

# ***Franck-Hertz-Versuch***

Mit dem Franck-Hertz-Versuch wird die Anregung von Hg-Atomen durch Elektronenstoß untersucht. Deshalb seien zunächst einige grundlegende Vorstellungen über den Aufbau der Atome vorangestellt, die für das Verständnis des Versuchs unerlässlich sind.

## 1. Theoretische Grundlagen

J.J. Thomson hat um die Jahrhundertwende ein statisches Atommodell entwickelt. Dabei ist die positive Ladung des Kerns gleichmäßig im Kugelvolumen des Atoms verteilt, während die Elektronen in ihm feste Plätze einnehmen. Schwingungen um ihre Ruhelage führen zur Aussendung von Strahlung bestimmter Frequenzen.

Doch die Rutherford'schen Streuversuche von  $\alpha$ -Strahlen ( $\text{He}^{2+}$ -Teilchen) an dünnen Goldfolien zeigen, daß diese Vorstellung nicht richtig ist. Rutherford beobachtet auch sehr große Ablenkungen der  $\alpha$ -Teilchen an der Folie, die durch die Stöße mit den Elektronen der Atome - aufgrund des großen Massenunterschiedes zwischen  $\alpha$ -Teilchen und Elektron - nicht erklärt werden können.

Daraufhin stellt Rutherford sein dynamisches Atommodell vor. Danach umkreisen die Elektronen des Atoms den sehr kleinen Kern ( $\varnothing < 5 \cdot 10^{-14} \text{m}$ ), der die positive Ladung trägt und in dem fast die gesamte Atommasse vereinigt ist. Dieses Modell erklärt zwar die Streuung der  $\alpha$ -Teilchen, besitzt jedoch zwei große Schwächen. Da die Elektronen auf ihren Kreisbahnen stets beschleunigt werden, müßten sie elektromagnetische Strahlung aussenden und somit Energie verlieren. Das hätte wiederum zur Folge, daß zum einen die Elektronen in den Kern stürzen müßten, und zum anderen, daß das Atom ein kontinuierliches Spektrum aussenden würde. Offensichtlich sind die Atome jedoch stabil und senden lediglich Wellen bestimmter Frequenzen aus (Linienspektren).

Um diese Widersprüche zu beseitigen, postuliert Nils Bohr, daß es im Gegensatz zur klassischen Elektrodynamik bestimmte Bahnen geben soll, auf denen das Elektron kreisen kann, ohne Strahlung auszusenden. Für diese Bahnen führt er folgende Quantisierungsbedingung ein:

$$L = m \cdot r \cdot v = n \cdot \hbar \quad , \quad n = 0,1,2,\dots \quad L - \text{Bahndrehimpuls des Elektrons}$$

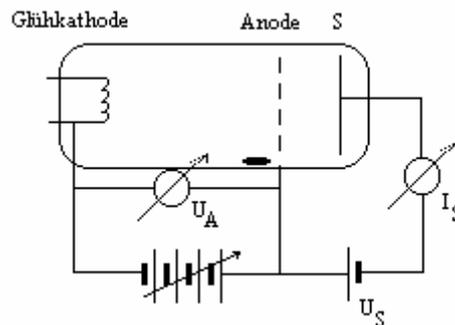
Jede stationäre Bahn entspricht einem definierten Energiezustand des Elektrons. Wechselt ein Elektron von einer energiereicheren Bahn auf eine energieärmere, so wird die Energiedifferenz in Form einer elektromagnetischen Welle (Lichtquant, Photon) bestimmter Frequenz  $\nu$  abgestrahlt, so daß gilt:

$$\Delta E = E_2 - E_1 = h \cdot \nu \quad \text{mit} \quad h = 2\pi \cdot \hbar = 6.626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$$

Mit diesen Bedingungen stimmt das Atommodell nun mit den Beobachtungen überein. Aus der Quantisierung des Bahndrehimpulses folgt die Quantisierung der Energiezustände. Dies wiederum bedeutet nach obiger Beziehung, daß die Emissionsspektren der Atome nur Licht bestimmter Frequenz ausstrahlen, was zu den bekannten Linienspektren führt.

Die Bedeutung des Franck-Hertz-Versuchs liegt darin, daß es 1913 damit erstmals gelang, die vollkommen willkürlich festgelegten Bohrschen Postulate auf *nichtoptischem* Wege zu verifizieren, und somit die Quantelung der Anregungsenergien nachzuweisen. Es zeigt sich, daß Atome - neben der Absorption von elektromagnetischen Wellen - ebenfalls durch Stöße

mit freien Elektronen angeregt werden können. Die von Franck und Hertz verwandte Versuchsanordnung zeigt folgende Abbildung:



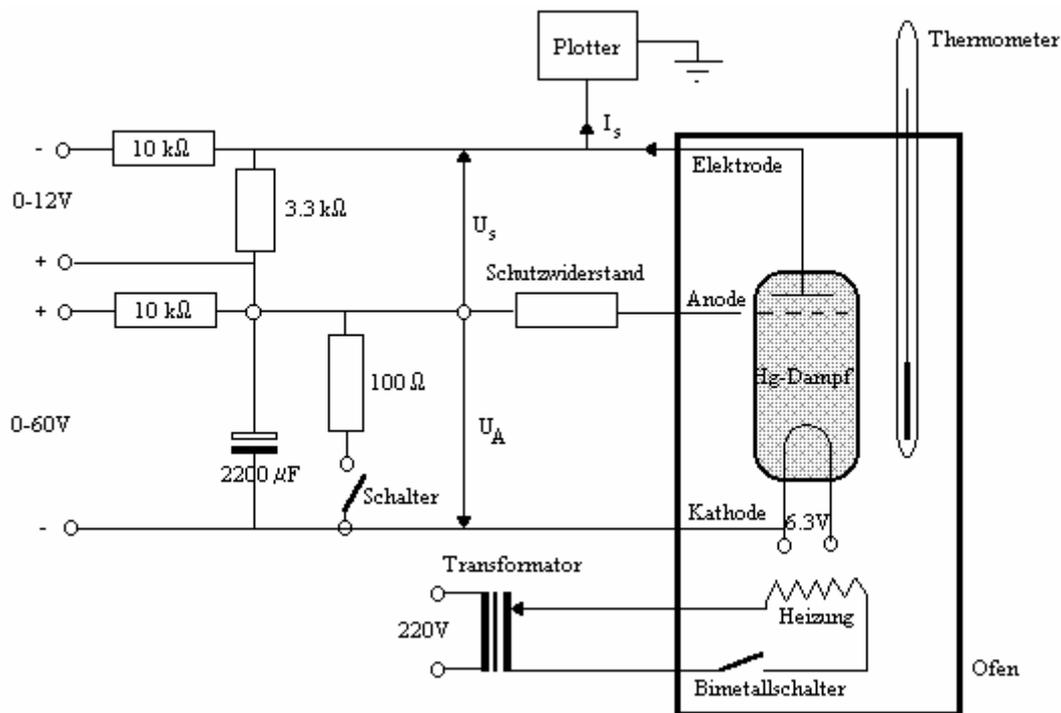
Es handelt sich im wesentlichen um eine Triode. An der Glühkathode werden durch thermische Anregung freie Elektronen erzeugt. In dem evakuierten Glaskolben befindet sich ein Quecksilbertropfen, der durch Erwärmen des Kolbens auf 150-200 °C in Dampf von einigen mbar Druck verwandelt wird. Die Elektronen werden in dem elektrischen Feld zwischen Kathode und Anode, das sich über die regelbare Spannung  $U_A$  variieren läßt, beschleunigt. Bis die Elektronen die Anode erreichen, stoßen sie mehrmals mit den Hg-Atomen zusammen. Ein Teil der Elektronen bleibt an der gitterförmigen Anode „hängen“, der andere Teil tritt in ein von der Spannung  $U_S$  erzeugtes Gegenfeld ein und wird verzögert. Nur die Elektronen mit genügend hoher kinetischer Energie können die Gegenelektrode S erreichen und sorgen so für den Strom  $I_S$ . Die Größen  $U_A$  und  $I_S$  werden gemessen. Diagramm 1 zeigt den charakteristischen Verlauf von  $I_S$  in Abhängigkeit von  $U_A$ . Man beobachtet bei steigender Beschleunigungsspannung einen periodischen Wechsel von Maxima und Minima. Dies läßt sich mit dem zuvor erläuterten Atommodell wie folgt erklären. Erhöht man kontinuierlich die Spannung  $U_A$ , werden die Elektronen bis zum Erreichen der Anode beschleunigt und besitzen dort maximale kinetische Energie. Ist  $U_A > U_S$  durchlaufen sie aufgrund ihrer Trägheit das Gegenfeld zwischen der Anode und der Elektrode S und liefern einen Strom  $I_S$ . Auf dem Weg zur Anode stoßen die Elektronen teilweise mehrmals mit den Hg-Atomen zusammen. Solange die kin. Energie jedoch nicht der Energiedifferenz  $\Delta E$  zweier stationärer Bahnen der Valenzelektronen eines Hg-Atoms entspricht, ist dieser Stoßvorgang elastisch. Die Anwendung des Energie- und Impulssatzes zeigt, daß dabei nur ein vernachlässigbar kleiner Teil der kinetischen Energie der Elektronen an die Hg-Atome abgegeben wird, da  $m_{\text{Hg}} \gg m_e$  ist. Erhöht man  $U_A$  weiter, steigt auch der Strom  $I_S$  bis die Elektronen in der Nähe der Anode erstmals die kinetische Energie erreichen, die der zuvor erwähnten Energiedifferenz  $\Delta E$  (Anregungsenergie) entspricht. Dann stoßen die Elektronen mit den Hg-Atomen inelastisch und übertragen ihre gesamte kin. Energie den Hg-Atomen. Die Elektronen können daraufhin die Gegenspannung  $U_S$  nicht mehr überwinden. Es treffen nur noch vereinzelt Elektronen auf S, der Strom  $I_S$  sinkt auf den Minimalwert. Bei weiterem Anwachsen von  $U_A$  wiederholt sich dieser Vorgang bis die Elektronen die kin. Energie besitzen, die dem n-fachen der Anregungsenergie entspricht. Dann stoßen sie auf dem Weg zur Anode gerade n-mal inelastisch mit den Hg-Atomen. Dies führt zum n-ten Minimum von  $I_S$ .

Was geschieht nun bei der Anregung der Hg-Atome durch Elektronenstoß? Ein Valenzelektron des Hg-Atoms wird von dem energieärmeren Zustand  $6^1S_0$  (Grundzustand) in den energiereicheren Anregungszustand  $6^3P_1$  gebracht. Dieser Zustand ist metastabil. Nach ca.  $10^{-8}$ s kehrt das Elektron unter Aussendung eines Photons der Wellenlänge  $\lambda = 254\text{nm}$  in den Grundzustand zurück (nichtoptischer Übergang). Dies entspricht nach obiger Beziehung einer Energie von 4.9eV. Diesen Energiewert können wir mit dem Franck-Hertz-Versuch bestätigen. Denn nach oben Gesagtem muß die Spannungsdifferenz der Beschleunigungsspannung

$U_A$  zwischen zwei Extrema multipliziert mit der Ladung  $e$  der Elektronen ja gerade der Anregungsenergie  $\Delta E$  entsprechen.

## 2. Versuchsaufbau und -durchführung

Den benutzten Versuchsaufbau mit dem entsprechenden Schaltschema zeigt folgende Abbildung:



Zur Erzeugung der Beschleunigungs- bzw. Bremsspannung stehen zwei Netzgeräte zur Verfügung, die sich jeweils von 0-60 V bzw. 0-12 V variieren lassen. Die Beschleunigungsspannung  $U_A$  wird durch eine spezielle Kondensatorschaltung erzeugt, die dafür sorgt, daß  $U_A$  durch Öffnen des Schalters  $S$  automatisch langsam auf ihren Maximalwert steigt. Während dieses Vorgangs wird der Kondensator aufgeladen. Der Ladevorgang dauert mehrere Sekunden, in denen  $U_A$  kontinuierlich steigt.

Das zweite Netzgerät ist an einen Spannungsteiler (Reihenschaltung zweier Widerstände) angeschlossen. An dem  $3.3\text{k}\Omega$ -Widerstand fällt nur ungefähr  $\frac{1}{4}$  der anliegenden Spannung ab, so daß sich die Gegenspannung  $U_S$  lediglich auf Höchstwerte um 3V bringen läßt.

Die Franck-Hertz-Röhre selbst befindet sich in einem Ofen, der mit einer Heizwendel betrieben wird. Über den Stelltransformator läßt sich die Temperatur grob einstellen. Zur Feineinstellung dient ein Bimetallstreifen, der sich im Gehäuse befindet und es ermöglicht, eine halbwegs konstante Temperatur aufrechtzuerhalten. Die Temperatur kann mit dem Thermometer überwacht werden.

Zur Erzeugung von Elektronen durch Glühemission dient die Kathodenheizspannung von 6.3V. Unsere Meßgrößen - die Anodenspannung  $U_A$  und der Strom  $I_S$  - werden direkt von dem angeschlossenen Schreiber (Plotter) als sogenannte  $I_S(U_A)$ -Kennlinie aufgezeichnet, d. h., der Strom  $I_S$  ist mit dem y-Eingang des Schreibers verbunden und die Spannung  $U_A$  mit dem x-Eingang.

Diese Kennlinien sollen nun für zwei verschiedene Temperaturen aufgenommen werden. Bei  $T_1 = 175\text{ °C}$  wird für vier unterschiedliche Bremsspannungen  $U_S = 0.5, 1.0, 1.5$  und  $2.0\text{ V}$  die Messung durchgeführt. Dabei darf die Beschleunigungsspannung nur Werte bis maximal  $30\text{ V}$  annehmen. Im zweiten Versuchsteil wird die Temperatur auf  $T_2 = 200\text{ °C}$  erhöht. Gleichfalls darf  $U_A$  nun auch bis  $60\text{ V}$  steigen. Für  $U_S = 2.0\text{ V}$  wird wiederum die Kennlinie aufgenommen. Anschließend sollen aus den Meßergebnissen die Anregungsenergie der Hg-Atome bestimmt werden.

Der Versuch wird nun folgendermaßen durchgeführt. Zu Beginn bringt man den Ofen bei eingeschalteter Kathodenheizspannung der Röhre auf die gewünschte Temperatur. Dazu wird der Stelltransformator zunächst mit  $200\text{ V}$  betrieben, bis man in die Nähe von  $160\text{ °C}$  gelangt. Dann stellt man eine Spannung von ca.  $140\text{ V}$  ein und regelt mit dem Bimetallstreifen nach bis die gewünschte Temperatur  $T_1 = 175\text{ °C}$  erreicht worden ist. An dem Plotter sind für die Eingänge folgende Einstellungen notwendig:

- a) x-Eingang:  $1\text{ V/cm}$
- b) y-Eingang:  $0.1\text{ V/cm}$

Durch Öffnen des Schalters kann nun eine Messung durchgeführt werden. Die vier Kennlinien für alle Gegenspannungen  $U_S$  sind in das gleiche Diagramm einzutragen. Danach wird die Temperatur auf  $T_2 = 200\text{ °C}$  erhöht. Die Einstellungen am Plotter sind wie folgt zu ändern:

- a) x-Eingang:  $10\text{ V/cm}$
- b) y-Eingang:  $0.1\text{ V/cm}$

### 3. Auswertung und Fehlerrechnung

Die Kennlinien für die zwei Versuchsteile zeigen die Diagramme 2 und 3. Die Extremwerte sind markiert worden. Die Abstände der Minima lauten für die verschiedenen Bremsspannungen:

Abstand zwischen dem i-ten und (i+1)-ten Minimum	$\Delta U_{0.5}$ in V	$\Delta U_{1.0}$ in V	$\Delta U_{1.5}$ in V	$\Delta U_{2.0}$ in V
1	5.05	5.05	4.90	4.80
2	4.90	4.80	4.85	4.95
3	4.90	4.95	4.95	4.90

Für die Maxima ergibt sich:

Abstand zwischen dem i-ten und (i+1)-ten Maximum	$\Delta U_{0.5}$ in V	$\Delta U_{1.0}$ in V	$\Delta U_{1.5}$ in V	$\Delta U_{2.0}$ in V
1	4.70	4.70	4.75	4.70
2	4.85	4.80	4.80	4.80
3	4.85	4.85	4.90	4.95

Aus den Werten für die Maxima ergibt sich für die Mittelwerte und die Standardabweichung:

$U_s$ in V	$\langle \Delta U_{U_s} \rangle = \frac{1}{3} \cdot \sum_{i=1}^3 \Delta U_{i,U_s}$	$\sigma_{n-1} = \sqrt{\frac{\sum_i (\langle U_{U_s} \rangle - U_{i,U_s})^2}{n-1}}$ in V
0.5	4.80	0.087
1.0	4.78	0.076
1.5	4.82	0.076
2.0	4.82	0.126

Für die Anregungsenergie der Hg-Atome und dem relativen Fehler erhalten wir somit:

$$\begin{aligned} \Delta E_{0.5} &= (4.80 \pm 0.09) \text{ eV} & (1.9 \%) \\ \Delta E_{1.0} &= (4.78 \pm 0.08) \text{ eV} & (1.7 \%) \\ \Delta E_{1.5} &= (4.82 \pm 0.08) \text{ eV} & (1.7 \%) \\ \Delta E_{2.0} &= (4.82 \pm 0.13) \text{ eV} & (2.7 \%) \end{aligned}$$

Bei  $T = 200^\circ\text{C}$  haben wir für  $U_s = 2.0\text{V}$  erhalten:

$\Delta U_{\text{Minima}}$ in V	$\Delta U_{\text{Maxima}}$ in V
4.88	4.66
4.66	4.66
4.77	4.66
4.55	4.77
5.00	4.88
4.66	4.88
4.88	4.88
4.77	4.88
5.00	4.88

Der Mittelwert aus den Werten der Maxima lautet:

$$\langle \Delta U \rangle = \frac{1}{9} \cdot \sum_{i=1}^9 \Delta U_i \approx 4.79 \text{ V}$$

Für die Standardabweichung folgt:

$$\sigma_{9-1} = \sqrt{\frac{\sum_i (\langle \Delta U \rangle - \Delta U_i)^2}{9-1}} \approx 0.11 \text{ V}$$

Die Anregungsenergie lautet damit:

$$\Delta E = (4.79 \pm 0.11) \text{ eV}$$

## 4. Fehlerdiskussion

Vergleichen wir unsere Meßwerte mit dem Literaturwert<sup>1</sup> von 4.9 eV für die Anregungsenergie des  $6^3P_1$ -Zustandes der Hg-Atome, so stimmen sie recht gut überein. Die bei unseren Messungen auftretenden Fehler resultieren hauptsächlich aus den Schwankungen der Ofentemperatur. Während der gesamten Versuchsdauer konnten wir Temperaturschwankungen von  $\pm 5$  °C beobachten. Dies wirkt sich wie folgt aus. Bei Temperaturerhöhung erhöht sich auch der Dampfdruck der Hg-Atome in der Triode. Dadurch sinkt die mittlere freie Weglänge der Elektronen. Es kommt auf ihrem Weg zum Gitter zu mehr Stößen, was zur Folge hat, daß weniger Elektronen die Bremsspannung noch überwinden können. Der Strom  $I_s$  nimmt leicht ab. Da bei uns jedoch die Aufnahme einer Kennlinie weniger als eine Minute dauert, machen sich die Temperaturschwankungen nicht so stark bemerkbar. Deshalb erhalten wir relativ genaue Ergebnisse. Andere Fehlerquellen sind die Verluste durch Schaltströme und Wärmeverluste. Des weiteren besitzen natürlich auch unsere Meßgeräte (Voltmeter, Amperemeter) und der verwandte Plotter eine gewisse Ungenauigkeit, die sich jedoch schlecht abschätzen läßt.

---

<sup>1</sup> Bergmann-Schäfer, Lehrbuch der Experimentalphysik, Bd IV, S.183