

1 Grundlagen

Das Rutherfordsche Atommodell besagt, dass ein Atom aus einem positiv geladenen Kern besteht, der sehr klein im Vergleich zur Atomgröße ist und nahezu die gesamte atomare Masse in sich vereinigt, und aus Elektronen, die insgesamt eine gleich große negative Ladung tragen und den Kern in großem Abstand umkreisen (Rutherford 1913).

Dieses Modell wurde hinsichtlich seiner Aussagen zum Atomkern durch Streuversuche mit α -Teilchen an Metallfolien bestätigt, konnte jedoch die Stabilität der Atome und die Natur ihrer Lichtemission (das Auftreten von Linienspektren) nicht erklären. Nach den Gesetzen der klassischen Elektrodynamik sollten die durch die Coulomb-Wechselwirkung zwischen Atomkern und -hülle beschleunigten Elektronen kontinuierlich Strahlung aussenden und aufgrund ihres Energieverlustes in den Atomkern stürzen.

Bohr postulierte, dass die Elektronen den Atomkern auf Bahnen bestimmter Energie strahlungsfrei umlaufen können. Beim Übergang eines Elektrons zwischen diesen Bahnen sollte entsprechend seiner Energiedifferenz ΔE in diesen Bahnen das Energiequant $h\nu$ der elektromagnetischen Strahlung (Licht) mit der Frequenz ν emittiert oder absorbiert werden, so dass

$$\Delta E = h\nu. \tag{1}$$

Die von Franck und Hertz im Jahre 1913 durchgeführten Elektronenstoßversuche waren eine direkte experimentelle Bestätigung dieser Quantentheorie des Atoms. Sie zeigen, dass Atome auch durch Stöße mit (freien) Elektronen energetisch angeregt werden können. Hierbei wird die kinetische Energie der Elektronen in Energiequanten ΔE auf die Atome übertragen, die ihren charakteristischen Anregungsenergien entsprechen.

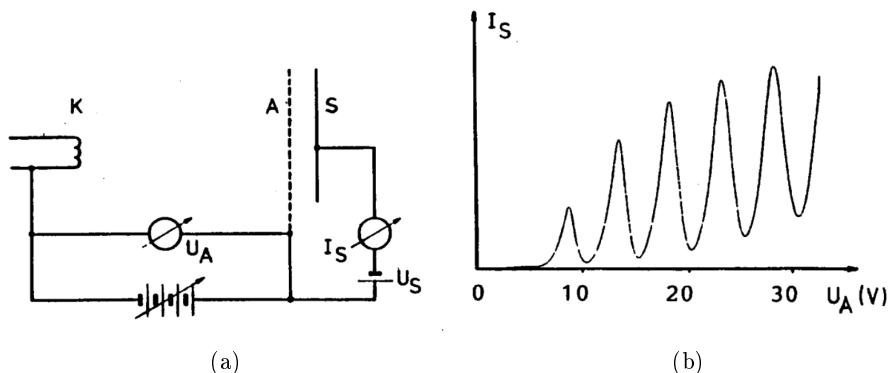


Abbildung 1: (a) Anordnung des Versuchs von Franck und Hertz, mit Kathode K, gitterförmige Anode A, Gegenelektrode S, Gegenspannung U_S (b) Messergebnis für $I_S(U_A)$, die Lagen der Minima und Maxima unterscheiden sich jeweils um die gleiche konstante Spannungsdifferenz von etwa 4.9 V.

Abb. 1a zeigt schematisch die von Franck und Hertz benutzte Versuchsanordnung: In einem evakuierten und mit einem Quecksilbertropfen gefüllten Glaskolben wird durch äußeres Erwärmen auf etwa 150 °C bis 200 °C ein Hg-Dampfdruck von einigen mbar erzeugt. In dem Kolben befinden sich die Elek-

troden K, A und S, die zur Erzeugung freier Elektronen und zur Bestimmung ihrer Energieabgabe bei Stößen mit den Hg-Atomen dienen. Aus der elektrisch beheizten Kathode K treten Elektronen auf Grund ihrer thermischen Energie aus und werden durch das elektrische Feld infolge der Spannung U_A zur gitterförmigen Anode A hin beschleunigt. Dabei treten sie durch Stöße mit den Hg-Atomen in Wechselwirkung (die mittlere freie Weglänge der Elektronen zwischen zwei Stößen beträgt in Abhängigkeit vom Hg-Dampfdruck einige μm). Ein Teil der Elektronen gelangt direkt auf das Anodengitter, der andere Teil wird auf dem Weg zu der hinter A liegenden Gegenelektrode S durch ein Gegenfeld infolge der Spannung U_S abgebremst, so dass nur solche Elektronen S erreichen können, die eine genügend große kinetische Energie besitzen. Abb. 1b zeigt den Strom I_S zur Gegenelektrode in Abhängigkeit von der Beschleunigungsspannung U_A bei einer Bremsspannung $U_S = 1.2\text{ V}$. Erhöht man die Spannung U_A von Null an stetig, so steigt für $U_A > U_S$ der Strom I_S in Abhängigkeit vom Hg-Dampfdruck und gemäß der Röhrencharakteristik einer Diode im Raumladungsbereich ($I_S \approx U_A^{3/2}$) zunächst monoton an, nimmt jedoch oberhalb einer bestimmten Spannung U_{A1} wieder ab und durchläuft bei weiterem Ansteigen von U_A Minima und Maxima, deren Lagen sich jeweils um die gleiche konstante Spannungsdifferenz von etwa 4.9 V unterscheiden. Dieses Verhalten wird durch die Art der Stöße erklärt, welche die Elektronen auf dem Weg zwischen Kathode und Anode an den Hg-Atomen erleiden. Für Spannungen $U_A < U_{A1}$ sind die Stöße nur elastisch, so dass wegen der sehr verschiedenen Massen der Stoßpartner ($m_{\text{Hg}}/m_e = 3.7 \times 10^5$) praktisch keine kinetische Energie übertragen wird.

Die kinetische Energie der Elektronen, welche die Anode passieren, ist nahezu gleich für alle Elektronen

$$E = e(U_A - U_K).$$

Hierbei ist e die Elementarladung und U_K die Kontaktspannung zwischen Kathode und Anode ($eU_K =$ Differenz der elektronischen Austrittsarbeiten aus diesen Elektroden). Für Spannungen $U_A - U_K > U_{A1} - U_K = U_1 = 4.9\text{ V}$ finden zwischen den Elektronen und Hg-Atomen auch inelastische Stöße statt, wobei die Elektronen die Energie eU_1 abgeben, die der Hg-Anregungsenergie zwischen dem Grundzustand 6^1S_0 und Resonanzniveau 6^2P_1 entspricht. Nach einem inelastischen Stoß besitzen die Elektronen für Beschleunigungsspannungen nur wenig größer als U_{A1} nicht mehr genügend Energie, um das Gegenfeld zwischen Anode und Gegenelektrode zu überwinden. Dies bewirkt die Abnahme des Stroms I_S .

Bei weiterem Anwachsen der Spannung U_A steigt der Strom I_S wieder an, da mit ihr auch die kinetische Energie der Elektronen zur Überwindung des Gegenfeldes ansteigt. Wenn die um die Kontaktspannung U_K verminderte Beschleunigungsspannung U_A das n -fache der Anregungsspannung U_1 erreicht, finden im Mittel gerade n inelastische Stöße zwischen einem Elektron und den Hg-Atomen statt, was sich im Auftreten der weiteren Maxima im Strom I_S äußert.

Anmerkung: Mit geänderter experimenteller Anordnung des Franck-Hertz-Versuchs, Abb. 1a, ist es möglich auch weitere Anregungsenergien des Quecksilbers sowie die anderer Atome zu bestimmen. Die der Stoßanregung nachfolgende Rückkehr der Hg-Atome in den Grundzustand ist im vorliegenden Versuch durch die dabei auftretende Lichtemission (an der Anode, s. Versuchsaufbau) zu be-

obachten. Der direkte Übergang ($\lambda = 254 \text{ nm}$) entsprechend der Energie 4.9 eV ist jedoch wegen der geringen Wellenlänge nicht zu sehen.

2 Aufgabenstellung

2.1 Erste Aufgabe

Es sind die $I_S(U_A)$ -Kennlinien einer Franck-Hertz-Röhre bei zwei verschiedenen Temperaturen mit einem xy -Schreiber aufzunehmen:

- (a) bei $T_1 = \text{ca. } 175 \text{ }^\circ\text{C}$ für $U_A = 0 \text{ V}$ bis 30 V und $U_S = 0.5 \text{ V}, 1.0 \text{ V}, 1.5 \text{ V}$ und 2 V
- (b) bei $T_2 = \text{ca. } 200 \text{ }^\circ\text{C}$ für $U_A = 0 \text{ V}$ bis 60 V und $U_S = 2 \text{ V}$

2.2 Zweite Aufgabe

Die Ergebnisse sind graphisch auszuwerten und zu diskutieren. Bestimmen Sie aus der Lage der Maxima der Kennlinien die Anregungsspannung U_1 und vergleichen Sie diese mit dem Literaturwert. Diskutieren Sie mögliche Messfehler.

3 Versuchsaufbau

Das Schaltschema des im Versuch benutzten Aufbaus zeigt Abb. 2. Die Franck-Hertz-Röhre befindet sich in einem Gehäuse mit je einem Beobachtungsfenster an der Seiten- und Rückwand. Das Gehäuse wird mit einem elektrisch betriebenen Ofen beheizt, der über einen Bimetallschalter (T) und den Stelltransformator STr an das Wechselspannungsnetz (220 V) angeschlossen ist, so dass in einem weiten Bereich konstante Ofentemperaturen eingestellt werden können. Zur Temperaturmessung dient ein Thermometer (Th). Als Quelle für die Beschleunigungsspannung U_A , die Gegenspannung U_S und die Kathodenheizspannung (6.3 V) wird ein Röhrennetzgerät mit einem speziellen Vorschaltgerät benutzt, dessen Schaltschema i. w. Abb. 2 links neben der Röhre zeigt: Der Ausgang 0 V bis 12 V des Netzgerätes wird mit dem Spannungsteiler $10 \text{ k}\Omega/3.3 \text{ k}\Omega$ im Verhältnis 4:1 zur Erzeugung der Gegenspannung U_S (0 V bis 3 V) untersetzt, der Spannungsausgang 0 V bis 60 V (bzw. 30 V) erzeugt über den Spannungsteiler $10 \text{ k}\Omega/2200 \mu\text{F}$ beim Öffnen des Schalters S_1 eine zeitlich ansteigende Spannung $U_A(t)$ (Ladespannung des Kondensators), die mit einem Spannungsmesser bestimmt wird und zur Aufnahme der Kennlinien am x -Eingang des Schreibers anliegt.

Der Strom I_S der Röhre (etwa 10^{-9} A bis 10^{-8} A) wird mit einem Gleichstrommessverstärker gemessen, dessen Ausgang $U(I_S)$ (ca. 1 V) mit dem y -Eingang des Schreibers verbunden ist.

4 Versuchsdurchführung

Vor Versuchsbeginn muss die Franck-Hertz-Röhre aufgeheizt werden. Dazu wird bei eingeschalteter Kathodenheizung der Röhre der Heizofen zunächst mit etwa 200 V am Stelltrafo betrieben und der Bimetall-Thermostat an der Ofenseite auf ca. $175 \text{ }^\circ\text{C}$ gestellt. Hat die Röhre eine Temperatur von etwa $160 \text{ }^\circ\text{C}$ erreicht,

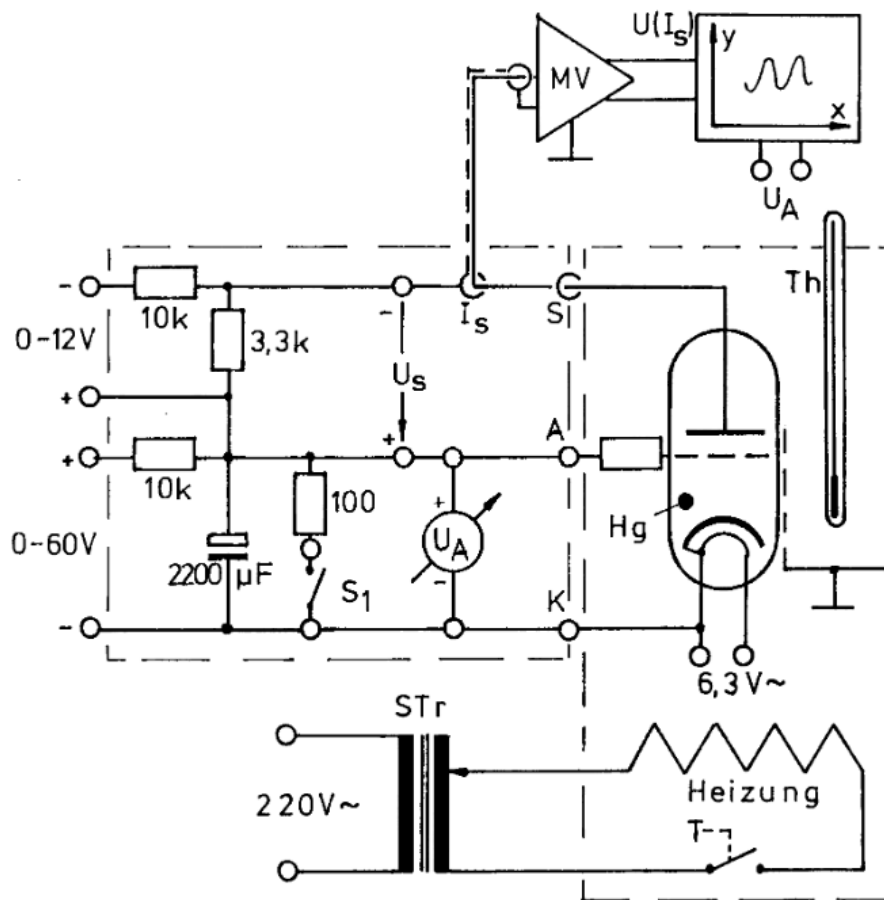


Abbildung 2: Schaltschema zum Franck-Hertz-Versuch, mit dem Spannungsteiler, dem Schalter S_1 , einem Voltmeter U_A links, der Franck-Hertz-Röhre (Elektroden S, A und K) rechts, einem x - y Schreiber oben und einer Heizung mit einem vorgeschalteten Stelltrafo STTr.

wird der Trafo auf ca. 140 V zurückgestellt und wenn nötig mit dem Bimetall-Thermostat die gewünschte Temperatur eingeregelt. Der übrige Versuchsaufbau wird gemäß der Schaltskizze, Abb. 2, vorgenommen, die Masseanschlüsse von Verstärker und Röhrengehäuse sind zu verbinden. Machen Sie sich vor der Aufzeichnung der Kennlinien mit der Bedienung des Messverstärkers und des Schreibers vertraut!

Zur Aufnahme der Kennlinien bei etwa 175 °C sind folgende Einstellungen nötig:

Messverstärkerbereich:	10^{-8} A
Schreiber, y -Eingang:	0.1 V cm^{-1} var.: = ca. 30 mV cm^{-1}
Schreiber, x -Eingang:	1 V cm^{-1} cal.

Die 4 Kennlinien sind, wenn möglich, nach einem Probedurchlauf (Starten und Beenden durch Öffnen und Schließen von S_1) für alle Gegenspannungen U_S

gemeinsam auf ein DIN A4-Millimeterblatt zu zeichnen.

Zur Aufnahme der Kennlinie bei ca. 200 °C sind folgende Einstellungen vorzunehmen:

Messverstärkerbereich:	10^{-9} A
Schreiber, y -Eingang:	0.1 V cm^{-1} var.: = ca. 30 mV cm^{-1}
Schreiber, x -Eingang:	10 V cm^{-1} var.: = ca. 2 V cm^{-1}

Anmerkung: Wird die Röhre bei ca. 200 °C betrieben, sollte die Kennlinie im Bereich $U_A < 60 \text{ V}$ etwa 10 Maxima und Minima aufweisen. Bei kleineren Temperaturen, liegt die Zündspannung für eine Glimmentladung der Röhre (was ist das?) unterhalb 60 V, so dass ein entsprechend kleinerer Bereich für U_A gewählt werden muss. Eine Aufnahme der Kennlinie während der Glimmentladung ist für diesen Versuch nicht sinnvoll. Das Einsetzen der Glimmentladung ist an einer Stufe in der Kennlinie der Röhre und an der Lichtemission der Hg-Atome in der Nähe der Kathode zu erkennen. Sie bewirkt zugleich ein Ansteigen des Anodenstroms. Der Schutzwiderstand (direkt am Anodengitter, s. Abb. 2) begrenzt den Strom und verhindert die Zerstörung der Kathode bzw. erhöht ihre Lebensdauer.

5 Versuchsauswertung

Die Kennlinien sind zu beschriften (Skalierung und Nullpunkte der Achsen, Angabe der jeweiligen Bremsspannung als Kurvenparameter). Die Maxima der Kurven sind zu kennzeichnen, ihre Abstände zu ermitteln. Die Mittelwerte der Abstände der Maxima sowie die Standardabweichung sind getrennt für beide Temperaturen T_1 und T_2 zu ermitteln und die Ergebnisse mit dem Literaturwert zu vergleichen. Diskutieren Sie den Verlauf der Kennlinien und mögliche Fehler Ihrer Messungen!

6 Fragen zur Selbstkontrolle

- Deuten Sie den Verlauf der $I_S(U_A)$ -Kennlinie (Abb. 1b).
- Warum geht der Strom I_S in den Minima nicht auf Null zurück?
- Warum benutzt man eine Gegenspannung U_S ?
- Welchen Einfluss hat die Temperatur der Franck-Hertz-Röhre auf den Strom I_S ?
- Welche Art der Anregung findet im Hg-Atom statt?
- Welche Wellenlänge besitzt das vom Hg-Atom nach der Stoßanregung ausgesandte Licht und wie weist man es nach?