

Franck-Hertz-Versuch (A1)

Ziel des Versuches

Die Energie des ersten angeregten Zustands von Quecksilber (Hg) soll mit Hilfe der inelastischen Streuung von Elektronen bestimmt werden.

Theoretischer Hintergrund

Der von James Franck und Gustav Hertz in den Jahren 1910 bis 1914 durchgeführte Versuch ist einer der grundlegenden Versuche der Quantenmechanik. Er zeigt die Existenz von diskreten Energieniveaus in Atomen und beweist, dass die Energieaufnahme oder -abgabe bei Atomen in Form von Energiequanten ΔE erfolgt.¹ Im Jahr 1925 wurden beide Physiker dafür mit dem Nobelpreis geehrt.

Ein Atom kann die von außen zugeführte Energie E nur dann absorbieren, wenn

$$E \geq \Delta E = E_2 - E_1 \quad (1)$$

ist, wobei E_1 und E_2 die Energiewerte zweier benachbarter diskreter Elektronenzustände sind. Im Versuch werden in einer mit Hg-Dampf gefüllten Röhre freie Elektronen in einem elektrischen Feld beschleunigt, die mit den Atomen folgende Stoßprozesse ausführen können:

1. Ist die Energie E der Elektronen kleiner als $E_2 - E_1$ so finden nur elastische Stöße statt, bei denen das stoßende Elektron seinen Impuls ändert aber keine Energie abgibt ($m_e \ll m_{\text{Hg}}$).
2. Ist die Energie E der Elektronen größer als ΔE , so treten inelastische Stöße auf, bei denen das stoßende Elektron die Energie ΔE an das Atom abgibt. Das Hg-Atom geht dabei von seinem elektronischen Grundzustand 1S_0 mit der Energie E_1 in den ersten angeregten Zustand 3P_1 mit der Energie E_2 über (siehe Abb. 1). Man spricht dabei auch von inelastischer Streuung von Elektronen an Atomen.

Die Energie ΔE beträgt beim Hg-Atom etwa 4,9 eV. Das angeregte Atom geht nach einer bestimmten Zeit, der sogenannten Lebensdauer des angeregten Zustands (ca. 10^{-9} s), wieder in den Grundzustand über und gibt dabei die Energie in Form von elektromagnetischer Strahlung ab.

Versuchsaufbau und -durchführung

Die sogenannte Franck-Hertz-Röhre befindet sich in einem Heizofen. Damit wird der in der evakuierten Röhre eingeschlossene Hg-Tropfen auf 180 °C

¹ J. Franck and G. Hertz: Über Zusammenstöße zwischen Elektronen und Molekülen des Quecksilberdampfes und die Ionisierungsspannung desselben, in: Verhandlungen Dtsch. Phys. Ges. Bd. 16, S. 457–467, 1914

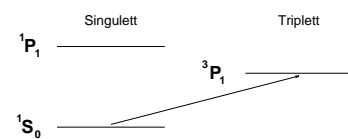


Abbildung 1: Termschema des Hg-Atoms

bis $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ erwärmt, sodass eine Quecksilberdampf-Atmosphäre mit einem Druck um 20 hPa entsteht. Darüber hinaus befinden sich in der Röhre (siehe Abb. 2) drei Elektroden: Eine indirekt geheizte Oxidkathode (geringe Austrittsarbeit) aus der Elektronen freigesetzt werden, eine gitterförmige Beschleunigungselektrode A, die als Anode wirkt, und eine Auffängerelektrode M. Die an der Kathode durch Heizung freigesetzten Elektronen bilden eine Raumladungswolke. Durch die zwischen Kathode K und Anodengitter A anliegende (variierbare) Spannung U_b werden die Elektronen in Richtung Anodengitter beschleunigt. Dabei wird die kinetische Energie der Elektronen um den Betrag $\Delta E_{\text{kin}} = eU_b$ erhöht. Um eine große Stoßwahrscheinlichkeit zu erzielen, ist der geometrische Abstand zwischen Kathode K und Anodengitter A groß gegen die mittlere freie Weglänge der Elektronen im Hg-Dampf. Zwischen Anodengitter A und Auffängerelektrode M liegt eine Gegenspannung U_g an, die die Elektronen, die das Anodengitter passiert haben, abbremst. Der Abstand zwischen Anodengitter A und Auffängerelektrode ist klein. Nur solche Elektronen, deren kinetische Energie am Anodengitter größer ist als eU_g können die Auffängerelektrode erreichen und als Auffängerstrom I_A nachgewiesen werden. Elektronen mit kleinerer kinetischer Energie werden durch das Gegenfeld abgebremst und dann umgekehrt in Richtung Anodengitter beschleunigt und fließen über das Anodengitter ab. Das Gegenfeld gestattet es, langsame Elektronen, die evtl. zuvor durch einen inelastischen Stoß Energie verloren haben, auszufiltern und so den Kontrast der Messung zu vergrößern.

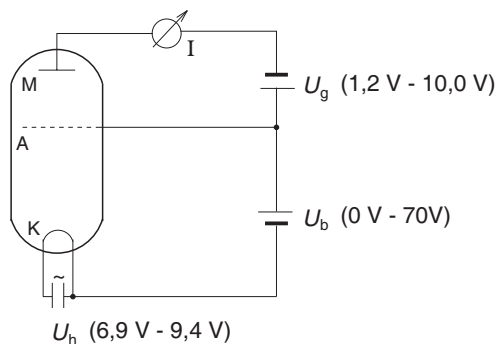


Abbildung 2: Franck-Hertz-Röhre

Gemessen wird der Auffängerstrom I_A in Abhängigkeit von der Beschleunigungsspannung U_b . Zunächst erwartet man mit steigender Beschleunigungsspannung einen monoton wachsenden Auffängerstrom solange nur elastische Stoßprozesse stattfinden. Bei einer bestimmten Beschleunigungsspannung überschreitet die kinetische Energie der Elektronen die kleinste Anregungsenergie ΔE der Hg-Atome und die Elektronen verlieren kinetische Energie durch inelastische Stoßprozesse mit den Hg-Atomen. Die nun langsamen Elektronen können die Auffängerelektrode nicht mehr erreichen und der Auffängerstrom nimmt stark ab. Bei weiter steigender Beschleunigungsspannung rückt die Zone der inelastischen Stöße weiter in Richtung zur Kathode. Die beim inelastischen Stoß langsamer gewordenen Elektronen können wieder beschleunigt werden und gelangen dadurch vermehrt zur Auffängerelektrode. Der Auffängerstrom nimmt solange wieder zu, bis einzelne Elektronen zweimal inelastisch gestreut werden können. Dieser Vorgang

wiederholt sich bei weiterer Steigerung der Beschleunigungsspannung und es können mehrfache inelastische Stöße beobachtet werden. Aus dem Abstand der Maxima, oder besser aus dem Abstand der Zusammenbrüche des Auffängerstroms, lässt sich die Anregungsenergie der Hg-Atome sehr genau bestimmen. In Abb. 3 ist der prinzipielle Verlauf des Auffängerstroms I_A über der Beschleunigungsspannung U_b gezeigt.

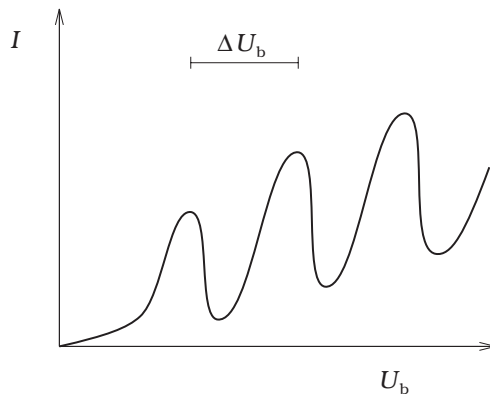


Abbildung 3: schematische Darstellung der Auffängerstrom-Beschleunigungsspannungs-Charakteristik

Hinweise zur Versuchsdurchführung

Zunächst wird die Röhrenheizung (Ofenheizung) mit Hilfe des Temperaturreglers eingeschaltet, um eine Temperatur von 180 °C zu erreichen.² An ein kaltes Rohr dürfen keine Betriebsspannungen gelegt werden, da das metallische Quecksilber einen Kurzschluss verursachen kann. Das Franck-Hertz-Rohr ist ein Vakuumrohr mit einer 5 g-Quecksilberfüllung. Gehen Sie vorsichtig mit der Apparatur um, um die Gefahr einer Implosion zu vermeiden. Das Gehäuse wird beim Betrieb auch außen heiß.³

Der Auffängerstrom I_A wird nicht direkt gemessen. Im Auffängerstromkreis befindet sich ein ohmscher Widerstand, an dem eine zum Auffängerstrom proportionale Spannung abgegriffen wird. Diese zum Auffängerstrom proportionale Spannung wird mit Hilfe eines empfindlichen Mikrovoltmeters gemessen.⁴ Die Messung der Beschleunigungsspannung (0 bis 70 V) erfolgt mit einem digitalen Multimeter. Der Kontrast der Messung kann mit der Gegenspannung verändert werden. Die Gegenspannung ist prinzipiell im Bereich von 0 bis 2 V einstellbar. Den größten Kontrast erhält man bei einer Gegenspannung von $U_g = 0$ V.

Der Heizstrom der Kathode wird mit einem Multimeter gemessen. Die Höhe des Heizstroms beeinflusst die Größe des zu messenden Auffängerstroms. Je nach Temperatur der Röhre muss der Heizstrom angepasst werden, um möglichst viele und ausreichend große Maxima messen zu können.⁵

Nach der Optimierung folgt die Aufnahme der Messwerte. Dabei wird dann nur noch die Beschleunigungsspannung U_b variiert. In den Bereichen der Maxima ist entsprechend genau zu messen. Das gelingt nur, wenn Sie bereits bei der Versuchsdurchführung die Messwerte grafisch auftragen. Achten Sie bei der Aufnahme der Messwerte darauf, dass die Röhrentemperatur möglichst konstant bleibt. Eine schwankende Röhrentemperatur verändert den Auffängerstrom. Derartige Veränderungen stören insbesondere in den

² Schalten Sie diese Heizung möglichst bereits vor der Vorbesprechung ein.

³ Achten Sie darauf, dass keine Kabel das Gehäuse berühren!

⁴ Aus schaltungstechnischen Gründen (Massepotentiale) ist der Außenmantel des Koaxialkabels mit dem Massepol des Eingangs des Mikrovoltmeters zu verbinden. Sie messen eine negative Spannung, d. h., die in Abb. 3 gezeigten Maxima werden bei ihrer Messung zu Minima.

⁵ Mit steigender Röhrentemperatur (Ofentemperatur) nimmt die Dichte des Hg-Dampfes und damit die Streuwahrscheinlichkeit zu. Es müssen also auch mehr Elektronen durch einen größeren Heizstrom aus der Kathode ausgeheizt werden, um einen ausreichenden Auffängerstrom zu messen.

Bereichen der zu untersuchenden Maxima. Evtl. sind hier dann entsprechend viele oder wiederholend Messwerte aufzunehmen.

Bei der Auswertung der Messkurven ist zu berücksichtigen, dass auf Grund der thermisch bedingten unterschiedlichen Anfangsgeschwindigkeiten der Elektronen und durch Kontaktpotentiale⁶ alle Messwerte durch eine additive Konstante überlagert werden, so dass sämtliche Extrema um denselben kleinen Betrag verschoben werden. Die Spannungsdifferenz zwischen den Extrema liefert somit eine bessere Messgrundlage, da dann additive Anteile herausfallen.

Das erste Maximum der $I_A - U_b$ -Charakteristik ist am schwächsten ausgeprägt, da sich das Gebiet, in dem inelastische Streuprozesse stattfinden, direkt unterhalb des Anodengitters befindet, denn nur dort haben die stoßenden Elektronen die notwendige kinetische Energie zur Anregung der Hg-Atome erreicht. Mit steigender Beschleunigungsspannung vergrößert sich dieses Gebiet in Richtung Kathode und die Stoßwahrscheinlichkeit nimmt dementsprechend zu.

Aufgabenstellung

1. Optimieren Sie den Heizstrom und evtl. die Gegenspannung so, dass in der Strom-Spannungscharakteristik möglichst viele Maxima sichtbar werden. Beginnen Sie mit einer Gegenspannung von 0 V.
2. Nehmen Sie die zum Auffängerstrom I_A proportionale Spannung in Abhängigkeit von der Beschleunigungsspannung U_b (0 bis 60 V) bei einer Röhrentemperatur von 180 °C auf und fertigen Sie bereits während der Aufnahme der Messwerte eine grafische Darstellung an.⁷
3. Wiederholen Sie die Messung bei einer Röhrentemperatur von 200 °C.
4. Bestimmen Sie aus ihren Daten die Anregungsenergie ΔE des Quecksilbers. Berechnen Sie die Wellenlänge der auf die Anregung folgenden Fluoreszenz.

⁶ Der Einfluss von Kontaktpotentialen bei beschalteten Vakuumröhren wird in der Anleitung zum Photoeffekt (A3) detailliert beschrieben. Die Kontaktpotentiale führen dazu, dass die von außen angelegte Beschleunigungsspannung nicht genau der kinetischen Energie der Elektronen entspricht.

⁷ Aufgrund des Alterungsprozesses der Röhren kann es vorkommen, dass Sie bei dieser Temperatur keine vernünftigen Messwerte erhalten. Wenden Sie sich in diesem Fall an das technische Personal um aufbauspezifische Hinweise zu erhalten.