

# Franck-Hertz-Versuch

# E 21

## 1 Aufgabenstellung

Die I-U Kennlinien einer Quecksilber-Franck-Hertz-Röhre sind bei zwei verschiedenen Temperaturen aufzunehmen. Aus den Kennlinien sind die Anregungsenergien des Hg-Atoms zu ermitteln.

## 2 Physikalische Grundlagen

Mit Hilfe des nach JAMES FRANCK und GUSTAV LUDWIG HERTZ (1925-1927 Professor für Experimentalphysik an der Universität Halle) benannten Versuches kann die Existenz diskreter stationärer Energiezustände der Elektronen in den Atomen gezeigt werden. Dies war eine wesentliche experimentelle Stütze für die Bohrsche Atomtheorie von 1913. Wegen der fundamentalen Bedeutung ihrer Experimente aus den Jahren 1911 bis 1914 für die Entwicklung der Quantentheorie erhielten die beiden Autoren 1925 den Nobelpreis für Physik.

In einem schweren Atom wie Quecksilber sind die meisten Elektronen durch die elektrostatische Anziehung des Atomkerns stark gebunden. Es ist deshalb eine hohe Energie nötig, um sie aus diesen Zuständen herauszubringen. Die äußersten Elektronen hingegen werden durch die inneren teilweise von der Anziehung durch den Kern abgeschirmt. Folglich ist ihre Bindungsenergie wesentlich kleiner. Die entsprechenden Zustände nennt man optische Niveaus, weil bei Übergängen zwischen ihnen Licht emittiert bzw. absorbiert wird.

Die kleinste Anregungsenergie des Hg-Atoms beträgt  $\Delta E_1 = 4,89 \text{ eV}$ ; hierbei geht ein Elektron vom Grundzustand  $6^1S_0$  in den ersten angeregten Zustand  $6^3P_1$  über (siehe Abb.3). Nach einer mittleren Lebensdauer von  $10^{-8} \text{ s}$  geht das Hg-Atom vom angeregten Zustand in den Grundzustand zurück, wobei

ein Lichtquant der Energie

$$E_{ph} = h \cdot f = h \cdot \frac{c}{\lambda} \quad (1)$$

( $h$ : Planck-Konstante,  $f$ : Frequenz,  $c$ : Lichtgeschw.,  $\lambda$ : Wellenlänge) ausgesandt wird. Mit  $E_{ph} = \Delta E_1$  ergibt sich die Wellenlänge der emittierten Strahlung  $\lambda = 253,65 \text{ nm}$ .

J. FRANCK und G. HERTZ entdeckten, dass Elektronen bei inelastischen Stößen mit Hg-Atomen ihre kinetische Energie nur in diskreten Portionen der Größe  $\Delta E_1$  übertragen können. Dieselbe Energie fanden sie in der von den Atomen emittierten Strahlung.

Abb.1 zeigt die Quecksilber-Franck-Hertz-Röhre und ihre elektrische Beschaltung. Die Röhre wurde bei der Fertigung mit Quecksilber beschickt und evakuiert. Während des Versuches wird sie in einem Ofen erwärmt, um einen ausreichenden Hg-Dampfdruck zu erzeugen.

Aus der indirekt geheizten Kathode K treten Elektronen aus und werden von der Saugspannung  $U_1$  aus dem Raumladungsgebiet vor der Kathode abgesaugt. Die Temperatur der Kathode (durch den Heizstrom beeinflussbar) und die Spannung  $U_1$  bestimmen die Anzahl der Elektronen, die in den Raum zwischen dem Raumladungsgitter  $g_1$  und dem Be-

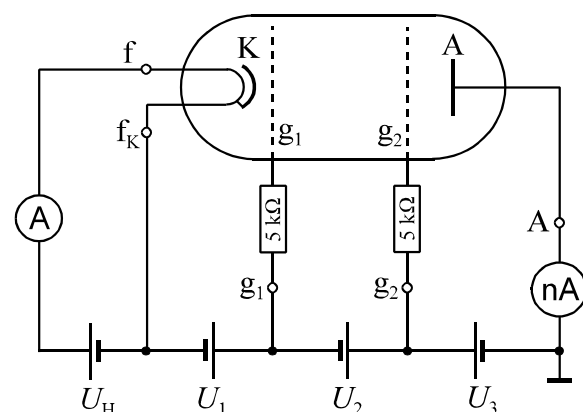


Abb. 1: Quecksilber-Franck-Hertz-Röhre mit Schaltplan des Versuches

schleunigungsgitter  $g_2$  gelangen. Mit Hilfe der Beschleunigungsspannung  $U_2$  werden die Elektronen zwischen  $g_1$  und  $g_2$  beschleunigt. Die Gegenspannung  $U_3$  lässt nur solche Elektronen zur Auffangelektrode A gelangen, deren kinetische Energie  $E_{kin} > e \cdot U_3$  ist.

Wird die Beschleunigungsspannung von  $U_2 = 0$  an erhöht, so steigt der Strom zunächst wie bei einer klassischen Tetrode an. Dann erreicht der Auffängerstrom jedoch ein Maximum und nimmt bei weiterer Steigerung von  $U_2$  sogar wieder ab. Nach dem Durchlaufen eines Minimums stieg der Strom erneut an und das beschriebene Verhalten wiederholt sich, d.h. es werden mehrere Maxima und Minima beobachtet.

In der Quecksilberdampfatmosfera kommt es zu elastischen bzw. unelastischen Stößen zwischen den Elektronen und den Hg-Atomen. Da die Masse eines Quecksilberatoms 370 000 mal so groß ist wie die eines Elektrons, behalten die Elektronen bei einem elastischen Zusammenstoß nahezu ihre gesamte Energie. Solange die kinetische Energie  $E_{kin}$  der Elektronen unterhalb der Anregungsenergie der Hg-Atome liegt, erfolgen nur elastische Stöße. Mit zunehmender Beschleunigungsspannung  $U_2$  erhöht sich die kinetische Energie der Elektronen und erreicht im ersten Maximum des Stromes für die schnellsten Elektronen (infolge der thermischen Emission sind die Elektronen nicht monoenergetisch) den Wert der Anregungsenergie der Hg-Atome aus dem Grundzustand in den ersten angeregten Zustand  $\Delta E_1$ . Die Elektronen verlieren die kinetische Energie  $E_{kin} = \Delta E_1$ , d.h. die Stöße werden unelastisch. Mit weiter zunehmender Beschleunigungsspannung gilt das für immer mehr Elektronen. Damit sinkt der Auffängerstrom  $I_A$  und erreicht schließlich ein Minimum. Weitere Extrema treten auf, wenn die kinetische Energie  $E_{kin}$  der Elektronen wiederholt die Anregungsenergie  $\Delta E_1$  erreicht.

Die Kennlinie der FRANCK-HERTZ-Röhre wird hauptsächlich durch die Häufigkeit der Stöße zwischen Elektronen und Hg-Atomen

bestimmt. Nach der kinetischen Gastheorie ist die mittlere freie Weglänge der Elektronen

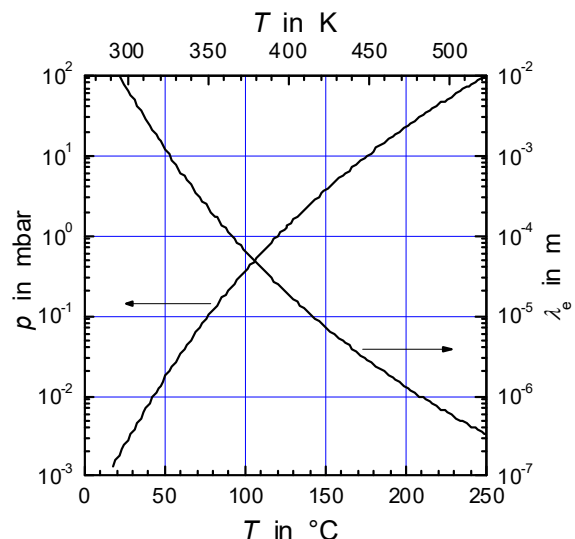
$$\lambda_e = \frac{1}{n \cdot \sigma} \quad (2)$$

Die Dichte der Hg-Atome ergibt sich aus dem (tabellierten) Dampfdruck  $p$  entsprechend

$$n = \frac{p}{kT} \quad (3)$$

Der Wirkungsquerschnitt  $\sigma$  für Elektronenstöße mit Hg-Atomen ist aus [1] bekannt. Er ist energieabhängig und besitzt Maxima von  $2,2 \text{ nm}^2$  bei  $0,5 \text{ eV}$  (elastische Stöße) und  $1,7 \text{ nm}^2$  bei  $4,9 \text{ eV}$  (inelastische Stöße).

Für elastische Stöße ergibt sich die in Abb.2 dargestellte Temperaturabhängigkeit.



**Abb. 2:** Hg-Dampfdruck und mittlere freie Weglänge der Elektronen in Hg

Oberhalb  $50^\circ\text{C}$  wird die mittlere freie Weglänge klein gegen den Elektrodenabstand der Röhre ( $g_1$ - $g_2 \approx 10 \text{ mm}$ ). Oberhalb  $150^\circ\text{C}$  wird sie so klein, dass die Elektronen durch die große Anzahl elastischer Stöße einen nicht mehr vernachlässigbaren Energieverlust erleiden.

Wird die Franck-Hertz-Röhre in der bisher beschriebenen Weise bei Temperaturen um  $175^\circ\text{C}$  betrieben, dann ist die Wahrscheinlichkeit für inelastische Stöße so groß, dass praktisch keine Elektronen mit wesentlich

größeren Energien als 4,9 eV auftreten. Um auch höhere Anregungen beobachten zu können, muss der Versuch so verändert werden, dass die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von 4,9eV-Stößen nicht mehr wesentlich größer ist als die Wahrscheinlichkeit für Stöße mit höheren Energien.

Mit der vorliegenden Franck-Hertz-Röhre kann das erreicht werden, indem man die Beschleunigungsspannung  $U_2$  zwischen Kathode und Gitter  $g_1$  anlegt,  $g_1$  und  $g_2$  kurzschließt und die Temperatur auf weniger als 150°C absenkt. Damit kommt die mittlere freie Weglänge fast in die Größenordnung der Beschleunigungsstrecke (dem Elektrodenabstand  $K-g_1 < 1$  mm) und zwischen  $g_1$  und  $g_2$  ist ein großer feldfreier Raum, in dem inelastische Stöße mit verschiedenen Anregungsenergien bis hin zur Ionisation bei 10,44 eV stattfinden können.

Das Termschema in Abb.3 zeigt die im Franck-Hertz-Versuch beobachtbaren und die wichtigsten optischen Übergänge.

Die Ionisierung äußert sich im Experiment durch einen starken Stromanstieg und eine

sichtbar bläulich leuchtende Gasentladung. Durch die Widerstände in den Leitungen zu  $g_1$  und  $g_2$  (Abb.1) wird der Strom auf unschädliche Werte begrenzt.

### 3 Versuchsaufbau

#### 3.0 Geräte:

- Franck-Hertz-Betriebsgerät
- Quecksilber-Franck-Hertz-Röhre
- Röhrenanschlussbox
- Rohrofen
- Ni-CrNi- Thermoelement
- Messverstärker
- Sensor-Cassy
- Computer mit CassyLab Software
- Digitalmultimeter
- Verbindungsleitungen

**3.1** Die Franck-Hertz-Röhre (Abb.1) befindet im Ofen und soll dort möglichst nicht bewegt werden. In der Ausgabe kann eine defekte Röhre gleicher Bauart als Anschauungsobjekt ausgeliehen werden. Der Abstand zwischen Kathode und  $g_1$  ist ca. 0,6 mm, der zwischen  $g_1$  und  $g_2$  beträgt etwa 10 mm.

Zur elektrischen Abschirmung und für eine gleichmäßige Umgebungstemperatur ist die Röhre im Ofen von einem Kupferzylinder umgeben, in dem auch das Thermoelement zur Temperaturmessung steckt. Über ein Verbindungskabel mit DIN-Stecker ist sie mit der Röhrenanschlussbox verbunden. Die beiden 5k $\Omega$ -Schutzwiderstände sind in diese Box eingebaut.

Das Franck-Hertz-Betriebsgerät liefert alle für den Versuch benötigten Spannungen und steuert die Heizung des Rohrofens mit Hilfe eines PID-Reglers. Dadurch wird die eingestellte Temperatur in etwa 15 min erreicht und dann konstant gehalten.

Das Digitalmultimeter dient zur Messung des Heizstromes der indirekt beheizten Kathode entsprechend Abb.1.

Der sehr kleine Auffängerstrom  $I_A$  (einige nA) wird mit Hilfe des Messverstärkers in eine zum Strom proportionale Spannung  $U_A$  von 0...10 V umgesetzt. Der Masseanschluss

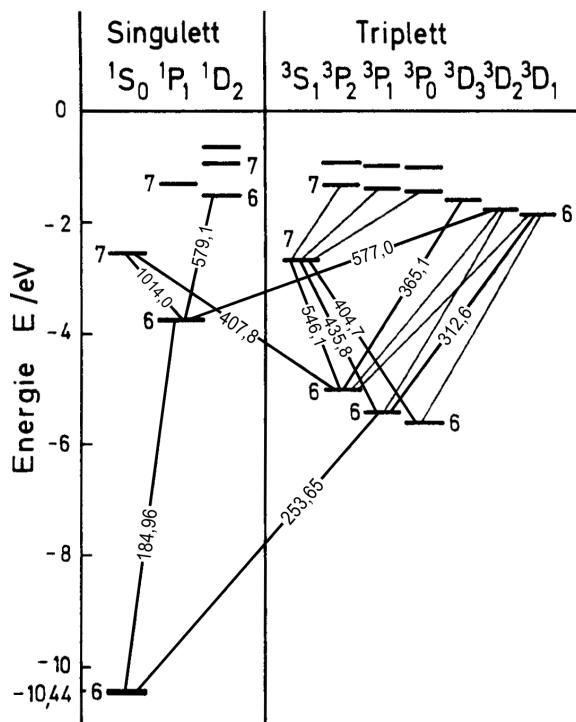


Abb. 3: Vereinfachtes Termschema von Hg

des Messverstärkers ist intern mit dem Schutzleiter verbunden (Erdung).

Der PC mit der Software CassyLab dient als XY-Schreiber und zur Versuchsauswertung. Mit Kanal A des SensorCassy wird die Beschleunigungsspannung  $U_2$  und mit Kanal B die zum Auffängerstrom  $I_A$  proportionale Spannung  $U_A$  am Verstärkerausgang gemessen. In der Regel ist der Messbereich  $10^{-9}$  A geeignet ( $U_A=1$  V entspricht  $I_A=1$  nA).

Die Bedienung des Betriebsgerätes und der Software werden vom zuständigen Assistenten erläutert. Eine Kurzanleitung zu CassyLab befindet sich im Anhang.

#### 4 Versuchsdurchführung

Kontrollieren Sie, ob Rohrofen und Temperaturfühler am Franck-Hertz-Betriebsgerät angeschlossen sind und vervollständigen Sie die Schaltung gemäß Abb.1.

Zum Schutz des hochempfindlichen Messkreises vor elektrischen Störfeldern liegt der Massepunkt auf Erdpotential (Erdung im Messverstärker), die Leitungen bis zur Röhre und die Röhrenanschlussbox sind abgeschirmt (Faradayscher Käfig), die Abschirmung ist mit Masse verbunden. Zusätzlich muss das Massekabel des Kupferzylinders im Ofen mit Masse verbunden werden.

Auf dem Aufkleber neben dem Ofen sind für die individuelle Franck-Hertz-Röhre geeignete Werte für Temperatur und Kathodenheizstrom angegeben. Dies sind Richtwerte, sie können später verändert werden.

Die Solltemperatur von etwa  $175^\circ\text{C}$  ist am Betriebsgerät einzustellen:  $1 \times \text{SET}$  drücken, dann mit  $\Delta \nabla$  Solltemperatur anzeigen und ändern. (Mit  $2 \times \text{SET}$  wird die Alarmtemperatur verstellt, die keine Bedeutung hat.)

Um eine bei niedrigen Hg-Dampfdrücken mögliche Glimmentladung in der Röhre zu vermeiden, müssen bei Temperaturen unter  $140^\circ\text{C}$  die Spannungen  $U_1$ ,  $U_2$  und  $U_3$  Null sein.

Das Programm CassyLab ist so einzurichten,

dass in der Standard-Darstellung alle Messwerte in Abhängigkeit von der Zeit und in einer zweiten Darstellung der Auffängerstrom  $I_A$  in nA in Abhängigkeit von der Beschleunigungsspannung  $U_2$  dargestellt wird.

Nach dem Erreichen der Solltemperatur werden die geeigneten Parameter für die Aufnahme der  $I_A$ - $U_2$ -Kennlinie gesucht. Dazu stellt man die Beschleunigungsspannung  $U_2$  auf Maximum und vergrößert dann die Saugspannung  $U_1$  von Null beginnend so weit, bis ein Strom von  $5 \dots 10$  nA fließt. Wenn der Auffängerstrom zu klein bleibt, kann die Heizspannung  $U_H$  bis auf  $7$  V vergrößert und/oder die Temperatur um  $5 \dots 10$  K verringert werden.

Die Aufnahme der  $I_A$ - $U_2$ -Kennlinie erfolgt teilautomatisch: Durch Drücken des  $U_2$ -Reglers im Zustand  $U_2=0$  startet das Betriebsgerät eine Rampe, wobei  $U_2$  in etwa  $17$  s von  $0$  bis  $30$  V vergrößert wird. In CassyLab müssen neben dem Messbereich noch Messzeit und -Intervall geeignet eingestellt werden. Dann startet man gleichzeitig mit der Rampe eine automatische Messreihe. Falls große Störspannungen (Netzbrummen) auftreten, kann man diese meist durch eine Mittelwertbildung über  $20$  ms weitgehend eliminieren.

Wenn alles funktioniert, variieren Sie  $U_1$  und  $U_3$  systematisch. Ändern Sie zuerst nur  $U_1$  und belassen Sie die Bremsspannung auf  $U_3=0$  V. Danach lassen Sie  $U_1$  konstant und ändern  $U_3$ . Überlegen Sie, welcher Einfluss von der Saugspannung  $U_1$  bzw. der Bremsspannung  $U_3$  auf die  $I_A$ - $U_2$ -Kennlinie zu erwarten ist. Optimieren Sie die Werte für  $U_1$  und  $U_3$ , so dass möglichst viele Maxima und Minima auswertbar sind. Protokollieren Sie Ihre Vorgehensweise und die Resultate.

Für die Beobachtung höherer Anregungen des Quecksilbers ist eine Ofentemperatur von etwa  $145^\circ\text{C}$  und ein kleinerer Heizstrom (siehe Aufkleber) einzustellen.  $U_1$ ,  $U_2$  und  $U_3$  werden auf Null geregelt, das Betriebsgerät muss eingeschaltet bleiben. Die Schaltung ist wie oben beschrieben zu ändern:  $U_1$  nicht

angeschlossen,  $U_2$  an Gitter 1 anschließen, Gitter 1 und 2 verbinden.

Die Spannung  $U_2$  ist vorsichtig bis auf 30 V zu erhöhen, dabei ist der Auffängerstrom  $I_A$  zu beobachten.  $I_A$  kann mittels  $U_H$  und  $U_3$  beeinflusst werden. Je größer  $I_A$ , desto „sauber“ ist in der Regel das Messsignal (größerer Signal-Rausch-Abstand). Variieren Sie  $U_3$ , um möglichst deutlich ausgeprägte Maxima zu erhalten. Zum Schutz der Röhre soll  $I_A$  niemals  $>100\text{nA}$  werden!

Messen Sie mindestens eine  $I_A$ - $U_2$ -Kennlinie mit möglichst vielen ausgeprägten Anregungsstufen und wenig Störungen.

## 5 Auswertung

Die  $I_A$ - $U_2$ -Kennlinien sind grafisch darzustellen.

Im 1. Teilversuch sind die Energien der Maxima und der Minima auszumessen. Aus den Differenzen aufeinander folgender Minima bzw. Maxima ist die Anregungsenergie  $\Delta E_1$  zu bestimmen und mit dem Literaturwert zu vergleichen.

Im 2. Teilversuch sind zunächst die Energien aller Maxima bzw. Schultern in der Kennlinie auszumessen. Finden Sie dann gleichbleibende Differenzen zwischen den sich in ähnlicher Form mehrfach wiederholenden Strukturen in der Kennlinie. Versuchen Sie, diese Differenzen mit den aus dem Termschema (Abb.3) bekannten Anregungsenergien zu identifizieren. Diskutieren Sie Ihre Ergebnisse!

## 6 Literatur

Eichler, Kronfeld, Sahn: Das Neue Physikalische Praktikum, Springer, Berlin u.a., 2006

E.W. Schpolski: Atomphysik. Teil II, 7. Auflage, VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin 1972, Seite 248

J. Franck und G. Hertz: Über die Erregung der Quecksilberresonanzlinie 253,6 nm durch Elektronenstöße. Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft 11(1914) 512-517

[1] R. E. Robson, M. Hildebrand, R. White: Ein Grundstein der Atomphysik. Physik Journal Nr. 3 (2013) 43-47

## 7 Kontrollfragen

7.1 Erläutern Sie das Franck-Hertz-Experiment und seine historische Bedeutung.

7.2 Welchen Einfluss hat eine kleine Temperaturänderung auf den Auffängerstrom?

7.3 Wie erklärt die kinetische Gastheorie Druck, Stoßhäufigkeit und mittlere freie Weglänge?

7.4 Wie groß ist der relative Energieverlust beim elastischen zentralen Stoß eines Elektrons mit einem (ruhenden) Hg-Atom, wenn sich ihre Massen wie 1 : 366 000 verhalten?