

TU Dortmund

# V601 - Franck-Hertz-Versuch

Markus Stabrin  
markus.stabrin@tu-dortmund.de

Kevin Heinicke  
kevin.heinicke@tu-dortmund.de

Versuchsdatum: 4. Juni 2013

Abgabedatum: 11. Juni 2013

# 1 Einleitung

Der Franck-Hertz-Versuch hat eine große Bedeutung in der frühen Geschichte der Quantenmechanik. Er bestätigte bei seiner ersten Durchführung 1914 einige Annahmen der Bohrschen Postulate und ermöglichte somit einen ersten Einblick in die innere Struktur der Atome.

Durch die Anregung von Quecksilberatomen und die darauffolgenden Erscheinungen lässt sich die Existenz von diskreten Energieniveaus bestätigen. Dies soll im Folgenden näher erläutert werden.

## 2 Theorie

### 2.1 Wechselwirkungen in Atomhüllen

Der Franck-Hertz-Versuch macht sich eine leicht veranschaulichbare Wechselwirkung zwischen freien Elektronen und an einen Kern gebundene Hüllenelektronen zu Nutzen. Ein freies Elektron kann mit einem Atom kollidieren, wobei je nach Energie des Elektrons ein elastischer oder ein unelastischer Stoß auftritt.

Das Elektron wird dabei vom Coulombpotential des Hüllenelektrons abgestoßen. Falls das freie Elektron genügend kinetische Energie trägt, kann es einen bestimmten Teil dieser Energie während eines unelastischen Stoßes an das Hüllenelektron abgeben.

Das Atom befindet sich dann in einem angeregten, instabilen Zustand mit der Energie  $E_1$ , die größer als die Energie  $E_0$  des Grundzustandes ist.

Nach dem Stoß bewegt sich das freie Elektron auf Grund der geringeren Energie  $E'$  mit einer verminderten Geschwindigkeit  $v_2$  weiter. Zudem ändert es seine Richtung, in Abhängigkeit zu der Geometrie des Stoßes. Die übertragene Energie  $\Delta E$  beträgt

$$\Delta E = E_1 - E_0 = \frac{1}{2}m_0(v_1^2 - v_2^2) . \quad (1)$$

Die Energie  $E'$  des freien Elektrons lässt sich mit Hilfe der Gegenfeldmethode bestimmen, wodurch schließlich der Energieunterschied  $\Delta E$  ermittelt werden kann.

### 2.2 Quecksilber als Stoßpartner

In diesem Versuch wird Quecksilber benutzt, da die Struktur der äußeren Schale (Hauptquantenzahl  $n = 6$ ) eine leichte Anregung durch Elektronenstöße erlaubt. Das stoßende Elektron vertauscht dabei mit dem Hüllenelektron. Das entspricht einem Umklappen des Elektronenspins, was eine Anregung in den ersten höheren Zustand zur Folge hat.

Bei leichteren Kernen (z.B. Helium) ist dies praktisch unmöglich.

### 3 Versuchsaufbau

Der Franck-Hertz-Versuch ist in Abbildung 1 schematisch dargestellt. In einem evakuierten Gefäß verdampft ein Tropfen Quecksilber, sodass sich Quecksilberatome homogen in diesem verteilen. Der Druck des Quecksilberdampfes kann durch die Temperatur  $T$  gesteuert werden.

Im unteren Teil des Gefäßes befindet sich eine Glühkathode aus Wolfram, die durch Gleichstrom erhitzt wird. Es treten auf Grund des glühelektrischen Effektes Elektronen aus dem Material aus und bilden eine Elektronenwolke um den Wolframdraht.

Zwischen Glühkathode und einem, in der Mitte des Gefäßes befestigtem Drahtgitter, wird eine Spannung  $U_B$  angelegt, sodass die Elektronen in Richtung des Drahtgitters beschleunigt werden.

Hinter dem Drahtgitter, im oberen Teil des Gefäßes befindet sich eine weitere Elektrode, die zum Drahtgitter ein negatives Potential  $U_A$  besitzt. Elektronen, die das Drahtgitter passieren und genügend Energie besitzen, können das Potential  $U_A$  überwinden und als Auffängerstrom  $I_A$  in der Elektrode gemessen werden. Langsame Elektronen werden dagegen zurück zum Drahtgitter gelenkt und von diesem absorbiert.

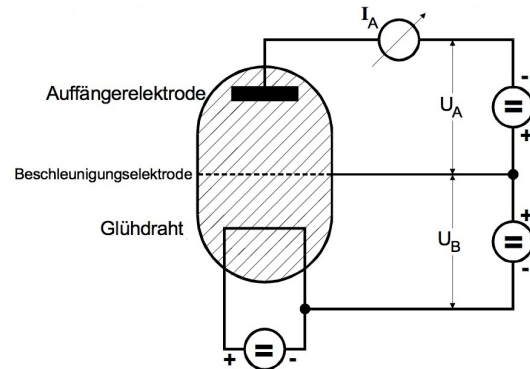


Abbildung 1: Versuchsaufbau [1].

Durch Erhöhung der Beschleunigungsspannung  $U_B$  kann die kinetische Energie der Elektronen stetig erhöht werden. Mit der Elektronenladung  $e$  gilt

$$E_{\text{kin}} = e \cdot U_B. \quad (2)$$

Bei konstanter Auffängerspannung  $U_A$  erreichen dann mit steigender Spannung  $U_B$  immer mehr Elektronen die Auffängerelektrode und der Strom  $I_A$  wächst.

Auf dem Weg durch das Gefäß stoßen die Elektronen mit den Quecksilberatomen zusammen. Wenn sie nun genügend kinetische Energie  $E_{\text{kin}} = \Delta E$  besitzen, sodass sie die Quecksilberatome anregen können, treten unelastische Stöße auf. Die gesamte Energie der Elektronen geht dann in die Quecksilberatome über und der Strom  $I_A$  fällt auf 0. Die kinetische Energie der Elektronen stimmt dann mit der Energiedifferenz  $\Delta E$  zwischen Grundzustand und erstem angeregten Zustand des Quecksilberatoms überein.

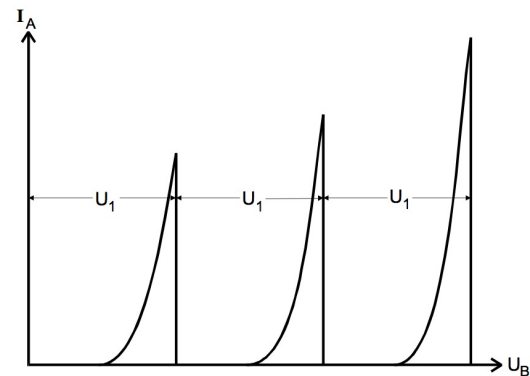


Abbildung 2: Idealisiertes Strom-Spannungs-Diagramm [1].

Durch weitere Erhöhung der Beschleunigungsspannung  $U_B$  wiederholt sich dieser Prozess, sodass ein Strom-Spannungs-Diagramm, wie in Abbildung 2 dargestellt, entsteht. Durch Messung des Abstandes  $U_1$  zwischen zwei Strommaxima lässt sich somit die Energiedifferenz  $\Delta E$  bestimmen und es gilt

$$\Delta E = e \cdot U_1 . \quad (3)$$

### 3.1 Systematische Abweichungen

Auf Grund verschiedener Effekte, die im Folgenden aufgeführt sind, weicht die tatsächlich messbare Kurve von der idealisierten Kurve in Abbildung 2 ab.

- Die Strom-Spannungs-Kurve ist um einen Wert  $K$  verschoben. Dieser Wert  $K$  bezeichnet das Kontaktpotential, welches auf Grund der verschiedenen Austrittsarbeiten des Kathoden- und des Gitterdrahtmaterials auftritt und durch das Fermi-Niveau  $\Phi$  der Materialien bestimmt ist:

$$K = \frac{1}{e}(\Phi_B - \Phi_A)$$

- Die Kurve erscheint abgeflacht und verbreitert, weil die Elektronen nicht mit konstanter Geschwindigkeit aus dem Glühdraht austreten. Die Elektronen besitzen stattdessen ein Energiespektrum, welches als Fermi-Dirac-Verteilung bezeichnet wird. Dadurch fällt der Auffängerstrom  $I_A$  nach einem Maximum nicht mehr un stetig auf den Wert 0 ab, sondern nähert sich stetig einem Minimum, das nicht 0 ist.
- Die Wahrscheinlichkeit, dass die Elektronen mit Quecksilberatomen kollidieren hängt stark vom Dampfdruck  $p$  des Quecksilbergases ab. Dieser legt die freie Weglänge  $\bar{w}$  fest, die ein Elektron durchschnittlich zurücklegen muss, um mit einem Quecksilberatom zu kollidieren.

Falls die Weglänge  $\bar{w}$  größer als die Dimension  $a$  der Versuchsanordnung ist, treten kaum Kollisionen auf und eine Messung ist schwierig. Wenn die Weglänge  $\bar{w}$  viel kleiner ist als  $a$ , treten zwischen den unelastischen Stößen viele elastische Stöße auf, die mit starken Richtungsänderungen verbunden sind. Dadurch verringert sich die Anzahl der Elektronen, die die Auffangelektrode erreichen und das Ergebnis wird verfälscht.

## 4 Durchführung

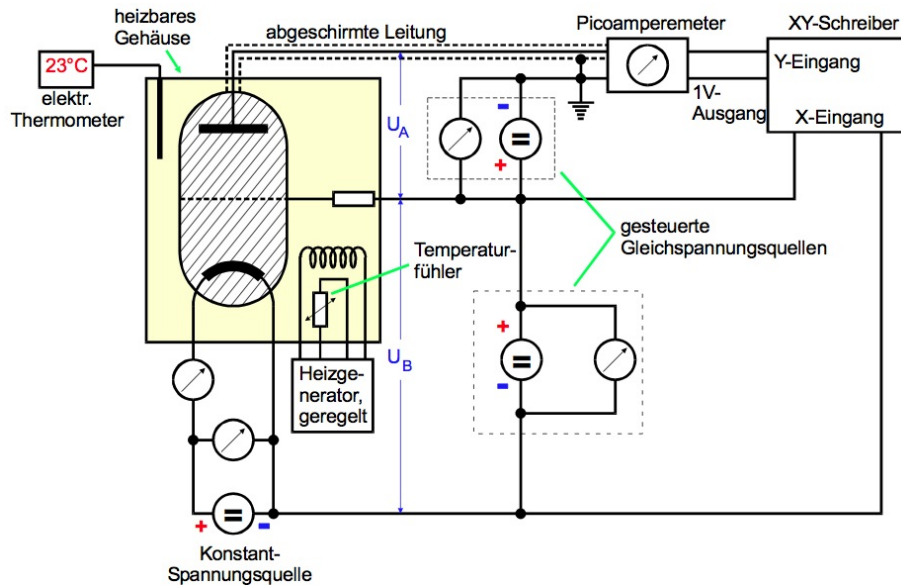


Abbildung 3: Aufbau der hier verwendeten Apparatur [1].

Die hier verwendete Apparatur ist in Abbildung 3 dargestellt. Das gesamte, mit Quecksilberdampf befüllte Gefäß befindet sich in einem Blechgehäuse, welches durch einen elektronischen Temperaturregler erhitzt werden kann. Die Temperatur  $T$  wird mit einem elektronischen Thermometer gemessen. Die Brems- und Beschleunigungsspannungen  $U_A$  und  $U_B$  können kontinuierlich zwischen 0 und  $U_A = 11\text{ V}$  bzw.  $U_B = 60\text{ V}$  geregelt werden. Dabei kann die Zeit  $t$ , in der die Spannung geregelt wird, zwischen  $t = 30\text{ s}$  und  $t = 5\text{ min}$  variiert werden.

Der XY-Schreiber muss vor der ersten Messung justiert werden, indem ohne Eingangssignal der Nullpunkt beider Richtungen auf den Nullpunkt der Skalierung eingestellt wird. Der Y-Eingang wird dann mit dem Signal des Picoamperemeters, welches den Auffängerstrom  $I_A$  misst, gespeist, der X-Eingang wahlweise mit der Spannung  $U_A$  oder  $U_B$ .

Vor jeder Messung müssen die maximalen Werte für Strom und Spannung eingestellt werden, sodass die Auslenkungen des XY-Schreibers für diese ebenfalls maximiert werden können. Dadurch ist sichergestellt, dass der XY-Schreiber nicht überregelt.

Zuerst wird die integrale Energieverteilung der beschleunigten Elektronen bestimmt. Dazu wird der Auffängerstrom  $I_A$  in Abhängigkeit der Bremsspannung  $U_A$  bei konstanter Beschleunigungsspannung  $U_B = 11\text{ V}$  gemessen. Diese Messung wird bei Zimmertemperatur  $T \approx 20^\circ\text{C}$  und bei einer erhöhten Temperatur  $T \approx 150^\circ\text{C}$  durchgeführt. Aus dem Diagramm bei Zimmertemperatur lässt sich dann das Kontaktpotential  $K$  ablesen.

Anschließend wird bei einer Temperatur von  $T \approx 180^\circ\text{C}$  eine Frank-Hertz-Kurve aufgenommen. Dazu wird bei konstanter Auffängerspannung  $U_A \approx 1\text{ V}$  die Beschleunigungsspannung  $U_B$  von 0 auf  $U_B = 60\text{ V}$  geregelt. Aus der Kurve kann dann durch Abstandsmessung der Maxima die Energiedifferenz  $\Delta E$  aus Kapitel 2.1 bestimmt werden.

Schließlich wird bei einer Temperatur  $T \approx 105^\circ\text{C}$  und einer Auffängerspannung  $U_A = -30\text{ V}$  der Auffängerstrom  $I_A$  gemessen. Dabei ist darauf zu achten, dass die Polung des Y-Eingangs sowie des Picoamperemeters getauscht werden muss. Der Strom  $I_A$  ist hierbei zunächst nicht messbar und steigt ab einer bestimmten Spannung  $U$  stark, nahezu sprunghaft an. Durch Extrapolation dieser Kurve auf den Wert  $I_A = 0$  lässt sich dann die Ionisationsspannung  $U_{\text{ion}}$  und damit die Ionisationsenergie  $E_{\text{ion}}$  für Quecksilber bestimmen:

$$E_{\text{ion}} = e \cdot U_{\text{ion}} \quad (4)$$

## 5 Auswertung

## 6 Diskussion

## Literatur

- [1] Physikalisches Anfängerpraktikum der TU Dortmund: Versuch V601 - Der Franck-Hertz-Versuch. <http://129.217.224.2/HOME/PAGE/PHYSIKER/BACHELOR/AP/SKRIPT/V601.pdf>. Stand: Juni 2013.