

Anfängerpraktikum V601

Franck-Hertz-Versuch

Helena Nawrath
helena.nawrath@tu-dortmund.de

Carl Arne Thomann
arnethomann@me.com

Durchführung: 12. Mai 2015 Abgabe: 19. Mai 2015

TU Dortmund – Fakultät Physik

1 Ziel

Der Frank-Hertz-Versuch zählt zu den Elektronenstoßexperimenten. Diese werden genutzt, um die Struktur der Elektronenhülle eines Atoms genauer zu erforschen. Ziel ist es die Anregungsenergie eines Quecksilberatoms zu bestimmen, die Energieverteilung der stoßenden Elektronen zu untersuchen, sowie die Ionisierungsenergie von Quecksilber zu beziffern.

2 Theorie

2.1 Anregung eines Hg-Atoms

Zur Bestimmung der Anregungsenergie eines Quecksilberatoms wird dieses mit Elektronen bestimmter Energie beschossen. Die stoßenden Elektronen übertragen ihre Energie auf das Atom und versetzen es in einen angeregten Zustand. Aus den Informationen des Energieverlustes der Stoßelektronen können Rückschlüsse auf die Anregungsenergie E_a gezogen werden. Stoßen Hg-Atom und Elektron unelastisch, so nimmt das Atom die Energie

$$\frac{m_e v_{\text{vor}}^2}{2} - \frac{m_e v_{\text{nach}}^2}{2} = E_1 - E_0 = E_a \quad (1)$$

auf. m_e bezeichnet die Masse der stoßenden Elektronen, v_i ihre Geschwindigkeiten vor und nach dem Stoß, E_0 die Energie des Hg-Atoms im Grund- und E_1 die Energie im ersten angeregten Zustand. Nach einer Relaxationszeit von $t \approx 10 \cdot 10^{-8} \text{ s}$ geht das Hg-Atom wieder in den Grundzustand über und emittiert ein Lichtquant der Energie

$$h\nu = E_1 - E_0. \quad (2)$$

Damit ein unelastischer Stoß zustande kommt muss für die Energie der stoßenden Elektronen die Bedingung $E_e \geq E_a$ gelten. Wird diese nicht erfüllt stoßen Elektron und Atom elastisch. Es kommt zu einer geringen Energieabgabe von

$$\Delta E = \frac{4m_e M}{(m_e + M)^2} \cdot E_e \approx 1,1 \cdot 10^{-5} E_e \quad (3)$$

aufgrund des großen Massenunterschiedes. Dieser kleine Energiebetrag ruft nur eine Richtungsänderung in der z -Komponente des Elektrons hervor, führt jedoch nicht zu einer Anregung der Atome.

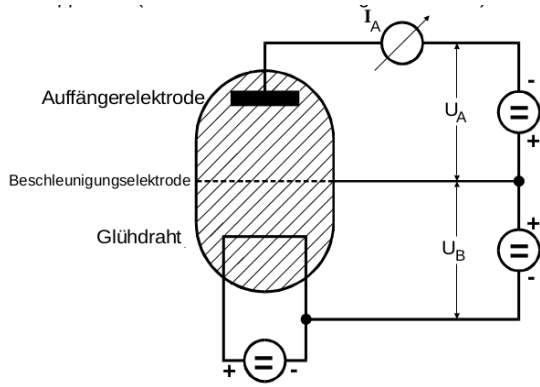


Abbildung 1: Grober Aufbau des Franck-Hertz-Versuchs.

2.2 Idealisierte Franck-Hertz-Kurve

In einem evakuierten Gefäß befindet sich ein Tropfen Quecksilber (Hg), der teilweise verdampft. Abhängig von der Umgebungstemperatur T bildet sich ein Gleichgewichtsdampfdruck p_{st} aus. Ein heißer Glühdraht dient als Elektronenlieferant. Durch eine gitterförmige Beschleunigungselektrode (BE) mit positiver Beschleunigungsspannung U_B wird den Elektronen eine Energie von

$$eU_B = \frac{m_e v_{\text{vor}}^2}{2} \quad (4)$$

zugeführt. Erreichen die Elektronen die Auffängerelektrode (AE) lässt sich ein Auffängerstrom I_A messen. Elektronen werden jedoch nur von der AE gestoppt, wenn sie genug Energie besitzen um deren Bremsfeld, erzeugt durch die Spannung U_A , zu überwinden. Nur Elektronen mit

$$\frac{m_e}{2} v_z^2 \geq eU_A \quad (5)$$

passieren diese Hürde – die restlichen Elektronen kehren zur BE zurück. Zur Bestimmung der Anregungsenergie wird die zuvor beschriebene Gegenfeldmethode benutzt. Während die Elektronen sich durch das Gefäß bewegen stoßen sie mit den Hg-Atomen zusammen. Das Beobachten des Auffängerstroms I_A gibt Aufschluss über die Anregungsenergie. Das Erhöhen von U_B lässt den Strom ansteigen, da immer mehr Elektronen die AE erreichen. Sobald die Elektronen eine Energie aufweisen, die gleich der Anregungsenergie ist geben sie diese durch Stöße an die Hg-Atome ab. Danach reicht ihre Energie nicht mehr aus, um das Gegenfeld zu passieren - I_A fällt rasant ab. Starkes Erhöhen von U_B führt den Elektronen so viel Energie zu, dass mehrere Stöße ermöglicht werden. Die Abstände der Maxima U_1 entsprechen der Anregungsenergie des Hg-Atoms im ersten Zustand:

$$U_1 = \frac{1}{\epsilon_0}(E_1 - E_0). \quad (6)$$

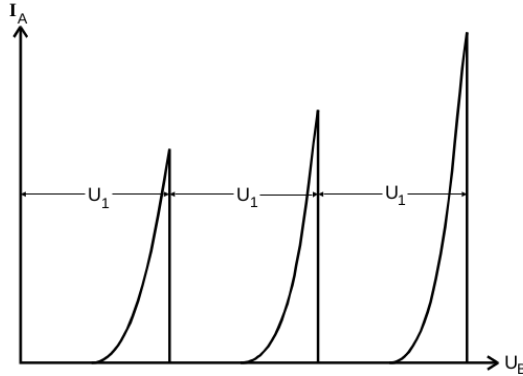


Abbildung 2: Theoretischer - idealisierter - Kurvenverlauf des Auffängerstroms I_A .

Der tatsächliche Kurvenverlauf weicht vom idealen etwas ab, da einige messbedingte Nebeneffekte auftreten.

2.2.1 Nebeneffekte

2.2.2 Das Kontaktpotential

Die eingestellte Spannung U_B entscheidet sich von der tatsächlichen Beschleunigungsspannung. Grund dafür sind die Potentiale Φ_D und Φ_{BE} , d.h. die Austrittsarbeit der Elektronen aus verwendeten Glühdraht und der Beschleunigerelektrode. Diese unterscheiden sich dank unterschiedlichem Material. Die Effektivspannung ist um den Betrag des Kontaktpotentials K herabgesetzt und die Kurve deswegen verschoben.

$$U_{B,\text{eff}} = U_B - \frac{1}{\epsilon_0}(\Phi_{BE} - \Phi_D) = U_B - K \quad (7)$$

2.2.3 Energiespektrum der Elektronen

Nach der Fermi-Dirac-Verteilung weisen die Leitungselektronen eines Metalls ein Energiespektrum auf und besitzen damit unterschiedliche Anfangsgeschwindigkeiten. Das hat zur Folge, dass die Kurvenmaxima sich langsamer ausbilden und flacher werden. Außerdem ist kein unstetiger Abfall der Kurve auf ein Stromminimum von $I_A = 0$ zu beobachten. Richtungsänderungen eventueller elastischer Stöße zu einer Verbreiterung des Kurvenverlaufs, sofern diese zwischen BE und AE stattfinden.

2.2.4 Dampfdruck

Für die mittlere freie Weglänge \bar{w} muss $\bar{w} < a$ mit dem Abstand a zwischen BE und AE gelten um die Wahrscheinlichkeit unelastischer Stöße zu maximieren. \bar{w} ist über den Dampfdruck p_{st} steuerbar, der über T eingestellt wird.

$$\bar{w} = \frac{0,0029}{p_{\text{st}}} p_{\text{st}}(T) = 5,5 \cdot 10^7 \exp - \frac{6876}{T}, [p_{\text{st}} = \text{mbar}, [\bar{w}] = \text{cm}. \quad (8)$$

In einem bestimmten Temperaturbereich ist die Stoßwahrscheinlichkeit also optimal. Ein kleinerer Druck führt zu einer geringen Stoßwahrscheinlichkeit, ein größerer Druck führt zu vielen elastischen Stößen.

3 Durchführung

Das vorherig erwähnte Glasrohr mit Glühdraht, BE und AE befindet sich in einem heizbaren Blechgehäuse, dessen Temperatur T über einen Regler eingestellt und konstant gehalten werden kann. Das Ablesen der Temperatur erfolgt über ein Thermometer. Der Heizfaden wird über ein Konstantspannungsgerät betrieben, BE und AE über el. Geräte, deren Ausgangsspannung sich zeitproportional ändern kann. Die Spannungen können über die Bereiche $0 \leq U_B \leq 60 \text{ V}$ und $0 \leq U_A \leq 11 \text{ V}$ variiert werden. Der Auffängerstrom I_A wird über ein Picoamperemeter gemessen. Es besteht aus einem Gleichstromverstärker und Aperemeter, das proportional zum Eingangsstrom ausschlägt.

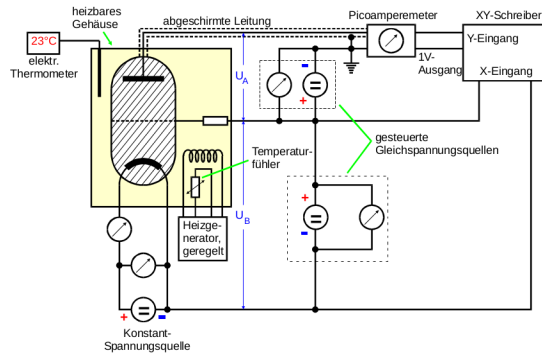


Abbildung 3: Detaillierter Aufbau des Versuches.

3.1 Franck-Hertz-Kurve

Um die Franck-Hertz-Kurve aufzeichnen zu können wird ein XY-Schreiber genutzt. Auf der X-Achse wird U_B aufgetragen, in Y-Richtung eine Spannung U , proportional zum Strom I_A . Diese Spannung wird vom Picoamperemeter geliefert. Die Justierung des

Schreibers erfolgt über die "zero"-Knöpfe. Damit wird der Nullpunkt in die linke untere Ecke gelegt. Dabei darf kein Signal an den Eingängen liegen. Die Empfindlichkeit der Eingänge wird eingestellt, in dem ein geringes Signal angelegt und langsam gesteigert wird. Die Auslenkung des Y-Schreibers sollte maximal sein, wenn $I_A \approx 3 \text{ nA}$ erreicht. Die X-Komponente sollte vollen Ausschlag zeigen, wenn die Maximalspannung erreicht ist. Um die Achse auf Volt zu eichen müssen einige Werte eingetragen werden, die vom Voltmeter abgelesen werden. Der Hg-Dampfdruck muss wie in THEORIE erwähnt richtig eingestellt werden. Dafür wird das Blechgehäuse erhitzt in dem der Stellknopf am Temperaturregler nach rechts gedreht wird, bis ein Ausgangsstrom ein Maximum von $2,1 - 2,2 \text{ A}$ erreicht wird und T abgelesen werden kann. Sobald die gewünschte Temperatur erreicht ist sollte der Knopf nach links zurückgedreht werden bis der Ausgangsstrom nun ein Minimum von $1,2 \text{ A}$ erreicht. T ist konstant, wenn der Strom zwischen beiden Extremwerten schwingt. Die Heizleistung des Drahtes sollte so weit heruntergeregt werden, dass bei $U_B \approx 60 \text{ V}$ ein Strom $I_A = 1 - 3 \text{ nA}$ gemessen wird. Die Kurve wird bei Temperaturen, die zwischen $160 - 200^\circ\text{C}$ liegen, im Bereich von $0 \leq U_B \leq 60 \text{ V}$ aufgenommen mit $U_A \approx 1 \text{ V}$.

3.2 Energieverteilung der Elektronen

Der Strom I_A wird in Abhängigkeit von der Bremsspannung U_A aufgezeichnet; $U_B = 11 \text{ V}$. Die Messung wird bei $T \approx 20^\circ\text{C}$, $T = 140 - 160^\circ\text{C}$ durchgeführt. Für $T \approx 20^\circ\text{C}$ wird bei $U_A = 0$ ein Strom $I_A = 50 \text{ V}$ eingestellt, in dem die Kathodenheizung neu eingeregelt wird.

3.3 Ionisierungsspannung

Der Strom I_A wird in Abhängigkeit von U_B aufgenommen bei einer konstanten Anodenspannung von $U_A = -30 \text{ V}$.

4 Auswertung

5 Diskussion

Literatur

- [1] John D. Hunter. „Matplotlib: A 2D Graphics Environment“. In: *Computing in Science and Engineering* 9.3 (2007), S. 90–95. URL: <http://link.aip.org/link/?CSX/9/90/1>. Version 1.3.1.
- [2] Eric Jones, Travis Oliphant, Pearu Peterson u. a. *SciPy: Open source scientific tools for Python*. 2001. URL: <http://www.scipy.org/>. Version 0.14.0.
- [3] Eric O. Lebigot. *Uncertainties: a Python package for calculations with uncertainties*. URL: <http://pythonhosted.org/uncertainties/>. Version 2.4.5.
- [4] Travis E. Oliphant. „Python for Scientific Computing“. In: *Computing in Science and Engineering* 9.3 (2007), S. 10–20. URL: <http://link.aip.org/link/?CSX/9/10/1>. Version 1.8.1.
- [5] The GIMP Team. *GIMP: GNU Image Manipulation Program*. URL: <http://www.gimp.org/>. Version 2.8.10.

Die verwendeten Plots wurden mit *matplotlib*[1] und die Grafiken mit *GIMP*[5] erstellt sowie die Berechnungen mit *Python-Python-Numpy*, [4], *Python-Scipy*[2] und *Python-uncertainties*[3] durchgeführt.