

V601

Franck-Hertz-Versuch

Robin Pelkner
robin.pelkner@tu-dortmund.de

Joshua Althüser
joshua.althueser@tu-dortmund.de

Durchführung: 02.04.2019

Abgabe: 09.04.2019

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|-----------|
| 1 Zielsetzung | 3 |
| 2 Theorie | 3 |
| 3 Durchführung | 6 |
| 4 Auswertung | 7 |
| 4.1 Bestimmung der mittleren freien Weglänge | 7 |
| 4.2 Differentielle Energieverteilung der Elektronen | 8 |
| 4.2.1 bei Raumtemperatur ($T = 25.5\text{ °C}$) | 8 |
| 4.2.2 bei $T = 143\text{ °C}$ | 10 |
| 4.3 Franck-Hertz-Kurve | 10 |
| 4.4 Ionisierungsenergie | 12 |
| 5 Diskussion | 13 |
| Literatur | 14 |

1 Zielsetzung

In diesem Experiment soll sich der Franck-Hertz-Versuch näher angeschaut werden. Dabei wird die Energiedifferenz zwischen dem ersten angeregten und dem Grundzustand von Hg-Atomen untersucht. Des Weiteren wird die Ionisationsenergie untersucht.

2 Theorie

In dem Franck-Hertz-Versuch werden Elektronenstöße verwendet, um Hg-Atome anzuregen. Dabei können sowohl elastische als auch unelastische Stöße vorkommen, wobei erstere lediglich die Richtung der Elektronen ändert. Der Energieverlust kann hier aufgrund des großen Masseunterschiedes zwischen Hg-Atom und Elektron vernachlässigt werden. Letztere hingegen sorgen dafür, dass die Elektronen kinetische Energie verlieren. Diese Energie wird zur Anregung des Atoms genutzt. Die Energiedifferenz der Elektronen ergibt sich damit nach

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

wobei m_e die Elektronenmasse und v_{vor} und v_{nach} die Geschwindigkeiten der Elektronen vor beziehungsweise nach dem unelastischen Stoß sind. Dies ist ebenfalls die Energie des emittierten Photons, wenn das Atom zurück in den Grundzustand fällt. Dabei gilt die Relation

$$\Delta E = h\nu \quad (2)$$

für die Frequenz ν des Photons, wobei h das Planck'sche Wirkungsquantum ist. Zur Bestimmung dieser Energie wird die sogenannte Gegenfeldmethode benutzt. Hierbei werden die Elektronen in einem Quecksilberdampf mittels einer Beschleunigungselektrode beschleunigt. An dieser liegt die Spannung U_B an. Nach dieser befindet sich eine Auffängerelektrode, an der eine Gegenspannung U_A anliegt. Dieser Aufbau ist in Abbildung 1 zu sehen. Wenn die Elektronen auf der Strecke bis zu der Beschleunigungselektrode keine Stöße erfahren und mit der Geschwindigkeit $v = 0$ beginnen, so kann ihre Energie an dieser Stelle mittels

$$E = e_0 U_B = \frac{m_e}{2} v_z^2 \quad (3)$$

berechnet werden, wobei e_0 die Elementarladung ist.

Wenn diese Geschwindigkeit in z -Richtung der Ungleichung

$$\frac{m_e}{2} v_z^2 \geq e_0 U_A \quad (4)$$

genügt, erreichen die Elektronen die Auffängerelektrode und es kann an dieser ein Strom gemessen werden. Ist die Beschleunigungsspannung gerade so hoch, dass die Elektronen genug Energie haben, um die Hg-Atome anzuregen, so wird man einen starken Abfall der

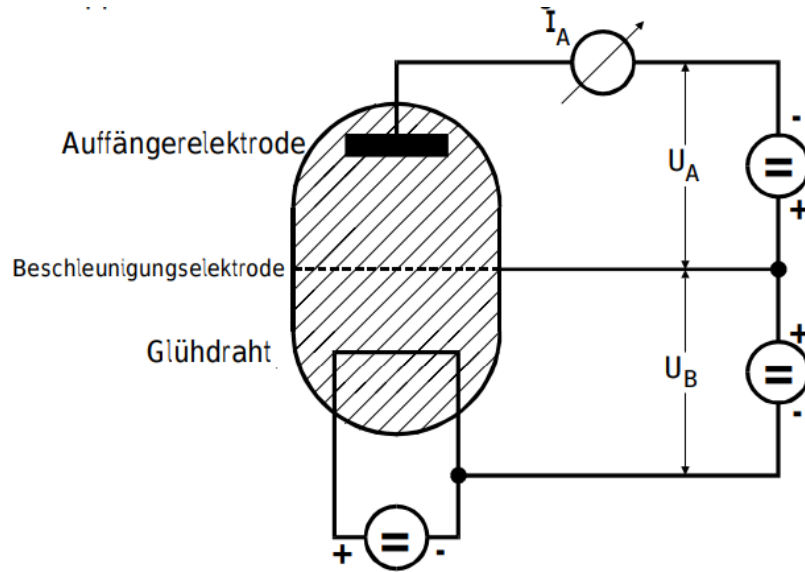


Abb.1: Prinzipieller Aufbau des Franck-Hertz-Versuches

Abbildung 1: Aufbau einer Röhre mit Gegenfeld[1].

Stromstärke an der Auffängerelektrode feststellen. Erhöht man die Beschleunigungsspannung weiterhin, so wird dieser Strom erneut ansteigen, bis die Elektronen nach dem ersten Anregungsvorgang genug Energie aufnehmen können, um ein weiteres Atom anregen zu können. In diesem Fall sinkt der Strom an der Auffängerelektrode erneut rapide. Die dadurch entstehende Theoriekurve ist in Abbildung 2 zu sehen.

Diese Kurve wird in der Praxis allerdings breiter und flacher ausfallen. Dies liegt daran, dass zum Einen die Elektronen den Glühdraht bereits mit einer gewissen Geschwindigkeitsverteilung verlassen, was dazu führt, dass die Maxima nicht bei einer exakten Spannung festgestellt werden sondern um dieses herum verteilt ebenfalls Stromfluss gemessen wird. Des Weiteren können die Geschwindigkeitsänderungen durch elastische Stöße zum Teil beträchtlich sein. Ebenfalls existiert eine gewisse Wahrscheinlichkeit, dass die Elektronen lange genug keinen Stoß erfahren, um das Atom zu ionisieren. Diese wird möglichst gering gehalten, in dem der Dampfdruck $p_{\text{Sättigung}}$ in der Röhre auf einem bestimmten Wert gehalten wird. Dadurch entsteht ein bestimmter durchschnittlicher Abstand \bar{w} zwischen den einzelnen Hg-Atomen. Dieser muss 1000 bis 4000 mal kleiner sein als der Abstand a zwischen Glühdraht und Beschleunigungselektrode. Der Abstand zwischen den Atomen und der Sättigungsdruck sind in der Gastheorie miteinander über

$$\bar{w} = \frac{0,0029}{p_{\text{Sättigung}}} \quad (5)$$

verknüpft, wobei für die Sättigung mittels

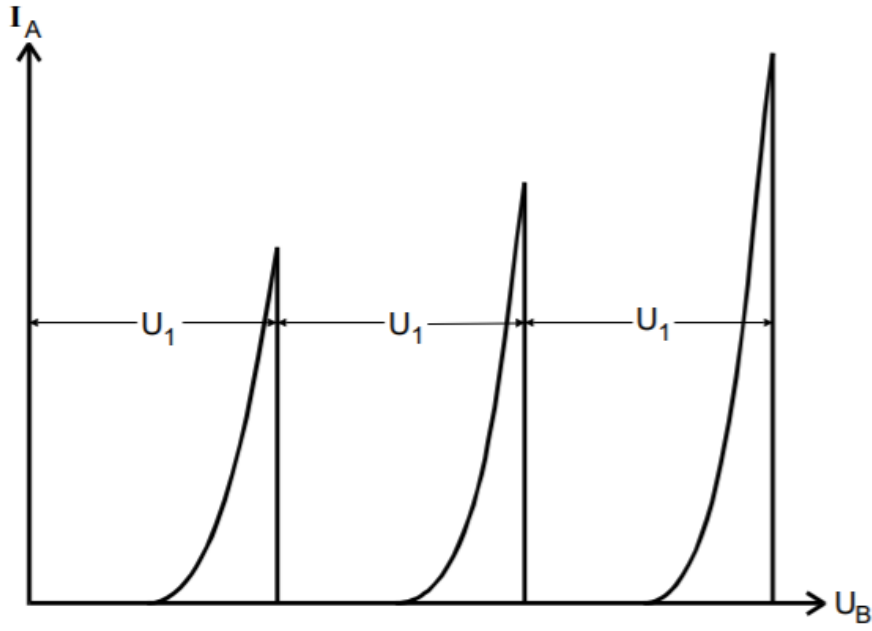


Abbildung 2: Theoretische Franck-Hertz-Kurve - ohne Störeinflüsse[1].

$$p_{\text{Sättigung}} = 5,5 \cdot 10^7 \cdot e^{\left(\frac{-6876}{T}\right)} \quad (6)$$

berechnet werden kann. Dabei sind die Einheiten von \bar{w} cm, von $p_{\text{Sättigung}}$ 10^{-3} bar und von T K.

Die Abstände zwischen zwei abrupten Abfällen U_1 ist das erste Anregungspotential des Hg-Atoms. Sie berechnet sich über

$$U_1 = \frac{1}{e_0} \cdot (E_1 - E_0). \quad (7)$$

Des Weiteren ist jedoch zu beachten, dass die Austrittsarbeit des Glühdrahtes und der Beschleunigungselektrode auf den effektiven Wert der Beschleunigungsspannung $U_{\text{B,eff}}$ miteinander einwirken. Diese berechnet sich nach

$$U_{\text{B,eff}} = U_{\text{B}} - \frac{1}{e_0} \cdot (\Phi_{\text{B}} - \Phi_{\text{G}}) = U_{\text{B}} - tK, \quad (8)$$

wobei Φ_{B} und Φ_{G} die Austrittsarbeit der Beschleunigungselektrode beziehungsweise des Glühdrahtes sind. Der Summand $\frac{1}{e_0} \cdot (\Phi_{\text{B}} - \Phi_{\text{G}})$ wird Kontaktpotential K genannt. Um diesen ist die Franck-Hertz-Kurve verschoben.

Während der Messung der Ionisationsenergie wird der Wert des Auffängerstroms I_{A} zunächst 0 A betragen. Ist die Ionisationsspannung erreicht, so wird die Stromstärke rapide ansteigen. Die Theoriekurve dazu ist in Abbildung 3 zu sehen.

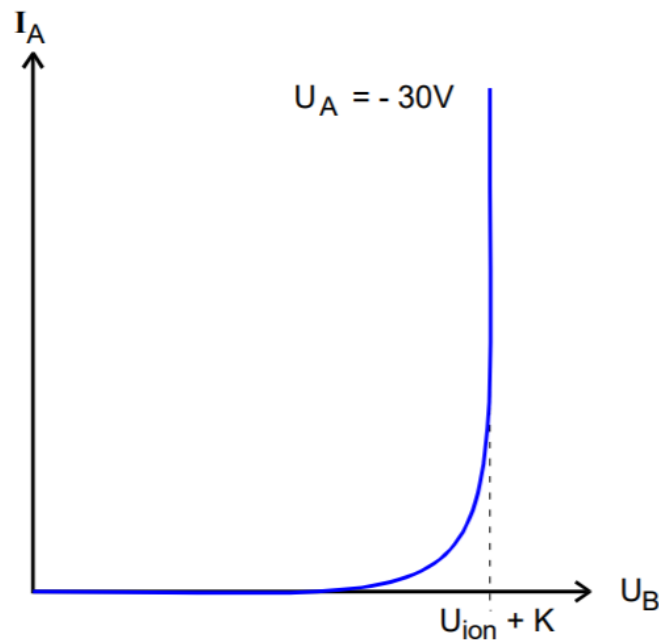


Abbildung 3: Theoretische Kurve der Stromstärke I_A bei dem Ionisationsvorgang[1].

3 Durchführung

Zunächst wird die Schaltung gemäß der Skizze in Abbildung 4 aufgebaut. Dabei ist zu beachten, dass an dem Schreiber nicht immer U_B anliegt, sondern jeweils die zu messende Spannung. Der Schreiber wird mittels der "Zero"-Drehknöpfen so kalibriert, dass sich der Nullpunkt in der unteren linken Ecke befindet. Des Weiteren ist vor jeder Messung darauf zu achten, dass der Schreiber so skaliert ist, dass er nie über seinen Maximalausschlag hinaus geht, um Datenverlust zu verhindern.

Zunächst wird Bremsspannung U_A untersucht, um die integrale Energieverteilung der Elektronen zu untersuchen. Die Beschleunigungsspannung U_B wird auf konstant +11 V eingestellt. Zunächst wird eine Messung des Auffängerstroms I_A bei Zimmertemperatur durchgeführt und anschließend weitere Messungen bei 140 – 160 °C. Nun wird die Bremsspannung von 0 V bis auf ihren Maximalwert langsam variiert. Die dadurch entstehende Kurve von I_A in Abhängigkeit von U_A wird durch den Schreiber notiert.

Als nächstes werden Franck-Hertz-Kurven bei verschiedenen Temperaturen zwischen $160^\circ\text{C} \leq T \leq 200^\circ\text{C}$ aufgenommen. Dazu wird die Schaltung nun so aufgebaut, dass U_B am Schreiber anliegt. Die Bremsspannung wird dabei auf $U_A = -1$ V eingestellt. Die Beschleunigungsspannung U_B wird so variiert, dass sie zwischen 0 V und 60 V liegt.

Zuletzt wird die Spannung U_B bestimmt, ab der Quecksilber ionisiert wird. Dazu wird die Temperatur zwischen 100 und 110 °C gehalten. Die Gegenspannung wird auf $U_A = 30$ V eingestellt. Nun wird die Beschleunigungsspannung langsam erhöht, bis die Stromstärke I_A beginnt rapide anzusteigen.

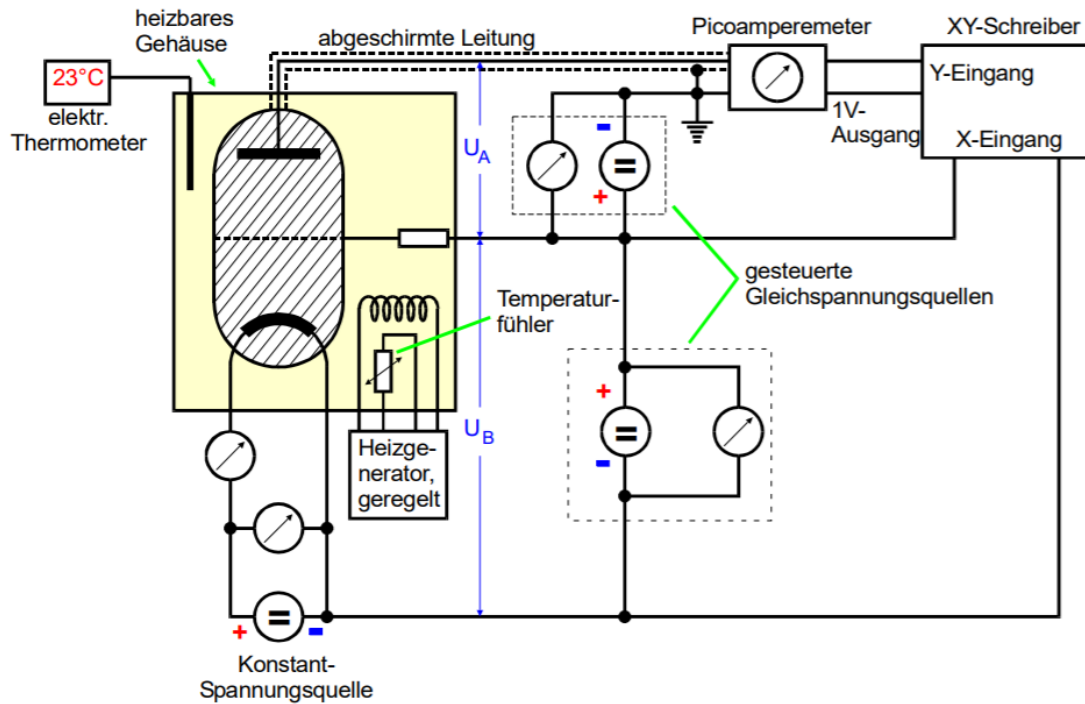


Abbildung 4: Schaltskizze des Versuches[1].

4 Auswertung

4.1 Bestimmung der mittleren freien Weglänge

Gemäß (5) und (6) wird die mittlere freie Weglänge \bar{w} zu den im Experiment verwendeten Temperaturen bestimmt und mit dem Abstand $a = 0.01\text{m}$ zwischen der Kathode und der Beschleunigungselektrode verglichen. Die Weglänge \bar{w} sowie das Verhältnis $\frac{a}{\bar{w}}$ zu den zugehörigen Temperaturen sind in Tabelle 1 zu sehen.

Tabelle 1: Mittlere freie Weglängen zu den verwendeten Temperaturen, sowie dem Verhältnis zum Abstand Kathode-Beschleunigungselektrode.

| T / K | Dampfdruck /mbar | \bar{w} / m | $\frac{a}{\bar{w}}$ |
|----------------|----------------------|-----------------------|---------------------|
| 298.65 | $5.51 \cdot 10^{-3}$ | $5.260 \cdot 10^{-3}$ | 1.901 |
| 416.15 | 3.67 | $7.904 \cdot 10^{-6}$ | 1265 |
| 468.65 | 23.36 | $1.242 \cdot 10^{-6}$ | 8054 |
| 379.15 | 0.73 | $3.964 \cdot 10^{-5}$ | 252.3 |

4.2 Differentielle Energieverteilung der Elektronen

4.2.1 bei Raumtemperatur ($T = 25.5\text{ °C}$)

Für diesen Auswertungsteil wird die Abbildung 1 aus dem Anhang verwendet. Zuerst muss der Maßstab der x-Achse der Grafik bestimmt werden. Dazu wird die maximale gemessene Spannung von $U_{\max} = 10\text{V}$ durch die Länge der gesamten Kurve (24cm) geteilt. Dadurch ergibt sich eine Skalierung von $1\text{cm} \hat{=} 0.42\text{V}$. Durch Unterteilung der Achse in kleine Teilstücke, lässt sich für jedes dieser Teilstücke eine Näherung der Steigung bestimmen. Die abgelesenen Steigungen, sowie die der zugehörige Spannungswert sind in Tabelle 2 zu sehen und in Abbildung 5 grafisch aufgetragen. In der Grafik zeigt die y-Achse die Steigung der integralen Verteilung, welche proportional zur Anzahl Elektronen ist, während die x-Achse die Abbremsspannung U_A zeigt und damit proportional zur Energie der Elektronen ist. Wie zu sehen ist haben die meisten Elektronen eine Energie von 9.24eV . Die angelegte, konstante Beschleunigungsspannung U_B ist aber auf 11V eingestellt. Nach (8) beträgt das Kontaktpotential somit $K_1 = 1.76\text{V}$. Die in Abbildung 5 dargestellte Kurve beschreibt zunächst eine relativ konstante Verteilung mit geringen Werten, steigt dann aber steil zum Maximum an, um danach ebenfalls steil wieder zu sinken. Aus diesem Peak lässt sich, wie bereits erwähnt, schließen, dass die meisten Elektronen die selbe Energie haben.

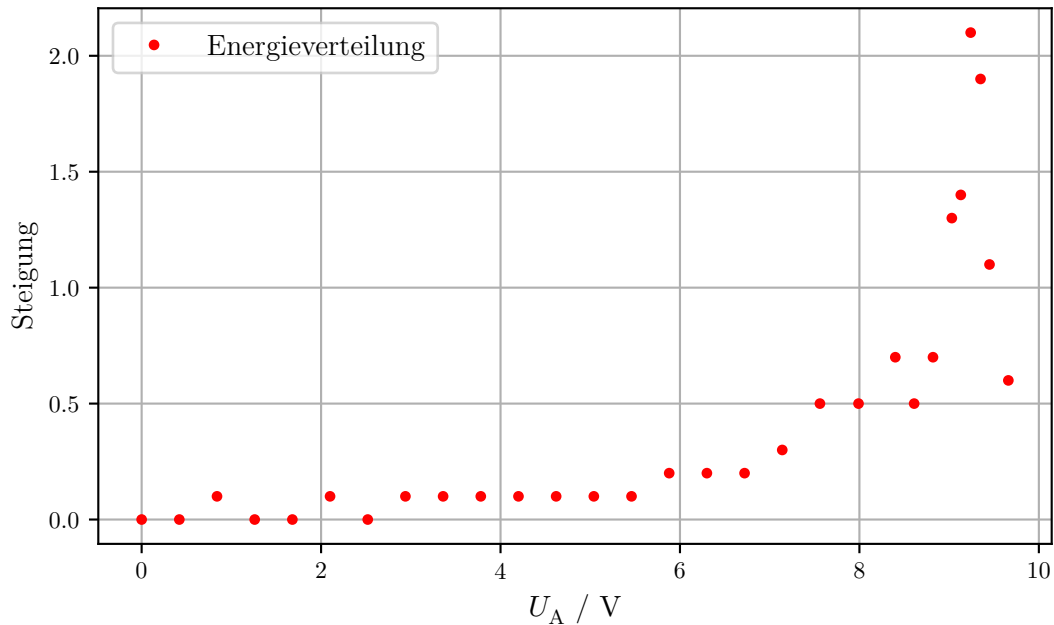


Abbildung 5: Differentielle Energieverteilung bei Raumtemperatur($T = 25.5\text{°C}$)

Tabelle 2: Differentielle Energieverteilung bei Raumtemperatur (25.5 °C).

| U_A / V (Abstand bis zum nächsten Eintrag) | Steigung / $\frac{\text{Änderung y-Achse}}{\text{Änderung x-Achse}}$ |
|--|--|
| 0.00 | 0.0 |
| 0.42 | 0.0 |
| 0.84 | 0.1 |
| 1.26 | 0.0 |
| 1.68 | 0.0 |
| 2.10 | 0.1 |
| 2.52 | 0.0 |
| 2.94 | 0.1 |
| 3.36 | 0.1 |
| 3.78 | 0.1 |
| 4.20 | 0.1 |
| 4.62 | 0.1 |
| 5.04 | 0.1 |
| 5.46 | 0.1 |
| 5.88 | 0.2 |
| 6.30 | 0.2 |
| 6.72 | 0.2 |
| 7.14 | 0.3 |
| 7.56 | 0.5 |
| 7.99 | 0.5 |
| 8.40 | 0.7 |
| 8.61 | 0.5 |
| 8.82 | 0.7 |
| 9.03 | 1.3 |
| 9.13 | 1.4 |
| 9.24 | 2.1 |
| 9.35 | 1.9 |
| 9.45 | 1.1 |
| 9.66 | 0.6 |

4.2.2 bei $T = 143\text{ °C}$

Bei der Energieverteilungsmessung bei 143°C wird genauso verfahren wie schon im vorherigen Kapitel (siehe Unterunterabschnitt 4.2.1). Die aus Abbildung 2 aus dem Anhang abgelesenen Spannungen U_A und die zugehörigen Steigungen sind in Tabelle 3 aufgelistet und in Abbildung 6 grafisch dargestellt. Zu sehen ist zuerst eine konstante Verteilung, die jedoch steil absinkt und von da an nur noch eine geringe (fast) konstante Verteilung zeigt. Hier zeigt sich, dass die meisten Elektronen eine geringere Energie haben, allerdings auch stärker im Energiespektrum verteilt sind. Der starke Abfall der Anzahl an Elektronen bei ungefähr $U_A = 4\text{V}$ lässt sich mithilfe von Unterabschnitt 4.3 erklären, da bei dieser ungefähr dieser Spannung die Quecksilberatome bereits angeregt werden können.

Tabelle 3: Differentielle Energieverteilung bei 143°C .

| U_A / V (Abstand bis zum nächsten Eintrag) | Steigung / $\frac{\text{Änderung y-Achse}}{\text{Änderung x-Achse}}$ |
|---|--|
| 0.00 | 0.9 |
| 0.42 | 1.0 |
| 0.84 | 1.0 |
| 1.26 | 1.0 |
| 1.68 | 1.0 |
| 2.10 | 1.1 |
| 2.52 | 1.0 |
| 2.94 | 1.0 |
| 3.36 | 1.0 |
| 3.78 | 0.6 |
| 4.20 | 0.4 |
| 4.62 | 0.1 |
| 5.46 | 0.1 |
| 6.30 | 0.1 |
| 6.72 | 0.1 |
| 7.14 | 0.1 |
| 7.56 | 0.1 |
| 8.40 | 0.1 |
| 8.82 | 0.1 |
| 9.24 | 0.1 |
| 9.66 | 0.0 |

4.3 Franck-Hertz-Kurve

Die aufgenommene Franck-Hertz-Kurve ist in Abbildung 3 des Anhangs zu sehen. Weitere Franck-Hertz-Kurven sind dem Anhang beigelegt, werden aber in der Auswertung nicht weiter beachtet, da die ausgewählte Kurve die deutlichsten Extrema aufweist. Zur Bestim-

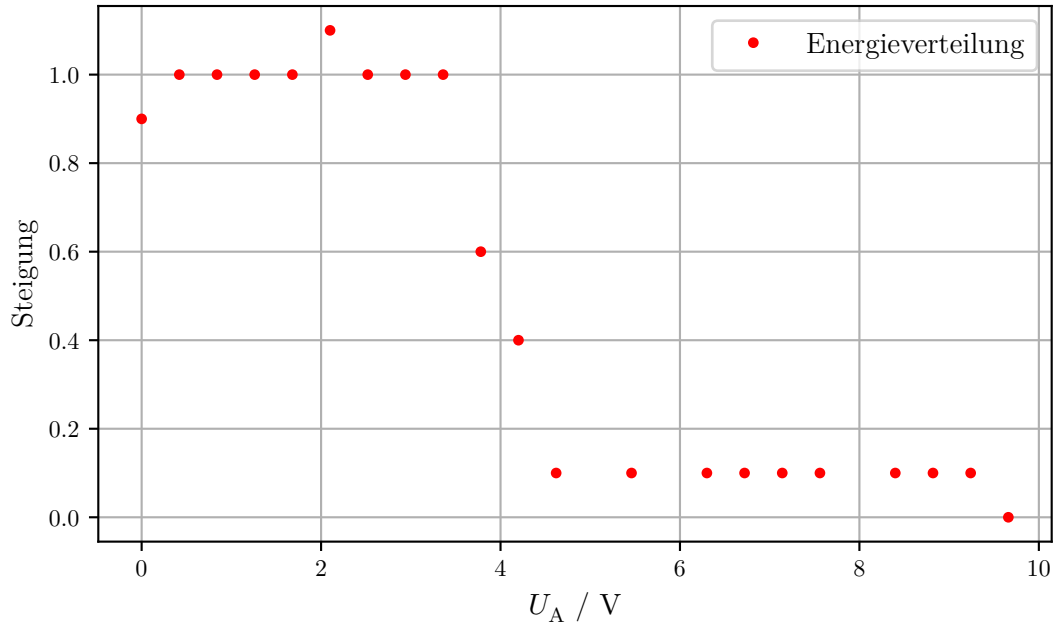


Abbildung 6: Differentielle Energieverteilung bei $T = 143^\circ\text{C}$

mung der ersten Anregungsenergie des Quecksilbers werden die Abstände der Extrema der Franck-Hertz-Kurve aufgenommen und gemittelt. In dieser Abbildung entspricht 1cm hier 2.45V. Die Spannungsdifferenzen sind in Tabelle 4 aufgestellt. Die Mittelung wird durch

$$U_{\text{Anr}} = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 (U_{i+1} - U_i) \quad (9)$$

und der zugehörige Fehler durch

$$\Delta U_{\text{Anr}} = \frac{1}{\sqrt{56}} \sqrt{\sum_{i=1}^8 (U_i - U_{\text{Anr}})^2} \quad (10)$$

errechnet. Hierdurch ergibt sich eine erste Anregungsspannung von

$$U_{\text{Anr}} = (5.24 \pm 0.11)\text{V}$$

beziehungsweise eine erste Anregungsenergie von

$$E_{\text{Anr}} = (5.24 \pm 0.11)\text{eV}.$$

Durch Gleichung (2) und dem Zusammenhang $\lambda = \frac{c}{\nu}$ ergibt sich die Wellenlänge des emmitierten Lichts zu

$$\lambda = (237 \pm 5)nm, \quad ,$$

wobei sich der Fehler durch Fehlerfortpflanzung zu

$$\Delta\lambda = \frac{c \cdot h}{E_{\text{Anr}}} \cdot \Delta E_{\text{Anr}} \quad (11)$$

berechnet. Das emmitierte Licht liegt damit im ultravioletten Bereich. Das erste Spannungsmaximum liegt bei

$$U_1 = 5.70V.$$

Da $U_1 = K + U_{\text{Anr}}$ gilt, lässt sich das Kontaktpotential zu

$$K_2 = (0.46 \pm 0.11) \text{ V}$$

bestimmen.

Tabelle 4: Abstände der Maxima der Franck-Hertz-Kurve.

| i | Abstand / cm | Abstand $U_{i+1} - U_i$ / V |
|---|--------------|-----------------------------|
| 1 | 2.0 | 4.91 |
| 2 | 2.0 | 4.91 |
| 3 | 2.1 | 5.14 |
| 4 | 2.2 | 5.39 |
| 5 | 2.1 | 5.14 |
| 6 | 2.1 | 5.14 |
| 7 | 2.2 | 5.39 |
| 8 | 2.4 | 5.89 |

4.4 Ionisierungsenergie

Die Ionisierungsenergie von Quecksilber wird mithilfe von Abbildung 4 aus dem Anhang bestimmt. Hierzu wird eine Asymptote in die Grafik eingezeichnet. In dieser Grafik entspricht 1cm 1V. Die Schnittstelle der Asymptote mit der x-Achse liegt somit bei $U_{\text{Schnitt}} = 10V$. Zusammen mit den zuvor bestimmten Kontaktpotentialen ergeben sich die Ionisierungsenergien somit zu

$$E_{\text{ion},1} = 8.24\text{eV},$$

$$E_{\text{ion},2} = (9.54 \pm 0.11)\text{eV}.$$

5 Diskussion

Bei allen Auswertungsteilen sind die Ungenauigkeiten zu beachten, welche sich direkt aus dem Versuchsaufbau ergeben und somit zu systematischen Fehlern in den Ergebnissen führen. Zum Einen ist zu beachten, dass es nicht möglich war mit der Heizapparatur die Temperatur des Röhrengehäuses konstant zu halten. Bei jeder Messung traten daher Schwankungen der Temperatur auf. Dies lag zudem auch an dem Heizfaden, welcher die Apparatur zusätzlich beheizte. Des Weiteren treten Fehler durch das grafische Auswerten des Versuches auf: das Zeichengerät hat eine eingeschränkte Genauigkeit, was zum Beispiel an dem wellenartigen Charakter aller Graphen zu sehen ist. Des Weiteren ist die Dicke des verwendeten Stiftes zu Beachten, da hier schon fast eine Dicke von 1mm (also ein Kästchen auf dem Millimeterpapier) vorliegt, was die Genauigkeit daher stark beeinträchtigt. Hinzu kommt außerdem die Genauigkeit mit der das menschliche Auge Werte aus solchen Grafiken ablesen kann. Das zu Anfang bestimmte Verhältnis $\frac{a}{\bar{w}}$ zwischen der mittleren freien Weglänge \bar{w} und dem Abstand a zwischen Kathode und Beschleunigungselektrode liegt im besten Fall zur Erstellung einer Franck-Hertz-Kurve zwischen 1000 und 4000. Dies gelang allerdings nur bei der zweiten Messung (bei 143°C) der Energieverteilung. Die Messungen der Energieverteilung verliefen erwartungsgemäß. Der Peak bei der ersten Messung ist gut ausgeprägt, was eine gute Abschätzung des Kontaktpotentials möglich macht. Das Verhältnis $\frac{a}{\bar{w}}$ ist hier um eine Faktor 1000 geringer als es zur Bestimmung einer Franck-Hertz-Kurve optimal wäre; dadurch regen weniger Elektronen die Quecksilberatome an, wodurch das Ergebnis weniger verfälscht wird. Anders ist es bei der gleichen Messung bei 143°C der Fall: hier liegt das erwähnte Verhältnis sehr gut im angesprochenen Bereich, weshalb viele Elektronen die Quecksilberatome anregen und zu dem starken Abfall der Anzahl Elektronen über einer Energie von 4eV führen. Durch die Aufnahme von fünf verschiedenen Franck-Hertz-Kurven konnte die für die Auswertung ausgewählt werden, welche die deutlichsten Extrema aufweist, was die grafische Auswertung hier etwas vereinfachte. Hier liegt das Verhältnis über dem optimalen Bereich, was wohl zu einer noch höheren Stoßwahrscheinlichkeit im Rohr führt. Hierdurch kommt es aber auch zu mehr elastischen Stößen, welche zu einer deutlichen Abflachung der Extrema führen. Dies wird besonders bei höher angelegten Spannungen in der Grafik deutlich. Der bestimmte Wert

$$E_{\text{Anr}} = (5.24 \pm 0.11) \text{eV}$$

weicht nur um 6.49% vom Literaturwert

$$E_{\text{Lit}_{\text{Anr}}} = 4.9 \text{eV}[2]$$

ab, was auf Grund der Fehlerquellen vertretbar ist. Die beiden Kontaktpotentiale $K_1 = 1.76 \text{V}$ und $K_2 = 0.46 \text{V}$, weichen um 282.61% voneinander ab. Die Ionisierungsenergie $E_{\text{ion},1} = 8.24 \text{eV}$ weicht um 26.67% und die Ionisierungsenergie $E_{\text{ion},2} = (9.54 \pm 0.11) \text{eV}$ um 10.45% vom Literaturwert

$$E_{\text{ion}} = 10.438\text{eV [3]}$$

ab. Dies lässt vermuten, dass die Messung des zweiten Kontaktpotentials besser ist. Insgesamt ist die starke Abweichung der beiden Kontaktpotentiale voneinander allerdings nur durch einen zufälligen Fehler zu erklären, da beide Versuchsteile gut verliefen. Die relativ geringe Abweichung der Ionisierungsenergie vom Literaturwert lässt auf eine gute Messung schließen, wobei hier die Problematik der grafischen Auswertung bei der Bestimmung der Asymptote besonders zum Tragen kommt.

Literatur

- [1] TU Dortmund. *V601 - Franck-Hertz-Versuch*. 2019.
- [2] HyperPhysics. *Franck-Hertz-Experiment*. Apr. 2019. URL: <http://hydrogen.physik.uni-wuppertal.de/hyperphysics/hyperphysics/hbase/FrHz.html>.
- [3] M. Stegemann. *Quecksilber*. Apr. 2019. URL: <http://www.periodensystem.info/elemente/quecksilber>.