

V601

Der Franck-Hertz-Versuch

Amelie Hater

amelie.hater@tu-dortmund.de

Ngoc Le

ngoc.le@tu-dortmund.de

Durchführung: 28.05.2024

Abgabe: 04.06.2024

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

| | |
|-------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 1 Zielsetzung | 3 |
| 2 Theorie | 3 |
| 2.1 Idealisierter Franck-Hertz-Versuch | 4 |
| 2.2 Störquellen des Franck-Hertz-Versuchs | 4 |
| 2.2.1 Kontaktpotential | 5 |
| 2.2.2 Energie-Spektrum der Elektronen | 5 |
| 2.2.3 Dampfdruck | 5 |
| 3 Durchführung | 6 |
| 3.1 Integrale Energieverteilung der beschleunigten Elektronen | 6 |
| 3.2 Franck-Hertz-Kurven | 6 |
| 4 Auswertung | 7 |
| 4.1 Ermittlung der mittleren freien Weglänge | 7 |
| 4.2 Differentielle Energieverteilung | 7 |
| 4.3 Franck-Hertz-Kurve und Anregungsenergie | 11 |
| 5 Diskussion | 13 |
| Literatur | 13 |

1 Zielsetzung

Das Ziel dieses Versuchs ist die Anregungsenergie von Quecksilber mithilfe einer Franck-Hertz-Röhre zu bestimmen. Hierfür werden verschiedene Franck-Hertz-Kurven bei unterschiedlichen Temperaturen aufgenommen. Zusätzlich wird die integrale Energieverteilung der beschleunigten Elektronen bestimmt.

2 Theorie

Bei diesem Versuch werden Elektronen mit einer bekannten Energie in Quecksilberdampf geschossen. Somit entstehen sowohl elastische als auch unelastische Stoßprozesse zwischen den Elektronen und den Hg-Atomen. Elektronen mit einer nicht zu hohen Energie sorgen für elastische Stöße. Dadurch verändert sich die Geschwindigkeit sowie die Richtung der Elektronen. Besitzen die Elektronen eine ausreichend hohe Energie, treten unelastische Stöße auf. Hierdurch werden die Hg-Atome von ihrem Grundzustand mit der Energie E_0 auf den ersten angeregten Zustand mit der Energie E_1 angeregt. Aus der Energiedifferenz zwischen der Energie der Elektronen vor und nach den Stößen wird die aufgenommene Energie der Hg-Atome

$$E_a = E_1 - E_0 = \frac{m_0 \cdot v_{\text{vor}}^2}{2} - \frac{m_0 \cdot v_{\text{nach}}^2}{2} \quad (1)$$

bestimmt. Hier entspricht m_0 die Masse eines Elektrons und v_{vor} sowie v_{nach} die Geschwindigkeiten des Elektrons vor und nach dem Stoßprozess. Nach dem Stoßprozess fällt das Hg-Atom mit einer Relaxationszeit $t \sim 10^{-8}$ s in seinen Grundzustand zurück. Währenddessen wird ein Lichtquant mit der Energie

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

emittiert, wobei h das Plancksche Wirkungsquantum und ν die Frequenz der Lichtquelle beschreibt.

2.1 Idealisierter Franck-Hertz-Versuch

Um die Anregungsenergie von Quecksilber zu bestimmen wird eine Franck-Hertz-Röhre verwendet, dessen schematischer Aufbau in der Abbildung (1) abgebildet ist. Hier befindet sich Quecksilber-Dampf in einem Glaskolben. Zusätzlich ist in dem Glaskolben ein Glühdraht, aus der, aufgrund des glühelektrischen Effekts, eine Elektronenwolke entsteht. Diese Elektronen werden durch eine Beschleunigerspannung U_B in Richtung der Beschleunigungsanode beschleunigt. Hinter der Beschleunigungsanode befindet sich eine Auffängerelektrode, auf der die Elektronen landen. Während der Beschleunigungsstrecke finden die Stoßprozesse zwischen den Elektronen und den Hg-Atomen statt. Die Energie der Elektronen nach den Stößen wird anhand der Gegenfeldmethode bestimmt. Die Auffängerelektrode bestitzt eine geringe Gegen- bzw. Bremsspannung U_A im Vergleich

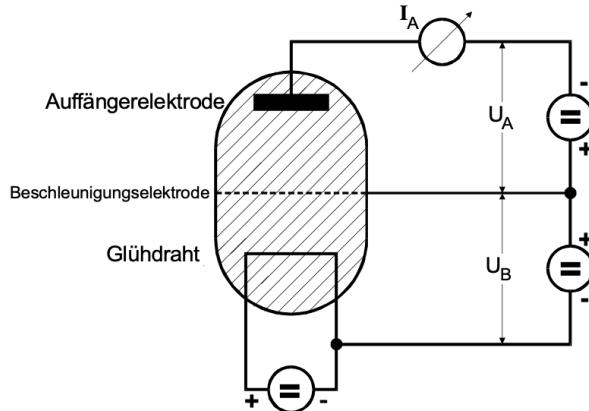


Abbildung 1: Schematischer Aufbau des Franck-Hertz-Experiments Q[1].

zur Beschleunigungsanode. Dadurch entsteht ein Bremsfeld, wogegen nur Elektronen durchgelangen, für welche die kinetische Energie

$$\frac{m_0}{2} v_z^2 \geq e_0 U_A \quad (3)$$

erfüllt. Die Elektronen, die diese Ungleichung nicht erfüllen, kehren zur Beschleunigungsanode zurück. Wird die Beschleunigerspannung kontinuierlich erhöht bis die Elektronenergie größer oder gleich der Energie E_a ist, werden die Hg-Atome angeregt. Dadurch besitzen die Elektronen wieder eine zu kleine Energie um gegen das Bremsfeld anzukommen. Demnach können die Elektronen erneut Energie aufnehmen, wodurch der Verlauf des Auffängerstroms I_A an der Auffängerelektrode im Idealfall die Franck-Hertz-Kurve in Abbildung (2) abbildet.

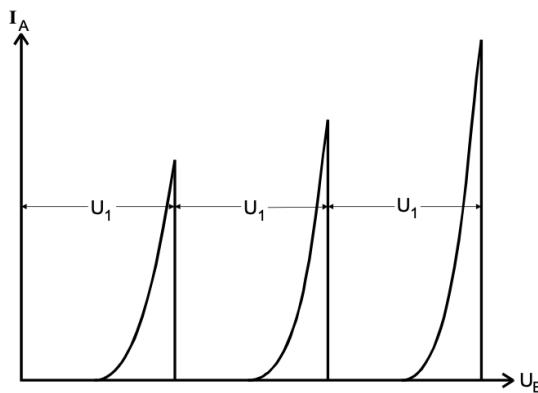


Abbildung 2: Idealisierte Franck-Hertz-Kurve Q[1].

2.2 Störquellen des Franck-Hertz-Versuchs

Die Kurve aus der Abbildung (2) lässt sich im Experiment allerdings nicht realisieren, da Nebeneffekte berücksichtigt werden müssen. Diese werden im Folgenden weiter erläutert.

2.2.1 Kontaktpotential

Bei der verwendeten Franck-Hertz-Röhre bestehen die Glüh- und Beschleunigerelektrode aus unterschiedlichen Materialien, damit bei bereits relativ niedrigen Temperaturen eine hohe Emissionsrate erzielt werden kann. Dadurch unterscheidet sich das Beschleunigungspotential von der angelegten Beschleunigungsspannung. Demnach lautet die Effektivspannung

$$U_{B,\text{eff}} = U_B - \underbrace{\frac{1}{e_0} (\Phi_B - \Phi_G)}_K, \quad (4)$$

wobei K das Kontaktpotential und Φ_B sowie Φ_G die Auftrittsarbeit der Beschleunigungsanode und des Glühdrahts ist.

2.2.2 Energie-Spektrum der Elektronen

Die Elektronen besitzen beim Austreten der Glühkathode nicht dieselbe Energie, da diese bereits in der Glühkathode ein Energie-Spektrum besitzen. Dadurch fällt der Auffängerstrom I_A nicht bei einer genau definierten Beschleunigerspannung ab, sondern die Frank-Hertz-Kurve ist an den Peaks breiter und abgeflachter.

2.2.3 Dampfdruck

Damit viele Stöße zwischen den Elektronen und den Hg-Atomen zu beobachten sind, muss die mittlere freie Weglänge \bar{w} der Atome klein gegenüber dem Abstand zwischen der Glühkathode und der Beschleunigungsanode sein. Diese Weglänge lässt sich über den Sättigungsdampfdruck

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

regulieren. Hier beschreibt T die Temperaturen in K und $p_{\text{sät}}$ ist in mbar. Aus der kinetischen Gastheorie, folgt

$$\bar{w} = \frac{0,0029}{p_{\text{sät}}}, \quad (6)$$

mit $[\bar{w}] = \text{cm}$. Somit existiert ein Dampfdruckbereich, für die der Franck-Hertz-Effekt optimal verläuft. Ist die Temperatur sehr hoch, dann treten viele elastische Stöße auf, wodurch das Hg-Atom nicht angeregt wird. Bei niedrigen Temperaturen ist die Stoßwahrscheinlichkeit zu klein, sodass ebenfalls keine Hg-Atome angeregt werden.

3 Durchführung

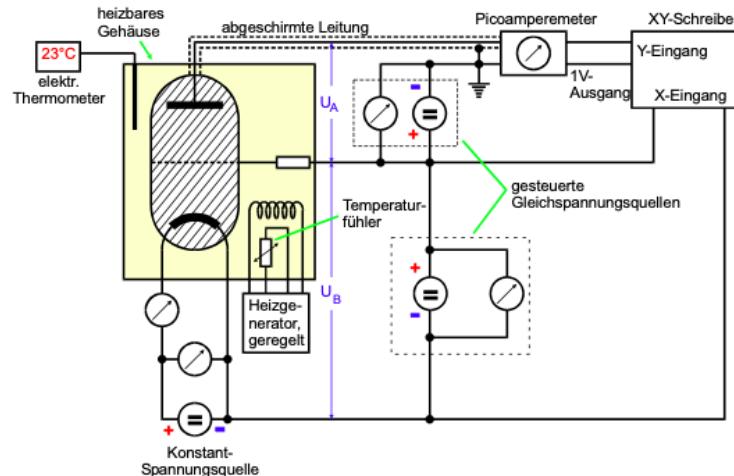


Abbildung 3: Schaltbild zur Aufnahme einer Franck-Hertz-Kurve Q[1].

Für beide Durchführungen wird der Versuchsaufbau in Abbildung (3) verwendet.

3.1 Integrale Energieverteilung der beschleunigten Elektronen

Im ersten Teil der Durchführung wird die integrale Energieverteilung der beschleunigten Elektronen bestimmt. Hierfür wird der Auffängerstrom I_A in Abhängigkeit von der Bremsspannung U_A gemessen, welche mithilfe des XY-Schreibers aufgezeichnet werden. Dabei wird die Beschleunigerspannung auf $U_B = 11\text{ V}$ eingestellt und wird nicht weiter verändert. Diese Messungen werden bei Zimmertemperatur und für eine Temperatur zwischen $T = 140 - 160\text{ }^\circ\text{C}$ durchgeführt.

3.2 Franck-Hertz-Kurven

Beim zweiten Teil des Versuchs wird je eine Franck-Hertz-Kurve für drei verschiedene Temperaturen mithilfe des XY-Schreibers aufgenommen. Hier werden der Auffängerstrom I_A in Abhängigkeit der Beschleunigerspannung U_B , im Bereich von $0 < U_B < 60\text{ V}$, gemessen. Währenddessen bleibt die Bremsspannung konstant bei $U_A = 1\text{ V}$. Für die Auswertung wird anschließend die Kurve ausgewählt, bei der die Maxima und Minima besonders gut ausgeprägt sind.

4 Auswertung

4.1 Ermittlung der mittleren freien Weglänge

Die mittlere freie Weglänge der Elektronen kann mithilfe von Formel (5) und (6) berechnet werden. Die dazu verwendeten Temperaturen T , bei denen die Kurven aufgenommen

werden, sind in Tabelle (1) zusammen mit den Ergebnissen aufgelistet. Außerdem wird das Verhältnis aus dem Abstand $a = 1 \text{ cm}$ zwischen Kathode und Elektrode und der mittleren freien Weglänge berechnet und in Tabelle (1) aufgelistet.

Tabelle 1: Mittlere freie Weglänge mit Verhältnis.

| T [K] | $\bar{\omega} [\text{m}]$ | $a/\bar{\omega}$ |
|---------|---------------------------|-------------------|
| 295, 75 | $6,59 \cdot 10^{-3}$ | 1,52 |
| 423, 15 | $6,01 \cdot 10^{-6}$ | $1,66 \cdot 10^3$ |
| 433, 15 | $4,13 \cdot 10^{-6}$ | $2,42 \cdot 10^3$ |
| 444, 15 | $2,79 \cdot 10^{-6}$ | $3,59 \cdot 10^3$ |
| 451, 15 | $2,19 \cdot 10^{-6}$ | $4,56 \cdot 10^3$ |
| 453, 15 | $2,05 \cdot 10^{-6}$ | $4,88 \cdot 10^3$ |

Das Verhältnis nimmt mit steigender Temperatur zu.

4.2 Differentielle Energieverteilung

Die zugrundeliegende Messkurve wird mithilfe eines XY-Schreibers aufgezeichnet. Die Messkurve, die bei einer Temperatur von $22,6^\circ\text{C}$ aufgenommen wird, ist in Abbildung (4) zu sehen. Die Messkurve, die bei 150°C aufgenommen wird, ist in Abbildung (5) zu sehen. Beide Kurven werden bei einer Beschleunigungsspannung von $U_B = 11 \text{ V}$ aufgenommen. Da die Daten nur graphisch vorliegen, müssen sie vom Papier abgelesen werden.

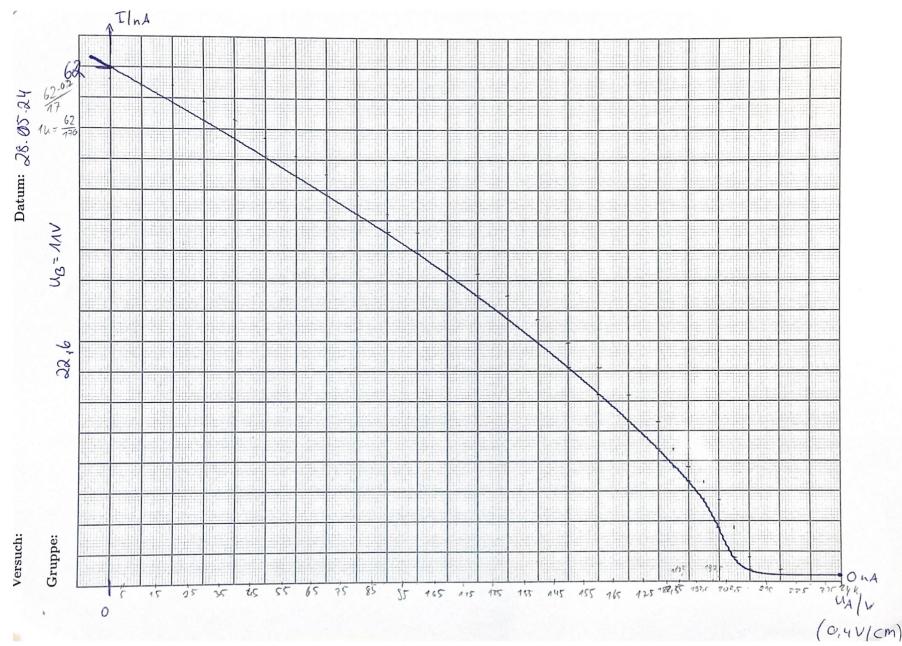


Abbildung 4: Strom-Spannungsmesskurve bei $T = 22,6 \text{ } ^\circ\text{C}$.

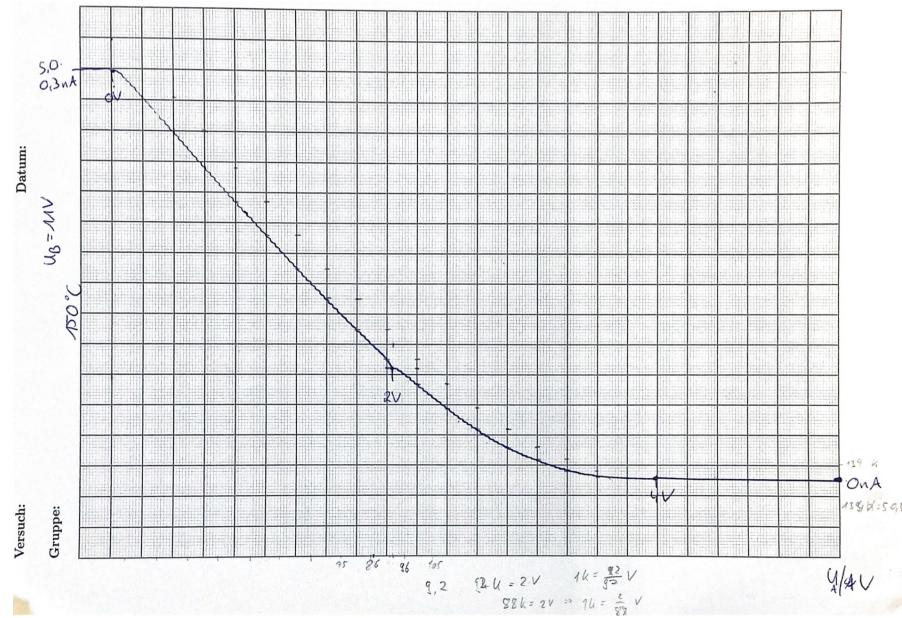


Abbildung 5: Strom-Spannungsmesskurve bei $T = 150 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Die errechnete Steigung und der zugehörige Spannungswert sind für die Kurve bei $22,6 \text{ } ^\circ\text{C}$ und für $150 \text{ } ^\circ\text{C}$ in Tabelle (2) vermerkt. Diese Werte für die Kurve von $22,6 \text{ } ^\circ\text{C}$ sind in Abbildung (6) dargestellt.

Tabelle 2: Steigung der Kurve bei 22,6 °C und 150 °C in Abhängigkeit von der Spannung.

| $U_{22,6}$ [V] | $I_{22,6}/U_{22,6}$ [A/V] | U_{150} [V] | I_{150}/U_{150} [A/V] |
|----------------|---------------------------|---------------|-------------------------|
| 0,2 | 5,45 | 0,11 | 0,46 |
| 0,6 | 4,54 | 0,33 | 0,57 |
| 1 | 5,45 | 0,54 | 0,62 |
| 1,4 | 5,45 | 0,76 | 0,57 |
| 1,8 | 5,45 | 0,98 | 0,57 |
| 2,2 | 5,45 | 1,20 | 0,57 |
| 2,6 | 6,36 | 1,41 | 0,51 |
| 3 | 5,45 | 1,63 | 0,51 |
| 3,4 | 5,45 | 1,87 | 0,56 |
| 3,8 | 6,36 | 2,18 | 0,31 |
| 4,2 | 6,36 | 2,39 | 0,39 |
| 4,6 | 6,36 | 2,61 | 0,34 |
| 5 | 7,27 | 2,84 | 0,30 |
| 5,4 | 6,36 | 3,07 | 0,20 |
| 5,8 | 7,27 | 3,30 | 0,20 |
| 6,2 | 8,18 | 3,52 | 0,10 |
| 6,6 | 8,18 | 3,75 | 0 |
| 7 | 8,18 | 3,98 | 0 |
| 7,3 | 10,91 | 4,20 | 0 |
| 7,5 | 9,09 | 4,43 | 0 |
| 7,7 | 10,91 | 4,66 | 0 |
| 7,9 | 16,36 | 4,89 | 0 |
| 8,1 | 18,18 | 5,11 | 0 |
| 8,3 | 7,27 | 5,34 | 0 |
| 8,6 | 1,82 | | |
| 9 | 0 | | |
| 9,4 | 0 | | |

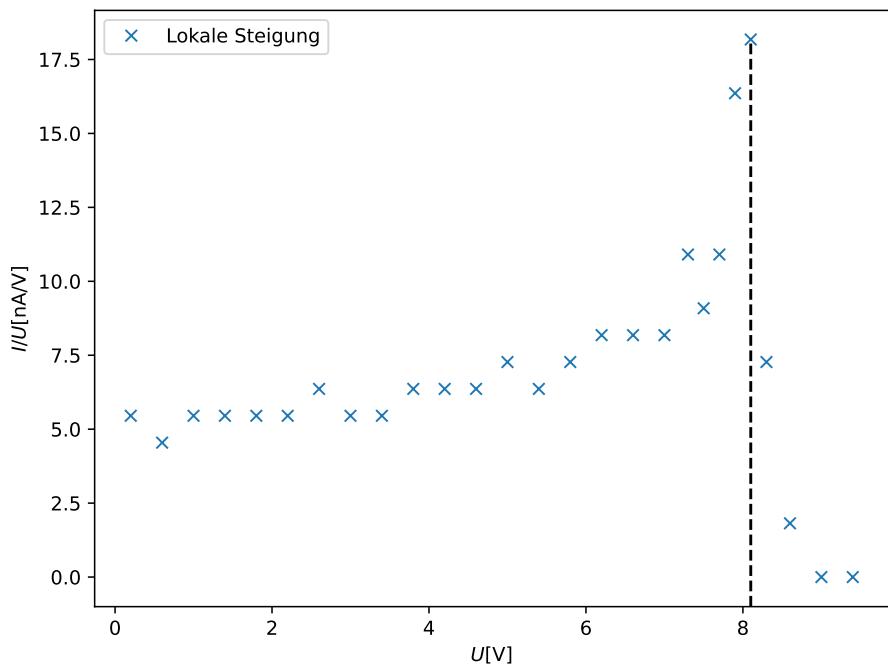


Abbildung 6: Steigung der Kurve in Abhangigkeit von der Spannung bei $22,6\text{ }^\circ\text{C}$.

Die Werte der Kurve bei $150\text{ }^\circ\text{C}$ sind in Abbildung (7) dargestellt.

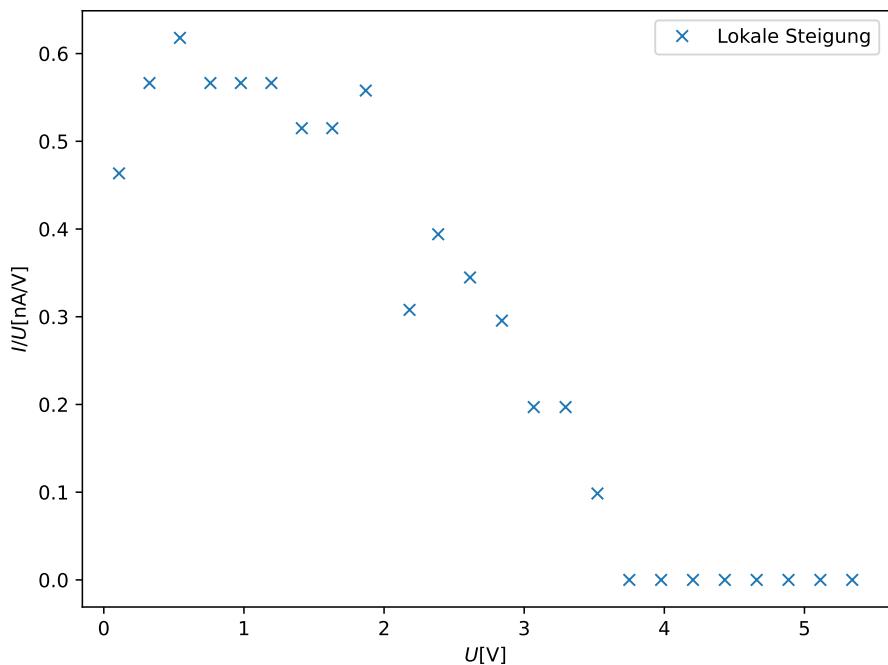


Abbildung 7: Steigung der Kurve in Abhangigkeit von der Spannung bei $150\text{ }^\circ\text{C}$.

Mithilfe des Spannungswertes der größten Steigung der Kurve bei 22,6 °C wird das Kontaktpotential berechnet. Dazu wird Formel (4) verwendet. Dies ergibt daher den Wert

$$U_K = 11 \text{ V} - 8,1 \text{ V} = 2,9 \text{ V}.$$

4.3 Franck-Hertz-Kurve und Anregungsenergie

Die Grundlage dieses Abschnitts der Auswertung sind Franck-Hertz-Kurven, die in Abbildung (8) zu sehen ist.

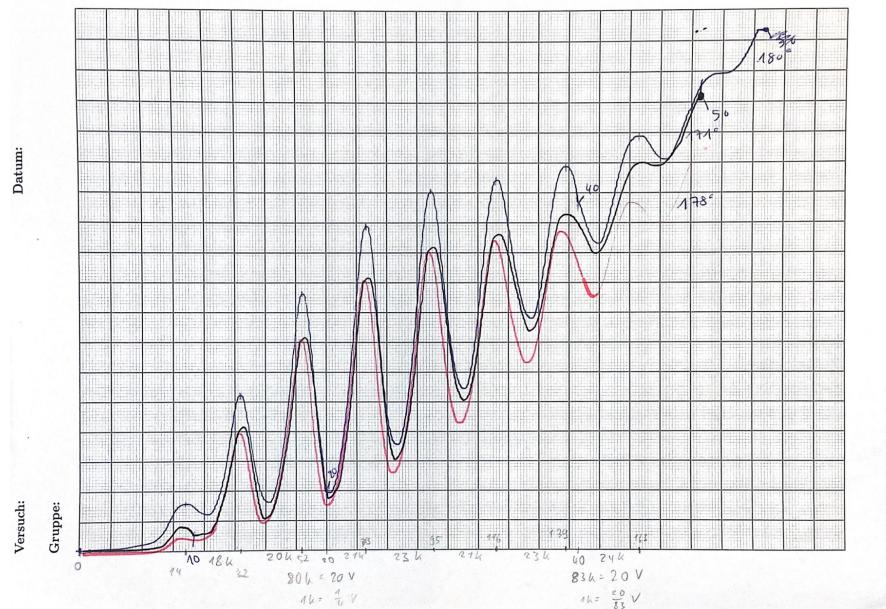


Tabelle 3: x-Position des N-ten Maximum.

| N-tes Maximum | x-Position des Maximum [V] |
|---------------|----------------------------|
| 1 | 3,5 |
| 2 | 8 |
| 3 | 13 |
| 4 | 17,59 |
| 5 | 22,89 |
| 6 | 27,95 |
| 7 | 33,49 |
| 8 | 39,27 |

Diese Werte sind in der Abbildung (9) zu sehen mit Ausgleichsgerade der Form $y = mx + n$. Die Steigung der Ausgleichsgerade ist der mittlere Abstand der Maxima.

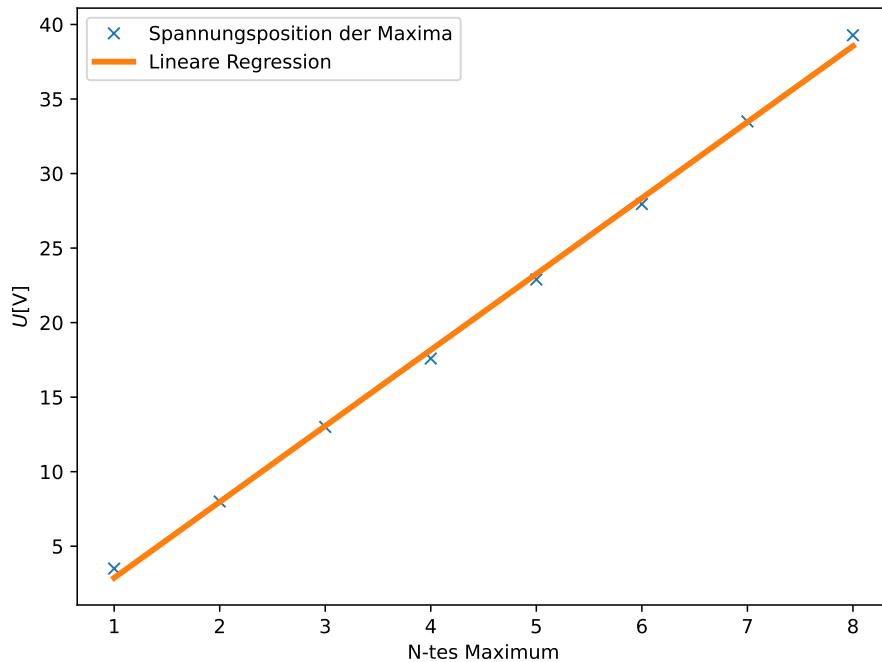


Abbildung 9: Maxima einer Franck-Hertz-Kurve.

Die berechneten Werte sind

$$m = (5,1 \pm 0,08) \text{ V}$$

$$n = (-2,2 \pm 0,4) \text{ V}.$$

Daher gilt für die mittlere Beschleunigungsspannung $(5,1 \pm 0,08)$ V. Aus dieser lässt sich die Wellenlänge durch

$$\lambda = \frac{h \cdot c}{U_B \cdot e}$$

bestimmen. Es ergibt sich ein Wert von $\lambda = 2,43 \cdot 10^{-7}$ m.

5 Diskussion

Die relative Abweichung der Experimentalwerte von den Theoriewerten wird durch die Formel

$$\Delta x = \left| \frac{x_{exp} - x_{theo}}{x_{theo}} \right|$$

bestimmt. Der Literaturwert der Anregungsenergie von Quecksilber ist $\Delta E_{theo} = 4,9$ eV. Daraus ergibt sich eine Beschleunigungsspannungsdifferenz zwischen Maxima $\Delta U_B = 4,9$ V. Die relative Abweichung vom Experimentalwert mit $U_B = (5,1 \pm 0,08)$ V ist 4,08 %. Die Abweichung kann dadurch zustande gekommen sein, dass die Achse des XY-Schreibers nicht linear ist, was zur Zeit der Durchführung des Experiments nicht bekannt war. Zusätzlich ist das Ablesen vom Millimeterpapier ebenfalls mit Unsicherheiten verknüpft. Dies macht die gesamte Auswertung unsicherer. Außerdem war es nicht möglich bei einer konstanten Temperatur aufzuzeichnen, wenn die Temperatur höher war als die Außentemperatur. Während der Messung sank die Temperatur teils um mehr als 10 °C. Alle Fehler zusammengenommen, ist es überraschend, dass die Abweichung nicht höher ausfällt.

Literatur

- [1] Unknown. *Der Franck-Hertz-Versuch*. TU Dortmund, Fakultät Physik. 2024.