

V 601

Der Franck-Hertz Versuch

Felix Symma

felix.symma@tu-dortmund.de

Joel Koch

joel.koch@tu-dortmund.de

Durchführung: 12.04.2022

Abgabe: 19.04.2022

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1 Zielsetzung	3
2 Theorie	3
2.1 Aufbau und Ablauf des Franck-Hertz Experimentes	3
2.2 Fehlerquellen und Störungen	5
3 Durchführung	7
4 Auswertung	8
4.1 Bestimmung der freien Weglänge	8
4.2 Integrale Energieverteilung	8
4.3 Interpretation der Franck-Hertz Kurven	10
5 Diskussion	12
Literatur	13

1 Zielsetzung

Im folgenden Versuch sollen die diskreten Energiewerte der Elektronenhülle des Hg-Atoms untersucht werden. Dazu wird die integrale Energieverteilung der beschleunigten Elektronen bei zwei unterschiedlichen Temperaturen untersucht. Anschließend werden für zwei weitere Temperaturen Franck-Hertz-Kurven aufgenommen.

2 Theorie

Zur Strukturaufklärung der Elektronenhüllen werden Elektronenstoßexperimente durchgeführt. Dazu werden Elektronen mit geeigneter Energie auf Atome geschossen. Es wird der dabei entstehende Energieverlust der Elektronen genutzt, Informationen über die Struktur zu erhalten.

2.1 Aufbau und Ablauf des Franck-Hertz Experimentes

Die Franck-Hertz Apparatur ist schematisch in der Abbildung 1 dargestellt.

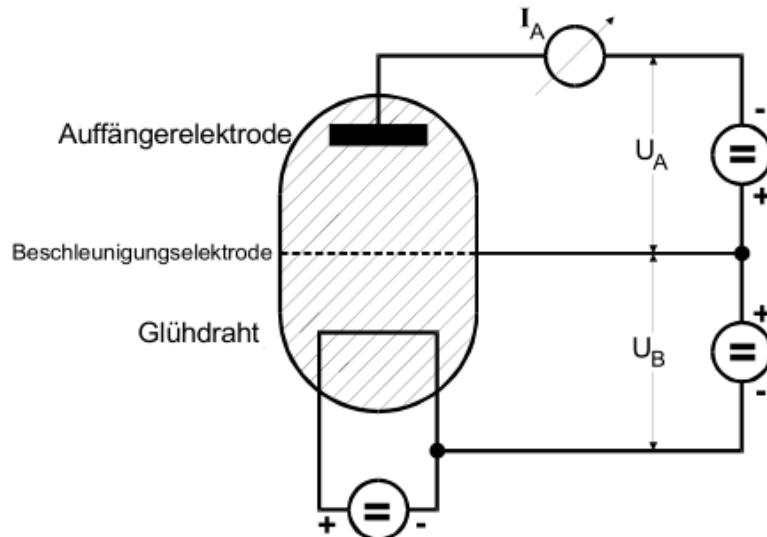


Abbildung 1: Schematische Darstellung des Franck-Hertz Versuches [1].

Der Versuch besteht aus einem evakuierten Gefäß, in dem sich die auf die Struktur der Elektronenhülle zu untersuchende Probe befindet. In dem folgenden Versuch wird Quecksilber verwendet. In der Glaskugel ist ein Draht angebracht, der aus einem hochschmelzenden Metall besteht. Dieser wird durch Gleichstrom erhitzt, weshalb infolge des glühelektrischen Effektes Elektronen austreten. Der Glühdraht wird außerdem noch mit einem Oxid eines Erdalkalimetalls bestrichen, was die Austrittsarbeit W herabsetzt. Die Austrittsarbeit ist dabei die für den Austritt von Elektronen benötigte Energie innerhalb

einer Zeiteinheit. Dadurch dass die Austrittsarbeit herabgesetzt wird, treten mehr Elektronen aus dem Draht. Gegenüber der Heizelektrode ist eine Beschleunigungsanode, also eine gitterförmige, positiv geladenen Elektrode mit der Spannung U_B . Sie sorgt dafür, dass die Elektronen beschleunigt werden. Nach durchlaufen der Strecke zwischen dem Glühdraht und der Beschleunigungsanode erhalten die Elektronen die kinetische Energie mit dem Betrag

$$\frac{1}{2}m_0^2v^2 = e_0U_B. \quad (1)$$

Dabei ist e_0 die Elementarladung, m_0 die Masse der Elektronen, v_{vor} die Geschwindigkeit vor der Beschleunigungsphase und U_B die Beschleunigungsspannung. Die Gleichung (1) ist allerdings nur gültig, sofern die Geschwindigkeit der Elektronen zu Beginn der Beschleunigung null ist.

Hinter der Beschleunigungsanode befindet sich die Auffängerelektrode, an der die auftreffenden Elektronen gemessen werden. Die Energiemessung geschieht über die Gegenfeldmethode, weshalb die Auffängerelektrode selbst auch eine geringe Gegenspannung U_A besitzt. Das dadurch entstehende Gegenfeld können nur die Elektronen durchlaufen, deren Geschwindigkeitskomponente in Feldrichtung v_z die folgende Ungleichung erfüllt

$$\frac{1}{2}m_0v_z^2 \geq e_0U_A. \quad (2)$$

Im Beschleunigungsraum befinden sich demnach Hg-Atome, mit denen die Elektronen zusammenstoßen. Wenn die Energie der Elektronen nicht groß genug ist, führen sie elastische Stöße durch. Die Energieabgabe ΔE an das Hg-Atom ist hier allerdings zu vernachlässigen, da der Massenunterschied zwischen den beiden Stoßpartnern zu hoch ist. Sie beträgt

$$\Delta E = \frac{4m_0M}{(m_0 + M)^2} \approx 1,1 \cdot 10^{-5} \text{ J}. \quad (3)$$

Die Richtungsänderungen der Elektronen ist allerdings für die Ergebnisse von großer Wichtigkeit. Darauf wird in Unterabschnitt 2.2 nochmal eingegangen. Die zweite Stoßmöglichkeit zwischen Elektronen und Hg-Atomen ist unelastisch. Wenn die Energie der Elektronen durch die Beschleunigung größer oder gleich groß der Energiedifferenz des ersten angeregten Zustandes und des Grundzustandes des Hg-Atoms ist, dann regt das Elektron dieses an. Das Elektron gibt genau die Energie $\Delta E = E_1 - E_0$ an die Atomhülle ab. Dabei bezeichnet E_1 die Energie des ersten Zustandes und E_0 die des Grundzustandes. Das Hg-Atom ist nun in einem angeregten Zustand. Beim Übergang zurück in den Grundzustand emittiert es ein Lichtquant, also ein Photon, mit der Energie

$$hf = E_1 - E_0. \quad (4)$$

Die Frequenz wird mit f bezeichnet und h ist hierbei das Planck'sche Wirkungsquantum. Wird die Beschleunigungsspannung U_B kontinuierlich erhöht, treten auch mehr Stöße auf und die Elektronen besitzen nicht mehr genügend Energie, um gegen das Bremsfeld

anzukommen. Deshalb verringert sich der Auffängerstrom I_A über den zeitlichen Verlauf gesehen immer wieder und es ergibt sich der Kurvenverlauf, der aus Abbildung 2 abzulesen ist. Die Abstände zwischen den einzelnen Peaks U_n ist über die folgende Relation zu berechnen.

$$U_n = \frac{1}{e_0} (E_n - U_{n-1}). \quad (5)$$

Dabei bezeichnet U_n den Abstand zweier aufeinander folgender Maxima und analog dazu E_n und E_{n-1} die Anregungspotentiale der Elektronenhülle.

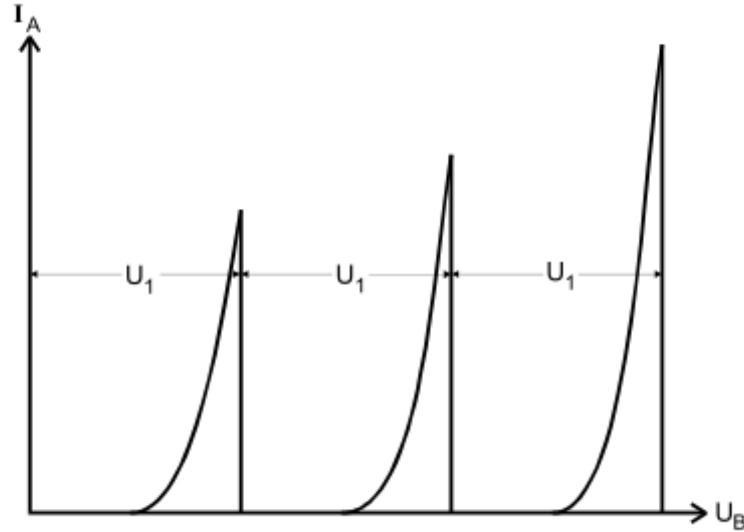


Abbildung 2: Kurvenverlauf des Auffängerstromes I_A gegen die Bremsspannung U_B [1].

2.2 Fehlerquellen und Störungen

Die Ergebnisse aus dem Versuch werden allerdings nicht die ideale Franck-Hertz Kurve ergeben, wie sie in Abbildung 2 abgebildet ist. Die Gründe für mögliche Störungen und erwartbare Fehlerquellen werden im Folgenden dargestellt.

Der erste Grund ist auf den Einfluss des Kontaktspotentials zurückzuführen. Das Beschleunigungspotential zwischen dem Glühdraht und der Beschleunigungsanode ist von der von außen angelegten Spannung verschieden, da die Elektroden aus unterschiedlichen Materialien bestehen. Durch die unterschiedlichen Materialien haben die Elektroden auch unterschiedliche Austrittsarbeiten für die Elektronen und das tatsächliche Beschleunigungspotential $U_{B, eff}$ ist definiert zu

$$U_{B, eff} = U_B - \frac{1}{e_0} (\phi_B - \phi_G). \quad (6)$$

Wobei der Ausdruck

$$K = \frac{1}{e_0}(\phi_B - \phi_G) \quad (7)$$

das Kontaktpotential ist, ϕ_G die Austrittsarbeit aus dem Glühdraht und ϕ_B die Austrittsarbeit aus der Beschleunigungselektrode ist. Das Potentialgefälle ist außerdem durch die Abbildung 3 verbildlicht.

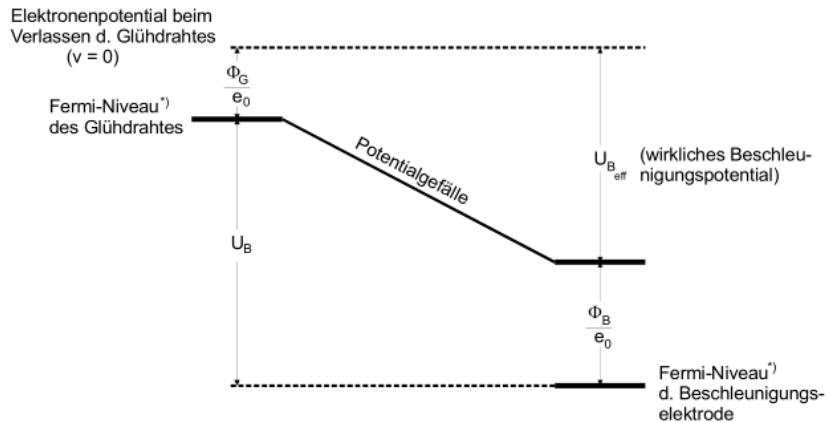


Abbildung 3: Die Potentialverhältnisse zwischen dem Glühdraht und der Beschleunigungsanode [1].

Der zweite Grund für die Abweichungen zu der idealen Kurve ist das Energiespektrum der Elektronen. Beim Austreten der Elektronen aus dem Glühdraht durch den glüh-elektrischen Effekt haben die Elektronen nicht alle die gleiche Anfangsgeschwindigkeit. Nach der Beschleunigungsphase haben sie somit eine Energieverteilung, die bei $U_{B, \text{eff}}$ beginnt und kontinuierlich steigt. Somit setzen die unelastischen Stöße nicht bei einer genau definierten Beschleunigungsspannung ein und sind stattdessen über einen gewissen Bereich verteilt. Die Kurve fällt deshalb nach einem Maximum nicht auf den Wert null herab, sondern sinkt auf ein gewisses Stromminimum herab.

Außerdem ist der Einfluss der elastischen Zusammenstöße zwischen Elektronen und Atomen zu nennen. Diese führen, wie bereits erwähnt, zwar nicht zu merklichen Energieabnahmen, jedoch ändern sie die Richtung der Elektronen beträchtlich. Finden diese im Raum zwischen Kathode und Beschleunigungsanode statt, dann tragen sie nicht wesentlich zur Franck-Hertz Kurve bei. Im Raumbereich zwischen der Beschleunigungs- und der Auffängerelektrode führen sie dazu, dass die Verteilung der z-Komponente der Geschwindigkeiten und somit die Franck-Hertz Kurve abflacht und verbreitert.

Da für die Beobachtung der Kurve Zusammenstöße zwischen Elektronen und Hg-Atomen notwendig sind, nimmt der Dampfdruck des zu untersuchenden Stoffes Einfluss auf eben-diese Kurve. Es wird die mittlere freie Weglänge \bar{w} der Atome klein gegen den Abstand a zwischen Kathode und Beschleunigungselektrode gewählt und somit die Wahrscheinlichkeit der Zusammenstöße erhöht. Die Weglänge \bar{w} kann über den Druck $p_{\text{sät}}$ in der

Glasglocke genau eingestellt werden und es folgt mit

$$\bar{w} [\text{cm}] = \frac{0,0029}{p_{\text{sät}}} [\text{mbar}] \quad (8)$$

ein Zusammenhang zwischen dem Sättigungsdampfdruck $p_{\text{sät}}$ und der Temperatur T

$$p_{\text{sät}}(T) = 5,5 \cdot 10^7 e^{-\frac{6876}{T}}. \quad (9)$$

Es muss \bar{w} etwa um 1000 bis 4000 mal kleiner eingestellt werden, als a . In der verwendeten Apparatur beträgt a etwa 1 cm.

3 Durchführung

Der Versuch wird nach Abbildung 4 aufgebaut. Um die Frank-Hertz Kurven aufzuzeichnen wird ein XY-Schreiber verwendet. Die Temperaturregelung erfolgt über ein separates Heizergerät.

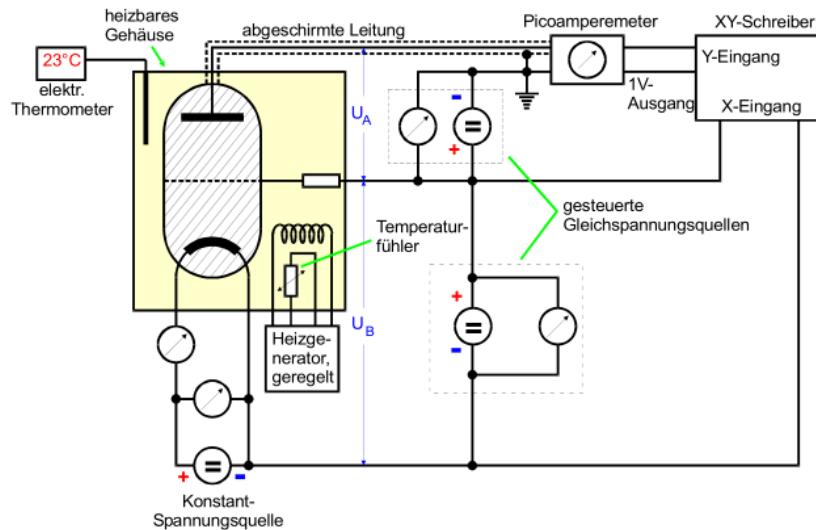


Abbildung 4: Schaltbild des im Versuch verwendeten Aufbaus [1].

Es wird zu Anfang die integrale Energieverteilung der Elektronen bestimmt. Dazu wird die Beschleunigungsspannung U_B auf einen konstanten Wert von 11 V eingestellt und der Auffängerstrom in Abhängigkeit von der Bremsspannung, die in einem Bereich von 0 V bis 10 V aufgezeichnet wird, gemessen. Die integrale Energieverteilung wird einmal bei Raumtemperatur und zweimal bei erhöhter Temperatur in einem Bereich von 140 °C bis 160 °C gemessen.

In einem zweiten Durchführungsschritt werden zwei Franck-Hertz Kurven in einem Temperaturbereich von 160 °C bis 200 °C bei einer konstanten Bremsspannung U_A von 1 V in Abhängigkeit von der Beschleunigungsspannung von 0 V bis 60 V gemessen. Für die Auswertung wird diejenige Kurve verwendet, die am geeignetsten ist, also die Maxima und Minima am ausgeprägtesten sind.

4 Auswertung

4.1 Bestimmung der freien Weglänge

Zunächst werden sowohl die Sättigungsdampfdrücke $p_{\text{sätt}}$ aus Gleichung 9, als auch die mittleren Weglängen der Elektronen \bar{w} aus Gleichung 8 für die verschiedenen Temperaturen, bei denen die Versuche durchgeführt werden, bestimmt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 1 angegeben.

Tabelle 1: Sättigungsdampfdruck, mittlere freie Weglänge und der zusammen mit a resultierende Faktor.

T/K	$p_{\text{sät}}/\text{m bar}$	\bar{w}/cm	Faktor $\frac{a}{\bar{w}}$
300	0,006114	0,4743212	2,1083
420	4,2692	0,0006793	1472,10
440	8,9851	0,0003227	3098,85
460	17,7257	0,0001636	6112,47

Der Abstand zwischen Kathode und Beschleunigungselektrode beträgt bei der verwendeten Apparatur etwa 1 cm. Daraus folgt, dass die mittlere Weglänge im Mikrometerbereich liegen sollte. Es können demnach gute Franck-Hertz-Kurven bei Temperaturen von 400 K bis 450 K aufgezeichnet werden.

4.2 Integrale Energieverteilung

Wie bereits in der Durchführung erläutert wird eine feste Beschleunigungsspannung von $U_b = 11 \text{ V}$ eingestellt und der Auffängerstrom gemessen. Um nun die integrale Energieverteilung bestimmen zu können, müssen mehrere Spannungswerte U_a gegen den dazugehörigen Wert

$$\Delta I_a := I_a(U_a) - I_a(U_a + \Delta U_a) \quad (10)$$

aufgetragen werden. Dieser Zusammenhang beschreibt nach Gleichung 1 die Energieverteilung. Eine hohe Änderung von I_a entspricht einer hohen Anzahl von Elektronen, die eben diese kinetische Energie besitzen und nun durch die Bremsspannung aufgehalten werden.

Die Messungen wurden einmal bei Raumtemperatur und einmal bei $T = 423,16 \text{ K}$ durchgeführt. Die Ergebnisse sind für Raumtemperatur in Abbildung 5 und für $T = 423,16 \text{ K}$ in Abbildung 6 dargestellt.

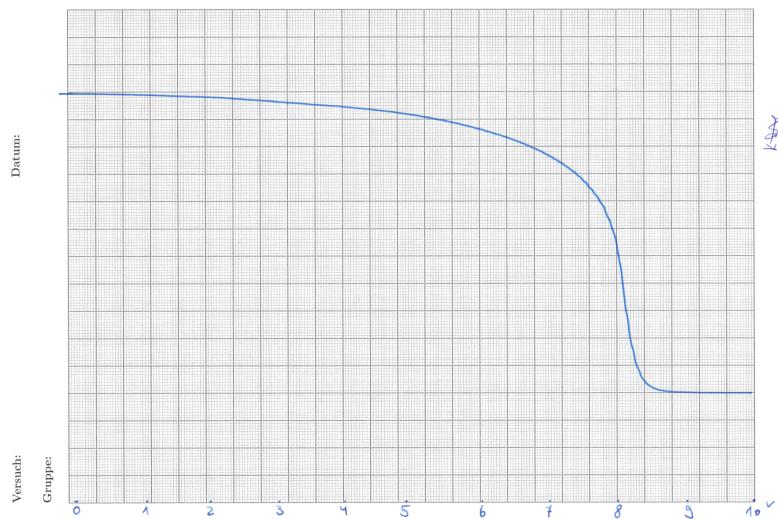


Abbildung 5: Energieverteilungsmessung bei Raumtemperatur.

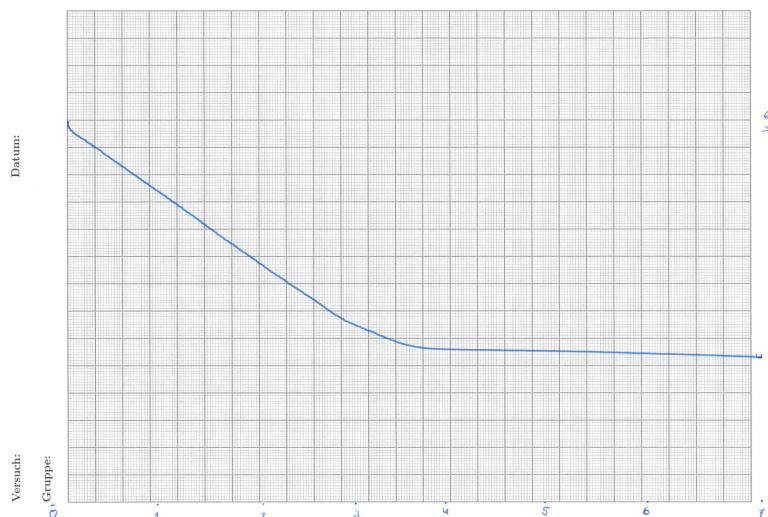


Abbildung 6: Energieverteilungsmessung bei $T = 423,16\text{ K}$.

Der Graph der Differenz $I_A(U_A + \Delta U_A) - I_A(U_A)$ ist in Abbildung 7 zu sehen.

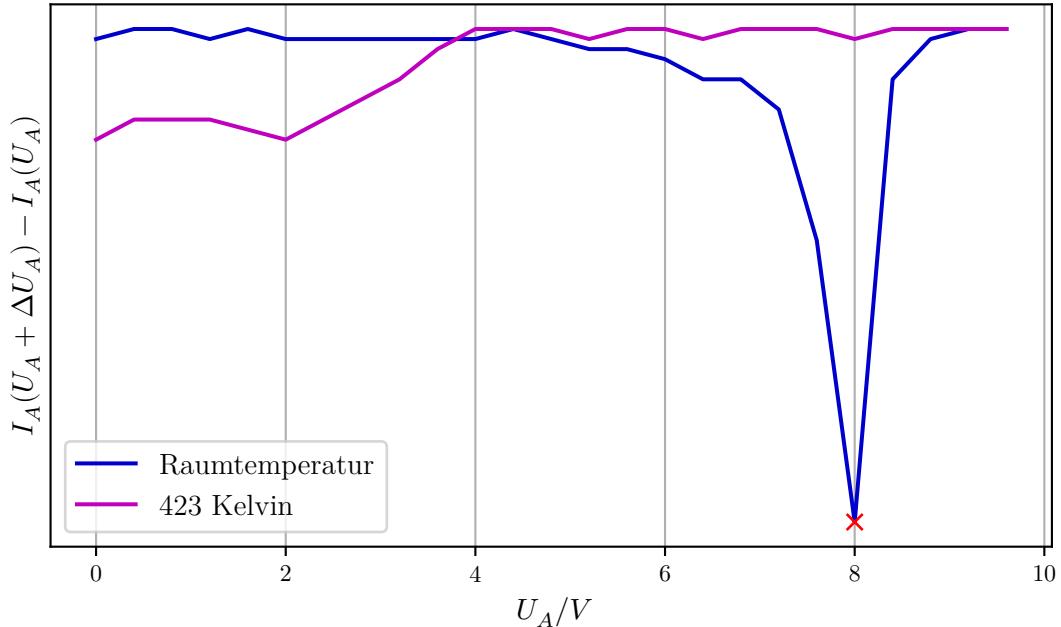


Abbildung 7: Differenz $I_A(U_A + \Delta U_A) - I_A(U_A)$ gegen die Spannung U_A .

An den Differenzen bei Raumtemperatur kann nun das Minimum abgelesen werden. Es liegt bei 8V und ist bereits rot markiert. Mit Hilfe dieses Minimums, dass $U_{B,\text{eff}}$ aus Gleichung 6 entspricht, kann jetzt zusammen mit der eingestellten Beschleunigungsspannung $U_B = 11\text{V}$ und Gleichung 7 das Kontaktpotential berechnet werden. Es hat den Wert

$$K = 3\text{V}.$$

4.3 Interpretation der Franck-Hertz Kurven

Die Franck-Hertz-Kurve bei $T = 443,16\text{K}$ ist in Abbildung 8 und die bei $T = 463,16\text{K}$ in Abbildung 9 aufgezeichnet.

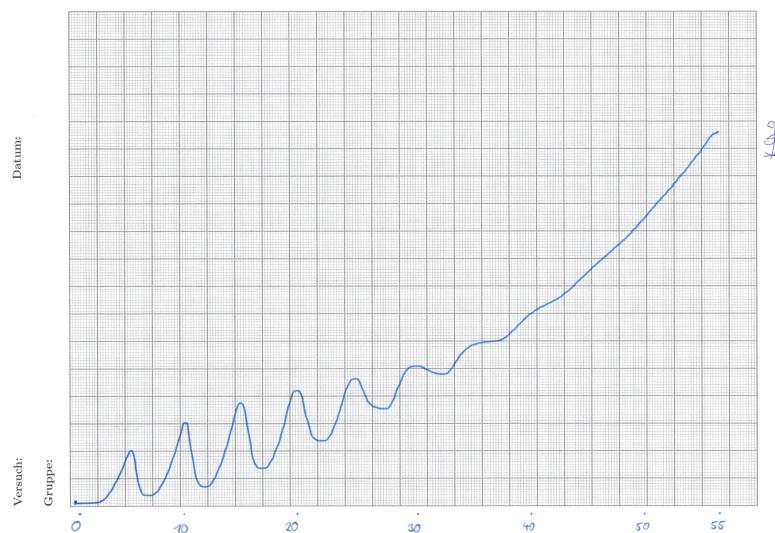


Abbildung 8: Franck-Hertz-Kurve bei 443,16 K.

Die ablesbaren Maxima der Franck-Hertz-Kurve bei $T = 443,16 \text{ K}$ befinden sich bei

$$\begin{aligned} U_1 &= 4,25 \text{ V}, \\ U_2 &= 8,97 \text{ V}, \\ U_3 &= 13,69 \text{ V}, \\ U_4 &= 18,64 \text{ V}, \\ U_5 &= 23,61 \text{ V}. \end{aligned}$$

Daraus folgt als gemittelter Abstand der Maxima

$$\Delta U = (4,84 \pm 0,12) \text{ V}.$$

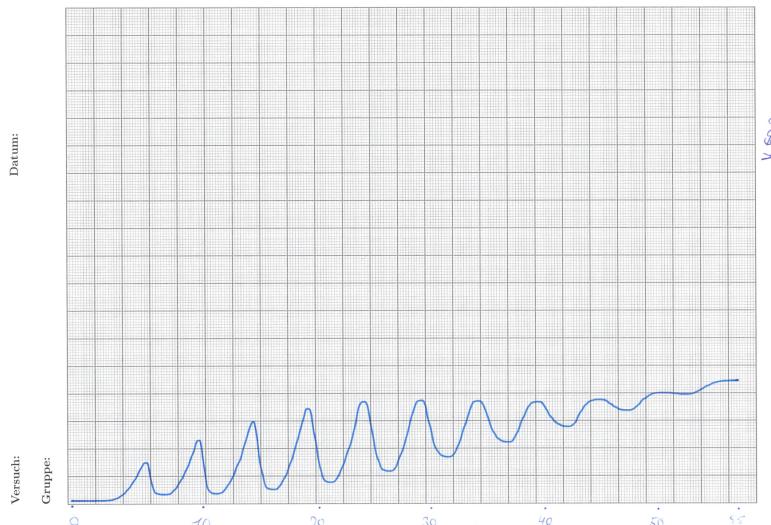


Abbildung 9: Franck-Hertz-Kurve bei 463,16 K.

Die ablesbaren Maxima der Franck-Hertz-Kurve bei $T = 463,16 \text{ K}$ befinden sich bei

$$\begin{aligned}U_1 &= 6,34 \text{ V}, \\U_2 &= 10,98 \text{ V}, \\U_3 &= 15,85 \text{ V}, \\U_4 &= 20,73 \text{ V}, \\U_5 &= 25,61 \text{ V}, \\U_6 &= 30,73 \text{ V}.\end{aligned}$$

Daraus folgt als gemittelte Abstand der Maxima

$$\Delta U = (4,88 \pm 0,15) \text{ V}.$$

Es ergibt sich als aus beiden Messungen gemittelter Wert

$$\Delta U = (4,86 \pm 0,14) \text{ V}.$$

Nach Gleichung 4 beträgt die Wellenlänge λ der emittierten Strahlung somit

$$\lambda = (255 \pm 4) \text{ nm}.$$

5 Diskussion

Zusammenfassen kann gesagt werden, dass sämtliche Messungen erfolgreich verlaufen sind und sich die Ergebnisse größtenteils mit den Erwartungen decken.

Die Abstände der Maxima bei den Franck-Hertz-Kurven wurden für die Kurve bei

$T = 443,16\text{ K}$ als $(4,84 \pm 0,12)\text{ V}$ und für die Kurve bei $463,16\text{ K}$ als $(4,88 \pm 0,15)\text{ V}$ gemessen. Die Abweichung zum Literaturwert von $4,9\text{ V}$ beträgt somit für die Kurve bei $T = 443,16\text{ K}$ $1,22\%$ und für die bei $T = 463,16\text{ K}$ $0,41\%$.

Bei allen Messung ist anzumerken, dass die Messung der Temperatur wohl sehr ungenau ausgefallen ist. Nach Erhöhungen der Heizleistung, zeigte der Temperaturmesser zum Beispiel teils niedrigere Temperaturen an. Darüber hinaus schwankte die gemessene Temperatur auch bei konstanter Heizleistung teils stark. Ursache hierfür könnten Ungenauigkeiten der verwendeten Apparaturen sein, die auf Bauweise und Alter dieser zurückzuführen sind. Außerdem wurden sämtliche Messungen zunächst bei geöffnetem Fenster durchgeführt. Dieser Umstand wurde allerdings während der Versuchsdurchführung korrigiert, was weitere Inkonsistenzen mit sich gebracht haben könnte.

Des Weiteren könnten durch das Auswerten der vom XY-Schreiber gefertigten Kurven weitere Ungenauigkeiten aufgetreten sein. Vor allem das nachträgliche Skalieren der Kurven erwies sich als schwierig, da der XY-Schreiber nach dem Zurückregeln der Spannung teilweise weit vom ursprünglichen Startpunkt entfernt war. Es mussten somit bei der Auswertung Mittelwerte der Abstände in der Skalierung gebildet werden, was zur Folge hatte, dass die angegeben Werte für Maxima teilweise augenscheinlich nicht mit der Skalierung übereinstimmen.

Literatur

- [1] *Der Franck-Hertz-Versuch*. TU Dortmund, Fakultät Physik. 2022.