

v601

Franck-Hertz Versuch

Justus Weber

justus.weber@tu-dortmund.de

Guy Lochny

guy.lochny@tu-dortmund.de

Durchführung: 22.04.2025

Abgabe: 29.04.2025

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1 Zielsetzung	3
2 Theorie	3
2.1 Idealisierter Franck-Hertz Versuch	3
2.2 Einflüsse/Störquellen beim Versuch	5
2.2.1 Kontaktpotential	5
2.2.2 Energiespektrum der Elektronen	6
2.2.3 Dampfdruck	6
2.3 Fehlerrechnung	6
3 Durchführung	7
4 Auswertung	8
4.1 Mittlere freie Weglänge	8
4.2 Kontaktpotential	8
4.3 Franck-Hertz Kurven	12
5 Diskussion	14
5.1 Mittlere freie Weglänge	14
5.2 Franck-Hertz Kurven	15
Literatur	15

1 Zielsetzung

In diesem Versuch wird mithilfe einer Franck-Hertz Röhre die Anregungsenergie von Quecksilber bestimmt. Dazu werden Franck-Hertz Kurven bei unterschiedlichen Temperaturen aufgenommen. Außerdem wird die Energieverteilung der Elektronen bestimmt.

2 Theorie

Der Franck-Hertz Versuch zählt zu den Elektronenstoßexperimenten, mithilfe dessen die Struktur von Elektronenhüllen untersucht werden kann. Für dieses Experiment wird eine evakuierte Röhre mit Hg-Dampf verwendet. In diesem soll es zu sowohl elastischen als auch inelastischen Stößen zwischen Elektronen und den Atomen des Hg-Dampfes kommen. Bei diesen Stößen kommt es zu Energieunterschieden; Treffen die Elektronen auf ein Atom, kommt es ab einer bestimmten Energie zu dem inelastischen Stoß, wobei die Elektronen diskrete Energie verlieren und an das Atom abgeben. Dieses ändert folglich sein Energieniveau. Diese Energiedifferenz (vor Stoß und nach Stoß) lässt sich folgendermaßen kalkulieren:

$$\Delta E = E_1 - E_0 \quad (1)$$

$$= \frac{1}{2}m_0v_{vor}^2 - \frac{1}{2}m_0v_{nach}^2. \quad (2)$$

m_0 sei die Ruhemasse des Elektrons. Die Energien werden mithilfe einer Gegenfeldmethode bestimmt, welche im folgenden noch erläutert wird. Die Atome verweilen jedoch nicht in diesem angeregten Zustand. Stattdessen geben sie die gewonnene Energie in Form von emittierten Lichtquanten ab. Die Wellenlänge λ dieses Lichts beträgt

$$\lambda = \frac{ch}{\Delta E}. \quad (3)$$

2.1 Idealisierter Franck-Hertz Versuch

Der schematische Aufbau des Franck-Hertz Versuches befindet sich in Abbildung 2.

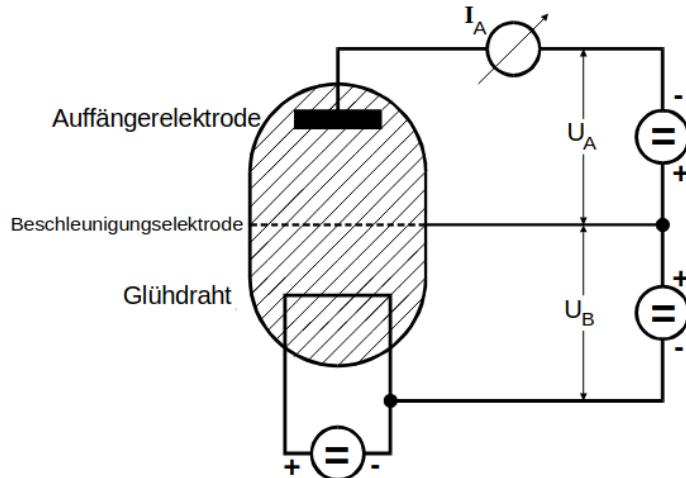


Abbildung 1: Aufbau mit Elementen. [2]

In der Röhre befindet sich das erwähnte Quecksilber Gas, welches teilweise spontan verdampft bis sich ein umgebungstemperaturabhängiger Gleichgewichtsdampfdruck einstellt. Folglich lässt sich durch die Umgebungstemperatur die Dampfdichte kontrollieren. Jenes ist wichtig für die Stoßwahrscheinlichkeit, je höher der Druck, desto eher stoßen die Elektronen mit den Atomen zusammen. Bei zu hohem Druck wiederum würden die Atome gebremst. Der Glühdraht sendet durch den glühelektrischen Effekt die Elektronen aus, welche diesen umgeben. Die Elektrode in der Mitte der Röhre ist mit einer positiven Gleichspannung U_B versehen, sie hat den Zweck, die Elektronen zu beschleunigen. Auf ihrem Beschleunigungsweg beläuft sich die kinetische Energie der Elektronen betragsmäßig auf

$$E_1 = E_{\text{Beschleunigung}} \quad (4)$$

$$\Leftrightarrow \frac{1}{2}m_0v_{\text{vor}}^2 = e_0U_B. \quad (5)$$

Am Ende befindet sich die Auffängerelektrode, an welcher der Strom I_A liegt. Dieser ist der Auffängerstrom, welcher alle ankommenen Elektronen detektiert. Zusätzlich befindet sich hier eine dezente Bremsspannung U_A , welche die Signalqualität verbessern soll, indem sie energiereiche Elektronen durchlässt. Dementsprechend wird die anschließende Darstellung der Anregungsenergie verbessert. Mathematisch festgehalten schaffen es nur Elektronen an die Anode, welche die Ungleichung

$$E_{\text{Flucht}} \geq E_A \quad (6)$$

$$\Leftrightarrow \frac{1}{2}m_0v_z^2 \geq e_0U_A \quad (7)$$

erfüllen. Für die Feststellung, wann das Hg-Atom angeregt wurde, wird U_B langsam erhöht. Sobald $U_B > U_A$, wächst der Elektronenstrom rasant an. Wird die Elektronenenergie

ΔE überschritten, kommt es zu inelastischen Stößen, wobei die Elektronen all ihre Energie bei Stoß übertragen und die Auffängerelektrode nicht mehr erreichen, sodass der Auffängerstrom sinkt. U_B wird weiter erhöht, damit die Elektronen wieder genügend Energie verfügen um bei der Anode anzulangen. Bei erneutem Erreichen der Energie von ΔE kommt es zu inelastischen Stößen und I_A sinkt wie zuvor. Jenes Verfahren setzt sich in U_1 -periodischem Abstand fort. Für die Distanz zwischen den Maxima gilt der Zusammenhang

$$U_1 = \frac{1}{e_0} \Delta E. \quad (8)$$

Jedoch unterliegt der Versuch einigen unvermeidbaren Einflussfaktoren, welche im folgenden Kapitel ausgeführt werden.

2.2 Einflüsse/Störquellen beim Versuch

2.2.1 Kontaktpotential

Aufgrund unterschiedlicher Materialien der Glühkathode und Beschleunigungselektrode liegt eine Potentialdifferenz vor, welche die effektive Beschleunigungsspannung verändert. Um ein großes Maß an emittierten Elektronen zu erlangen, wird für den Glühdraht ein Material gewählt, dessen Austrittsarbeit viel geringer ist als die der Beschleunigungselektrode, also: $W_G < W_B$. Das dabei entstehende Potentialgefälle verursacht eine Verschiebung der Franck-Hertz Kurve um das Kontaktpotential K, eine Veranschaulichung liegt in Abbildung 2 vor.

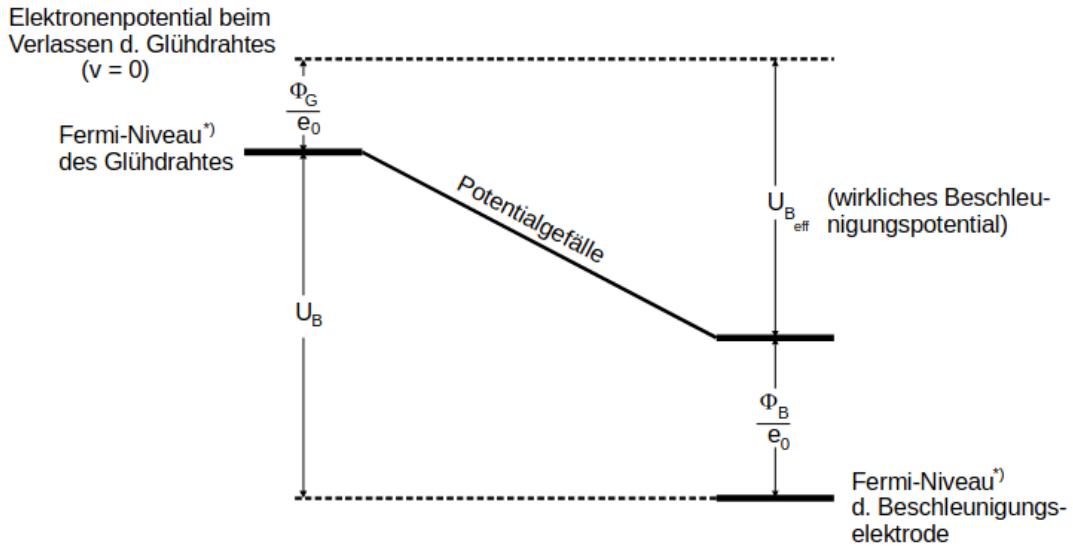


Abbildung 2: Potentialunterschiede. [2]

Die Spannung, welche sich letztendlich ergibt, besteht aus der Beschleunigungsspannung

gund dem Kontaktpotential.

$$U_{B,eff} = U_B - K \quad (9)$$

$$= U_B - \frac{W_B - W_G}{e_0} \quad (10)$$

2.2.2 Energiespektrum der Elektronen

Die Elektronen sind nach Passieren des Beschleunigungsraums nicht monoenergetisch, sie werden mit einem kontinuierlichen Spektrum an Energie an der Elektrode ausgesendet. Als Folge sinkt I_A nicht auf Null nach Erreichen der Peaks, es stellt sich ein Minimum ein.

2.2.3 Dampfdruck

Ein weiterer Aspekt ist der Einfluss durch Druck. Der Sättigungsdruck hängt von der Temperatur T ab. Folglich verändert sich die Stoßdistanz der Teilchen \bar{w} bei Variation der Temperatur, da der Druck dazu führt, dass mehr (bei hoher Temperatur) elastische Kollisionen der Elektronen mit den Hg-Atomen stattfinden. Wenn nun die Temperatur zu hoch oder zu klein ist, treten dementsprechend viele elastische Stöße auf, wodurch das Hg-Atom nicht angeregt wird, da die Elektronen keine Zeit haben genügend Energie aufzunehmen oder sie fliegen unbremst durch das Feld, da es zu keinen Kollisionen kommt. Es gilt als Zusammenhang

$$\bar{w} = 5.5 \cdot 10^7 \exp\left(-\frac{6876}{T}\right). \quad (11)$$

Dabei sei die mittlere freie Weglänge angegeben in cm.

2.3 Fehlerrechnung

Die gemessenen Werte unterliegen Messunsicherheiten und werden demnach im Folgenden nicht als fehlerfrei angesehen. Die Fehler entstehen bei der Bildung der Mittelwerte durch den Fehler des Mittelwerts und bei der Regressionsrechnung sowie der Fehlerfortpflanzung durch Python. Der Fehler des Mittelwerts ist gegeben durch

$$\begin{aligned} \Delta \bar{x} &= \sqrt{\bar{x}^2 - \bar{x}^2} \\ &= \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} / \sqrt{N}. \end{aligned} \quad (12)$$

Um Fehler einzubeziehen, wird die Gauß'sche Fehlerfortpflanzung verwendet:

$$\Delta f = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 \cdot (\Delta x)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 \cdot (\Delta y)^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial z}\right)^2 \cdot (\Delta z)^2} \quad (13)$$

3 Durchführung

Der theoretische Aufbau des Experiments befindet sich in Abbildung 3.

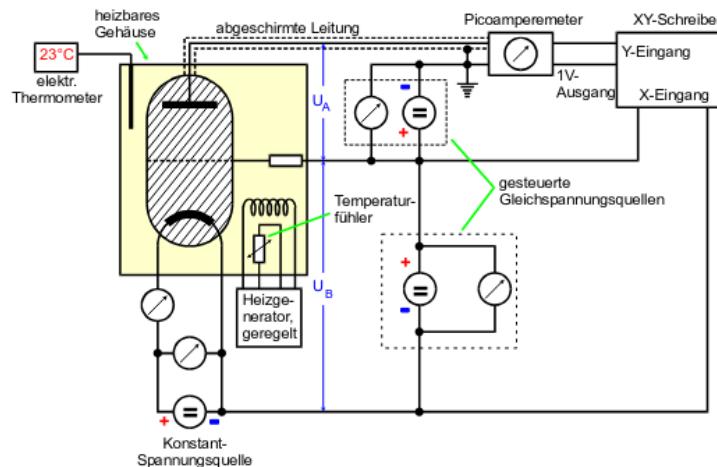


Abbildung 3: Aufbau des Versuchs (1). [2]

Die Installation gemäß des Plans ist in Abbildung 4 zu sehen.

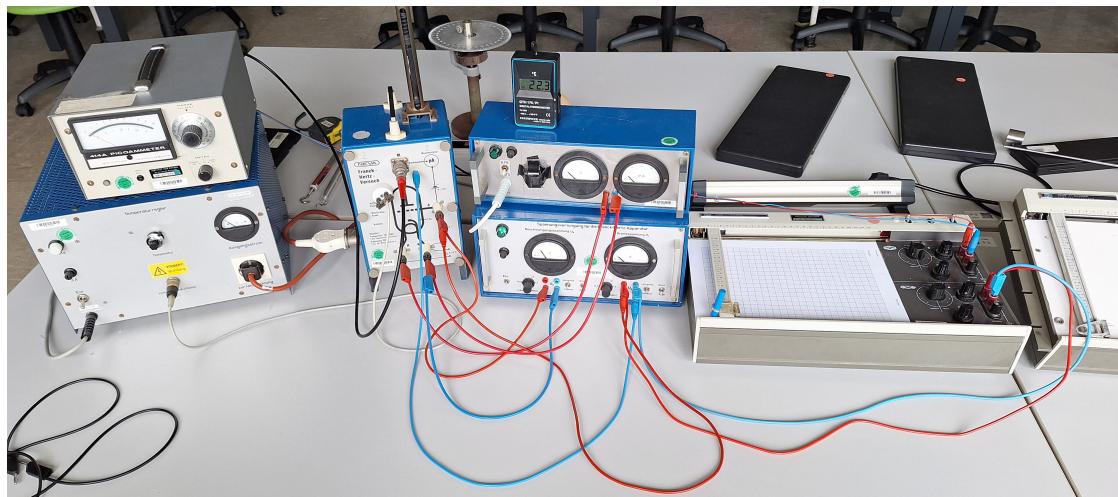


Abbildung 4: Aufbau des Versuchs (2).

Auf der linken Seite ist ein elektronischer Temperaturregler zu sehen, welcher die Temperatur des Glaskolbens konstant hält, er liefert Werte im Bereich von 373.15 – 473.15K. Über dem Regler steht das Picoamperemeter. Jenes soll den Auffängerstrom I_A der Anode detektieren. Rechts dieser Bauten befindet sich das Herzstück des Experiments:

Die Franck- Hertz Röhre mit dem Hg-Dampf, was auf dem Bild nur von der Seite zu sehen ist. Wiederum rechts der Röhre befindet sich eine Apparatur zur Spannungsregulierung, sie ist für U_B und U_A zuständig. Für die integrale Energieverteilung der beschleunigten Elektronen wird ersteres zunächst auf $U_B = 11V$ eingestellt und konstant gelassen. Die Spannung U_A wird innerhalb einer halben Minute hochgeregelt. Ganz rechts liegt der XY-Schreiber, welcher die Stromstärke in Abhängigkeit der Spannung aufzeichnet. Dazu wird lediglich ein Blatt Papier in der Vorrichtung befestigt und der Schreiber wie gewünscht justiert. Die Messungen für diesen Teil werden in einem Bereich von $T = 413.15 - 433.15K$ durchgeführt. Für den zweiten Teil des Experiments sollen die tatsächlichen Franck-Hertz Kurven erstellt werden. Dazu wird für zwei verschiedene Temperaturen jeweils eine Kurve mithilfe des XY-Schreibers aufgenommen. Nun wird die Stromstärke I_A in Abhängigkeit der Beschleunigungsspannung gemessen. Dazu wird die Bremsspannung konstant auf $U_A = 1V$ eingestellt und U_B im Bereich von $0 - 60V$ hochgestellt.

4 Auswertung

4.1 Mittlere freie Weglänge

Zuerst wird die in der Abschnitt 2 erwähnte mittlere freie Weglänge der Elektronen bestimmt, welche die Elektronen in dem Quecksilbergas zurücklegen, wenn es zu einem Stoß kommt. Dazu werden die Temperaturen der Messungen in Gleichung 11 eingesetzt. Die Resultate sind in Tabelle 1 aufgelistet.

Tabelle 1: Mittlere Freie Weglängen.

T / K	$\bar{\omega} / m$
296,15	$0,063 \cdot 10^3$
419,15	$7,02 \cdot 10^{-5}$
436,15	$3,75 \cdot 10^{-5}$
448,15	$2,42 \cdot 10^{-5}$

Es ist erkennbar, dass die Anzahl an Stößen proportional zur Temperatur ist. Bei Temperaturen im Bereich von 400K bis 500K ist das Verhältnis der mittleren freien Weglänge zu dem Abstand von Kathode zu Anode mit $a = 1\text{cm}$ sehr gering, was letztendlich den Franck-Hertz Versuch ermöglicht.

4.2 Kontaktpotential

In diesem Teil des Versuchs geht es darum das Kontaktpotential zu berechnen. In den Abbildungen Abbildung 5 und Abbildung 6 sind die Strom- Gegenspannungs Messkurven abgebildet, welche mit dem XY-Schreiber aufgezeichnet wurden. Einerseits bei einer Temperatur von 296.15K und einmal bei 419.15K.

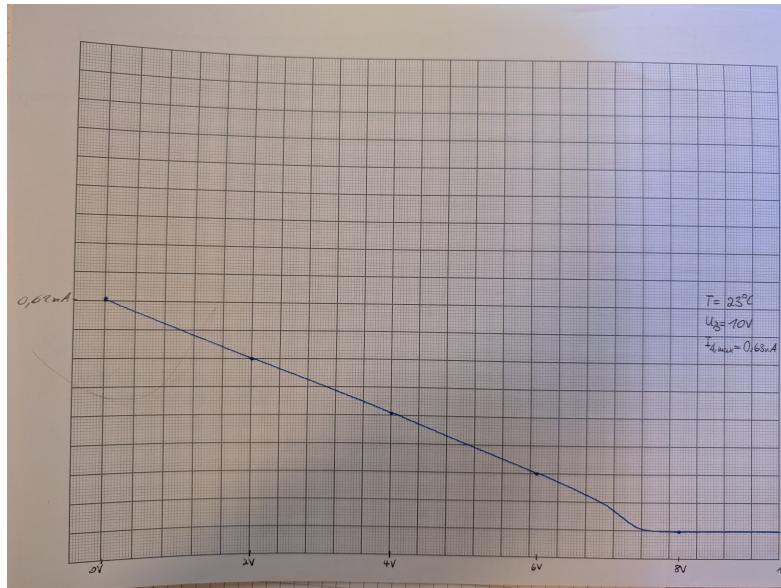


Abbildung 5: Strom-Spannungs Kurve bei 296.15K

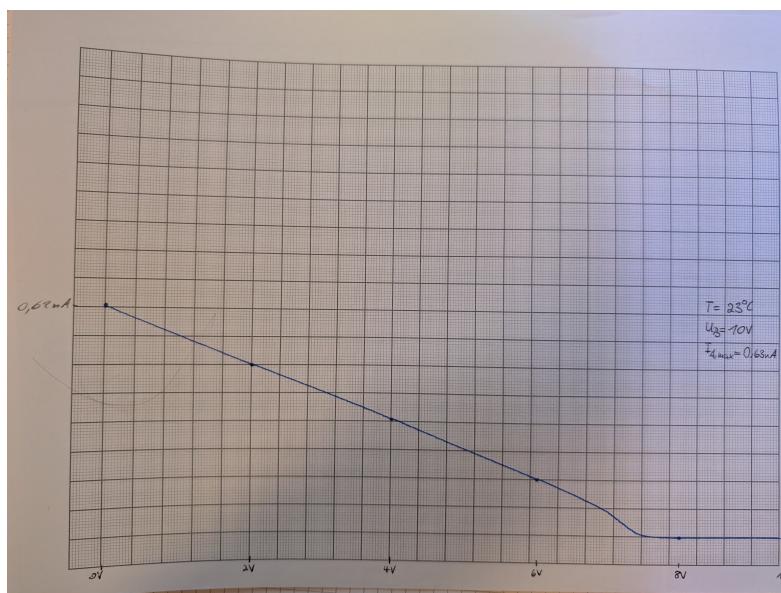


Abbildung 6: Strom-Spannungs Kurve bei 419.15K

Aus diesen graphischen Daten muss der Differenzenquotient für bestimmte Werte gebildet werden, um auf den Spannungspunkt mit der größten Steigung (Wendepunkt) zu schließen. Daraus lässt sich dann nach Gleichung 9 das Kontaktpotential berechnen.

In Tabelle 2 sind die händisch ermittelten Differenzenquotienten einiger Messpunkte für beide Temperaturniveaus aufgetragen. Zusätzlich sind diese in Abbildung 7 und Abbildung 8

graphisch dargestellt.

Tabelle 2: Differentiation der Messdaten.

$T = 296.15\text{K}$		$T = 419.15\text{K}$	
U/V	$I/U/\text{nA/V}$	U/V	$I/U/\text{nA/V}$
2	-0,073	0	0
4	-0,073	0,25	-0,005 94
6	-0,073	0,5	-0,005 77
6,5	-0,085	0,75	-0,0050
6,6	-0,089	1	-0,0050
6,7	-0,096	1,25	-0,0047
6,8	-0,104	1,5	-0,0044
6,9	-0,106	1,75	-0,0040
7	-0,111	2	-0,0036
7,1	-0,118	2,25	-0,0028
7,2	-0,130	2,5	-0,0021
7,3	-0,139	2,75	-0,0017
7,4	-0,124	3	-0,0007
7,5	-0,111	3,25	-0,0002
8	0	3,5	0

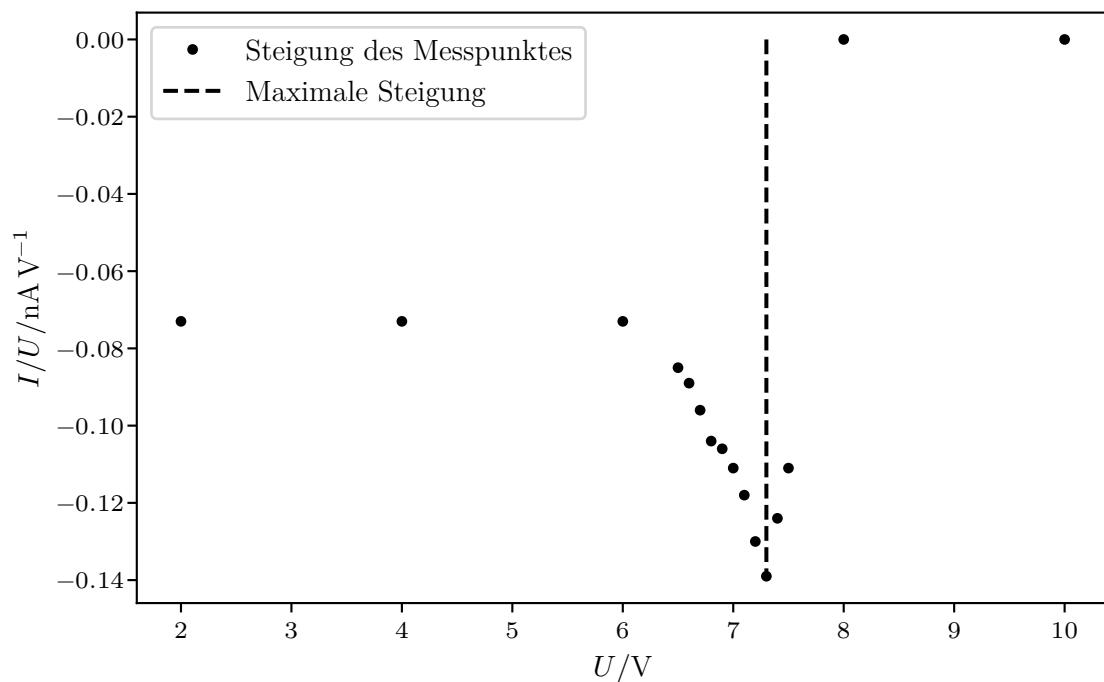


Abbildung 7: Steigung der Kurve bei 296.15K

Aus Abbildung 7 kann entnommen werden, dass die größte Steigung (negative Steigung) am Punkt $U = 7.3$ V vorliegt. Daraus berechnet sich das Kontaktpotential zu

$$\begin{aligned} U_{\text{Kontakt}} &= U_{\text{B}} - U_{\text{B,eff}} \\ &= 10\text{V} - 7.3\text{V} \\ &= 2.7\text{V}. \end{aligned}$$

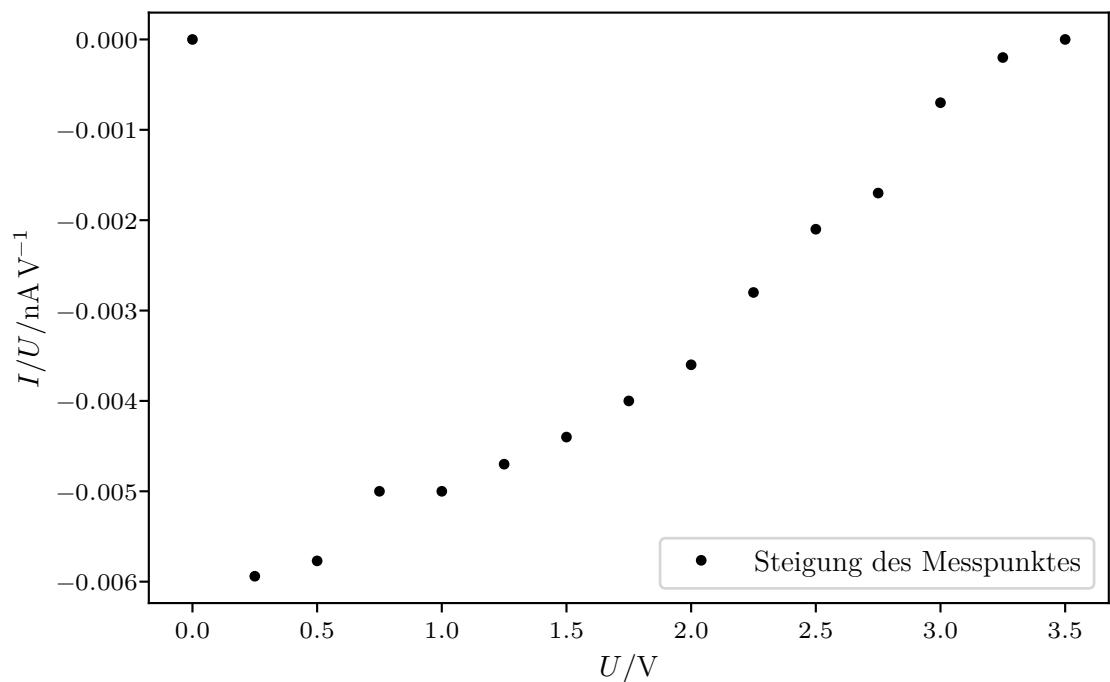


Abbildung 8: Steigung der Kurve bei 419.15K

4.3 Franck-Hertz Kurven

Für die Auswertung der Franck-Hertz Kurven wurden I_A -Werte bei 436.15K und 448.15K aufgenommen. Diese sind in Abbildung 9 abgebildet.

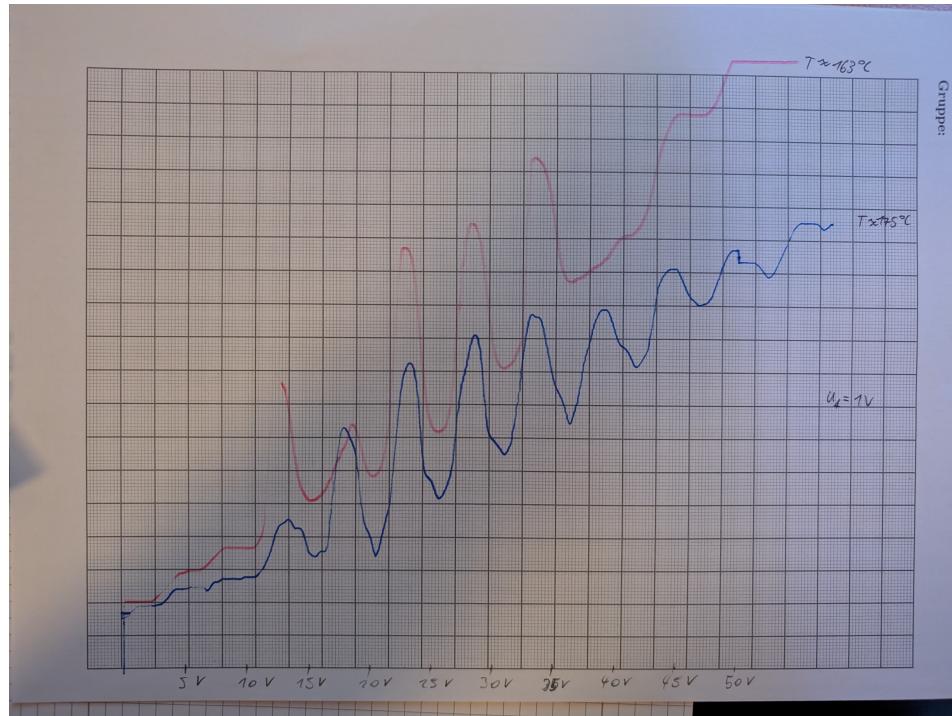


Abbildung 9: Franck-Hertz Kurven.

Relevant für die Auswertung sind die x-Werte der Maxima der Frank-Hertz Kurven. Dementsprechend wird die blaue Kurve zur Auswertung herangezogen, da bei dieser die Maxima deutlicher vorliegen. Die x-Werte des n-ten Maximums sind Tabelle Tabelle 3 zu entnehmen.

Tabelle 3: Mittlere Freie Weglängen.

n	$U_{\text{gegen}} / \text{V}$
1	13,04
2	17,39
3	23,09
4	28,39
5	33,15
6	41,71
7	47,28
8	49,59

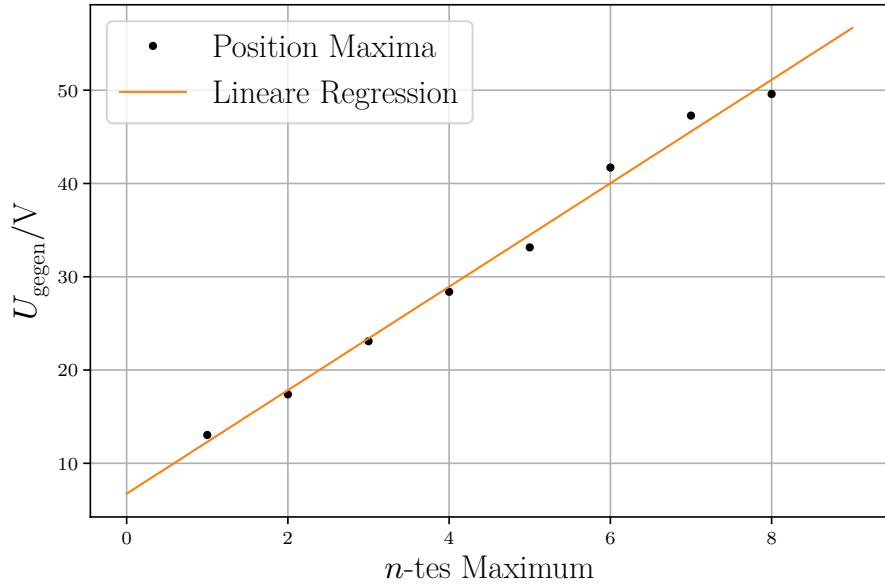


Abbildung 10: Maxima der blauen Franck-Hertz Kurve und Regression.

Die Parameter der linearen Ausgleichsrechnung sind

$$a = (5,5 \pm 0,2) \text{ V} \quad (14)$$

$$b = (6,7 \pm 0,1) \text{ V}, \quad (15)$$

wobei a die Steigung und somit die durchschnittliche Beschleunigungsspannung $U_B = (5,5 \pm 0,2) \text{ V}$ angibt. Aus U_B kann mit

$$\lambda = \frac{h \cdot c}{U_B \cdot e} \quad (16)$$

die Wellenlänge λ bestimmt werden (siehe auch Gleichung 3). Das ergibt eine Wellenlänge von

$$\lambda = 2,25 \cdot 10^{-7} \text{ m} \quad (17)$$

Auch die Anregungsenergie lässt sich mit U_B bestimmen:

$$E_1 - E_0 = 8,81 \cdot 10^{-19} \text{ V}. \quad (18)$$

5 Diskussion

5.1 Mittlere freie Weglänge

Durch Unterabschnitt 4.1 kann darauf geschlossen werden, dass die Franck-Hertz Kurven bei niedrigen Temperaturen bis ca. 150°C nicht entstehen. Jenes stimmt mit der Theorie überein; Bei geringer Temperatur ist der Dampfdruck des Gases ebenso gering, was in einer geringen Anzahl an Stößen zwischen Elektronen und Atomen resultiert. Das zeigt sich in der hohen mittleren freien Weglänge des Elektrons im Niedrigtemperatur-Bereich.

5.2 Franck-Hertz Kurven

Als Literaturwert für die Anregungsenergie der Quecksilberatome sing 4.9eV gegeben [1], was der mittlere Differenz der Maxima entsprechen würde. Der experimentell bestimmte Werte liegt bei 5.5V, was einer Abweichung von 11% entspricht. Das kann mehrere Ursachen haben: zum einen kann die Ungenauigkeit durch Ablesen der Steigung vom Millimeterpapier als Fehlerquelle herangezogen werden. Andererseits unterliegt das Experiment dem statistischen Fehler, da auch Abweichungen des XY-Schreibers miteinbezogen werden müssen. Als Hauptfehlerquelle kann jedoch die Temperaturregulation des Gases genannt werden, diese konnte nicht konstant eingestellt werden, sondern musste am Heizgenerator durch einen Drehregler eingestellt werden.

Literatur

- [1] StudySmarter. *Franck-Hertz-Versuch*. Abgerufen am 27. April 2025. 2025. URL: <https://shorturl.at/jhF9V> (besucht am 27.04.2025).
- [2] V601: *Der Franck-Hertz-Versuch*. TU Dortmund. 2025.