

VERSUCH NUMMER 601

Der Franck-Hertz Versuch

Irgendjemand

irgend.jemand@tu-dortmund.de

Someone

some.one@tu-dortmund.de

Durchführung: 31.05.2022

Abgabe: 07.06.2022

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1 Zielsetzung	1
2 Theoretische Grundlagen	1
2.1 Kontaktpotential	3
2.2 Einfluss des Energiespektrums	3
2.3 Einfluss des Dampfdrucks	4
3 Versuchsaufbau und Durchführung	4
3.1 Versuchsaufbau	4
3.2 Durchführung	5
3.2.1 Integrale Energieverteilung	5
3.2.2 Franck-Hertz Kurve	5
4 Auswertung	5
4.1 Mittlere freie Weglänge	5
4.2 Kontaktpotential bei 37 Grad Celsius	5
4.3 Kontaktpotential bei 150 Grad Celsius	8
4.4 Franck-Hertz Kurve bei 180 Grad Celsius	11
4.5 Franck-Hertz Kurve bei 193 Grad Celsius	12
5 Diskussion	13
Literatur	13

1 Zielsetzung

In diesem Versuch soll mit Hilfe einer Franck-Hertz Apparatur die Energie zwischen den Niveaus des Hg-Atoms bestimmt werden. Zudem kann das apparaturabhängige Kontaktpotential bestimmt werden.

2 Theoretische Grundlagen

Zunächst soll der theoretische Verlauf der Franck-Hertz Kurve erläutert werden. Dazu ist es wichtig zu verstehen was in dem Hg-Gas mit den beschleunigten Elektronen passiert. Wenn sich Elektronen durch Materie bewegen interagieren sie mit dieser. Genauer kommt es zu Stößen zwischen den Elektronen und den Atomen. Das Elektron bekommt durch ein anliegendes elektrisches Feld eine Geschwindigkeit v_{vor} . Stößt das Elektron nun mit einem Atom des Hg-Gases kommt es zum Energietransfer weshalb das Elektron nun die Geschwindigkeit v_{nach} besitzt. Das Atom des Gases muss die überschüssige Energie aufnehmen. Dies geschieht indem das Atom in das nächst grössere Energieniveau übergeht. Dieser Übergang ist in Abbildung 1 dargestellt.

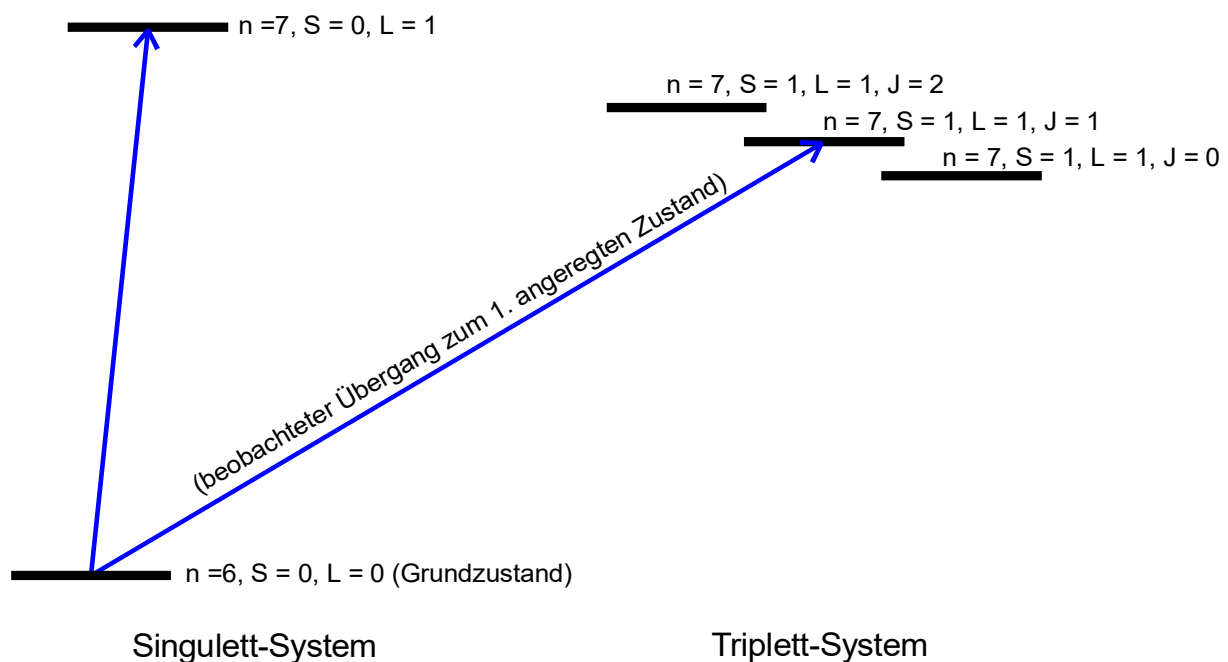


Abbildung 1: Übergang in höhere Energieniveaus der Elektronen in der Valenzschale des Quecksilbers.[1]

Der Übergang in das eingezeichnete Energieniveau wird eigentlich kaum beobachtet da es nur möglich ist wenn ein Elektron seinen Spin ändert. Doch durch die Stöße eines Elektrons wird dieser Übergang wahrscheinlicher und ist die in diesem Versuch gefundene Energie.

Somit ist die Energiedifferenz der Zustände gegeben durch

$$E_1 - E_0 = \frac{m_0 \cdot v_{\text{vor}}^2}{2} - \frac{m_0 \cdot v_{\text{nach}}^2}{2}.$$

Zum Verständnis wird der prinzipielle Aufbau in Abbildung 2 dargestellt.

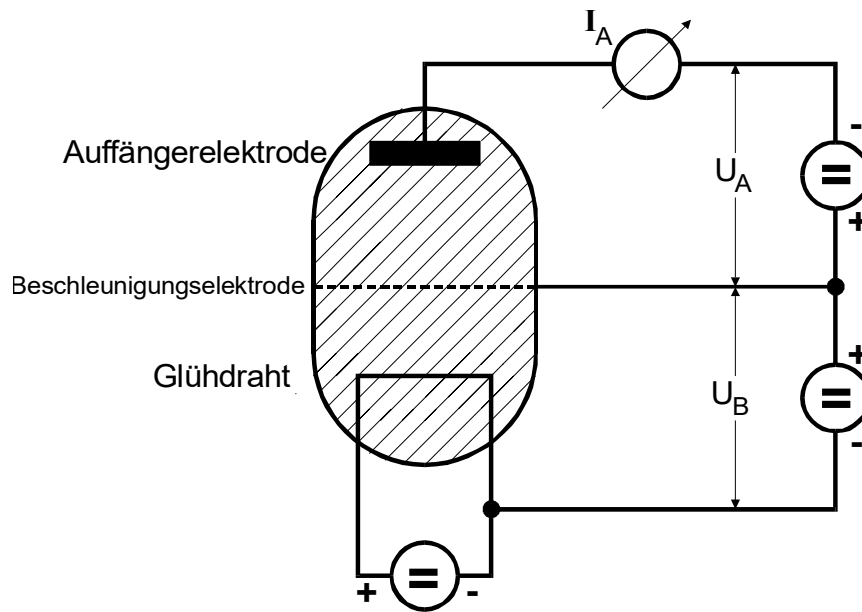


Abbildung 2: Schematischer Aufbau des Versuchs.[1]

Der Aufbau besteht im wesentlichen aus einem Glühdraht der Elektronen aussendet und zwei Elektroden die die Elektronen erst beschleunigen und dann abbremmen. Die Spannungen über diese Elektroden werden mit U_A und U_B bezeichnet. Die Energie die in einem zentralen Stoß abgegeben wird ist mit

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

relativ gering und kann vernachlässigt werden. Durch die Stöße werden aber dennoch beträchtliche Richtungsänderungen hervorgerufen. Wenn ein Elektron durch das elektrische Feld genug Energie bekommen hat um das Hg-Atom anzuregen bleibt die Energie aber nicht einfach bei dem Atom. Diese Energie wird schnell wieder in Form eines Lichtquants abgestrahlt. Als Maß der Anzahl der Elektronen die es durch die Abbremsspannung schaffen wird der Strom I_A verwendet. Dieser wird in Abbildung 3 dargestellt.

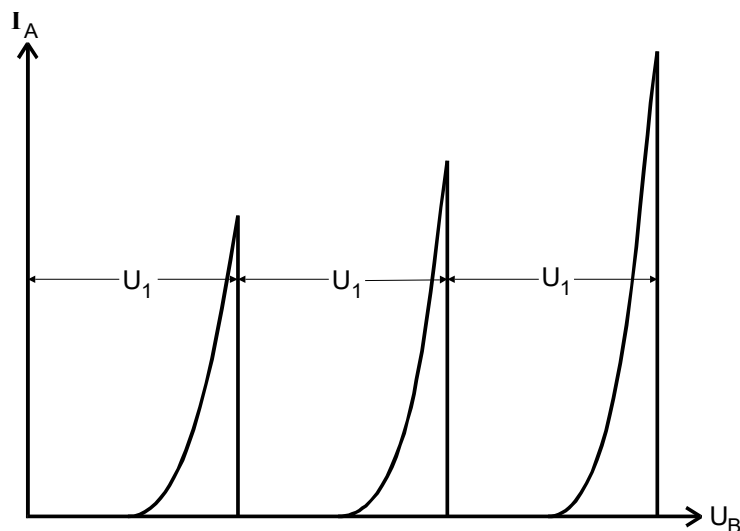


Abbildung 3: Theoretischer Verlauf der Stromstärke I_A gegen die Spannung U_B . [1]

Hier ist auch klar das die Elektronen mehrere Male mit den Hg-Atom interagieren und so mehrere Peaks verursachen. Die Energiedifferenz der Zustände ergibt nun aus

$$E = e_0 \cdot U_1 \quad (1)$$

Daraus lässt sich dann die Wellenlänge

$$\lambda = \frac{h \cdot c}{E} \quad (2)$$

mit der Lichtgeschwindigkeit $c = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ m/s}$ [2] und dem Planckschen Wirkungsquantum $h = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$ [2] berechnen. Dies ist allerdings eine idealisierte Darstellung. In der Realität kommt es aus verschiedenen Gründen zu Abweichungen von dieses Modell.

2.1 Kontaktpotential

Da für die Kathode und Anode verschiedene Materialien, die dementsprechend verschiedene Austrittsarbeiten haben, verwendet werden können kommt es zu einer Abweichung der Messung. Durch diesen Unterschied weicht die tatsächliche Potentialdifferenz von der Spannung U_B ab. Dies ist in Abbildung 4 für zwei beliebige Potentiale ϕ dargestellt.

Elektronenpotential beim Verlassen d. Glühdrahtes ($v = 0$)

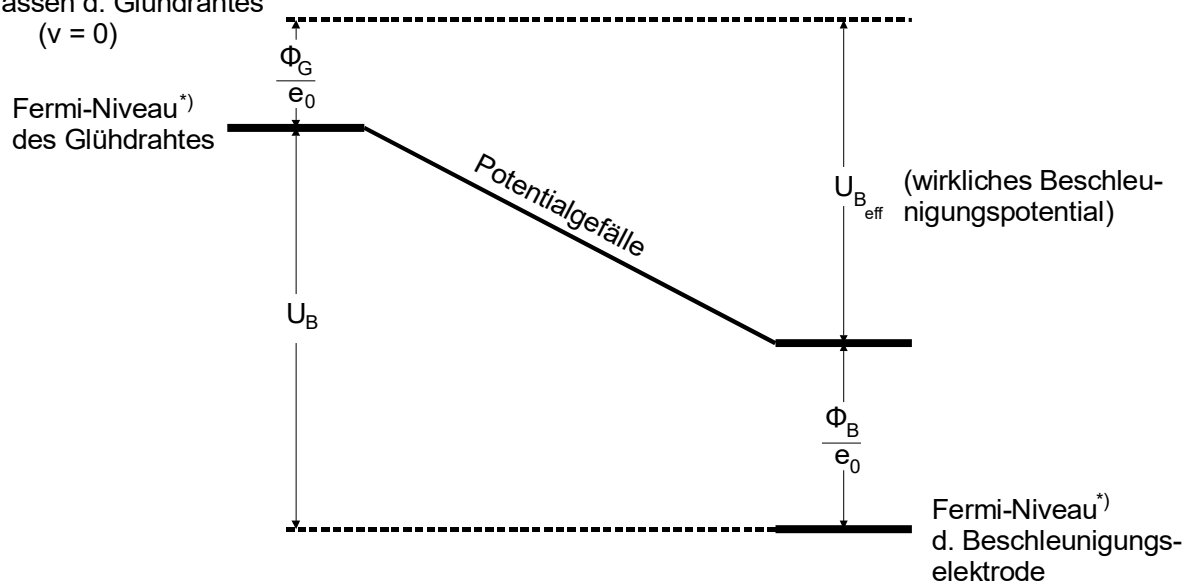


Abbildung 4: Unterschiede der Fermi-Niveaus von Glühdraht und Elektrode.[1]

Durch dieses Potential ist die tatsächliche Spannung $U_{B,eff}$ gegeben durch

$$U_{B,eff} = U_B - \frac{\phi_B - \phi_G}{e_0}. \quad (3)$$

Dabei schreibt man für das Kontaktpotential K

$$K = \frac{\phi_B - \phi_G}{e_0}.$$

Das heisst das die Spannung um K verschoben wird.

2.2 Einfluss des Energiespektrums

Der verwendete Glühdraht gibt Elektronen ab. Diese haben aber nicht diskrete Energien sondern werden mit einem kontinuierlichen Spektrum ausgesendet. Das bedeutet das die Peaks in Abbildung 3 breiter werden, da nicht mehr bei einer exakten Spannung die Aktivierung der Atome geschieht sondern in einem breiterem Bereich. Die Energie der Elektronen hat auch einen Einfluss auf die elastischen Stöße. Bei diesen wird zwar nur wenig Energie übertragen aber die Richtung der Elektronen kann stark abweichen. Wenn die Elektronen deshalb daran gehindert werden an der Kathode anzukommen wird der Strom verringert und erhöht die Ungenauigkeit der Messung.

2.3 Einfluss des Dampfdrucks

Auch der Dampfdruck hat einen großen Einfluss auf die Gestalt der Franck-Hertz Kurve. Damit auch tatsächlich Stöße passieren muss die mittlere freie Weglänge \bar{w} um einen Faktor 1000 kleiner sein als der Abstand zwischen der Elektrode und Kathode in der Apparatur sein. \bar{w} wird durch den Sättigungsdruck

$$p_{\text{sät}}(T) = 5,5 \cdot 10^{-7} \exp\left(\frac{-6876}{T}\right) \quad (4)$$

definiert mit

$$\bar{w} = \frac{0.0029}{p_{\text{sät}}}. \quad (5)$$

Dabei ist $p_{\text{sät}}$ in mbar und \bar{w} in cm. Der Dampfdruck muss also in einem Bereich gewählt werden sodass die Elektronen eine möglichst große Interaktionswahrscheinlichkeit haben.

3 Versuchsaufbau und Durchführung

3.1 Versuchsaufbau

Der gesamte Versuchsaufbau ist in Abbildung 5 dargestellt.

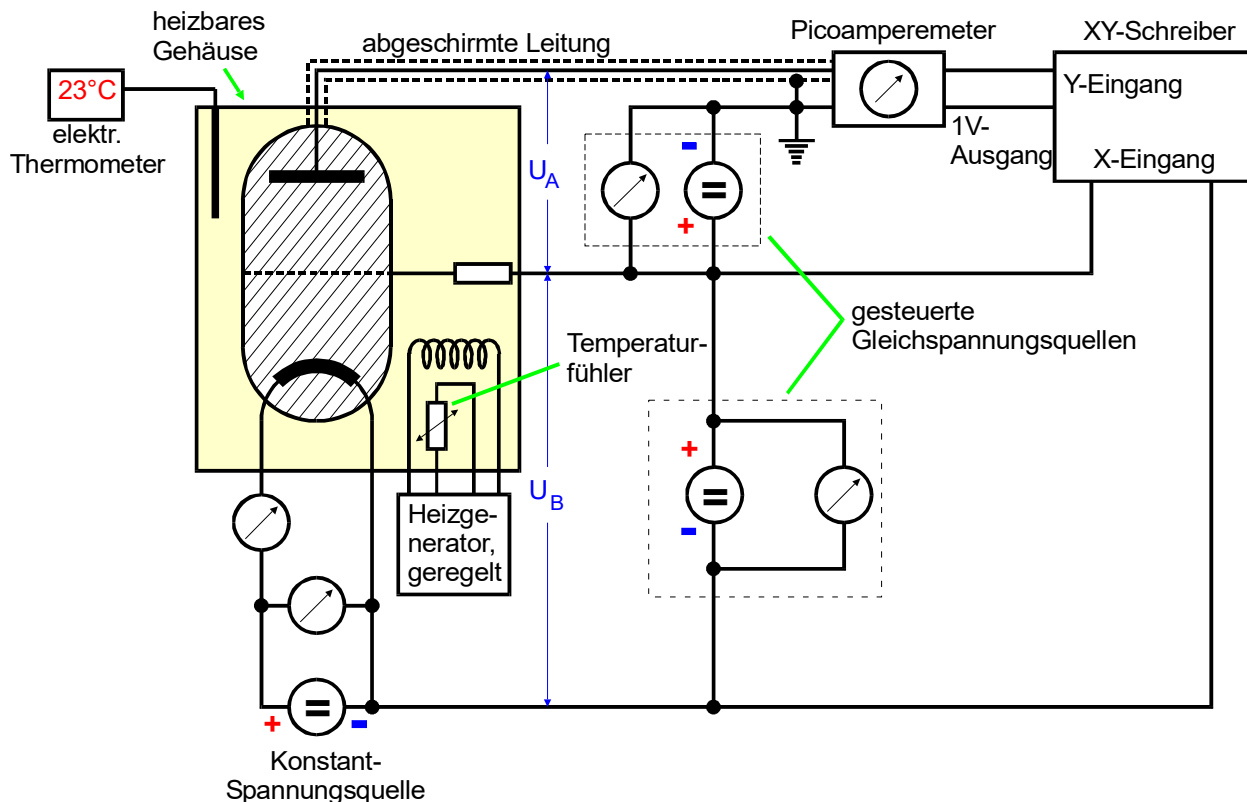


Abbildung 5: Kompletter Versuchsaufbau.[1]

Hier ist die in der Theorie angesprochene Franck-Hertz Apparatur zu erkennen. Diese befindet sich in einem heizbaren Gehäuse um die Temperatur einzustellen. Mit einem Elektrischen Thermometer wird die Temperatur gemessen. Die Spannungen U_B und U_A werden durch 2 Gleichspannungsregler eingestellt. Die Daten werden über ein Picoamperemeter an einen XY-Schreiber gegeben. Dieser stellt die Daten dann auf einem Papier da.

3.2 Durchführung

3.2.1 Integrale Energieverteilung

Zunächst soll der Strom I_A in Abhängigkeit von der Spannung U_A bestimmt werden. Dazu wird die Spannung U_B konstant auf 11 V gehalten und U_A variiert. Dies wird sowohl bei Raumtemperatur als auch bei einer Temperatur von 140 °C durchgeführt. Für die Messung bei Raumtemperatur wird die Spannung an der Glühkathode so eingestellt, dass bei $U_A = 0$ ein Strom von 50 nA gemessen wird. Aus den erhaltenen Daten lässt sich so die differenzielle Energieverteilung so wie das Kontaktpotential bestimmen.

3.2.2 Franck-Hertz Kurve

Für die Bestimmung der Franck-Hertz Kurven werden mehrere Messungen durchgeführt. Die Temperatur wird im Bereich 160 °C bis 200 °C gewählt und die Spannung $U_A = 1,0$ V festgelegt. U_B wird über einen Bereich von 0 V bis 0 V verändert. Für die Auswertung werden die Graphen mit den deutlichsten Peaks ausgesucht.

4 Auswertung

4.1 Mittlere freie Weglänge

Zunächst soll die mittlere freie Weglänge \bar{w} und der Sättigungsdruck $p_{\text{sät}}$ bestimmt werden. Dies geschieht nach dem die Temperaturen von °C mit Hilfe von $T_0 = 270$ K[2] nach K umgerechnet wurden. Die nach (4) und (5) berechneten Werte sind in Tabelle 1 dargestellt. Zusätzlich wurde auch das Verhältnis aus $a = 1,0$ cm und \bar{w} bestimmt.

Tabelle 1: Abgelesene Messwerte bei einer Temperatur von 180 °C.

T / K	$p_{\text{sät}} / \text{mbar}$	\bar{w} / cm	a/\bar{w}
310	0,010	0,22	4,5
420	4,8	0,000 60	1700
450	14	0,000 21	4900
470	22	0,000 13	7400

4.2 Kontaktpotential bei 37 Grad Celsius

Um das Kontaktpotential zu bestimmen wird die in Abbildung 6 dargestellte Kurve des XY-Schreibers verwendet.



Abbildung 6: Ausgabe des XY-Schreibers bei 37 °C.

Tabelle 2: Abgelesene Messwerte bei einer Temperatur von 37 °C.

U_A / LE	I_A / LE
0	110
9,0	110
18	100
27	98
36	92
45	86
54	81
63	75
72	70
81	64
90	59
99	53
110	47
120	40
130	33
140	25
140	16
150	3,0
160	0
170	0
180	0
190	0

An dieser werden Daten in Intervallen von $\Delta U_A = 9$ LE bestimmt. Diese sind in Tabelle 2 dargestellt. Zudem wurde eine Skala in U aufgetragen aus dieser lassen sich die LE in V umwandeln. Bei 37 °C wurde eine Proportionalitätskonstante von $^{10}_{/187}$ / LE/V bestimmt. Mit Hilfe dieser werden alle LE in U umgerechnet. Da der Strom I_A nur durch eine Proportionalitätskonstante aus den LE bestimmt wird kann diese Rechnung vernachlässigt werden. Zur Bestimmung des Kontaktpotentials ist es allerdings notwendig aus den abgelesenen I_A die Differenz zum nächsten Wert zu bekommen. Das heisst es wird an jedem Punkt

$$I_A(U_A) - I_A(U_A + \Delta U_A) \quad (6)$$

berechnet. Diese Daten sind in Abbildung 7 gegeneinander dargestellt. Alle Berechnungen, Graphen sowie das Bestimmen der Unsicherheiten werden mit Python 3.8.8 und entsprechenden Bibliotheken¹ durchgeführt.

¹Numpy [3], Uncertainties [4] and Matplotlib [5]

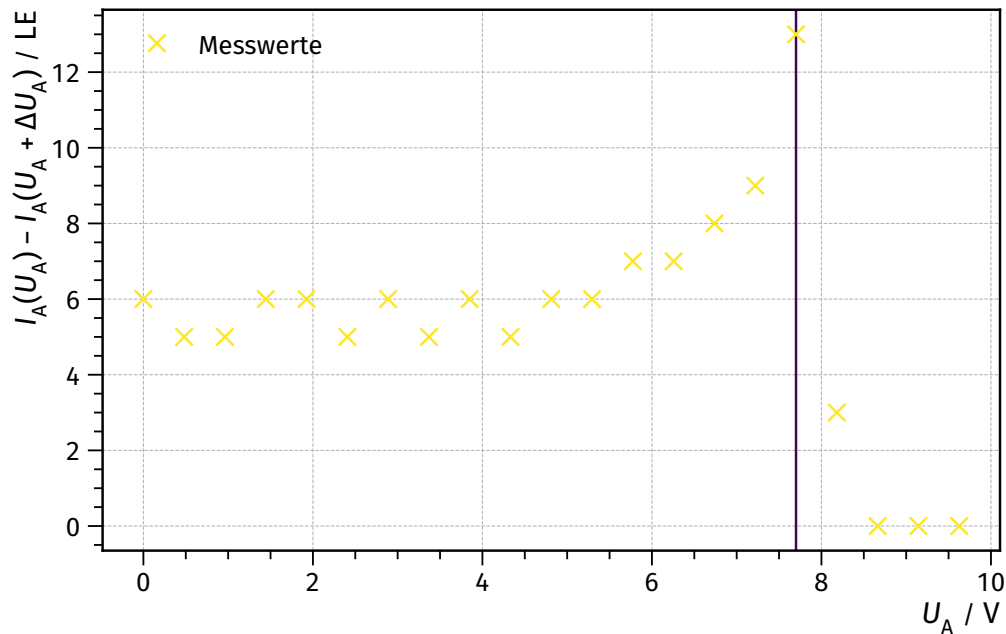


Abbildung 7: Differenzieller Strom bei 37 °C.

An diesem ist zu bemerken das bei einer Spannung von 7,7 V ein Maximum der Stromdifferenz vorliegt. Diese Spannung beschreibt $U_{B,eff}$ in (3). Durch das Umstellen nach K ergibt sich so mit Hilfe der eingestellten Spannung $U_B = 11 V$

$$K = U_B - U_{B,eff} = 3,3 V$$

4.3 Kontaktpotential bei 150 Grad Celsius

Für die Messwerte bei 150 °C wird genauso vorgegangen wie in Unterabschnitt 4.2. Die Daten des XY-Schreibers sind in Abbildung 8 dargestellt. Daraus wurden die Werte in Tabelle 3 abgelesen.

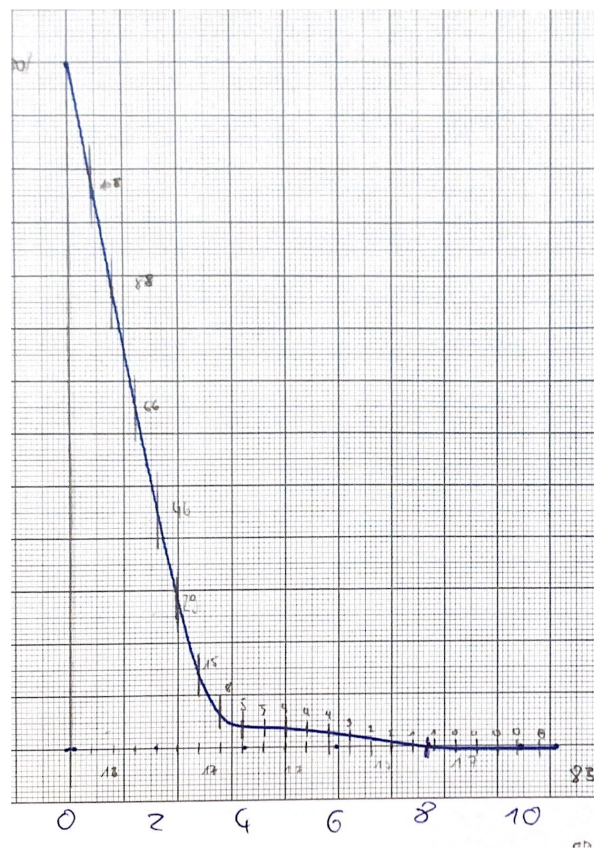


Abbildung 8: Ausgabe des XY-Schreibers bei 150 °C.

Tabelle 3: Abgelesene Messwerte bei einer Temperatur von 150 °C.

U_A / LE	I_A / LE
0	130
4,0	110
8,0	88
12	66
16	46
20	29
24	15
28	8,0
32	5,0
36	5,0
40	4,0
44	4,0
48	4,0
52	3,0
56	2,0
60	2,0
64	1,0
68	1,0
72	0
76	0
80	0
84	0

Für diese Werte wird eine Proportionalitätskonstante von $^{10}_{84} / \text{LE1/V}$ bestimmt werden. Die Daten werden so in V umgewandelt und die gleiche Rechnung wie in (6) durchgeführt. Bei dieser Auswertung wurde $\Delta U_A = 4 \text{ LE}$ gewählt. Diese sind in Abbildung 9 aufgetragen.

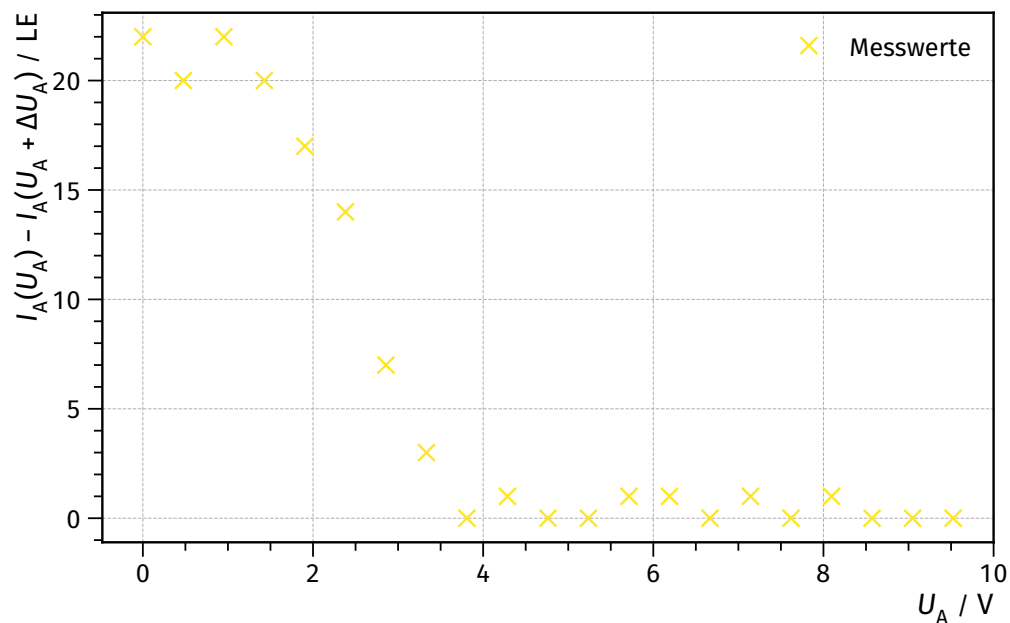


Abbildung 9: Differenzieller Strom bei 150 °C.

Dabei fällt auf das nun nicht mehr das Kontaktpotential bei etwa 8,0V abzulesen ist. Stattdessen fällt der Strom ab

etwa 4,0 V auf 0 LE ab und bleibt im gesamten Messbereich bei 0 LE. Dies ist in etwa die in Unterabschnitt 4.4 und Unterabschnitt 4.5 bestimmte Spannung. Da die Elektronen ab dieser Energie mit den HG-Atomen wechselwirken können kommen nur Elektronen mit kleineren Energien vor. Deshalb fällt die Kurve nach etwa 4,0 V auf 0 und wird nicht wieder grösser. So ist kein Kontaktpotential abzulesen.

4.4 Franck-Hertz Kurve bei 180 Grad Celsius

Der XY-Schreiber hat das in Abbildung 10 Bild produziert. Aus diesem werden die Maxima abgelesen. Diese sind in Tabelle 4 dargestellt.

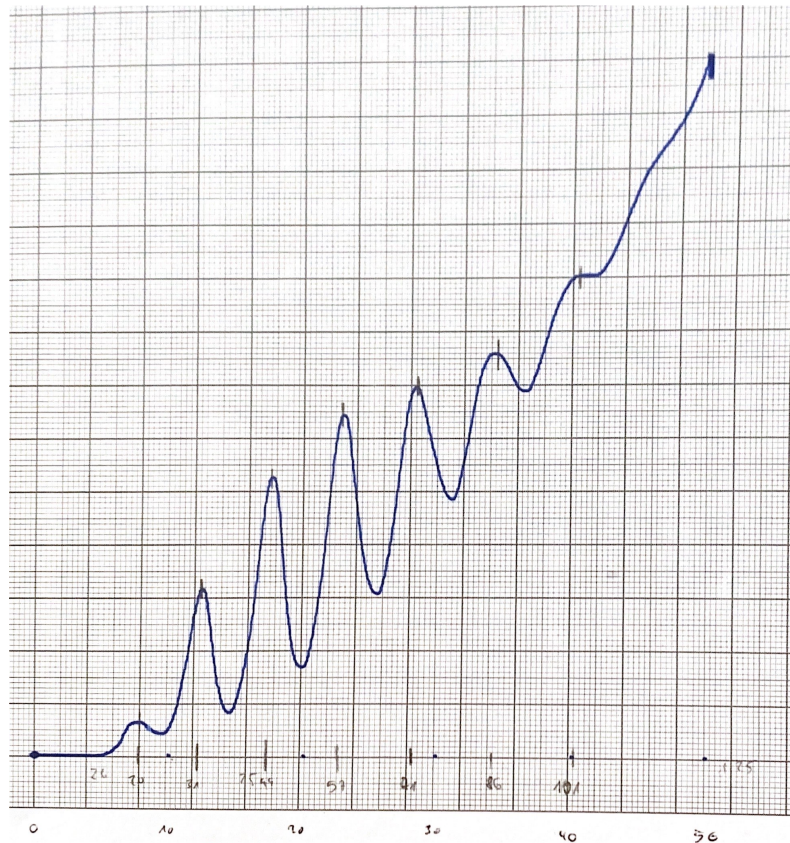


Abbildung 10: Ausgabe des XY-Schreibers bei 180 °C.

Tabelle 4: Abgelesene Messwerte bei einer Temperatur von 180 °C.

U_B / LE	$\Delta U_B / \text{V}$
20	4,4
31	5,2
44	5,2
57	5,6
71	6,0
86	6,0
100	

Für diese Messung wird eine Proportionalitätskonstante von $^{50}_{125} / \text{LE1/V}$ bestimmt. Mit dieser werden die Werte in V umgewandelt und die Differenz gebildet. Diese ist auch in Tabelle 4 eingetragen. Alle Mittelwerte einer N-fach

gemessenen Größe x werden über die Formel

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i. \quad (7)$$

berechnet. Der zugehörige Fehler des Messwertes berechnet sich dann über

$$\Delta \bar{x} = \sqrt{\frac{1}{N(N-1)} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}. \quad (8)$$

Setzt sich eine zu berechnende Größe aus mehreren mit Unsicherheit behafteten Messwerten zusammen, so ist die Unsicherheit dieser Größe über die Gaußsche Fehlerfortpflanzung gegeben

$$\Delta f(x_1, \dots, x_N) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left[\left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \cdot (\Delta x_i)^2 \right]}. \quad (9)$$

Bei der Angabe des Endergebnisses werden schließlich alle statistischen Teilfehler addiert. Auch diese Rechnung geschieht in Python und entsprechenden Bibliotheken.

So ergibt sich eine gemittelte Spannungsdifferenz von $U_1 = (5,40 \pm 0,23) \text{ V}$. Die Energie ergibt sich demnach zu $E_{180} = (5,40 \pm 0,23) \text{ eV} = (8,7 \pm 0,4) \cdot 10^{-19} \text{ J}$. Daraus wird nach (2) die Wellenlänge $\lambda_{180} = (232 \pm 10) \text{ nm}$ bestimmt.

4.5 Franck-Hertz Kurve bei 193 Grad Celsius

Auch bei 190°C wurde die Kurve durch den XY-Schreiber aufgenommen. Dazu wurden wieder die Daten der Hochpunkte bestimmt und in Tabelle 5 dargestellt. Für diese Messung ergibt sich eine Proportionalitätskonstante von $^{50}_{126}$.

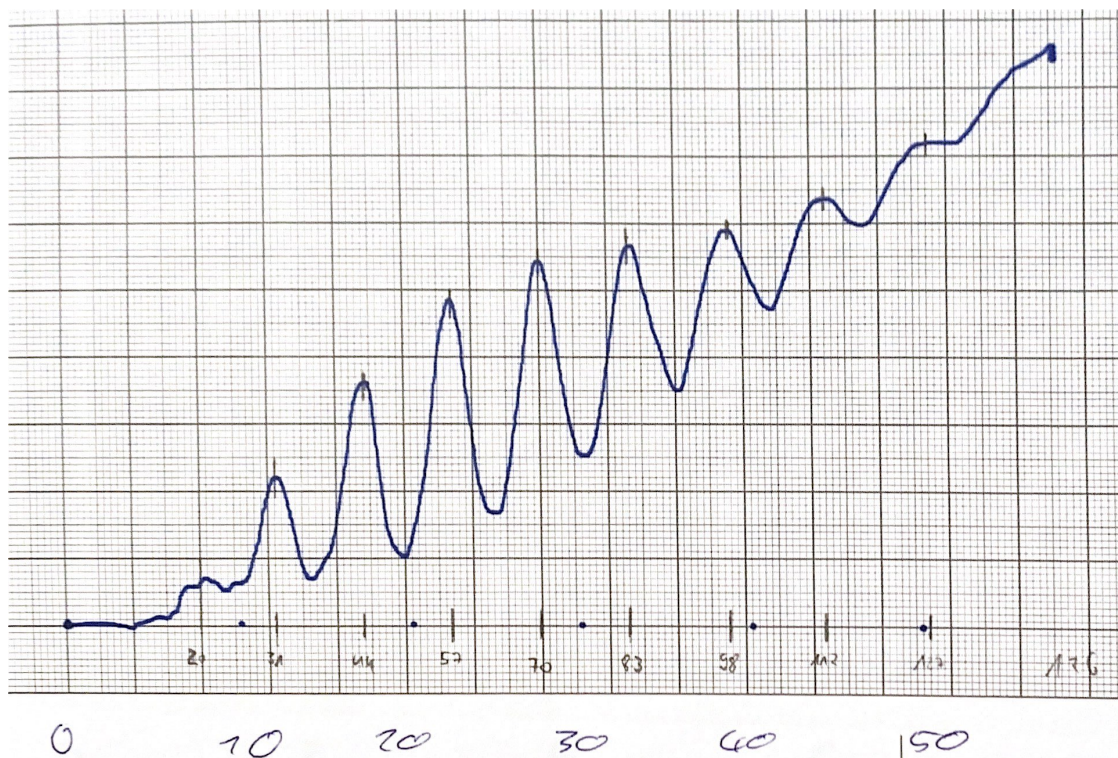


Abbildung 11: Ausgabe des XY-Schreibers bei 190°C .

Tabelle 5: Abgelesene Messwerte bei einer Temperatur von 180 °C.

U_B / LE	$\Delta U_B / \text{V}$
20	4,4
31	5,2
44	5,2
57	5,2
70	5,2
83	6,0
98	5,6
110	6,0
130	

Mit (1) und (2) wurde die Energie und die Wellenlänge der Zustandsänderung bestimmt. So werden die Werte $E_{193} = (5,31 \pm 0,17) \text{ eV} = (8,50 \pm 0,27) \cdot 10^{-19} \text{ J}$ und $\lambda_{180} = (236 \pm 8) \text{ nm}$ bestimmt.

5 Diskussion

In Tabelle 1 wurde das Verhältnis des mittleren freien Weglänge zu der Grösse der Franck-Hertz Apparatur bestimmt. Dieses sollte im besten Fall bei etwa 1000 bis 4000 liegen. Deshalb sollten also Experimente im Bereich von 410 K bis 450 K die besten Messergebnisse liefern. Zu allen Messwerten ist zu sagen, dass diese bereits durch das Ablesen einen Fehler bekommen. Zudem kommt es bei der Messung in den Geräten und durch äußere Einflüsse zu Abweichungen. Es ist beispielsweise schwierig die Temperatur auf einem konstanten Wert zu halten. Die tatsächliche Temperatur kann deshalb während des Versuchs um etwa 1,0 °C abweichen. Im Versuchsablauf ist auch aufgefallen das durch das wackeln am Tisch oder an den Kabeln es zu schlechteren XY-Bildern kam. Dies ist gut in Abbildung 6 zu sehen. Durch das Wackeln am Kabel zwischen Picoamperemeter und XY-Schreiber kam es zu einem Ausschlag des Stifts.

Für die Wellenlängen wird der Literaturwert $\lambda_{\text{lit}} = 250 \text{ nm}$ [6] herangezogen. Mit diesem ergibt sich eine relative Abweichung der Wellenlängen von $\Delta\lambda_{180} = (9 \pm 4) \%$ und $\Delta\lambda_{193} = (7 \pm 3) \%$. Der Versuch ist also insgesamt gut geeignet um die Energiedifferenz und damit die Wellenlänge zu bestimmen.

Literatur

- [1] Versuch Nr. 601. Der Franck-Hertz Versuch. TU Dortmund, Fakultät Physik. 2022.
- [2] J. Krause J. Grehn. Metzler Physik. 4. Aufl. Braunschweig: Bildunghaus Schulbuchverlage, 2007. ISBN: 978-3-507-10710-6.
- [3] Travis E. Oliphant. „NumPy: Python for Scientific Computing“. Version 1.9.2. In: Computing in Science & Engineering 9.3 (2007), S. 10–20. URL: <http://www.numpy.org/>.
- [4] Eric O. Lebigot. Uncertainties: a Python package for calculations with uncertainties. Version 2.4.6.1. URL: <http://pythonhosted.org/uncertainties/>.
- [5] John D. Hunter. „Matplotlib: A 2D Graphics Environment“. Version 1.4.3. In: Computing in Science & Engineering 9.3 (2007), S. 90–95. URL: <http://matplotlib.org/>.
- [6] Uni Konstanz. Franck-Hertz-Versuch mit Quecksilber und Neon. URL: <https://ap.physik.uni-konstanz.de/ap-public/Anleitungen/Franck-Hertz.pdf> (besucht am 03.06.2022).