

V601 Franck-Hertz-Versuch

Alina Landmann, alina.landmann@tu-dortmund.de
Jannine Salewski, jannine.salewski@tu-dortmund.de

Durchführung: 22.05.2018

Abgabe: 29.05.2018

TU Dortmund - Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1 Zielsetzung	1
2 Theorie	1
3 Durchführung	4
4 Auswertung	5
4.1 Energieverteilung	8
4.2 Franck-Hertz-Kurve	12
4.3 Ionisierungsenergie	13
5 Diskussion	15
Literatur	16

1 Zielsetzung

In diesem Versuch soll die Struktur der Elektronenhülle durch ein Elektronenstoßexperiment untersucht werden. Ziel ist es die Energie zu berechnen, die benötigt wird, um ein Quecksilberatome in den ersten angeregten Zustand zu versetzen. Außerdem soll die Ionisierungsenergie von Quecksilberatomen berechnet werden. Zusätzlich soll die Energieverteilung der verwendeten Elektronen näher betrachtet werden.

2 Theorie

In Abbildung 1 ist der schematische Aufbau dieses Versuches dargestellt. In der evakuierten Röhre befindet sich ein kleiner Tropfen Quecksilber, ein Teil davon verdampft direkt, bis sich ein Dampfdruckgleichgewicht einstellt. Dieses Dampfdruckgleichgewicht und somit auch die Dampfdichte hängt von der Umgebungstemperatur ab und kann somit variiert werden. An dem Glühdraht werden durch den Glühelektrischen-Effekt Elektronen emittiert. Zwischen dem Glühdraht der gitterförmigen Beschleunigungselektrode wird eine Spannung angelegt, die die emittierten Elektronen in Richtung der Beschleunigungselektrode beschleunigt. Die Elektronen haben an der Beschleunigungselektrode eine Energie von

$$\frac{m_0 v_z^2}{2} = U_b e_0 \quad (1)$$

unter der Bedingung, dass die Elektronen keine kinetische Energie besitzen, wenn diese aus dem Glühdraht austreten. Wobei m_0 die Masse, e_0 die Elementarladung und v die Geschwindigkeit der Elektronen und U_b die Beschleunigungsspannung beschreibt. Zwischen der Beschleunigungselektrode und der Auffängerelektrode wird eine Gegenspannung U_A angelegt, welche die Elektronen wieder abbremst. Die Elektronen, die genug Energie haben, um das Bremsfeld zu überwinden, gelangen bis zur Auffängerelektrode und sorgen dann für einen Stromfluss zwischen der Beschleunigungselektrode und der Auffängerelektrode. Diese Elektronen müssen die folgende Bedingung erfüllen:

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

Die Elektronen die nicht genügend kinetische Energie besitzen, um das Bremsfeld zu überwinden, gelangen zu Beschleunigungselektrode zurück.

Da sich in der ganzen Röhre zusätzlich noch Quecksilberatome befinden, kommt es zu zwei verschiedenen Wechselwirkungen zwischen den beschleunigten Elektronen und den Quecksilberatomen:

Die erste Wechselwirkung ist ein **elastischer Stoß**. Dieser ist aus energetischer Sicht zu vernachlässigen, da der Energieübertrag sehr gering ist, da die Masse des Quecksilberatoms sehr viel größer gegenüber der Masse des Elektrons ist. Nicht zu vernachlässigen ist

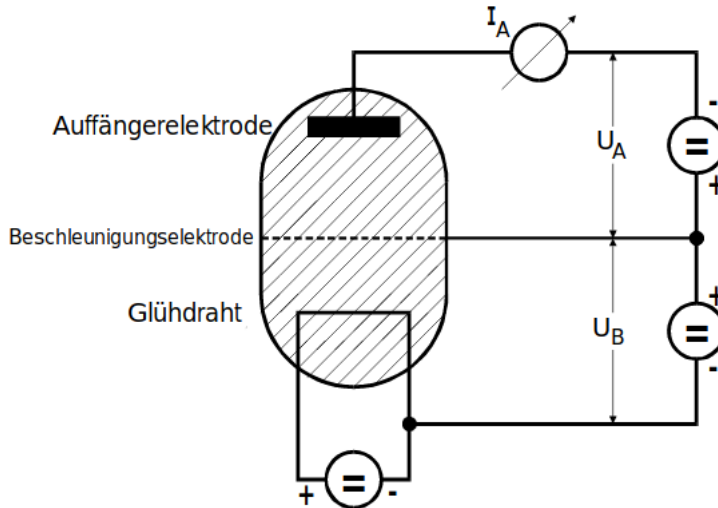


Abbildung 1: Schematischer Aufbau eines Franck-Hertz-Experiments.[Dor]

aber die Richtungsänderung, die das Elektron dadurch erfährt. Denn die oben genannten Gleichungen (1) und (2) beziehen sich nur auf die Geschwindigkeiten in z-Richtung. Wenn ein Elektron also abgelenkt wird und seine Richtung ändert, kann es sein, dass das Elektron nicht mehr genügend Geschwindigkeit in z-Richtung mehr besitzt, um das Bremsfeld zu überwinden, trotz des geringen Energieübertrags durch den elastischen Stoß.

Die zweite Wechselwirkung ist die **Anregung der Quecksilberatome**. Diese Wechselwirkung kommt aber nur zustande, wenn das Elektron eine größere Energie besitzt, als die Energiedifferenz des Grundzustandes und des angeregten Zustandes des Quecksilberatoms. Falls die Bedingung $E \geq E_1 - E_0$ erfüllt ist, gibt das Elektron die Energie $\Delta E = E_1 - E_0$ an die Elektronenhülle des Quecksilberatoms ab, welches sich somit im ersten angeregten Zustand befindet. Kurz darauf emittiert das Quecksilberatom die eben aufgenommene Energie wieder in Form von elektromagnetischer Strahlung mit der Energie $\Delta E = E_1 - E_0 = h\nu$ und fällt in seinen Grundzustand zurück.

Die ideale Franck-Hertz-Kurve ist in Abbildung 2 dargestellt. Hierbei wird der Auffängerstrom I_A gegen die Beschleunigungsspannung U_B aufgetragen. Wenn die Beschleunigungsspannung größer als die Bremsspannung ist, dann steigt der Auffängerstrom I_A immer weiter an. Ist nun aber die Beschleunigungsspannung so groß, dass die Elektronen die Energie $E_1 - E_2$ besitzen, so treten die eben genannten inelastischen Stöße auf mit der Anregung des Quecksilberatoms. Die Elektronen haben also all ihre Energie an die Quecksilberatome übertragen und können somit die Bremsspannung nicht mehr überwinden. Es kommt zu dem steilen Abfall des Auffängerstroms.

Dies ist dennoch nur eine idealisierte Franck-Hertz-Kurve, es gibt noch einige Einflüsse, die diese verändern:

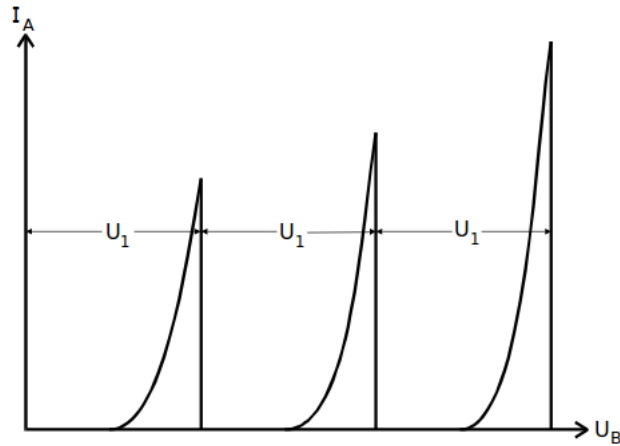


Abbildung 2: Idealisierte Franck-Hertz-Kurve.[Dor]

- Da der Glühdraht viele Elektronen emittieren soll, wird dieser meist mit einem Oxid eines Erdalkalimetalles überzogen, um die Austrittsarbeit des Materials zu verringern. Dies führt dazu, dass zwischen dem Glühdraht und der Auffängerelektrode ein **Kontaktpotential** entsteht (siehe Abbildung 3), welches die Franck-Hertz-Kurve um den Wert K verschiebt

$$K := \frac{1}{e_0}(\Phi_B - \Phi_G) \quad (3)$$

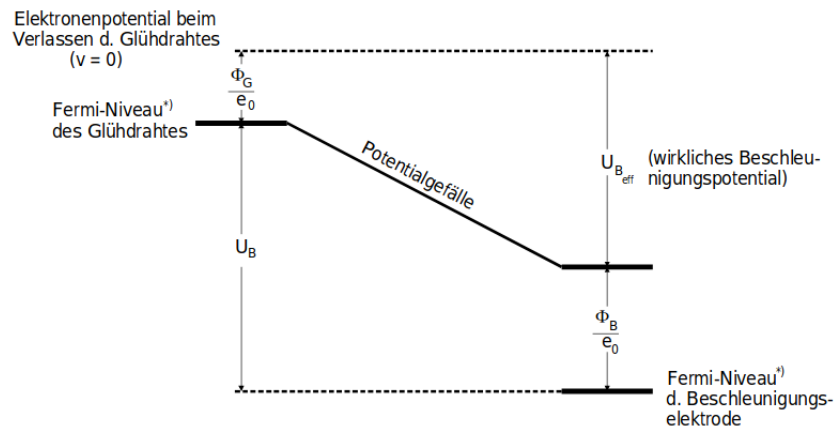


Abbildung 3: Kontaktpotential.[Dor]

- Bei der idealisierten Franck-Hertz-Kurve wurde bisher davon ausgegangen, dass alle Elektronen die selbe Energie besitzen, dies ist aber nicht der Fall, da die Elektronen mit unterschiedlichen Anfangsgeschwindigkeiten aus dem Material heraustreten. Dies führt zu einer **Energieverteilung**, der Fermi-Dirac-Verteilung. Die

Franck-Hertz-Kurve verändert sich dadurch, dass diese bis zum Maximum langsamer ansteigt und nach dem Maximum stetig auf ein Minimum abfällt und nicht mehr die 0 erreicht.

- Wie oben schon beschrieben entstehen immer wieder **elastische Stöße**, hierbei spielt der Energieübertrag kaum eine Rolle, nur die Richtungsänderung kann man im Bremsbereich nicht vernachlässigen, dies führt zu einer Abflachung und Verbreiterung der Franck-Hertz-Kurve.
- Der Einfluss des Dampfdruckes Um ein möglichst gute Messung zu erhalten, muss außerdem die mittlere freie Weglänge der Elektronen betrachtet werden, ist diese zu groß wird die Wahrscheinlichkeit größer, dass die Elektronen ohne jegliche Wechselwirkung mit den Quecksilberatomen bis zu Auffängerelektrode gelangen. Ist die mittlere freie Weglänge zu klein, dann entstehen mehr elastische Stöße. Es gibt also einen Bereich, in dem die mittlere freie Weglänge optimal ist. Diese kann durch den **Sättigungsdampfdruck** p_s eingestellt werden und dieser ist wiederum abhängig von der Umgebungstemperatur

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

$$\bar{w} = \frac{0,0029}{p_s} \quad (5)$$

mit p_s in mbar und \bar{w} in cm.

3 Durchführung

Der Versuch wird nach Abbildung 4 aufgebaut. Zur Messung der Energieverteilung der Elektronen wird der XY-Schreiber an die Apparatur angeschlossen, wobei die x-Achse die Bremsspannung U_A und die y-Achse den Auffängerstrom I_A darstellt. Dazu wird die Beschleunigungsspannung U_b konstant auf 11 V gehalten. Die Messung wird einmal bei Raumtemperatur $T \approx 23^\circ\text{C}$ und bei einer Temperatur von $T = 140^\circ\text{C} - 160^\circ\text{C}$ durchgeführt. Die Bremsspannung durchläuft dabei Werte von 0 V bis 20 V. Bei diesem Aufbau war darauf zu achten, dass die Heizspannung während der Messung bei etwa 3 V steht. Vor der Messung muss außerdem der XY-Schreiber justiert werden. Hierzu wird das Millimeterpapier in den XY-Schreiber eingelegt und zunächst das y-Signal ausgestöpselt. Daraufhin wird der Nullpunkt an die untere linke Seite des Papiers durch die "zero"-Knöpfe verschoben. Als nächstes wird das y-Signal wieder angebracht um die Empfindlichkeit der x- und y-Achse einzustellen, hierzu wird die Messung ohne Stift durchlaufen, um die maximale Auslenkung des x- und y-Wertes zu betrachten. Danach werden die Empfindlichkeiten der Achsen so eingestellt, dass die Messung das ganze Blatt

beschreibt. Zuletzt muss die x-Achse noch beschriftet werden, dazu wird die Bremsspannung immer in 2 V Schritten eingestellt und mit dem XY-Schreiber ein Punkt gemacht (ohne y-Signal).

Im zweiten Versuchsteil soll die Franck-Hertz-Kurve für verschiedene Temperaturen dargestellt werden. Hierzu werden für 5 verschiedene Messungen Temperaturen im Bereich 160 °C-200 °C eingestellt. Das x-Signal wird an die Beschleunigungsspannung U_b und das y-Signal an den Auffängerstrom I_A angeschlossen. Die Bremsspannung U_A beträgt 1 V, der Messbereich ist $U_b = 0 \text{ V} - 60 \text{ V}$. Die Justage des XY-Schreibers verläuft wie in dem vorherigen Versuchsteil.

Im letzten Teil soll die Ionisierungsenergie der Quecksilberatome gemessen werden. Bei einer Temperatur von $T = 100^\circ\text{C} - 110^\circ\text{C}$ wird die Bremsspannung auf $U_A = -30 \text{ V}$, um mit dem Auffängerstrom nur die positiv geladenen Quecksilberionen zu messen. Auch hier wird an das x-Signal die Beschleunigungsspannung U_b und an das y-Signal der Auffängerstrom I_A angeschlossen. Der Messbereich ist $U_b = 0 \text{ V} - 60 \text{ V}$. Auch hier erfolgt die Justage wie in dem ersten Versuchsteil.

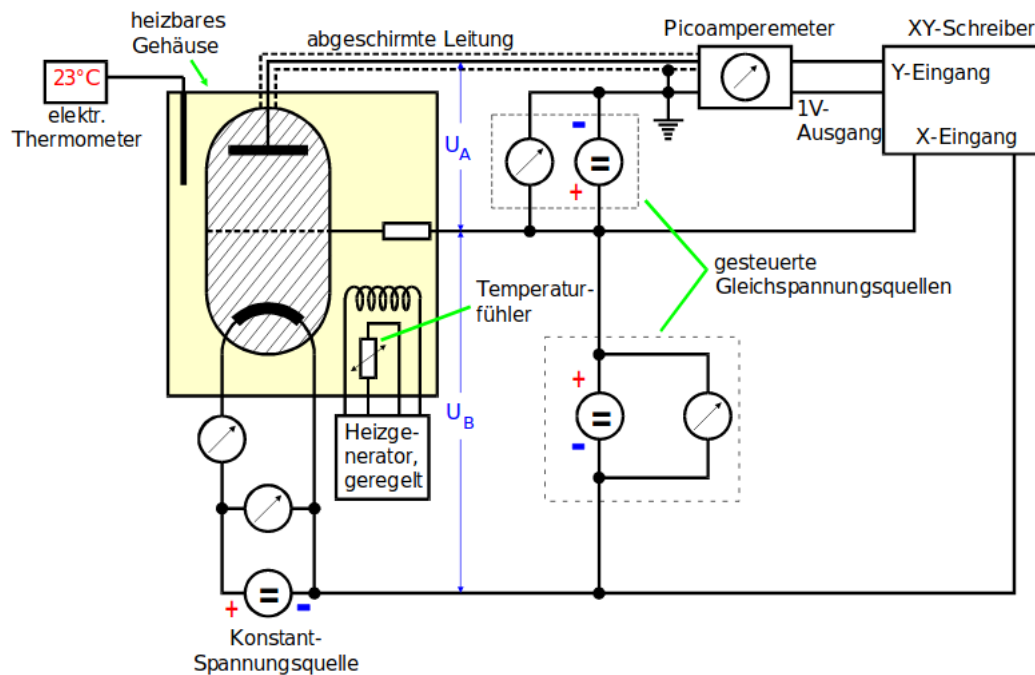


Abbildung 4: Versuchsaufbau.[Dor]

4 Auswertung

Zu Beginn des Versuchs werden der Sättigungsdruck und die mittlere freie Weglänge \bar{w} , die die Elektronen zurücklegen, für die verschiedenen verwendeten Temperaturen

berechnet. Dies geschieht mit Hilfe von Gleichung 4 und 5 und die Ergebnisse sind in Tabelle 1 zu sehen.

Tabelle 1: Verwendete Temperaturen, Sättigungsdrücke und mittlere freie Weglängen.

T_1 / K	p_{stt} / mbar	\bar{w} / cm	a / cm
296,05	$4,5032 \cdot 10^{-3}$	0,6440	1,55
403,25	2,1628	$1,3409 \cdot 10^{-3}$	745,77
457,15	16,1485	$1,7959 \cdot 10^{-4}$	5568,24
366,65	0,3943	$7,3548 \cdot 10^{-3}$	135,97

Um die, mit dem XY-Schreiber erstellten, Plots auswerten zu können, müssen in jedem erstellen Plot zunächst die X-Achsen skaliert werden. Hierfür werden bei bekannten Voltwerten, einzelne Markierungen entlang der X-Achse gemacht, durch die dann eine Regression der Form

$$U = ax + b$$

gelegt, um mit Hilfe dieser Gleichung im laufe des Versuchs die exakten Werte für die Spannungen zu berechnen. Die entsprechenden Regressionsparameter sind in Tabelle 2 zu sehen und die zugehörigen Plots ins Abbildung 5 und 7.

Tabelle 2: Regressionsparameter zur Skalierung der X-Achsen.

Plot	a in V/mm	\bar{w} / cm
1,2	$0,0410 \pm 0,0007$	$-0,47 \pm 0,11$
3	$0,2550 \pm 0,0011$	$-0,39 \pm 0,13$
4	$0,1187 \pm 0,0004$	$-0,63 \pm 0,05$

Abbildung 5: Skalierung der X-Achsen der Plots eins bis drei, die mit Hilfe des XY-Schreibers erstellt wurden.

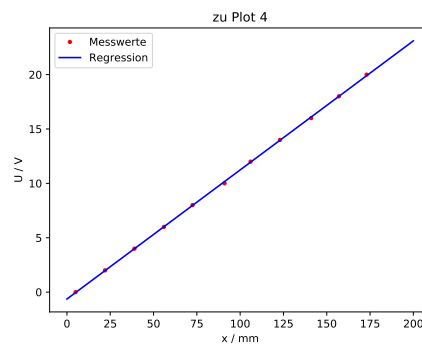
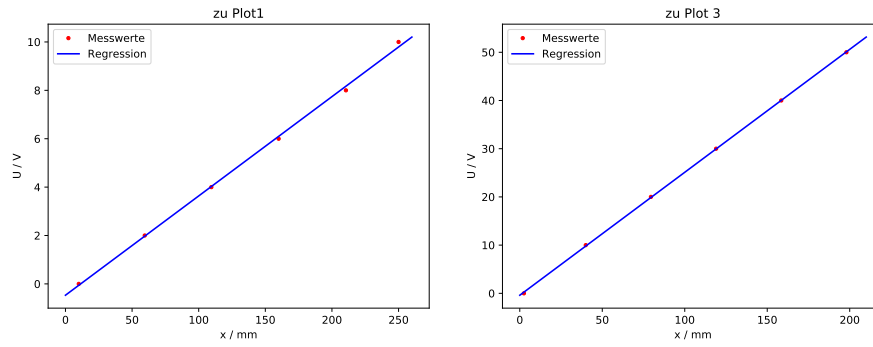


Abbildung 7: Skalierung der X-Achsen des vierten Plots, der mit Hilfe des XY-Schreibers erstellt wurde.

4.1 Energieverteilung

Im ersten Teil des Versuchs werden die integralen Energieverteilungen in differentielle umgewandelt, indem in die erstellten Plots Steigungsdreiecke eingezeichnet werden und dann die Steigungen gegen die Spannung U aufgetragen wird. Hierbei gilt für beide Plots, dass Δx 6 mm beträgt. Die abgelesenen Werte für die Temperatur $T = 296,05$ K sind in Tabelle 3, der mit Hilfe der Werte erstellte Plot ist in Abbildung 8 zu sehen. Die der Temperatur $T = 403,25$ K entsprechenden Werte und der dazugehörige Plot sind in Tabelle 4 und Abbildung 9 zu sehen. Bei der Energieverteilung bei der ersten Temperatur $T = 296,05$ K ist zu beobachten, dass die meisten Elektronen eine Energie von 7.402 eV besitzen, obwohl diese mit $U_B = 10$ V beschleunigt wurden, weshalb zu erwarten wäre, dass die meisten Elektronen eine Energie von 10 eV besäßen. Die Differenz ergibt das Kontaktpotential und beträgt:

$$K = U_B - U_A = 2.598 \text{ V}$$

Die Fermi-Dirac-Verteilung begründet, weshalb nicht alle Elektronen dieselbe Energie besitzen und demnach die Peaks der beiden Energieverteilungen nicht infinitesimal sind. Es ist zu sehen, dass der Peak der Energieverteilung bei $T = 403,25$ K noch abgeflachter ist, da diese Verteilung temperaturabhängig ist. Des Weiteren ist die mittlere freie Weglänge bei der höheren Temperatur deutlich geringer, was somit zu mehr Stößen zwischen den Elektronen führt, durch die diese dann so abgelenkt werden, dass sie sich nicht mehr in Richtung der Auffängerelektrode bewegen.

Tabelle 3: Abgelesene Messwerte der differentiellen Energieverteilung bei $T = 296,05$ K.

x / mm	U / V	Δy / mm
10	0	0
17	0.227	3
24	0.514	2
30	0.76	3
36	1.006	2
42	1.252	3
48	1.498	2
54	1.744	3
60	1.99	3
66	2.36	2
72	2.482	3
78	2.728	3
84	2.974	3
90	3.22	3
96	3.466	4
102	3.712	3
108	3.958	4
114	4.204	4
120	4.45	4
126	4.696	4
132	4.944	5
138	5.188	5
144	5.434	6
150	5.68	5
156	5.926	7
162	6.172	7
168	6.418	8
174	6.664	10
180	6.91	11
186	7.156	12
192	7.402	12
198	7.648	6
204	7.894	2
210	8.14	1
214	8.304	0

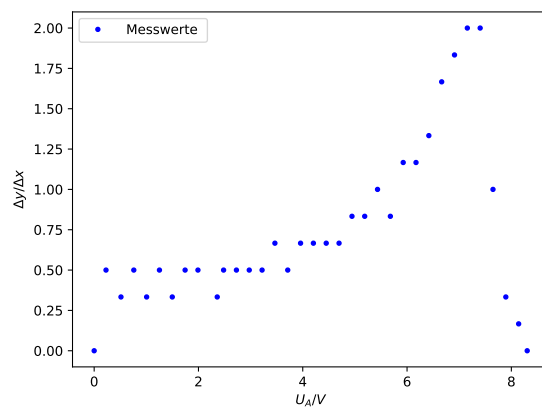


Abbildung 8: Differentielle Energieverteilung bei $T = 296,05$ K.

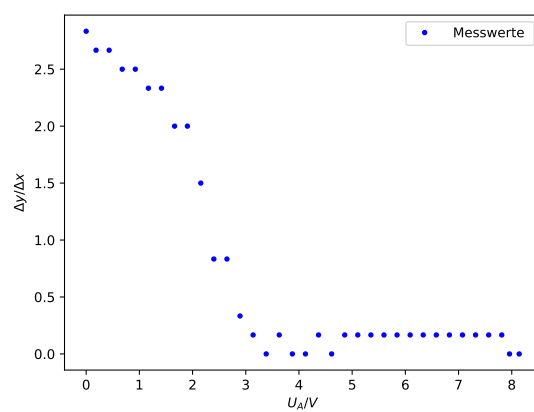


Abbildung 9: Differentielle Energieverteilung bei $T = 403,25$ K.

Tabelle 4: Abgelesene Messwerte der differentiellen Energieverteilung bei $T = 403,25$ K.

x / mm	U / V	Δy / mm
10	0	17
16	0.186	16
22	0.432	16
28	0.678	15
34	0.924	15
40	1.17	14
46	1.416	14
52	1.662	12
58	1.903	12
64	2.154	9
70	2.4	5
76	2.646	5
82	2.892	2
88	3.138	1
94	3.384	0
100	3.63	1
106	3.876	0
112	4.122	0
118	4.368	1
124	4.614	0
130	4.86	1
136	5.106	1
142	5.352	1
148	5.598	1
154	5.844	1
160	6.09	1
166	6.336	1
172	6.582	1
178	6.828	1
184	7.074	1
190	7.32	1
196	7.566	1
202	7.812	1
208	7.958	0
210	8.14	0

4.2 Franck-Hertz-Kurve

Um die erste Anregungsenergie zu berechnen, werden die Abstände zwischen den Maxima der Franck-Hertz-Kurve gemessen, um Werte für U_1 zu ermitteln, und im Anschluss der Mittelwert gebildet. Für die Anregungsenergie gilt:

$$E_1 - E_0 = eU_1$$

Der Mittelwert für U_1 und der dazugehörige Fehler berechnen sich mit Hilfe folgender Formeln:

$$\overline{U_1} = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 U_1$$
$$\Delta \overline{U_1} = \sqrt{\frac{1}{7} \sum_{i=1}^8 (U_1 - \overline{U_1})^2}$$

Somit ergibt sich für $U_1 = (4.8375 \pm 0.4090) \text{ V}$.

Mit Hilfe folgender Formel lässt sich dann die der Energie entsprechende Wellenlänge bestimmen:

$$\lambda = \frac{h \cdot c}{eU_1}$$
$$\lambda = (256 \pm 22) \text{ nm}$$

Aus der Lage des ersten Maximums lässt sich dann weiter das Kontaktpotential bestimmen:

$$U_{max1} = U_1 + K = 7.26 \text{ V}$$
$$K = U_{max1} - U_1$$

Die gesamte Franck-Hertz-Kurve ist um dieses Potential verschoben. Da U_1 eine fehlerbehaftete Größe ist, muss hierbei die Gaußsche Fehlerfortpflanzung beachtet werden und es ergibt sich mit Hilfe folgender Formel der Wert für K mit zugehörigem Fehler:

$$\Delta K = \sqrt{(-1)^2 \cdot (\Delta U_1)^2}$$
$$K = (2.4 \pm 0.4) \text{ V}$$

Da kein Literaturwert für das Kontaktpotential gefunden werden konnte und der in diesem Teil des Versuchs ermittelte Wert für das Kontaktpotential dem gleicht, der im ersten Teil ermittelt wurde, wird im folgenden mit dem Mittelwert weitergerechnet, der sich wie folgt berechnet:

$$\bar{K} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 K$$

$$\Delta \bar{K} = \sqrt{\sum_{i=1}^2 (K - \bar{K})^2}$$

Der Mittelwert für K beträgt:

$$\bar{K} = (2.499 \pm 0.140) \text{ V}$$

Tabelle 5: Maximaabstände der Franck-Hertz-Kurve

k	$x_{k+1} - x_k / \text{ mm}$	$U_{k+1} - U_k / \text{ V}$
1	18	4,2
2	19	4,455
3	20	4,71
4	20	4,71
5	21	4,965
6	21	4,965
7	22	5,22
8	23	5,475

4.3 Ionisierungsenergie

Die Ionisierungsenergie von Quecksilber wird bestimmt, indem eine Asymptote durch den Graphen 10 von $T = 366,65 \text{ K}$ gelegt und der Schnittpunkt mit der X-Achse bestimmt. Mittels der Skalierung, die zu Beginn durchgeführt wurde, ergibt sich ein Wert für die Ionisierungsspannung, wobei auch hier wieder das zuvor bestimmte Kontaktpotential mit eingerechnet werden muss:

$$U_{\text{Ion}} + \bar{K} = 14.089 \text{ V}$$

Mit Hilfe des zuvor berechneten und gemittelten Kontaktpotentials ergibt sich folgender Wert für die Ionisierungsenergie von Quecksilber:

$$E_{\text{Ion}} = (11.59 \pm 0.14) \text{ eV}$$

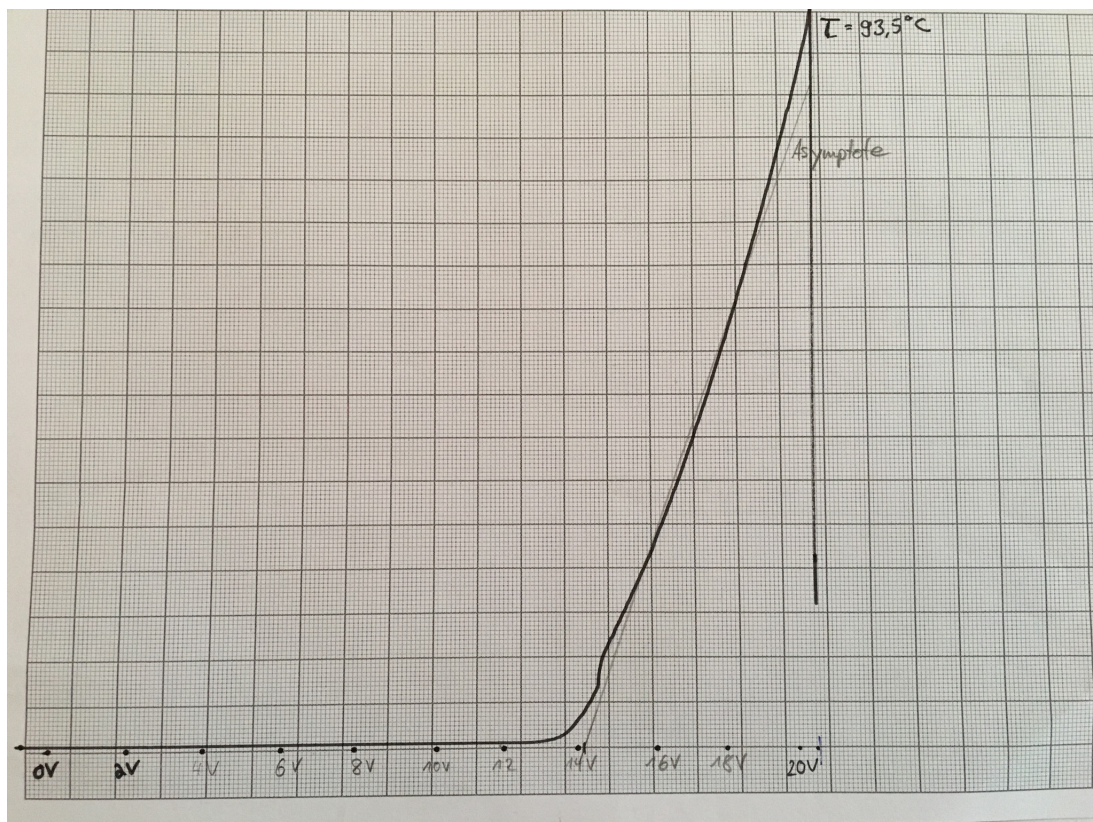


Abbildung 10: Plot mit eingezeichneter Asymptote zur Ermittlung der Ionisierungsenergie von Quecksilber.

5 Diskussion

Die beiden experimentell ermittelten Werte für das Kontaktpotential sind nicht zu bewerten, da hierfür keine Literaturwerte vorliegen. Die Literaturwerte für die Anregungsenergie [Wup], sowie für die Ionisierungsenergie [per] sind mit den zu vergleichenden Messwerten und der prozentualen Abweichung in Tabelle 6 zu finden. Beim Vergleich fällt auf, dass der Wert für die Anregungsenergie exakter bestimmt werden konnte. Die Abweichung hierfür liegt im Bereich der Standardabweichung. Die Abweichung für die Ionisierungsenergie hingegen weist einen recht großen Wert auf. Dies ist durch die recht ungenaue Methode der Ermittlung der Ionisierungsspannung, über das Einzeichnen der Asymptote, zu erklären, was als eine wesentliche Fehlerquelle zu betrachten ist, da hier lediglich abgeschätzt werden konnte, wo die Asymptote verlaufen sollte. Eine weitere Fehlerquelle ist das Ablesen der Messergebnisse aus dem Plot des XY-Schreibers. Hier besteht durch die Breite der aufgezeichneten Linie und das Milimeterpapier eine relativ große Ableseungenauigkeit. Da für die Ermittlung der beiden Energien dieselbe Apparatur verwendet wurde, ist folglich die Anpassung der Asymptote an den Graphen als die Fehlerquelle einzuschätzen, die den größten Einfluss auf das Ergebnis des Experiments besitzt.

Tabelle 6: Messwerte und Literaturwerte mit prozentualer Abweichung

	Messwerte	Literaturwerte	Prozentuale Abweichung
E_{Anregung}	$(4.8375 \pm 0.4090) \text{ eV}$	4.9 eV	1.43 %
E_{Ion}	$(11.59 \pm 0.14) \text{ eV}$	10.438 eV	11.04 %

Literatur

- [Dor] TU Dortmund. *Versuchsanleitung zu Versuch Nr. 601 Franck-Hertz-Versuch*. URL: <http://129.217.224.2/HOMEPAGE/MEDPHYS/BACHELOR/AP/SKRIPT/V601.pdf> (besucht am).
- [per] periodensystem.info. *Quecksilber:Atomeigenschaften*. URL: <http://www.periodensystem.info/elemente/quecksilber/> (besucht am).
- [Wup] Universität Wuppertal. *Franck-Hertz-Experiment*. URL: <http://hydrogen.physik.uni-wuppertal.de/hyperphysics/hyperphysics/hbase/FrHz.html#FHd> (besucht am).