

Durchführung: 23.05.2017
Abgabe: 30.05.2017

PRAKTIKUMSPROTOKOLL V601

FRANCK-HERTZ-VERSUCH

Anneke Reinold¹,
Vanessa Sulaiman²

¹anneke.reinold@tu-dortmund.de

²vanessa.sulaiman@tu-dortmund.de

1 Einleitung

Ziel des Versuchs soll sein die Quantennatur der Elektronenhülle zu bestätigen, indem die Energieunterschiede zwischen dem Grundzustand und des ersten angeregten Zustands gemessen und die Energieverteilung aufgestellt wird. Auch wird die Ionisierungsspannung von Quecksilber bestimmt.

2 Theorie

2.1 Experimentelle Funktionsweise

Um die zuvor in 1 genannten Punkte experimentell darlegen zu können, wird der Franck-Hertz-Versuch genutzt. Er beruht darauf, unter Nutzung der aus Elektronenstößen gewonnenen Ergebnisse, Rückschlüsse auf die Struktur der Elektronenhülle ziehen zu können. Im Speziellen werden Elektronen gleicher Energie mit Quecksilberdampf wechselwirken gelassen. Durch die zustande gekommenen elastischen Stöße passiert es, dass Quecksilberatome Energie aufnehmen und durch die Energiedifferenz vor und nach dem Stoß sich diese berechnen lässt. Sollten unelastische Stöße zustande kommen, so wird das Quecksilberatom aus dem Grundzustand E_0 in den ersten angeregten Zustand E_1 gehoben. Der prinzipielle Versuchsaufbau ist in Abbildung 1 zu sehen. Er besteht im Generellen aus

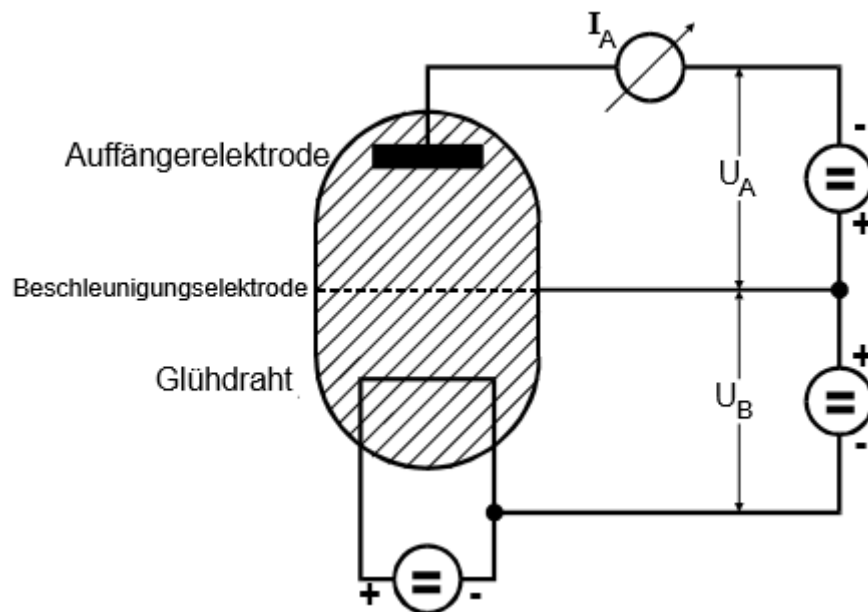


Abbildung 1: Prinzipieller Aufbau des Franck-Hertz-Versuchs[1].

einem evakuiertem Gefäß, indem sich ein Tropfen Quecksilber befindet, dessen Dampfdichte sich durch die Temperatur regeln lässt. Durch Erhitzen lösen sich Elektronen aus dem Glühdraht heraus und werden von einer Spannung U_B hin zur Beschleunigungselektrode

beschleunigt. Die Elektronen erhalten auf der Beschleunigungsstrecke eine Energie von

$$\frac{m_0 v_{\text{vor}}^2}{2} = e_0 U_B. \quad (1)$$

Die Energiemessung erfolgt über ein Gegenfeld, das zwischen Beschleunigungs- und Auffängerelektrode angelegt wird. Genauer gesagt ist es allein den Elektronen möglich, die Auffängerelektrode zu erreichen, sollten sie eine Energie besitzen, die

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

erfüllt. Nunmehr halten sich Quecksilberatome im Beschleunigungsraum auf, sodass es zu Wechselwirkungen mit den Elektronen kommt. Ist die Bedingung, dass die Elektronenenergie nicht allzu hoch ist, für einen elastischen Stoß gegeben, so gilt für den zentralen Stoß

$$\Delta E = \frac{4m_0 M}{(m_0 + M)^2} E. \quad (3)$$

Ist jedoch gegeben, dass die Elektronenenergie $E \geq (E_1 - E_0)$ ist, so kommt es zu einem inelastischen Stoß und es gilt

$$\frac{n_0 v_{\text{vor}}^2}{2} - \frac{n_0 v_{\text{nach}}^2}{2} = E_1 - E_0. \quad (4)$$

Das Quecksilberatom ist nun im ersten angeregten Zustand und relaxiert nach 10^{-8} s in seinen Grundzustand zurück und emittiert dabei ein Photon mit der Energie

$$h\nu = E_1 - E_0. \quad (5)$$

Zeitlich über mehrere Stöße hinweg gesehen kommen die Elektronen zu dem Punkt, an dem sie keine Energie besitzen, um gegen das Bremsfeld anlaufen zu können. Bemerkbar ist dies dadurch, dass der Auffängerstrom I_A immer weiter absinken muss und sich der in Abbildung 2 gezeigte Kurvenverlauf ergibt.

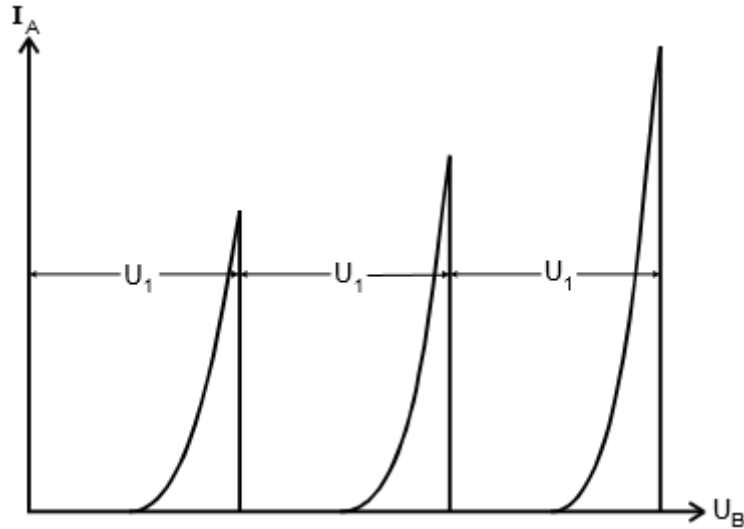


Abbildung 2: Verlauf zwischen der Bremsspannung U_B und dem Auffängerstrom I_A [1].

2.2 Erwartbare Fehlerquellen

Für die Erklärung, der aus dem Versuch gewonnenen Ergebnisse, von Bedeutung ist, dass die gemessene Kurve aufgrund mehrerer Punkte nicht exakt die in 2 gezeigte Form annehmen kann. Erstens kommt es aufgrund der Unterschiede im Material zwischen den Elektroden, welche eine andere Austrittsarbeit für Elektronen besitzen, zu einem Potentialgefälle, wenn die Elektronen den Glühdraht verlassen und wenn sie auf die Beschleunigungselektrode treffen, sodass die Kurve um ein Kontaktpotential K verschoben sein wird. Das Kontaktpotential ist definiert durch

$$K = \frac{1}{e_0}(\Phi_B - \Phi_G). \quad (6)$$

Des Weiteren besitzen die Elektroden im Leiter schon zu Beginn ein Energiespektrum, sodass nicht davon ausgegangen werden kann, dass alle Elektronen die gleiche Energie besitzen und eine unterschiedliche Anfangsgeschwindigkeit besitzen. Dies wird insofern in der Kurve bemerkbar, dass der Anstieg zu einem Maximum verringert ist und beim Fallen nicht mehr unstetig abläuft. Außerdem kommt es zu Richtungsänderungen der Elektronen nach elastischen Stößen, sollten diese zwischen der Beschleunigungs- und der Auffängerelektrode passieren. Somit kommt es dazu, dass die erhaltene Kurve flacher sein wird, als erwartet. Schließlich ist zu beobachten, dass der Franck-Hertz-Effekt in einem bestimmten Temperaturbereich besser funktioniert. Dafür muss gegeben sein, dass die mittlere freie Weglänge \bar{w} klein im Vergleich zum Abstand a zwischen der Glüh- und der Beschleunigungskathode sein muss. Die Weglänge \bar{w} lässt sich über den Dampfdruck des

Quecksilbers und somit über die Temperatur einstellen:

$$\bar{w} = \frac{0,0029}{p_{\text{Sät}}} \quad (7)$$

$$p_{\text{Sät}} = 5,5 \cdot 10^7 \exp \frac{-6876}{T}, \quad (8)$$

mit \bar{w} in cm, $p_{\text{Sät}}$ in mbar und T in K. Beim Unterschreiten des Temperaturbereichs sinkt die Wahrscheinlichkeit, dass Stöße auftreten, sodass auch dies sich auf die Messung auswirkt.

3 Aufbau und Durchführung

Der genaue Versuchsaufbau erfolgt nach Abbildung 3. Um die Kurven aufzuzeichnen, wird ein XY-Schreiber angeschlossen. Einstellbar ist die Temperatur im Gehäuse über einen Heizgenerator.

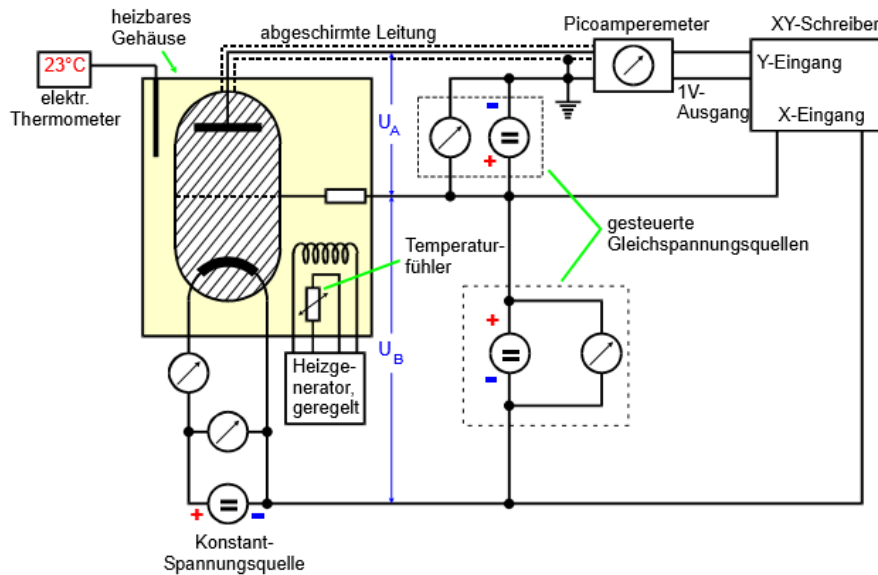


Abbildung 3: Schaltungstechnischer Versuchsaufbau[1].

Zu Beginn wird die integrale Energieverteilung der Elektronen bestimmt, die beschleunigt worden sind. Es wird hierzu der Auffängerstrom I_A in Abhängigkeit der Bremsspannung U_A bei $U_B = \text{const}$ gemessen. U_B bleibt in diesem Fall konstant und die Temperatur wird variiert. Im Folgenden wird die Franck-Hertz-Kurve für unterschiedliche Temperaturen aufgenommen, wobei für die weitere Auswertung jene herangezogen wird, die die deutlichste Ausprägung aufweist. U_A bleibt konstant und U_B liegt im Bereich $0 < U_B < 60 \text{ V}$. Schlussendlich wird die Ionisierungsspannung von Quecksilber bestimmt, indem I_A in Abhängigkeit von U_B gemessen wird und mit U_A ein konstantes Gegenfeld anliegt.

4 Auswertung

Zu Beginn werden die mittleren Weglängen \bar{w} für die verwendeten Temperaturen mit den Gleichungen (7) und (8) berechnet und mit dem Abstand $a = 1$ cm zwischen Kathode und Beschleunigungselektrode verglichen. Die berechneten Werte sind in Tabelle 1 aufgetragen.

Tabelle 1: Verwendete Temperaturen, zugehörige Dampfdrücke und mittlere Weglängen.

T / K	$p_{\text{Sät}} / \text{mbar}$	\bar{w} / cm	a / \bar{w}
301,05	$6,6229 \cdot 10^{-3}$	0,4379	2,28
423,15	4,8225	$6,0135 \cdot 10^{-4}$	1662,93
459,15	17,2420	$1,6819 \cdot 10^{-4}$	5945,66
383,15	0,8841	$32,8017 \cdot 10^{-4}$	304,86

Zur Auswertung der Plots des XY-Schreibers müssen jeweils die x-Achsen skaliert werden. Dafür wurden einzelne Markierungen an den Achsen gemacht und durch diese wird eine Regression der Form

$$U = ax + b \quad (9)$$

gelegt. Die Werte sind in Abbildung 4 aufgetragen und die entsprechenden Regressionsparameter sind in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Skalierungsparameter der x-Achsen.

Plot	a in V / mm	b in V
1	$0,0861 \pm 0,0006$	$-0,75 \pm 0,04$
2	$0,0861 \pm 0,0006$	$-0,81 \pm 0,05$
3	$0,2571 \pm 0,0004$	$-1,56 \pm 0,05$
4	$0,2545 \pm 0,0014$	$-1,69 \pm 0,11$

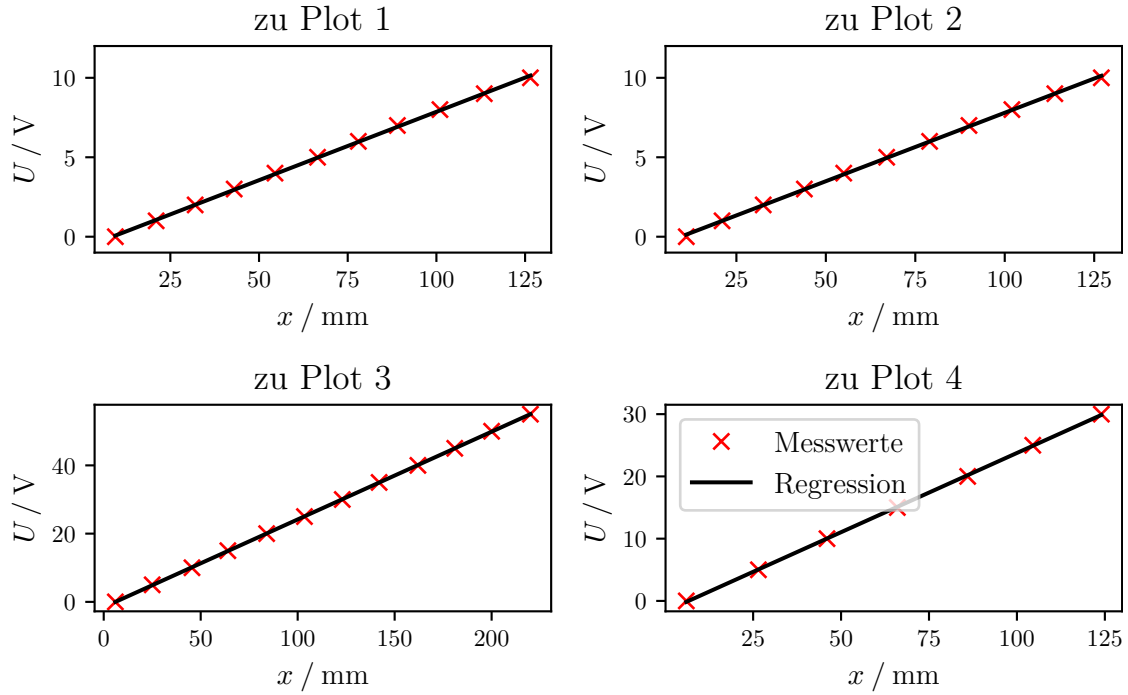


Abbildung 4: Skalierung der x-Achsen der Plots des XY-Schreibers.

4.1 Energieverteilung

Nun werden die integralen Energieverteilungen in differentielle umgewandelt, indem Steigungsdreiecke eingezeichnet werden und die Steigungen gegen U aufgetragen werden. Die abgelesenen Werte für $T = 301,05\text{ K}$ sind in Tabelle 3 dargestellt, wobei für alle Steigungsdreiecke $\Delta = 2\text{ mm}$ gilt. Die entsprechende differentielle Energieverteilung ist in Abbildung 5 aufgetragen. Für $T = 423,15\text{ K}$ sind die Werte in Tabelle 4 und die differentielle Energieverteilung in Abbildung 6, wobei hier für alle Steigungsdreiecke $\Delta = 5\text{ mm}$ gilt.

Bei der Energieverteilung für Zimmertemperatur ($T = 301,05\text{ K}$) fällt auf, dass die Mehrheit der Elektronen eine Energie von $9,2376\text{ eV}$ besitzen, obwohl sie mit 11 V beschleunigt wurden. Die Differenz ist das Kontaktpotential und beträgt

$$K = U_B - U_A = 1,7624\text{ V}.$$

Aufgrund der Fermi-Dirac-Verteilung besitzen jedoch nicht alle Elektronen die gleiche Energie, sodass der Peak nicht infinitesimal ist. Da diese Verteilung temperaturabhängig ist, ist die differentielle Energieverteilung bei $T = 423,15\text{ K}$ deutlich breiter verteilt. Eine weitere Ursache dafür ist die deutlich kleinere mittlere Weglänge zwischen den Stößen (siehe Tabelle 1), sodass die Wahrscheinlichkeit deutlich größer ist, dass Elektronen so stoßen, dass sie ihre Richtung deutlich ändern und sich nicht mehr in Richtung der Auffängerelektrode bewegen.

Tabelle 3: Messwerte der differentiellen Energieverteilung bei $T = 301,05$ K.

x / mm	U_A / V	Δy / mm
20	0,9720	0,0
65	4,8465	0,5
77	5,8797	1,0
88	6,8268	1,0
90	6,9990	1,5
92	7,1712	1,5
94	7,3434	1,5
96	7,5156	2,0
98	7,6878	2,0
100	7,8600	2,0
102	8,0322	2,5
104	8,2044	3,0
106	8,3766	3,0
108	8,5488	4,0
110	8,7210	5,0
112	8,8932	7,0
114	9,0654	16,0
116	9,2376	32,0
118	9,4098	23,0
120	9,5820	5,0
122	9,7542	2,0
125	10,0125	0,0

Tabelle 4: Messwerte der differentiellen Energieverteilung bei $T = 423,15$ K.

x / mm	U_A / V	Δy / mm
17,5	0,696 75	27,0
22,5	1,127 25	10,5
27,5	1,557 75	5,5
32,5	1,988 25	5,0
37,5	2,418 75	6,0
42,5	2,849 25	6,5
47,5	3,279 75	7,5
52,5	3,710 25	8,0
57,5	4,140 75	8,0
62,5	4,571 25	7,5
67,5	5,001 75	7,0
72,5	5,432 25	7,0
77,5	5,862 75	3,5
82,5	6,293 25	2,0
87,5	6,723 75	0,0

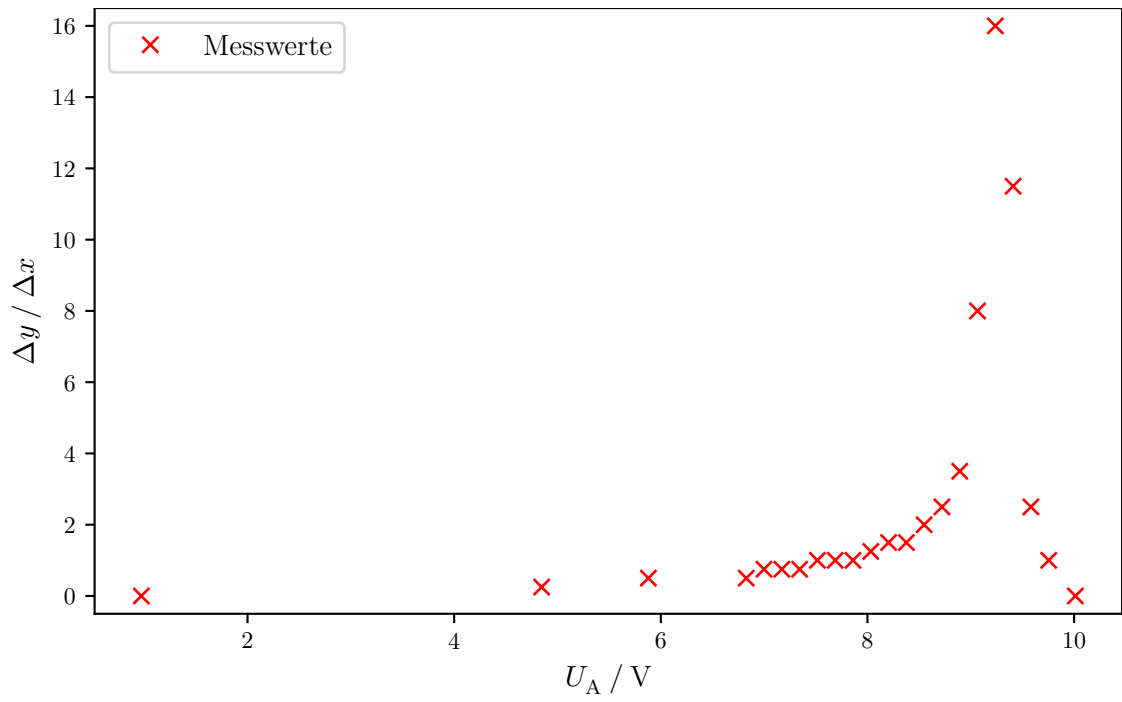


Abbildung 5: Differentielle Energieverteilung bei $T = 301,05$ K.

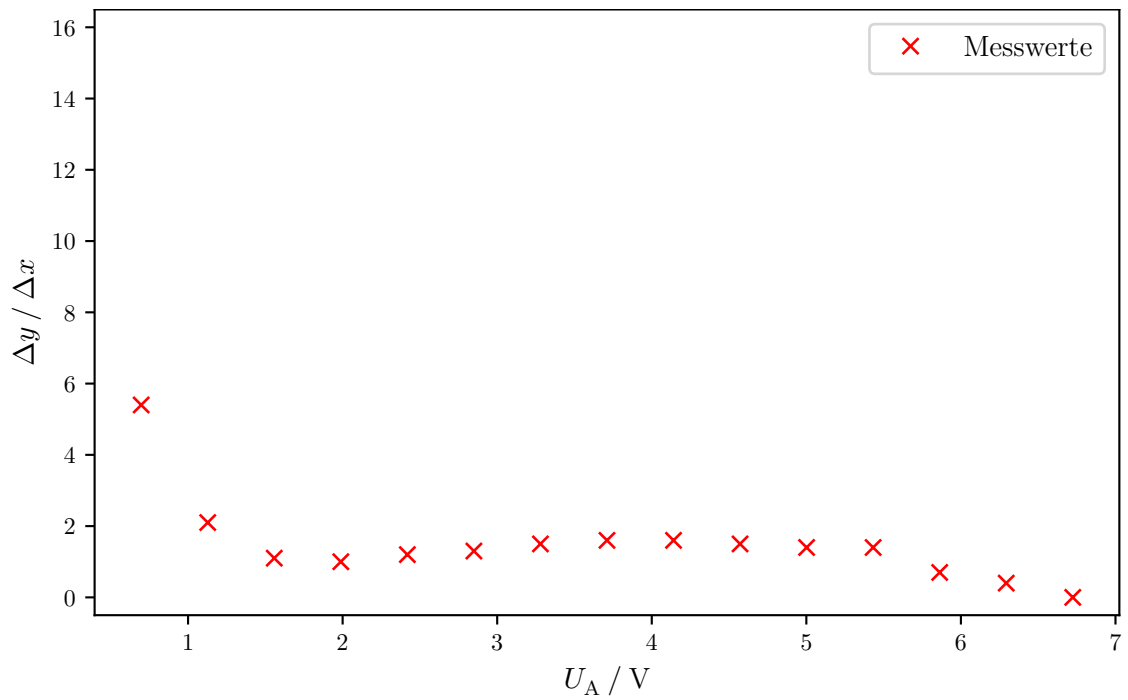


Abbildung 6: Differentielle Energieverteilung bei $T = 423,15$ K.

4.2 Franck-Hertz-Kurve

Zur Berechnung der ersten Anregungsenergie $E_1 - E_0 = eU_1$ werden die Abstände zwischen den Maxima der Franck-Hertz-Kurve gemessen und der Mittelwert gebildet. Die Abstände sind in Tabelle 5 aufgetragen und es ergibt sich der Mittelwert

$$U_1 = (3,4106 \pm 0,1212) \text{ V}.$$

Die Energie entspricht nach Formel (5) mit $\nu = \frac{c}{\lambda}$ der Wellenlänge

$$\lambda = (364 \pm 13) \text{ nm}.$$

Aus der Lage des ersten Maximums

$$U_{1.\text{Max}} = U_1 + K = 5,3817 \text{ V}$$

lässt sich das Kontaktpotential erneut bestimmen, da die gesamte Franck-Hertz-Kurve um dieses Potential verschoben ist und es ergibt sich

$$K = (1,9711 \pm 0,1212) \text{ V}.$$

Dieser Wert ist dem zuvor berechneten Wert ähnlich und da kein Literaturwert bekannt ist, wird im folgendem mit dem Mittelwert

$$\bar{K} = (1,9 \pm 0,1) \text{ V}$$

weitergerechnet.

Tabelle 5: Abstände der Maxima der Franck-Hertz-Kurve.

k	$(x_{k+1} - x_k) / \text{mm}$	$(U_{k+1} - U_k) / \text{V}$
1	18	3,0678
2	18	3,0678
3	18	3,0678
4	19	3,3249
5	19	3,3249
6	19	3,3249
7	20	3,5820
8	21	3,8391
9	22	4,0962

4.3 Ionisierungsenergie

Zur Berechnung der Ionisierungsenergie wird eine Asymptote an den Graphen angelegt, deren Nullstelle bestimmt wird. Dazu werden einige relevante Werte aus dem Graphen

abgelesen und eine lineare Regression durch diese berechnet. Aus der Regression ergeben sich die Parameter

$$a = (3,4 \pm 0,1) \frac{\text{mm}}{\text{V}}$$

$$b = (-45,2 \pm 2,0) \text{ mm}$$

und somit die Nullstelle

$$U_{\text{ion}} + \bar{K} = (13,3 \pm 0,7) \text{ V}.$$

Es folgt also

$$E_{\text{ion}} = (11,4 \pm 0,7) \text{ eV}$$

für die Ionisierungsenergie von Quecksilber.

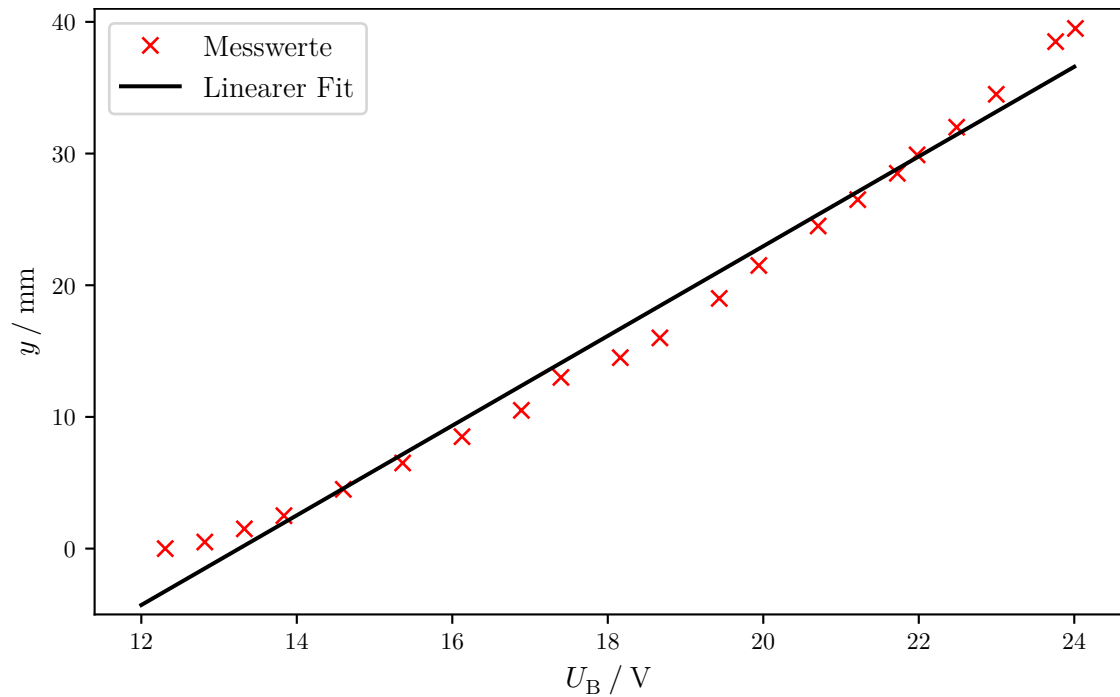


Abbildung 7: Bestimmung der Ionisierungsenergie.

5 Diskussion

Die beiden Ergebnisse für das Kontaktpotential können nicht weiter verglichen werden, da kein Literaturwert bekannt ist. Allerdings lassen sich die Anregungsenergie[3] und die Ionisierungsenergie[2] jeweils mit Literaturwerten vergleichen:

Tabelle 6: Vergleich der Messwerte mit Literaturwerten

	Messwert in eV	Literaturwert in eV	Abweichung in %
E_{anregung}	$3,4106 \pm 0,1212$	4,9	30,40
E_{ion}	$11,4 \pm 0,7$	10,438	8,44

Es zeigt sich, dass die Bestimmung der Ionisierungsenergie genauer ist als die Bestimmung der Anregungsenergie. Dennoch sind beide Abweichungen groß und die Literaturwerte liegen nicht innerhalb der Standardabweichungen der Messwerte, was auf einen systematischen Messfehler hindeutet. Die größte Ungenauigkeit entsteht vermutlich durch das Ablesen von den Plots des XY-Schreibers, da durch das Millimeterpapier nur eine geringe Ablesegenauigkeit besteht.

Literatur

- [1] TU Dortmund. *Versuchsanleitung zu Versuch 601*. URL: <http://129.217.224.2/HOME/PAGE/PHYSIKER/BACHELOR/AP/SKRIPT/V601.pdf> (besucht am 04.04.2017).
- [2] periodensystem.info. *Quecksilber: Atomeigenschaften*. URL: <http://www.periodensystem.info/elemente/quecksilber/> (besucht am 30.05.2017).
- [3] Universität Wuppertal. *Franck-Hertz-Messwerte für Quecksilber*. URL: <http://hydrogen.physik.uni-wuppertal.de/hyperphysics/hyperphysics/hbase/FrHz.html#FHd> (besucht am 30.05.2017).