

Versuch 601 "Der Franck-Hertz-Versuch"

Robert Konradi
robert.konradi@tu-dortmund.de

Lauritz Klünder
lauritz.kluender@tu-dortmund.de

Durchführung: 10.04.2018, Abgabe: 17.04.2018

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1 Zielsetzung	3
2 Theorie	3
2.1 Aufbau des Franck-Hertz-Versuches	3
2.2 Störeinflüsse	5
3 Durchführung	6
4 Auswertung	7
4.1 Differentielle Energieverteilung	7
4.2 Franck-Hertz-Kurve	11
4.3 Ionisierungsspannung	12
5 Diskussion	13
Literatur	13

1 Zielsetzung

In diesem Versuch wird der Franck-Hertz-Versuch untersucht. Mit ihr können diskrete Energiewerte eines Atoms bestimmt werden. Des Weiteren wird die Energieverteilung von Elektronen sowie die Ionisationsenergie von Quecksilber (Hg) untersucht und bestimmt.

2 Theorie

Unter Elektronenstoßexperiment gehört der der Franck-Hertz-Versuch dazu. Sie dient zur Strukturaufklärung der Elektronenhülle. In einen abgeschlossenen Raum lässt sich monoenergetische Elektronen mit darin enthaltenen Hg-Dampf wechselwirken. Es treten elastische und unelastische Stöße zwischen den beiden Materien statt. Mit Hilfe der Energieerhaltung und Impulserhaltung aus der Mechanik kann die Energiedifferenz ΔE , die das Hg-Atom aufgenommen hat, berechnen. Im Fall des unelastischen und elastischen Stoßes gilt die Formel:

$$\frac{m_0 \cdot v_{vor}^2}{2} - \frac{m_0 \cdot v_{nach}^2}{2} = E_1 - E_0 = \Delta E \quad (1)$$

Dabei ist E_1 der erste angeregte Zustand und E_0 der Grundzustand.

2.1 Aufbau des Franck-Hertz-Versuches

In Abbildung (1) ist eine schematische Darstellung des Versuches zu sehen.

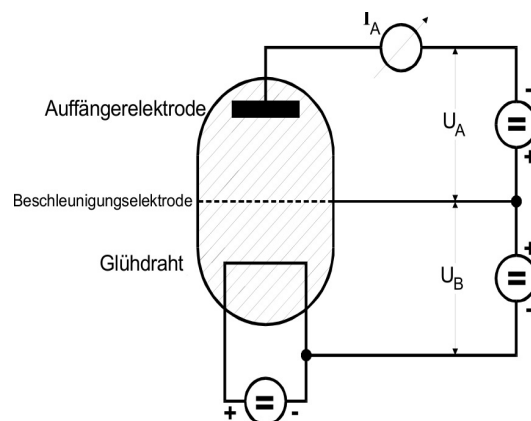


Abbildung 1: Aufbau des Franck-Hertz-Versuches [1].

Im evakuierten Gefäß befindet sich ein winziger Tropfen Quecksilber, der spontan verdampft. Es herrscht im Inneren ein Gleichgewicht zwischen Druck und Temperatur. Der Druck, auch genannt als Sättigungsdruck p_{stt} , ist nun von der Umgebungstemperatur T abhängig. Im Glühdraht wird ein Gleichstrom angelegt und mit Hilfe des glühelektrischen Effektes treten dabei eine große Anzahl von Elektronen aus. Die Beschleunigungsspannung ist von außen mit einer positiven Spannung U_a angelegt. Sobald Elektronen die

Beschleunigungsstrecke durchlaufen, erhalten sie kinetische Energie. Diese kinetische Energie lässt sich mit der Formel (2) beschreiben:

$$\frac{m_0 \cdot v_{vor}^2}{2} = e_0 \cdot U_b \quad (2)$$

Dabei ist e_0 die Elementarladung. Zu beachten ist, dass die Gleichung (2) nur dann gilt, wenn die Anfangsgeschwindigkeit aller Elektronen 0 ist. Sobald Elektronen zur Auffängerelektrode kommen, fließt ein Strom I_A die gemessen werden kann. Da eine Gegenspannung U_A anliegt, entsteht ein Bremsfeld für die Elektronen und dabei können nur Elektronen in Feldrichtung (Z-Richtung) ankommen. Es muss daher die Ungleichung

$$\frac{m_0 \cdot v_z^2}{2} \geq e_0 \cdot U_A$$

erfüllen.

Im Gefäß kommt es zwischen den Elektronen und den Hg-Atomen zu verschiedenen Stößen. Ist die Energie der Elektronen zu gering, treten nur elastische Stöße auf. Aufgrund des großen Masseunterschiedes zwischen Atom und Elektron ist die Energieabgabe $\Delta E \approx 1,1 \cdot 10^{-5} E$ sehr gering. Durch Erhöhung der Spannung U_b können die Elektronen das Hg-Atom im ersten Zustand anregen. Dabei überträgt es eine Energiedifferenz von $E_1 - E_0$ und behält das Elektron eine Restenergie von $E - (E_1 - E_0)$. Im angeregten Zustand des Hg-Atoms geht es nach einer Relaxationszeit in den Grundzustand zurück und emittiert dabei ein Lichtquant dessen Energie

$$h \cdot \nu = E_1 - E_0 \quad (3)$$

beträgt. Hier ist h das Planck'sche Wirkungsquantum und ν die Frequenz der emittierten Strahlung. Die Anregung des Hg-Atoms folgt dadurch, dass sich die Beschleunigungsspannung U_b größer ist als die fest eingestellt Gegenspannung U_a ist und ein Strom I_a fließt kann. In Abbildung (2)

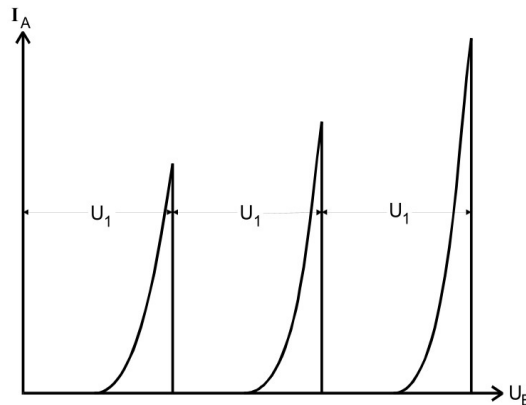


Abbildung 2: Schematische Darstellung der Franck-Hertz-Kurve [1].

ist ein idealisierter Zusammenhang zwischen dem Auffängerstrom I_A und der Beschleunigungsspannung U_b abgebildet. Der Verlauf der Kurve sagt aus, dass sobald die Elektronenenergie den Energiedifferenzwert $E_1 - E_0$ erreicht hat, treten unelastische Stöße auf und die Elektronen verlieren ihre Energie und die Auffängerelektrode detektiert kein Strom I_A mehr. Durch Erhöhung der Beschleunigungsspannung U_b bekommen die Elektronen erneut Energie dazu. Sobald die Elektronen wieder die Energiedifferenz erreichen haben treten erneut unelastische Stöße auf und der Vorgang wiederholt sich. Wie in der Abbildung (2) erfolgt dies in einem periodischen Intervall ab und der Abstand U_1 bezeichnet das erste Anregungspotential:

$$U_1 = \frac{1}{e_0} \cdot (E_1 - E_0) \quad (4)$$

des Hg-Atoms.

2.2 Störeinflüsse

Die Kurve in Abbildung (2) weicht in folgenden Punkten ab, da einige Nebeneffekte berücksichtigt werden müssen. Zum einen ist die Austrittsarbeit für die Elektronen eines Glühdrahts vom Material abhängig. Es sollte daher ein Material ausgesucht werden, dessen Austrittsarbeit Φ_g kleiner ist als die Austrittsarbeit der Beschleunigungselektrode Φ_b . Es ergibt sich nun für das effektive Beschleunigungspotential $U_{b,eff}$ den folgenden Ausdruck:

$$U_{b,eff} = U_b - \frac{1}{e_0} \cdot (\Phi_b - \Phi_g) \quad (5)$$

Der letzte Term wird auch als Kontaktpotential K bezeichnet. Das Kontaktpotenzial verschiebt lediglich die Franck-Hertz-Kurve nach vorne oder nach hinten.

Des Weiteren sind die Elektronen beim Durchlaufen nicht monoenergetisch. Die Austrittselektronen besitzen eine Energieverteilung mit verschiedenen Anfangsgeschwindigkeiten. Dies führt dazu, dass die unelastischen Stöße nicht mehr genau im definierten Bereich liegen. Die Kurve fällt bei ihrem Anstieg etwas flacher und die negative Flanke fällt nicht abrupt auf den Wert 0 ab, sondern nähert sich stetig einem Minimum an. Ein weiterer Grund für die Abflachung und Verbreitung der Kurve sind die elastischen Stöße zwischen der Beschleunigungsspannung und der Auffängerelektrode. Durch die Stöße entsteht eine Richtungsänderung und sorgt für eine Geschwindigkeitsverteilung in z-Richtung. Ein weiterer Störeinfluss auf die Kurve, ist der Dampfdruck $p_{sätt}$. Dabei ist es notwendig die Zusammenstöße zwischen Elektronen und Hg-Atome zu beobachten. Um sowas beobachten zu können, muss die mittlere freie Weglänge \bar{w} zwischen Atomen und Elektronen so klein gegenüber dem Abstand a zwischen der Auffängerelektrode und der Beschleunigungselektrode sein. Aus der kinetischen Gastheorie kann die Größe \bar{w} mit Hilfe des Dampfdrucks $p_{sätt}$ genau eingestellt werden.

$$\bar{w} = \frac{0,0029}{p_{sätt}} [p \text{ in mbar}] \quad (6)$$

Dabei ist $p_{\text{sätt}} = 5,5 \cdot 10^7 \cdot \exp\left(\frac{-6876}{T}\right)$ und dient als optimaler Druckbereich der Apparatur. Fällt der Druck unter diesem Bereich, so sinkt die Wahrscheinlichkeit für die Zusammenstöße der beiden Stoßpartner. Ist der Wert zu groß, so tritt vermehrte elastische Stöße auf und es erreichen nur wenige Elektronen die Auffängerelektrode.

3 Durchführung

Zur Aufnahme der Messreihen wird ein XY-Schreiber verwendet. Zur Justierung für den Nullpunkt wird der Knopf "Zero" benutzt ebenso werden die Achsenskalierungen so eingestellt, dass sie ausgewertet werden können. Um das Kontaktpotential bestimmen zu können, wird zunächst der Versuch bei Umgebungstemperatur von ca. 25,4 Grad sowie die Beschleunigungsspannung U_b auf +11 V eingestellt. Dabei wird der Strom I_a in Abhängigkeit der Bremsspannung U_a aufgezeichnet. Um eine Energieverteilung zu bestimmen wird die Temperatur mit Hilfe einer Heizung erhöht und die Aufzeichnung erfolgt wie eben beschrieben ist. In Abbildung (4) ist eine Darstellung zur Aufnahme

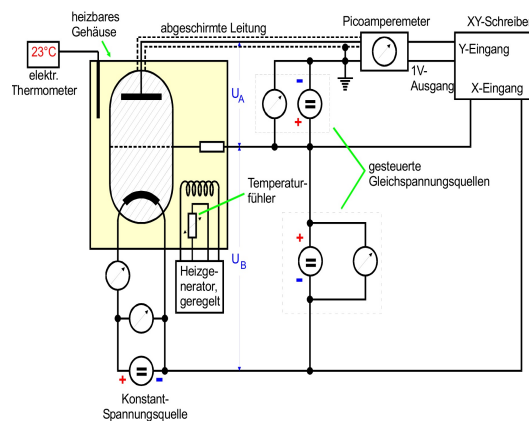


Abbildung 3: Aufbau zur Bestimmung der Frank-Hertz-Kurve [1].

der Kurve. Die Temperatur im evakuierten Gefäß muss so gegeben sein, dass bei der Erhöhung der Beschleunigungsspannung U_b auf +60V einen Stromwert von 1 -3 nA besitzt. Anschließend wird der Strom I_a in Abhängigkeit der Beschleunigungsspannung U_b mit dem XY-Schreiber aufgenommen. Um die Ionisationsenergie des Hg-Atoms zu bestimmen, wird die Bremsspannung auf den Wert von -30 V eingestellt. Dies führt dazu dass die Elektronen bei der Auffängerelektrode nicht detektiert werden sondern nur die Atomionen registriert werden. Die Temperatur muss dabei so eingestellt werden, dass die bei 100 - 110 Grad liegen soll. Anschließend wird der Strom I_a erneut in Abhängigkeit der Beschleunigungsspannung U_b aufgezeichnet.

4 Auswertung

Die mittlere freie Weglänge \bar{w} und den Dampfdruck $p_{\text{sätt}}$, der bei den verschiedenen Messreihen vorlag lässt sich mithilfe der Gleichung 6 bestimmen. Die Daten sind in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Die mittleren freien Weglängen und die Dampfdrücke von Hg bei verschiedenen Temperaturen.

T / K	\bar{w} / cm	$p_{\text{sätt}} / mbar$
298,55	$5,30 \cdot 10^{-1}$	$5,47 \cdot 10^{-3}$
377,15	$4,36 \cdot 10^{-3}$	$6,60 \cdot 10^{-1}$
418,65	$7,16 \cdot 10^{-4}$	4,05
465,15	$1,37 \cdot 10^{-4}$	20,92

4.1 Differentielle Energieverteilung

Nun soll aus den in den Abbildungen !!!5 und !!!5 gemessenen Kurven die differentielle Energieverteilung bestimmt werden. Dazu wird die Steigung an verschiedenen Stellen gemessen und gegen die Bremsspannung U_a aufgetragen. Die gemessenen Steigungen von der ersten Messreihe, die bei $T = 25,4^\circ\text{C}$ durchgeführt wurde, sind in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Darstellung der Steigungen a in Abhängigkeit von der Bremsspannung U_a der ersten Messreihe.

U_a / V	a
0,40	0
0,80	0
1,20	0
1,60	0
2,00	0
2,60	0,033
4,00	0,025
5,20	0,050
5,80	0,100
6,24	0,083
6,72	0,083
7,12	0,083
7,68	0,110
8,00	0,125
8,22	0,200
8,42	0,200
8,62	0,200
8,82	0,200
9,00	0,250
9,16	0,250
9,38	0,286
9,64	0,330
9,84	0,500

Mit diesen Messwerten ergibt sich nun der Graph, welcher in Abbildung 4 dargestellt ist.

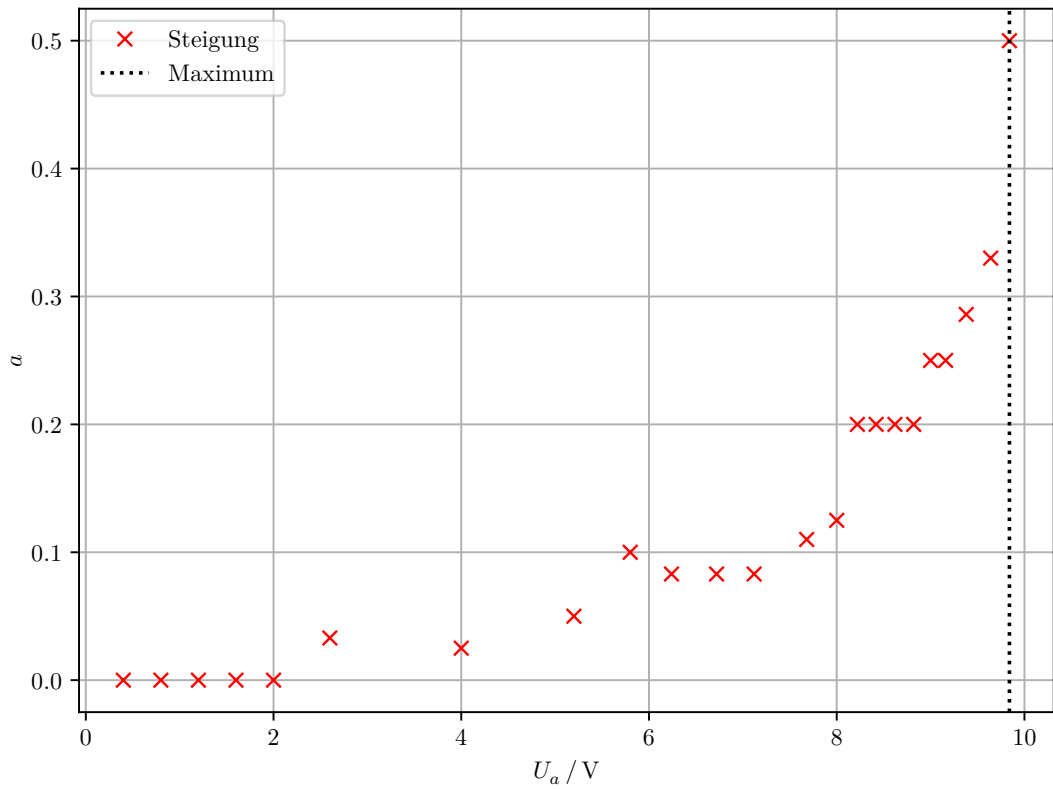


Abbildung 4: Graphische Darstellung der differentiellen Energieverteilung bei $T = 25,4^\circ\text{C}$.

Da die Elektronen mit einer Spannung von 11 V beschleunigt werden lässt sich aus dem Graphen das Kontaktpotential K der Apparatur berechnen, welches in diesem Fall $K = 1,16 \text{ V}$ ist.

Die zweite Messreihe wird bei $T = 145,5^\circ\text{C}$ durchgeführt. Aufgrund der höheren Temperatur sind die bestimmten Werte auch anders als bei der ersten Messreihe. Die berechneten Steigungen sind in Tabelle 3 dargestellt und auch in diesem Fall werden die differentiellen Energieverteilungen gegen die Bremsspannung in Abbildung 5 dargestellt.

Tabelle 3: Darstellung der Steigungen a in Abhängigkeit von der Bremsspannung U_a der zweiten Messreihe.

U_a / V	a
0,08	0,750
0,28	0,830
0,54	0,714
0,86	0,667
1,24	0,750
1,66	0,462
2,12	0,300
2,60	0,100
3,00	0,100
3,40	0,200
3,80	0,200
4,20	0,200
4,60	0,200
5,00	0,300
5,40	0,100
5,80	0,100
6,20	0,100
6,60	0,100
7,20	0,050
8,00	0
8,40	0
8,60	0

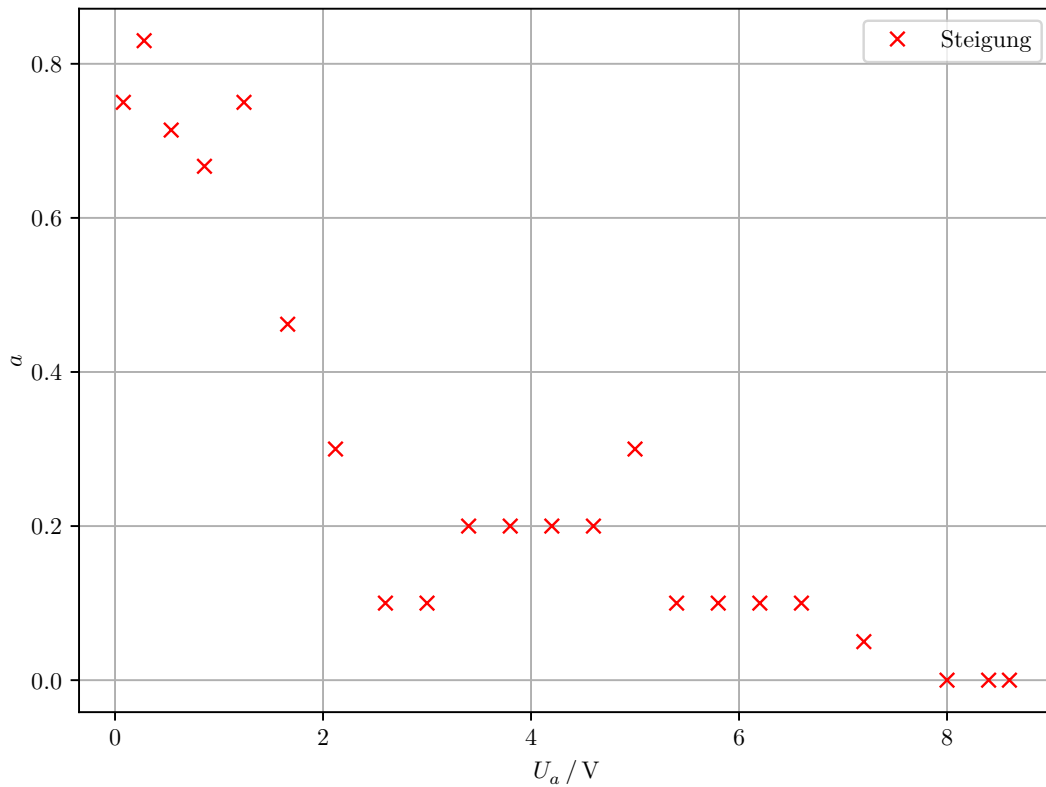


Abbildung 5: Graphische Darstellung der differentiellen Energieverteilung bei $T = 145,5^\circ\text{C}$.

Die Form der Messwerte der zweiten Messreihe unterscheidet sich so stark von der ersten, weil bei der höheren Temperatur die mittlere freie Weglänge viel geringer ist und die Elektronen mit einer höheren Wahrscheinlichkeit mit den Hg-Atomen wechselwirken. Da die differentielle Form dieser Messwerte ziemlich sprunghaft ist lassen sich nicht viele Informationen aus diesem Graphen entnehmen. Allerdings ist die Steigung und somit die Änderung des Auffängerstroms schon bei geringer Bremsspannung von ungefähr 2,6 V sehr gering und steigt auch nicht mehr an.

4.2 Franck-Hertz-Kurve

Aus der in Abbildung ?? gemessenen Franck-Hertz-Kurve wird nun die Anregungsenergie des Hg-Atoms bestimmt indem die Abstände der Maxima gemessen werden. Die Ergebnisse aus der Messung sind in Tabelle 4 gezeigt. Dabei gibt k an welches Maximum verwendet wurde und $\Delta U = U_{k+1} - U_k$.

Tabelle 4: Abstände der Maxima aus der Franck-Hertz-Kurve.

k	ΔU
1	4,60
2	4,53
3	4,77
4	4,10
5	4,60
6	5,00
7	5,62

Aus den gemessenen Werten lässt sich nun der Mittelwert und die Standardabweichung mithilfe der folgenden Formeln bestimmen.

$$\bar{U} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_i$$
$$\Delta \bar{U} = \frac{1}{\sqrt{N}} \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (U_i - \bar{U})^2}$$

Die Anregungsenergie lässt sich aus dem Mittelwert bestimmen indem der gemessene Abstand mit der Elementarladung multipliziert wird.

$$\bar{U} = (4,746 \pm 0,437) \text{ eV.}$$

Mithilfe der Gleichung 3 und der Relation $\lambda = \frac{c}{\nu}$ kann nun die Wellenlänge der emittierten elektromagnetischen Strahlung bestimmt werden mit der Formel

$$\lambda = h \frac{c}{E}$$

Der Fehler der Wellenlänge wird mit der Gauß'schen Fehlerfortpflanzung berechnet:

$$\Delta \lambda = \sqrt{\left(-\frac{hc}{E^2}\right)^2 \cdot \Delta E^2}$$

Damit ergibt sich für die Wellenlänge:

$$\lambda = (261 \pm 24) \text{ nm}$$

4.3 Ionisierungsspannung

In diesem Teil wird die Ionisationsspannung von Hg bestimmt. Die gemessenen Werte von diesem Aufgabenteil sind in Abbildung ?? dargestellt. Diese Kurve unterscheidet sich von der erwarteten Theoriekurve. Auf die möglichen Gründe wird in der Diskussion

eingegangen. Für die Bestimmung der Ionisationsspannung wird das erste Maximum der Kurve verwendet. Das Maximum liegt bei einer Spannung von 31,92 V. Von dieser Spannung muss nun noch das Kontaktpotential, was zuvor bestimmt wurde, abgezogen werden um die Ionisationsspannung zu erhalten.

$$U_{\text{ion}} = 30,76 \text{ V}$$

5 Diskussion

Bei der Bestimmung der differentiellen Energieverteilung fällt auf, dass die gemessenen Kurven und somit auch die differentiellen Kurven sich stark von den erwarteten Kurven unterscheiden. Aus der Theorie wird erwartet, dass der Auffängerstrom zumindest bei der ersten Messreihe, bei Zimmertemperatur, auf 0 V abfällt. Da das in dieser Messung nicht der Fall war könnte sich das ermittelte Kontaktpotential, welches in diesem Fall 1,16 V ist, etwas von den realen unterscheiden. Ein möglicher Grund für diese Ergebnisse könnte eine Fehlfunktion oder eine falsche Einstellung des XY-Schreibers gewesen sein, da dieser öfters nicht zuverlässig aufgezeichnet hat.

Bei der Bestimmung der Franck-Hertz-Kurve waren die Ergebnisse besser. Wenn die ermittelte Anregungsenergie, welche $U = (4,746 \pm 0,437) \text{ eV}$ beträgt, mit den Literaturwerten verglichen wird ergibt sich eine Abweichung von 3,14 %. Der Literaturwert ist in dem Fall $U_{\text{lit}} = 4,9 \text{ eV}$ [2].

Wie schon erwähnt unterscheidet sich die gemessene Kurve der Ionisierungsspannung von der erwarteten Kurve aufgrund eines systematischen Fehlers. Es wird nur ein Anstieg des Auffangstroms erwartet und danach einen plötzlichen Abfall. Den zweiten Anstieg bei der Messung könnte durch eine erneute Ionisation der Elektronen vorliegen.

Literatur

- [1] TU Dortmund. *Anleitung zum Versuch 601: Der Frank-Hertz-Versuch*. 2018.
- [2] *Franck-Hertz Messwerte für Quecksilber*. URL: <http://hydrogen.physik.uni-wuppertal.de/hyperphysics/hyperphysics/hbase/FrHz.html#FHd> (besucht am 11.04.2018).