

V601

Franck-Hertz-Versuch

Kalina Toben

kalina.toben@tu-dortmund.de

Daniel Wall

daniel.wall@tu-dortmund.de

Durchführung: 16.04.2019

Abgabe: 23.04.2019

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1	Zielsetzung	3
2	Theorie	3
2.1	Versuchsaufbau und Gegenfeldmethode	3
2.2	Störeinflüsse	5
3	Durchführung	5
4	Auswertung	6
4.1	Bestimmung der mittleren Weglänge	6
4.2	Bestimmung der integralen Energieverteilung der beschleunigten Elektronen	7
4.3	Analyse der Franck-Hertz-Kurve	11
4.4	Bestimmung der Ionisierungsspannung von Quecksilber	13
5	Diskussion	14
	Literatur	15

1 Zielsetzung

Bei dem Franck-Hertz-Versuch wird die Energiedifferenz zwischen dem ersten angeregten Zustand und dem Grundzustand sowie die Ionisationsenergie eines Hg-Atoms bestimmt. Weiter wird die Energieverteilung der beschleunigten Elektronen untersucht.

2 Theorie

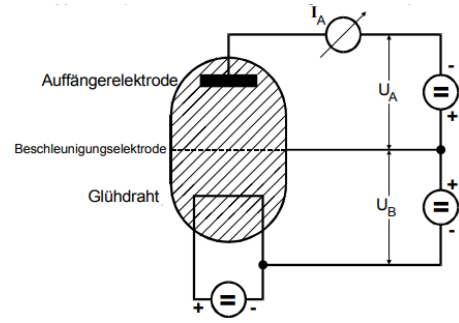


Abbildung 1: Schematischer Aufbau des Franck-Hertz-Versuchs. [1, S.116]

Der Franck-Hertz-Versuch gehört zu den Elektronenstoßexperimenten, mit denen die diskrete Struktur der Elektronenhüllen untersucht werden kann. In einer abgeschlossenen Kammer kommt es dabei zu Wechselwirkungen von Elektronen einer bestimmten Energie und Hg-Atomen. Diese Wechselwirkungen sind elastische und inelastische Stöße, wobei bei letzteren die Hg-Atome in den ersten angeregten Zustand versetzt werden. Dabei nehmen sie die Energie auf, die sich aus der kinetischen Energiedifferenz der Elektronen vor und nach dem Stoß ergibt:

$$\frac{m_0 v_{\text{vor}}^2}{2} - \frac{m_0 v_{\text{nach}}^2}{2} = E_1 - E_0, \quad (1)$$

mit der Ruhemasse eines Elektrons m_0 und den Geschwindigkeiten v_{vor} und v_{nach} vor und nach dem Stoß. Die Energie der Elektronen wird mithilfe der Gegenfeldmethode bestimmt.

2.1 Versuchsaufbau und Gegenfeldmethode

In Abbildung 1 ist eine schematische Darstellung der Franck-Hertz-Apparatur zu sehen. Das evakuierte Gefäß beinhaltet einen Tropfen Quecksilber, welches teilweise spontan verdampft und für einen Gleichgewichtsdampfdruck $p_{\text{Sättigung}}$ sorgt, welcher nur von der Umgebungstemperatur abhängig ist. Der Glühdraht wird mittels Gleichstrom erhitzt, sodass durch den glühelektrischen Effekt Elektronen austreten. Dem gegenüber steht eine Elektrode, an welcher eine positive Spannung U_B anliegt, sodass die Elektronen beschleunigt werden und anschließend eine kinetische Energie

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

wobei e_0 die Elementarladung ist, besitzen, sofern sie vorher die Geschwindigkeit $v = 0$ hatten. Hinter diese Beschleunigungselektrode wird eine Auffängerelektrode gesetzt. Diese ist gegenüber der Beschleunigungselektrode negativ geladen, sodass die Elektronen in

diesem Teil des Aufbaus abgebremst werden. Nur die Elektronen, deren Geschwindigkeit v_z in Feldrichtung die Ungleichung

$$\frac{m_0}{2} v_z^2 \leq e_0 U_A$$

erfüllt, kommen an der Auffängerelektrode an, die anderen kehren zur Beschleunigungselektrode zurück.

Im Beschleunigungsraum kommt es zwischen den Elektronen und den Hg-Atomen zu unterschiedlichen Stößen. Ist die Energie der Elektronen gering, treten nur elastische Stöße auf, bei denen der Energieverlust δE des Elektrons nicht von Relevanz ist, da das Massenverhältnis $\frac{m_0}{M}$, welches den Energieverlust bestimmt, sehr klein ist:

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

wobei E die Energie des Elektrons ist. Während der Energieverlust also zu vernachlässigen ist, ist die Richtungsänderung, die das Elektron bei dem Stoß erfährt, trotzdem relevant. Wird die Energie der Elektronen so groß wie die Energiedifferenz $E_1 - E_0$ oder größer, kommt es zu inelastischen Stößen zwischen ihnen und den Hg-Atomen. Auf diese wird der Betrag der Energiedifferenz übertragen, wodurch sie angeregt werden. Die restliche Energie behält das Elektron. Das Hg-Atom geht vom ersten angeregten Zustand unter Emission eines Lichtquants mit der Energie

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

wobei h das Plancksche Wirkungsquantum und ν die Frequenz der emittierten Strahlung ist, wieder in den Grundzustand zurück.

Bei der Gegenfeldmethode wird nun der Auffängerstrom I_A in Abhängigkeit der Beschleunigungsspannung U_B betrachtet, während diese kontinuierlich erhöht wird. Ein schematischer dieses Graphen ist in Abbildung 2 dargestellt. Ist die Beschleunigungsspannung größer als die Spannung der Auffängerelektrode, wird ein wachsender Strom registriert. Erreicht die Elektronenenergie den Wert $E_1 - E_0$, so kommt es zu den genannten inelastischen Stößen, bei denen die Elektronen ihre Energie verlieren, sodass sie nicht mehr zur Auffängerelektrode gelangen können. Der Auffängerstrom fällt ab. Ist die Beschleunigungsspannung groß genug, so kann dieser Prozess mehrfach stattfinden. Die Länge

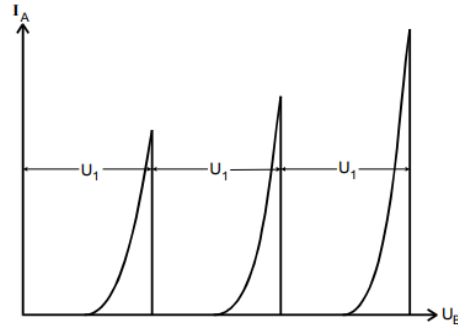


Abbildung 2: Auffängerstrom I_A in Abhängigkeit der Beschleunigungsspannung U_B . [1, S.118]

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

welche die Länge diese periodischen Intervalle bezeichnet, liefert das erste Anregungspotential.

2.2 Störeinflüsse

Die tatsächlich beobachtete Kurve des Auffängerstroms weicht aufgrund von einigen Nebeneffekten ab.

Das Beschleunigungspotential weicht dadurch ab, dass Glühdraht und Beschleunigungselektrode eine unterschiedliche Austrittsarbeit $\phi_{G/B}$ für Elektronen vorweisen, um bei niedriger Temperatur bereits höhere Emissionsraten zu erzielen. Es ergibt sich das effektive Beschleunigungspotential

$$U_{B,\text{eff}} = U_B - \frac{1}{e_0(\phi_B - \phi_G)}. \quad (5)$$

Der Ausdruck $\frac{1}{e_0}(\phi_B - \phi_G)$ wird als Kontaktpotential K bezeichnet, um den die resultierende Franck-Hertz-Kurve verschoben ist.

Weiter weisen die Leitungselektronen im Metall des Glühdrahts eine Energieverteilung auf, sodass sie mit unterschiedlichen Anfangsgeschwindigkeiten aus diesem austreten und demnach auch nach der Beschleunigung unterschiedliche Energien besitzen. Die Folge ist, dass die inelastischen Stöße nicht mehr bei einer bestimmten Beschleunigungsspannung eintreten, weshalb sich die Kurve flacher den Maxima nähert und stetig bis auf ein Minimum 0 abfällt. Auch die elastischen Stöße der Elektronen mit den Hg-Atomen zwischen Beschleunigungs- und Auffängerelektrode sorgen für eine Abflachung und Verbreiterung der Kurve, da die daraus resultierenden Richtungsänderungen eine Verteilung der relevanten Geschwindigkeitskomponente v_z hervorrufen. Einige Elektronen erreichen somit nicht die Auffängerelektrode.

Auch der Dampfdruck $p_{\text{Sättigung}}$ beeinflusst das Erscheinungsbild der Kurve. Um eine merkliche Anzahl von Zusammenstößen zwischen Elektronen und Hg-Atomen beobachten zu können, muss die mittlere freie Weglänge \bar{w} der Atome um den Faktor 1000 bis 4000 kleiner als der Abstand a zwischen Beschleunigungs- und Auffängerelektrode sein. In der kinetischen Gastheorie sind diese in Abhängigkeit der Temperatur T miteinander verknüpft:

$$\bar{w} = \frac{0,0029}{p_{\text{Sättigung}}}, \quad (6)$$

$$p_{\text{Sättigung}}(T) = 5.5 \cdot 10^7 e^{\frac{-6876}{T}}, \quad (7)$$

wobei \bar{w} in cm, $p_{\text{Sättigung}}$ in mbar und T in K angegeben werden. Es gibt also einen Dampfdruckbereich, der sich zur Beobachtung des Effekts besonders gut eignet. Unterhalb dieses Bereichs sinkt die Wahrscheinlichkeit für die benötigten inelastischen Zusammenstöße, oberhalb treten zu viele elastische Stöße auf, die mit Richtungsänderung der Elektronenbahnen einhergehen.

3 Durchführung

Zur Aufnahme der Franck-Hertz-Kurven auf dem Millimeterpapier werden die einzelnen Teile der Apparatur wie in Abbildung 3 zu sehen miteinander verbunden. Während des

gesamten Versuchs werden die Eingänge des XY-Schreibers stets so justiert, dass der gesamte zu untersuchende Bereich der Spannungen aufgezeichnet wird.

Zuerst wird die integrale Energieverteilung der Elektronen bei unterschiedlichen Temperaturen untersucht. Hierzu wird die Beschleunigungsspannung U_B auf 11 V eingestellt. Der Auffängerstrom I_A wird in Abhängigkeit der Bremsspannung U_A aufgezeichnet, welche von 0 bis 10 V läuft. Es wird je eine Kurve bei Zimmertemperatur und bei eingeschalteter Heizung ($T = 140 - 160\text{ °C}$) aufgezeichnet.

Zur Bestimmung der ersten Anregungsenergie eines Hg-Atoms werden Franck-Hertz-Kurven bei drei unterschiedlichen Temperaturen $T = 160 - 200\text{ °C}$ aufgezeichnet. Hierbei wird die Bremsspannung auf -1 V eingestellt und die Beschleunigungsspannung läuft von 0 bis 56 V. Es wird der Auffängerstrom in Abhängigkeit der Beschleunigungsspannung aufgezeichnet.

Zur Ermittlung der Ionisationsenergie von Hg wird die Bremsspannung auf -30 °C eingestellt, wodurch die erzeugten Ionen von der Auffängerelektrode registriert werden, die Elektronen jedoch nicht. Die Messung findet bei $T = 140 - 160\text{ °C}$ statt und es wird erneut der Auffängerstrom in Abhängigkeit von der Beschleunigungsspannung aufgezeichnet.

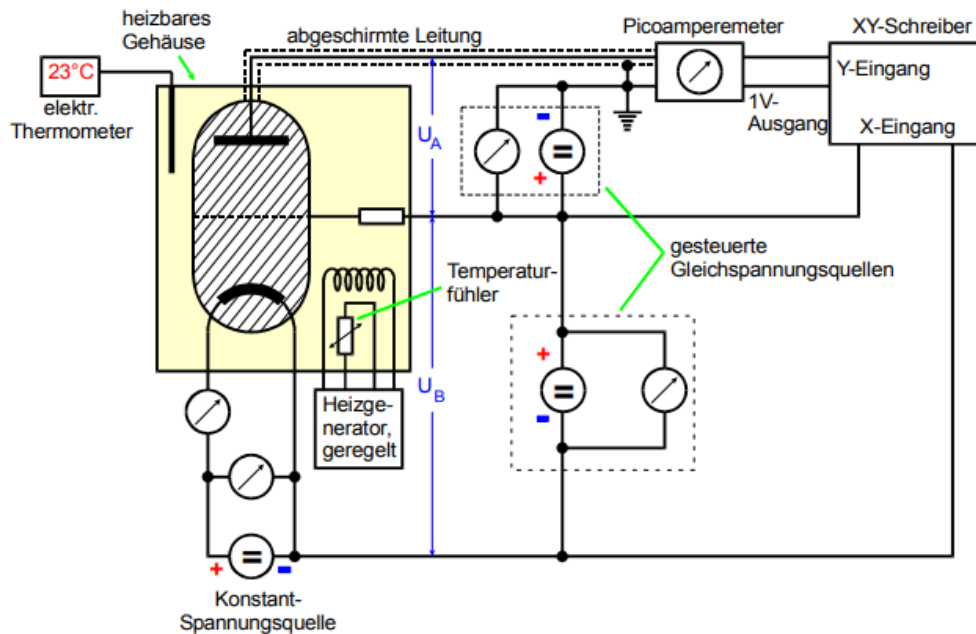


Abbildung 3: Versuchsaufbau zur Aufzeichnung einer Franck-Hertz-Kurve. [1, S.124]

4 Auswertung

4.1 Bestimmung der mittleren Weglänge

Mit Hilfe von Formel (6) und (7) wird die mittlere freie Weglänge \bar{w} für die verwendeten Temperaturen berechnet. Außerdem ist das Verhältnis zum Abstand $a = 1\text{ cm}$ aufgeführt.

Tabelle 1: Berechnung der mittleren freien Weglänge und Vergleich mit dem Abstand a .

T/K	\bar{w}/m	Verhältnis $\frac{a}{\bar{w}}$
299,25	$5,471 \cdot 10^{-7}$	18278,74
418,15	$3,801 \cdot 10^{-4}$	26,28
472,15	$2,497 \cdot 10^{-3}$	4,01
377,15	$6,371 \cdot 10^{-5}$	156,96

4.2 Bestimmung der integralen Energieverteilung der beschleunigten Elektronen

Aus den angefügten Abbildungen (6) und (7) wird die Steigung des Graphen für zwei Temperaturen abgelesen. Dazu wurden der x und y Wert der Steigungsdreiecke gemessen. Außerdem wird die Spannung abgelesen, wobei vorher richtig skaliert werden muss. Die Steigungen und die Spannungswerte werden in Tabelle (2) dargestellt. Dabei wurden die x Werte genormt.

Tabelle 2: Werte für den Graphen für die Bestimmung der Energieverteilung bei einer Temperatur $T = 299,25K$.

Steigung m	Genormte Spannungen
0	0
0,017	2,41
0,1	6,08
0,2	7,30
0,4	8,12
0,8	8,53
1,2	8,73
1,4	8,93
2,0	9,09
4,0	9,21
7,5	9,29
9,0	9,37
10,0	9,45
5,0	9,53
4,5	9,61
1,667	9,73
0,5	10

Der zugehörige Graph findet sich in Abbildung (4).

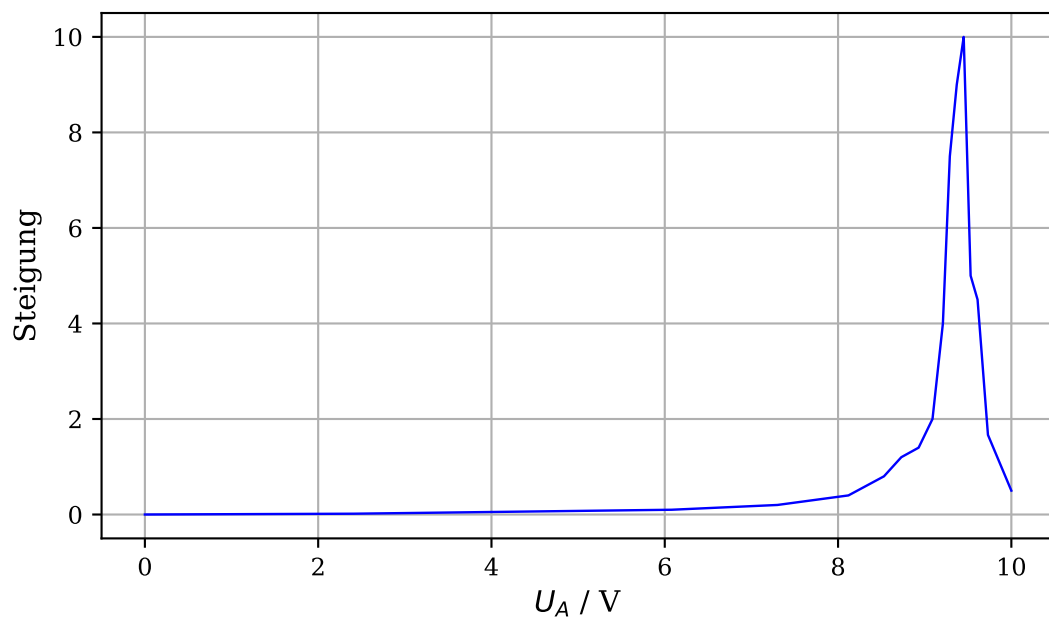


Abbildung 4: Die Energieverteilung der Elektronen bei einer Temperatur von $T = 299,25\text{K}$.

Tabelle 3: Werte für den Graphen für die Bestimmung der Energieverteilung bei einer Temperatur $T = 418,15\text{K}$.

Steigung m	Genormte Spannungen
0	0
0	2,57
2,82	3,94
1,8	4,35
1,4	4,55
0,4	4,75
0,2	5,16
0,1	5,57
0,2	6,39
0,27	9,25
0	10

Der Graph zu dieser Messreihe ist in Abbildung (5) zu finden.

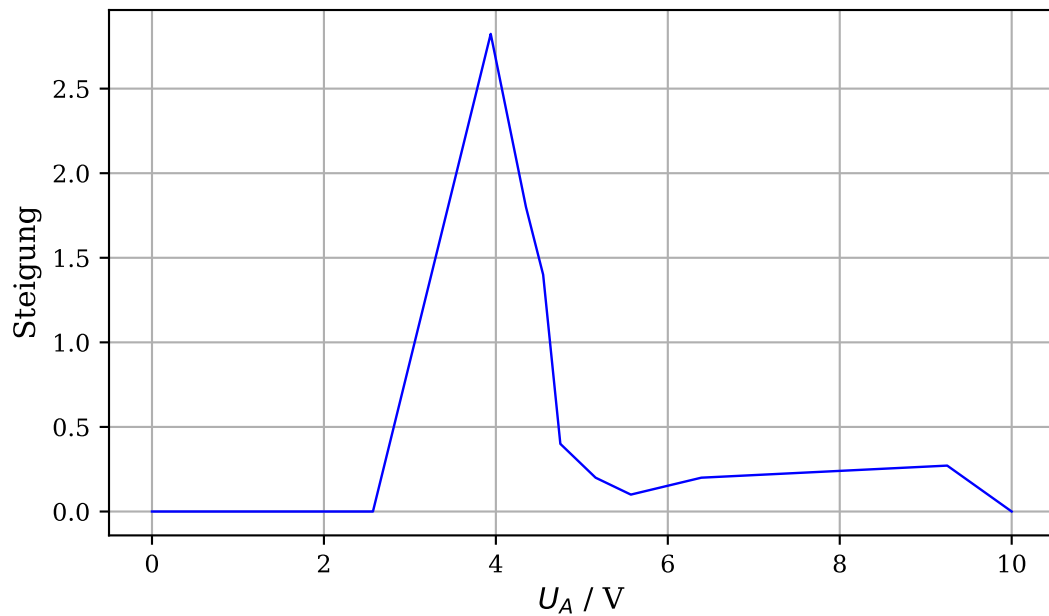


Abbildung 5: Die Energieverteilung der Elektronen bei einer Temperatur von $T = 418,15\text{K}$.

Aus Abbildung (4) kann man das Kontaktpotential ablesen. An dem Maximum des Graphen ist die Energie der Elektronen $9,45\text{eV}$. Da die Beschleunigungsspannung von 11V hinzugerechnet werden muss, ergibt sich ein Kontaktpotential von $K = 1,55\text{V}$. Damit viele Zusammenstöße der Elektronen mit den Quecksilber-Atomen stattfinden können, muss die mittlere freie Weglänge klein gegen den Abstand a sein. Somit treten mehr Stöße bei der ersten Messreihe auf. Im nächsten Abschnitt wird klar, dass die Anregungsspannung bei ca. $(4,89 \pm 0,206)\text{V}$ liegt. Dies lässt das Gefälle in Abbildung (5) erklären.

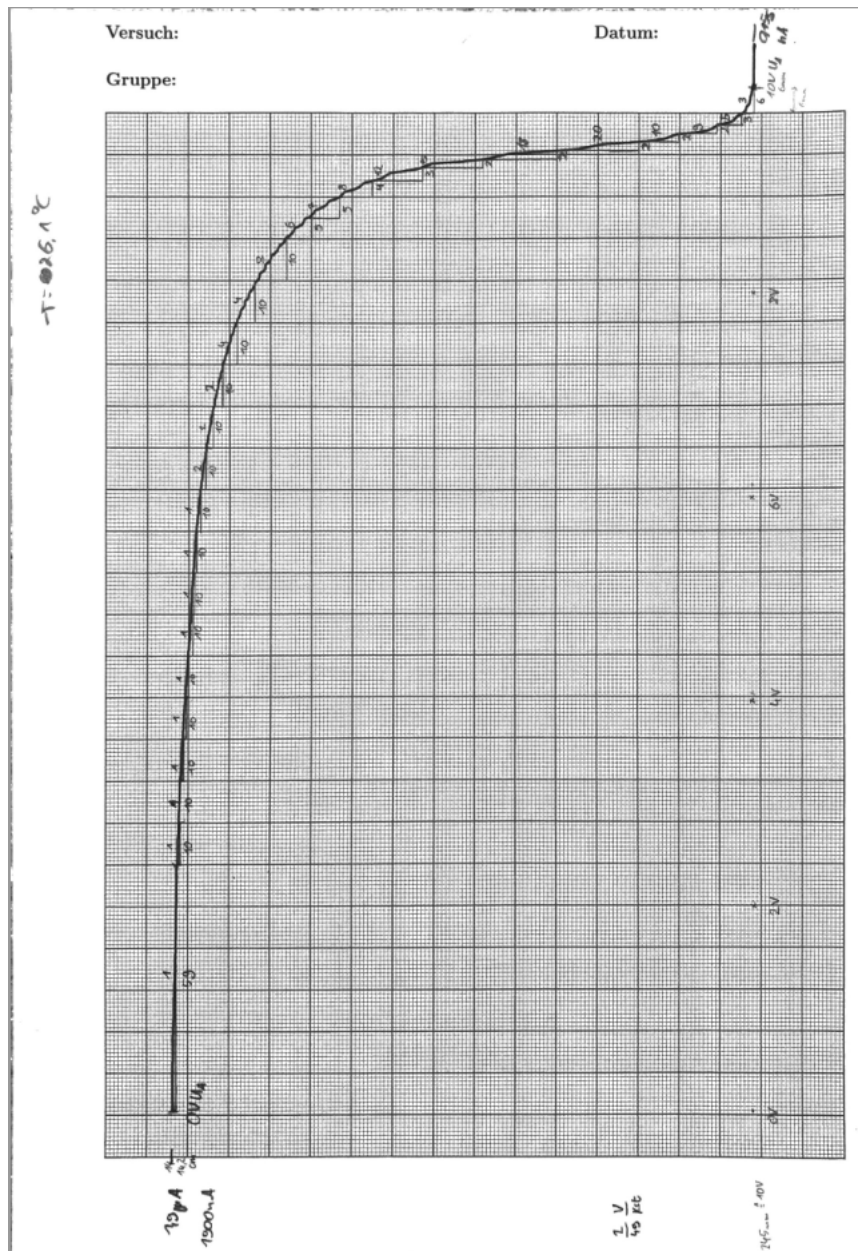


Abbildung 6: Erstelte Kurve bei einer Temperatur von $T = 299,25 \text{ K}$.

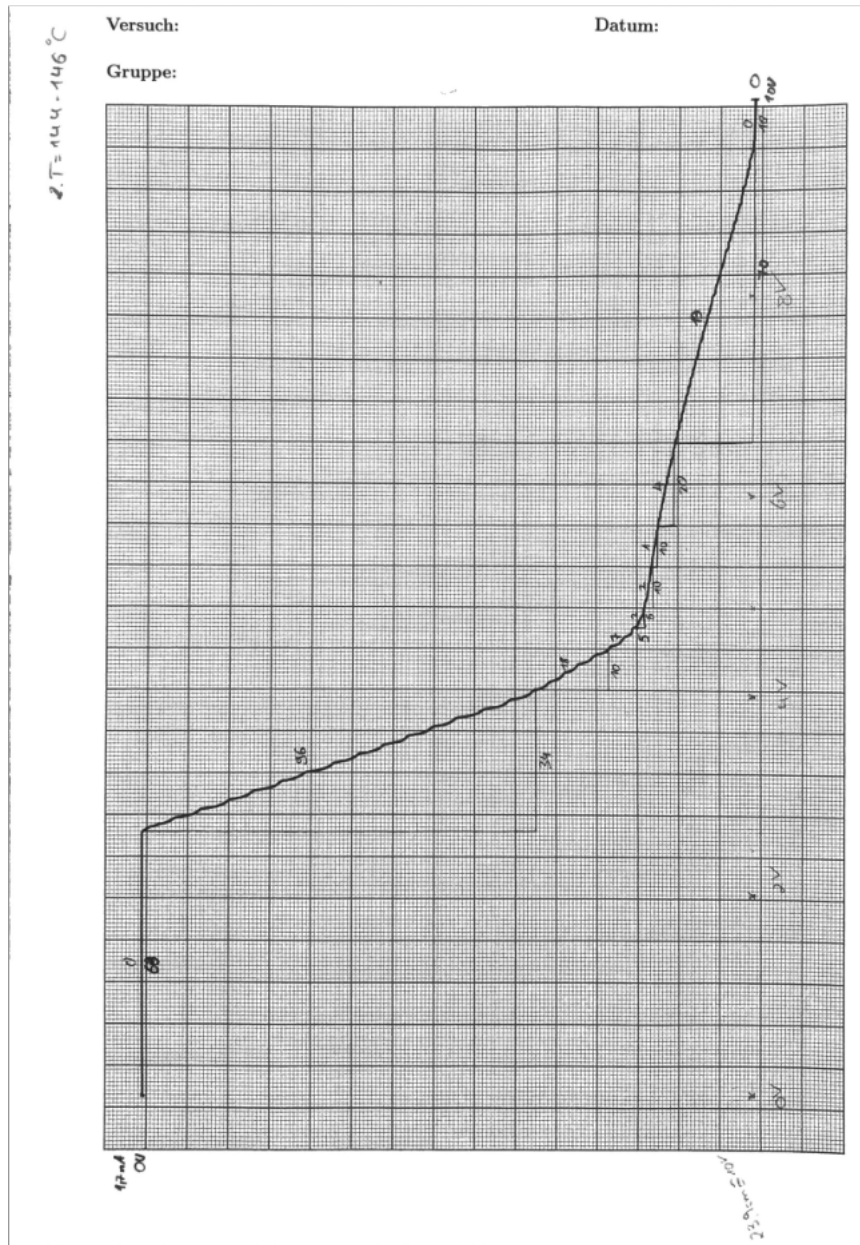


Abbildung 7: Erstellte Kurve bei einer Temperatur von $T = 418,15\text{K}$.

4.3 Analyse der Franck-Hertz-Kurve

Die Franck-Hertz-Kurve für eine Temperatur von ca. $T = 472,15\text{K}$ ist in Abbildung (8) zu sehen. Aus dieser werden die Abstände der Maxima gemessen, zu sehen in Tabelle (4).

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

Abstand der Maxima in V
4,945
4,670
4,670
4,670
4,945
4,670
4,945
5,220
4,945
5,220

Der gemittelte Abstand beträgt

$$U_1 = (4,89 \pm 0,206)\text{V}.$$

Nach Gleichung (4) ist die 1. Anregungsenergie

$$\begin{aligned} E_1 &= U_1 \cdot e_0 = (7,83 \pm 0,33) \cdot 10^{-19}\text{J} \\ E_1 &= (4,89 \pm 0,206)\text{eV}. \end{aligned}$$

Alle Mittelwerte und Fehler werden mit Python berechnet. Aus dem Abstand wird nun die Wellenlänge der emittierten Strahlung mit Hilfe von Formel (3) und der Relation $\lambda = \frac{c}{\nu}$ berechnet.

$$\begin{aligned} \nu &= \frac{E_1}{h} = (1,18 \pm 0,05) \cdot 10^{15}\text{Hz} \\ \lambda &= (2,54 \pm 0,11) \cdot 10^{-7}\text{m}. \end{aligned}$$

Inelastische Stöße treten nur auf, wenn die Energie hoch genug ist. Der Energieverlust beim elastischen Stoß ist also zu vernachlässigen.

Versuch:

Datum:

Gruppe:

$T = 472,15 \text{ K}$

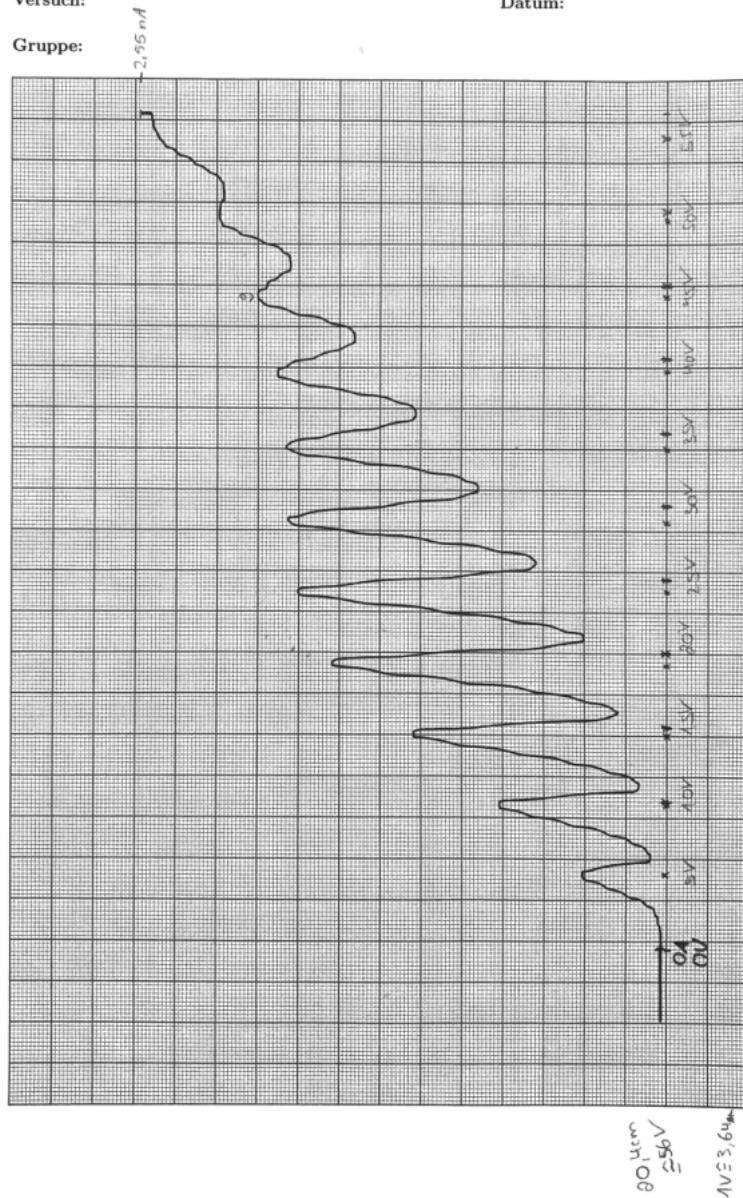


Abbildung 8: Franck-Hertz Kurve bei einer Temperatur von $T = 472,15 \text{ K}$.

4.4 Bestimmung der Ionisierungsspannung von Quecksilber

Bei diesem Versuchsteil beträgt die Temperatur $T = 377,15 \text{ K}$. Aus der angefügten Abbildung (9) lässt sich der Wert $U_{ion} + K$ ablesen. Dazu wird eine Asymptote eingezeichnet und der Schnittpunkt mit der x-Achse abgelesen. Er beträgt $X = 2,5 \text{ V}$. Mit Hilfe des vorher bestimmten Kontaktpotentials, wird die Spannung bestimmt.

$$U_{ion} = X - K = 0,95 \text{ V}.$$

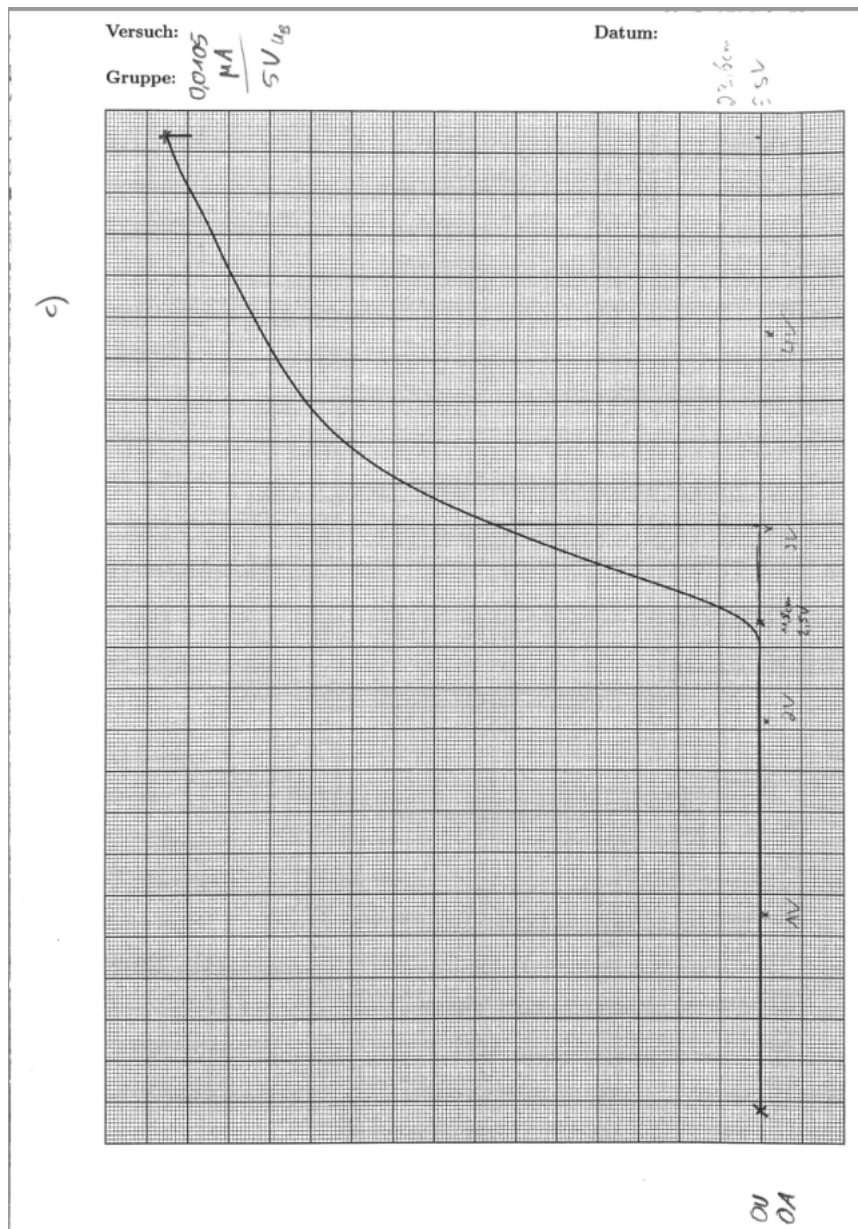


Abbildung 9: Beschleunigungsspannung und Strom bei Ionisierung bei einer Temperatur von $T = 377,15K$.

5 Diskussion

Insgesamt konnte keine Messung bei einer konstanten Temperatur durchgeführt werden, da sie immer schwankte. Die Spannungen konnten auch nur ungenau abgelesen werden, da dies ohne wirkliche Hilfsmittel stattfinden musste. Die gemessene 1. Anregungsenergie

und der Literaturwert[3]

$$E_1 = (4,89 \pm 0,206)\text{eV}$$

$$E_{1lit} = 4,9\text{eV}$$

sind fast identisch. Die Abweichung beträgt nur ca. 0,2 Prozent. Somit lässt sich sagen, dass die Werte für die Abstände gut abgemessen werden konnten. Die Maxima waren besonders gut für hohe Temperaturen zu erkennen. Der berechnete Wert für die Wellenlänge $\lambda = (2,54 \pm 0,11) \cdot 10^{-7}\text{m}$ liegt außerdem in einem sinnvollen Bereich, und es handelt sich somit um UV-Strahlung.

Die Ionisierungsspannung symbolisiert im Graphen einen signifikanten Anstieg der Stromstärke. Verglichen mit dem Literaturwert[2] liegen sie bei

$$U_{ion} = 0,95\text{V}$$

$$U_{ion,lit} = 10,438\text{V}.$$

Das ergibt eine Abweichung von ca 90 Prozent. Der Fehler muss bei der Aufzeichnung mit dem XY-Schreiber aufgetreten sein. Der Anstieg der Kurve liegt auch nur im Bereich von einer Spannung zwischen $(2 - 4)\text{V}$, was viel zu niedrig ist.

Literatur

- [1] TU Dortmund. *Anleitung zum Versuch 601, Franck-Hertz-Versuch*. 22. Apr. 2018. URL: <http://129.217.224.2/HOMEPAGE/PHYSIKER/BACHELOR/AP/SKRIPT/V601.pdf>.
- [2] *Quecksilber*. 22. Apr. 2019. URL: <http://www.periodensystem.info/elemente/quecksilber/>.
- [3] Uni Wuppertal. *Franck-Hertz Messwerte für Quecksilber*. 22. Apr. 2019. URL: <http://hydrogen.physik.uni-wuppertal.de/hyperphysics/hyperphysics/hbase/FrHz.html#FHD>.