

Nr.601

Franck-Hertz-Versuch

Sara Krieg
sara.krieg@udo.edu

Marek Karzel
marek.karzel@udo.edu

Durchführung: 04.06.2019

Abgabe: 11.06.2019

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1	Theorie	3
1.1	Einflüsse auf den Verlauf der Franck-Hertz-Kurve	4
1.1.1	Einfluss des Kontaktpotentials	4
1.1.2	Einfluss der Fermi-Dirac-Verteilung	5
1.1.3	Der Einfluss des Dampfdruckes	5
1.2	Der Versuchsaufbau und die Gegenfeldmethode	5
2	Durchführung	6
3	Auswertung	8
3.1	Bestimmung der freien Weglänge	8
3.2	Energieverteilung der beschleunigten Elektronen	8
3.3	Anregung des Hg-Atoms	11
3.4	Ionisationsspannung	12
4	Diskussion	12
5	Literaturverzeichnis	13

1 Theorie

Ziel dieses Versuches ist die Bestätigung der Quantennatur der Elektronenhüllen von Atomen.

Zu diesem Zweck werden beschleunigte Elektronen zur Anregung von Atomen im Quecksilberdampf genutzt. Bei kleinen Energien kommt es dabei zunächst zu elastischen Stößen der Elektronen mit den Hg-Atomen, bei denen noch keine Anregung zustande kommt, allein die Elektronenbewegungsrichtung wird dabei aufgrund des ungleichen Masseverhältnisses $\frac{m_e}{M} = 1836,201$ beeinflusst. Die Hg-Atommasse $M \gg m_e$ ist sehr viel größer als die Elektronenmasse m_e , daher geben die Elektronen hier nur den vernachlässigbar kleinen Energiebetrag

$$\Delta E = \frac{4m_e M}{(m_e + M)^2} \cdot E \quad (1)$$

an die Hg-Atome ab. E beschreibt dabei die kinetische Energie der Elektronen.

Erst ab einer bestimmten Energiehürde stoßen die Elektronen der Geschwindigkeit v_{vor} und der Masse m_e mit den Hg-Atomen, die vereinfacht nach dem Bohrschen Atommodell betrachtet werden, unelastisch zusammen, regen die Atome in den ersten diskreten angeregten Zustand an und geben dabei die Energiedifferenz

$$E_1 - E_0 = \frac{m_e \cdot v_{\text{vor}}^2}{2} - \frac{m_e \cdot v_{\text{nach}}^2}{2} \quad (2)$$

ab. Im Detail wird jeweils eins der 2 s-Elektronen der Valenzschale auf das Energieniveau der nächsthöheren Schale gehoben. Nach dem Stoß besitzen die Stoßelektronen nur noch die Geschwindigkeit v_{nach} und die Energie $E - (E_1 - E_0)$. Die verbliebene Elektronenenergie soll dabei nach der Gegenfeldmethode gemessen werden.

Die Hg-Atome emittieren nach der Relaxationszeit die überflüssige Anregungsenergie wieder in Form eines Photos mit der Energie

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

Dementsprechend ist theoretisch die in Abbildung 1 dargestellte Strom-Spannungskurve zu messen.

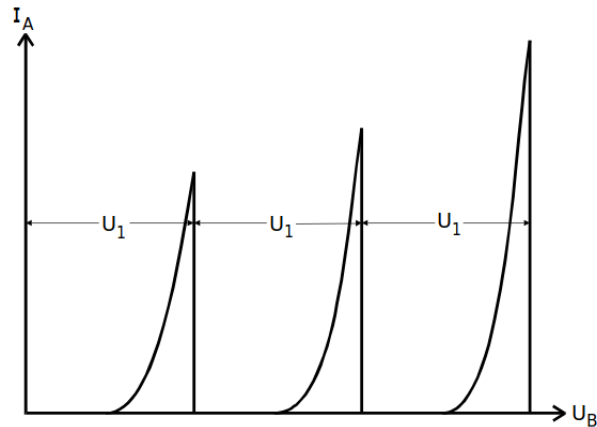


Abbildung 1: Idealisierte Strom-Spannungskurve des Franck-Hertz-Versuches mit un-
stetigen Stromstärkeabfällen und jeweils gleichen Spannungsdifferenzen
zwischen den Maxima [1]

Es ist zu erkennen dass der Auffängerstrom I_A bei steigender Beschleunigungsspannung U_B solange steigt, bis E für unelastische Stöße der Elektronen mit den Hg-Atomen ausreicht. Danach fällt I_A plötzlich ab. Bei weiterer Steigerung von U_B steigt auch I_A , bis E dann ausreicht, um jeweils zwei unelastische Stöße der Elektronen mit den Hg-Atomen zuzulassen. Dies wiederholt sich bei steigender U_B bis hin zu mehreren Anregungen. Die Spannungsdifferenzen zwischen den Strommaxima betragen dabei

$$\Delta U = \frac{E_1 - E_0}{e_0} . \quad (4)$$

Außerdem können die Hg-Atome durch Elektronenstöße ionisiert werden. Die dazu nötige Ionisationsenergie kann auch bestimmt werden.

1.1 Einflüsse auf den Verlauf der Franck-Hertz-Kurve

1.1.1 Einfluss des Kontaktpotentials

Aufgrund verschiedener Austrittsarbeiten ϕ_G und ϕ_B der Glühkathode und Beschleunigungsanode kommt es zu einem in Abbildung 2 dargestellten Potentialgefälle,

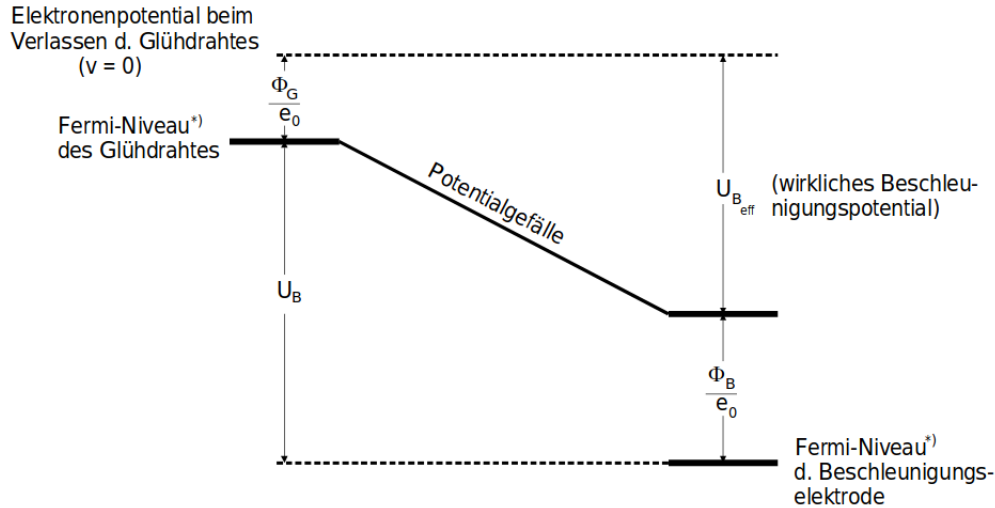


Abbildung 2: Das aus den verschiedenen Austrittsarbeiten der Elektroden resultierende Potentialgefälle zwischen Heizkathode und Beschleunigungsanode [1]

wodurch die effektive Beschleunigungsspannung nur noch

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

beträgt und die Franck-Hertz-Kurve um $\frac{\phi_B - \phi_G}{e_0}$ verschoben ist.

1.1.2 Einfluss der Fermi-Dirac-Verteilung

Da die Elektronen schon in der Glühkathode keinen diskreten Energiewert besitzen, sondern ihre Energien verschiedene Werte der kontinuierlichen Fermi-Dirac-Verteilung annehmen, sind auch ihre kinetischen Energien in der Vakuumkammer kontinuierlich verteilt. Somit fällt die Franck-Hertz-Kurve nicht bei einem bestimmten Betrag von U_B plötzlich unstetig ab, sondern nähert sich stetig einem Stromminimum.

1.1.3 Der Einfluss des Dampfdruckes

Der Franck-Hertz-Versuch erzielt die erwarteten Messwerte bei einer bestimmten Dampfdichte am besten. Ist die Dampfdichte bspw. sehr klein, so kann es auch bei sehr großer U_B nur vereinzelt zu Anregungen kommen, da die Stoßwahrscheinlichkeit sehr klein ist. Bei sehr hohen Dampfdichten spielt der Energieverlust durch elastische Stöße eine immer größere Rolle.

1.2 Der Versuchsaufbau und die Gegenfeldmethode

Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 3 dargestellt.

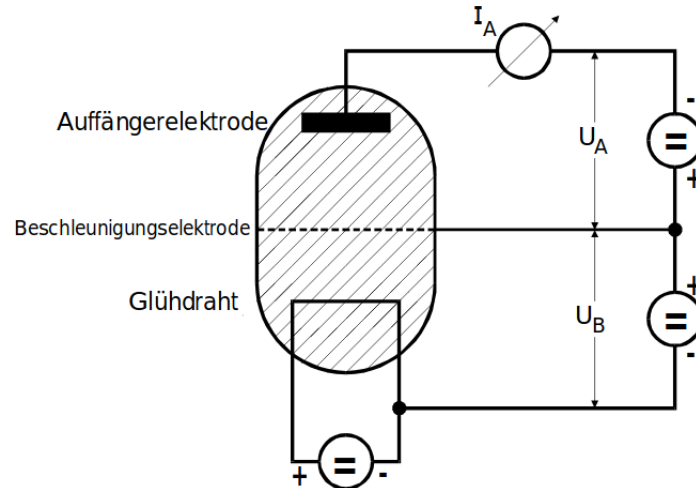


Abbildung 3: Versuchsaufbau des Franck-Hertz-Versuchs. Abgebildet ist die Vakuumkammer mit zwischen Glühkathode und Beschleunigungsanode geschalteter Beschleunigungsspannung U_B und zwischen Beschleunigungsanode und Auffängerelektrode geschalteter Bremsspannung U_A . [1]

In einem evakuierten Gefäß, in dem ein Quecksilbertropfen verdampft, sind eine Glühkathode, Beschleunigungsgitteranode und eine Auffängerelektrode eingefasst. Die aus der Glühkathode emittierten Elektronen werden durch das von der Beschleunigungsspannung U_B erzeugte E-Feld zur Gitteranode hin beschleunigt. Die kinetische Elektronenenergie kann als

$$\frac{m_e \cdot v_{\text{vor}}^2}{2} = e_0 \cdot U_B \quad (6)$$

bestimmt werden.

Danach werden die Elektronen im durch die Bremsspannung U_A erzeugten Gegenfeld gebremst.

Es können nur die Elektronen das Gegenfeld überwinden, für die deren kinetische Energie entlang des Feldes die Ungleichung

$$\frac{m_e \cdot v_E}{2} \geq e_0 \cdot U_A \quad (7)$$

erfüllt. Es wird der Auffängerstrom I_A der nach den Stößen dennoch an der Auffängerelektrode ankommenden Elektronen gemessen.

Außerdem lässt sich die Quecksilberdampfdruckdichte durch Temperaturänderung regeln.

2 Durchführung

Es wird ein Aufbau gemäß der in Abbildung 4 dargestellten Schaltskizze verwendet.

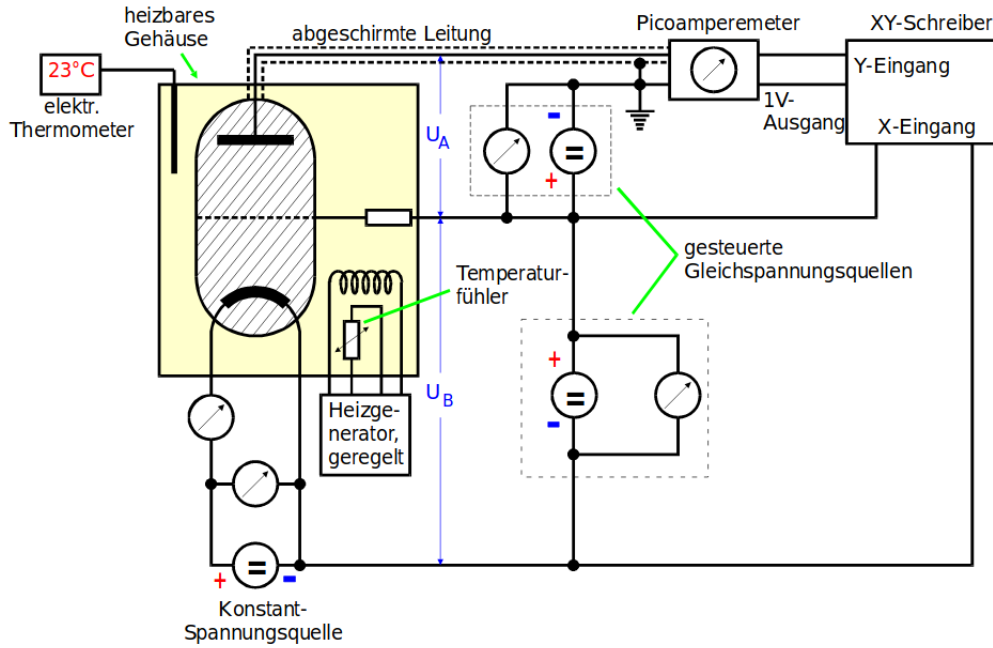


Abbildung 4: Schaltplan des Franck-Hertz-Versuchs. Zusätzlich sind ein XY-Schreiber, das Picoamperemeter, ein Heizgenerator und ein elektrisches Thermometer dargestellt. [1]

Zusätzlich zu den zuvor beschriebenen Elektroden im Vakuumglas werden ein Heizgenerator, Temperaturfühler und ein XY-Schreiber zur Aufzeichnung der Franck-Hertz-Kurven verwendet. Außerdem lassen sich die Spannungen zeitproportional innerhalb des Intervalls

$$0 \text{ V} \geq U_B, U_A \geq 60 \text{ V}$$

einstellen und der Auffängerstrom I_A kann an einem Picoamperemeter abgelesen werden. Zunächst wird die integrale Energieverteilung der beschleunigten Elektronen gemessen, indem I_A in Abhängigkeit von U_A und bei einer konstanten Bremsspannung $U_B = 11 \text{ V}$ aufgezeichnet wird.

Dabei wird U_A an den X-Eingang des XY-Schreibers geschlossen und dieser so eingestellt, dass das gesamte Spannungsintervall aufgenommen werden kann. Diese Messung erfolgt einmal bei Raumtemperatur und ein weiteres Mal im Intervall

$$140^\circ\text{C} \geq T \geq 160^\circ\text{C} .$$

Danach werden drei Franck-Hertz-Kurven für $U_A = 1 \text{ V}$ und bei Temperaturen im Intervall

$$160^\circ\text{C} \geq T \geq 200^\circ\text{C}$$

für verschiedene U_B gemessen. Diesmal wird dazu U_B an den X-Eingang des XY-Schreibers angeschlossen.

Zuletzt wird zur Bestimmung der Ionisationsenergie die Franck-Hertz-Kurve für $U_A = -30\text{ V}$ und im Temperaturintervall

$$100^\circ\text{C} \geq T \geq 110^\circ\text{C}$$

gemessen.

3 Auswertung

3.1 Bestimmung der freien Weglänge

Zunächst werden die Sättigungsdampfdrücke $p_{\text{sätt}}$ aus

$$p_{\text{sätt}} = \exp - \left(\frac{6876}{T} \right)$$

sowie die mittlere Weglänge der Elektronen aus

$$\bar{w}[\text{cm}] = \frac{0,0029}{p_{\text{sätt}}} [\text{p in mBar}]$$

für die verschiedenen Temperaturen, bei denen die Experimente durchgeführt werden, bestimmt. Außerdem werden diese Werte mit dem Abstand von 2 cm zwischen Kathode und Beschleunigungselektrode verglichen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 1 angegeben.

Tabelle 1: Bestimmung der Sättigungsdampfdrücke, sowie der mittleren Weglängen.

T / K	$p_{\text{sätt}} / \text{mbar}$	\bar{w} / cm	$\frac{a}{\bar{w}}$
296,15	0,005	0,63895	3,13
427,15	5,615	0,00052	3872,46
456,15	15,625	0,00019	10775,68
458,15	16,687	0,00017	11508,61
461,15	18,399	0,00016	12688,94

3.2 Energieverteilung der beschleunigten Elektronen

Im Folgenden werden die Graphen mit den Titeln 8a) 23°C und 8a) $140^\circ\text{C} - 160^\circ\text{C}$ untersucht. Es liegen hierbei integrale Energieverteilungen vor. Daher soll zunächst die differentielle Verteilung bestimmt werden. Die ermittelte Steigung des Graphen 8a) 23°C befindet sich in Tabelle 2.

Die daraus resultierende differentielle Energieverteilung bei 23°C ist in Abbildung 5 zu sehen. Die Ordinaten sind dabei proportional zur Anzahl, die Abszissen proportional zur Energie der Elektronen.

Für den zweiten Graphen wird analog verfahren. Die dazugehörigen Werte befinden sich in Tabelle 3 und Graph 6.

Tabelle 2: Ermittelte Steigungen der integralen Elektronenverteilung bei 23°C.

U / V	$\frac{\Delta y}{\Delta x}$
7,89	1,42
8,02	2,00
8,11	2,50
8,19	3,63
8,26	3,33
8,32	2,38
8,40	2,94
8,46	1,67

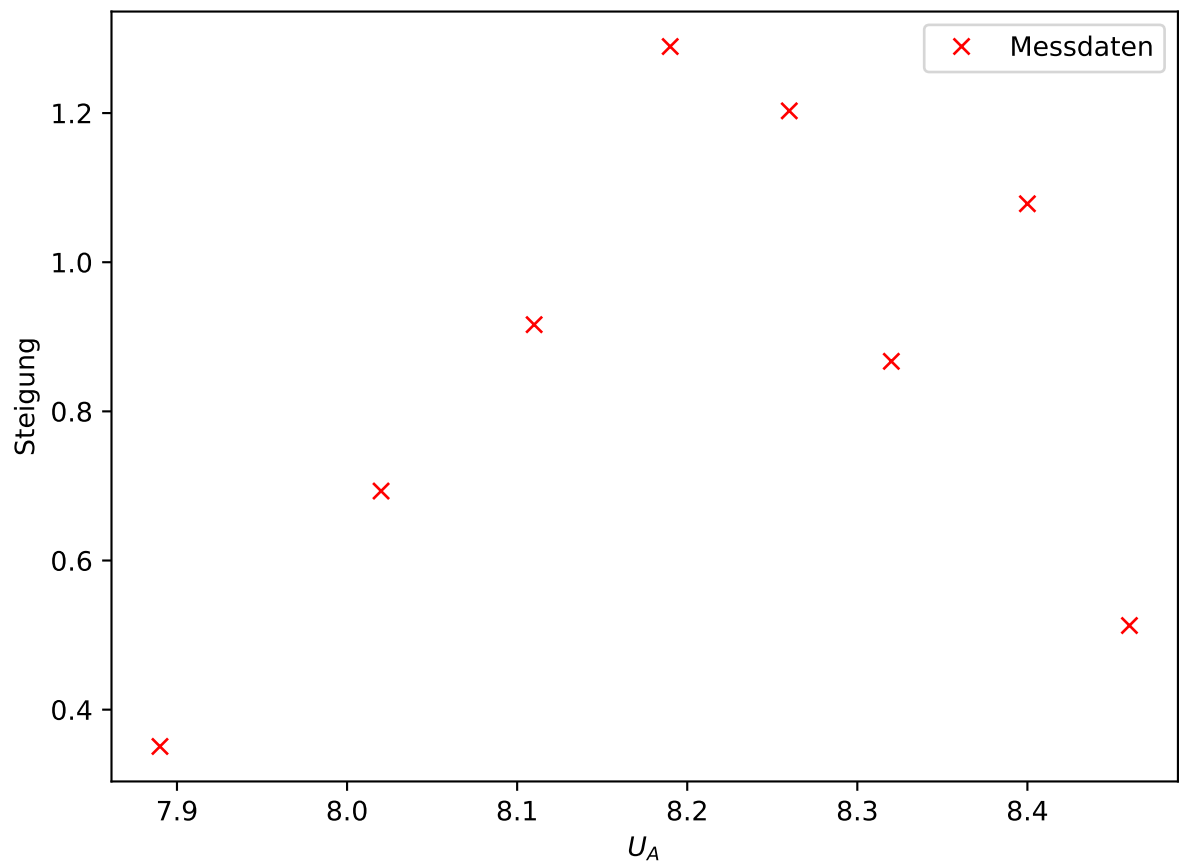


Abbildung 5: Differentielle Energieverteilung bei 23°C.

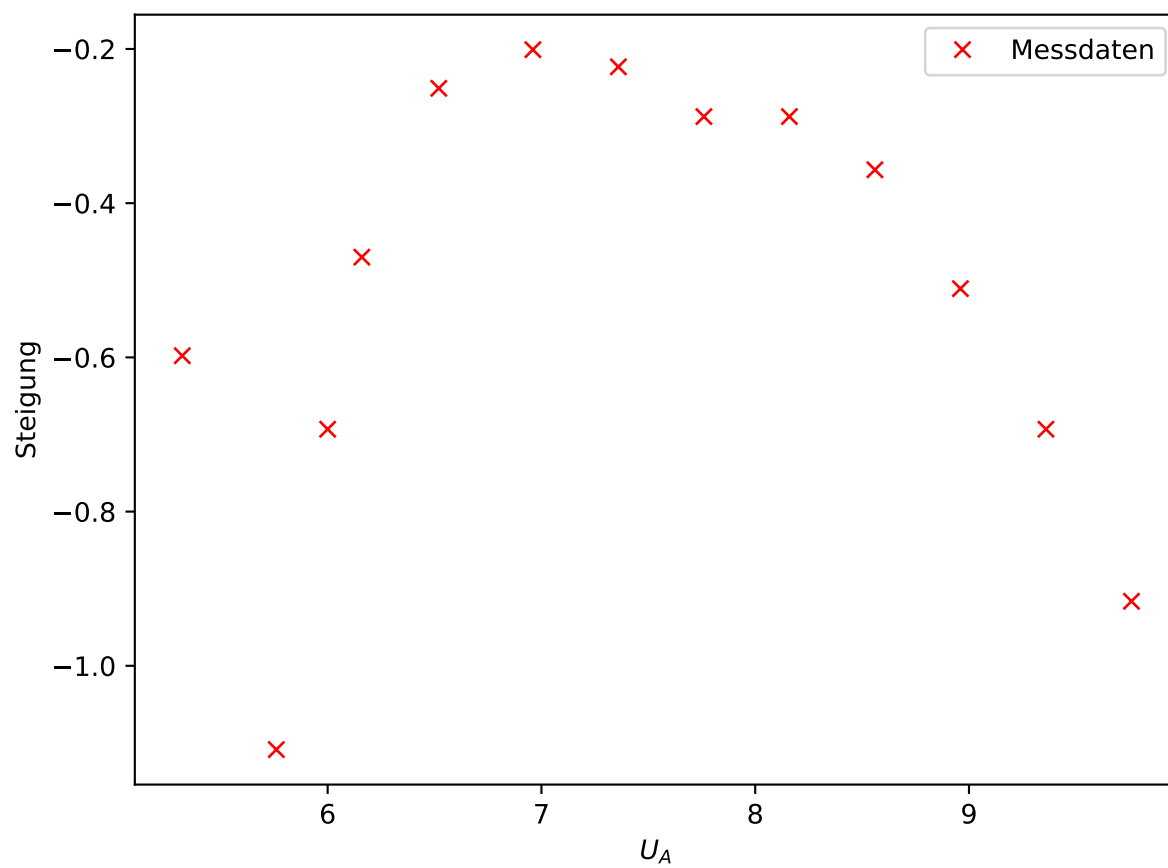


Abbildung 6: Differentielle Energieverteilung bei 154°C.

Tabelle 3: Ermittelte Steigungen der integralen Elektronenverteilung bei 154°C.

U / V	$\frac{\Delta y}{\Delta x}$
5,32	0,550
5,76	0,330
6,00	0,500
6,16	0,625
6,52	0,778
6,96	0,818
7,36	0,800
7,76	0,750
8,16	0,750
8,56	0,700
8,96	0,600
9,36	0,500
9,76	0,400

Im ersten Plot ist ein Peak bei 8,2 V und im zweiten bei 7 V zu erkennen. Das zu bestimmende Kontaktpotential wird für weitere Rechnungen auf

$$K_1 = 11 \text{ V} - 8,2 \text{ V} = 2,8 \text{ V}$$

festgelegt. Der Wert von 11 V ist dabei die angelegte Beschleunigungsspannung. Eigentlich wird ein einzelner Peak erwartet, der in der Theorie infinitesimal breit ist. In der Praxis ist dies offenkundig nicht vorzufinden. Grund dafür ist die Fermi-Dirac-Verteilung. Es ist allerdings in Abbildung 6 erkennbar, dass bei etwa 8,2 V ein Abfall der Steigung vorliegt. Dies wäre eigentlich bei der Spannung (2.76-2.8)V erwartet worden. Dies ist die Spannung, bei der die Elektronen das Quecksilber anregen können minus dem Kontaktpotential.

3.3 Anregung des Hg-Atoms

Mithilfe der aufgezeichneten Franck-Hertz-Kurve soll nun die 1. Anregungsenergie des Hg-Atoms bestimmt werden. Dafür wird die Lage der Maxima des Graphen mit dem Titel 8b) 185°C ermittelt, da dieser von allen aufgenommen Graphen die deutlichsten Maxima und Minima aufweist. Die Maxima und Minima sind mit k nummeriert und mit den jeweiligen Abstände in Tabelle 4 zu finden.

Die Abstände müssen mit der Elementarladung multipliziert werden. Es werden sowohl die Maxima, als auch die Minima verwendet, um eine höhere Genauigkeit zu erhalten. Es ergibt sich eine Anregungsenergie von

$$U_1 = 5,46 \text{ eV}.$$

Aus diesem berechneten Wert wird nun mit Hilfe von $\lambda = \frac{c}{\mu}$ und (3) die Wellenlänge der beim Übergang in den Grundzustand emittierten Strahlung bestimmt werden. Es ergibt

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

k	$U_{k+1} - U_k / \text{V}$
1	5,57
2	5,06
3	5,06
4	5,32
5	5,58
6	5,32
7	4,92
8	5,67
9	5,97
10	6,08

sich

$$\lambda = 451 \text{ nm.}$$

3.4 Ionisationsspannung

Zur Bestimmung der Ionisationsspannung des Quecksilber wird der Graphe mit dem Titel 8c) 107°C verwendet. Hierfür wird eine Extrapolation durchgeführt, so wie es in der Abbildung zu sehen ist. Der Schnittpunkt mit der x-Achse liegt bei 8,35 V. Mit dem bestimmten Kontaktpotential ergibt sich

$$U_{\text{ion}} = 5,55 \text{ V.}$$

4 Diskussion

Bei der Untersuchung der Energieverteilung der beschleunigten Elektronen ist deutlich zu erkennen, dass die aufgenommenen Werte stark von den erwarteten Werte abweichen. Gewünscht wäre eine nahezu gleiche Energie für alle Elektronen, welche allerdings nicht gegeben ist. Stattdessen ergab sich eine Verteilung in der Peaks nur schwer zu erkennen sind. Die berechnete Anregungsenergie der Quecksilber Atome und der dazugehörige Literaturwert ([2]) lauten

$$U_1 = 5,46 \text{ eV,}$$
$$U_{1, \text{Lit}} = 4,9 \text{ eV.}$$

Es ergibt sich eine prozentuale Abweichung von etwa 11,42 %. Daraus lässt sich schließen, dass die Bestimmung der Anregungsenergie mit Hilfe des Franck-Hertz-Versuches nicht sehr genau ist. Dies könnte an einem eventuell falschen Aufbau liegen, wie am Ende der

Versuchs festgestellt wurde. Außerdem waren sowohl die Brems- als auch die Beschleunigungsspannung nicht optimal abzulesen. Außerdem war es recht schwierig die Temperatur im gewünschten Bereich konstant zu halten, was ebenfalls einen negativen Einfluss auf die Messung gehabt haben kann.

Für die im letzten Versuchsteil zu bestimmende Ionisationsspannung ergeben sich die Werte([3]):

$$U_{\text{ion}} = 5,55 \text{ V}$$
$$U_{\text{ion,Lit}} = 10,438 \text{ V}$$

Die prozentuale Abweichung ist auch hier recht hoch mit 47 %. Hier fließt eine weitere Unsicherheit durch die recht ungenau Extrapolation mit ein. Bereits für kleine Änderungen in der Steigung ergeben sich bereits große Unterschiede für den Schnittpunkt der Geraden mit der x-Achse.

Insgesamt lässt sich sagen, dass die Methode des Franck-Hertz-Versuches zur Bestimmung von Anregungsenergie und Ionisationsspannung recht ungenau zu sein scheint. Dies liegt an einem eventuellen systematischen Fehler und durch mehrere einfließende Unsicherheiten.

5 Literaturverzeichnis

[1]: TU Dortmund. *Versuchsanleitung zu Versuch 601: Franck-Hertz-Versuch.*

[2]: Literaturwert für Anregungsenergie. <https://www.chemie.de/lexikon/Franck-Hertz-Versuch.html>

Werte entnommen am: 04.06.2019

[3]: Literaturwert für Ionisationsspannung. <http://www.periodensystem.info/elemente/quecksilber/>

Werte entnommen am: 04.06.2019