V601

Franck-Hertz-Versuch

Lukas Rolf
lukas.rolf@tu-dortmund.de

Yannik Brune
yannik.brune@tu-dortmund.de

Durchführung: 09.05.2017

Abgabe: 16.05.2017

Inhaltsverzeichnis

1 Zielsetzung **3**

2 Theorie **3**
2.1 Die Auswirkungen des Kontaktpotentials 4
2.2 Das Energiespektrum der Elektronen 5
2.3 Die Auswirkungen des Dampfdruckes 5

3 Aufbau **5**

4 Durchführung **6**

5 Auswertung **7**
5.1 Berechnung der mittleren freien Weglänge und Vergleich mit dem Abstand zwischen Kathode und Beschleunigungselektrode 7
5.2 Bestimmung der Skalierungsfaktoren 8
5.3 Bestimmung des Kontaktpotentials 9
5.4 Bestimmung der 1. Anregungsenergie von Quecksilber 13
5.5 Bestimmung der 1. Ionisierungsspannung von Quecksilber 14

6 Diskussion **16**

Literatur **17**

1 Zielsetzung

Es sollen die Ionisierungsenergie und die 1. Anregungsenergie des Quecksilberatoms bestimmt werden. Hierzu werden die Effekte von Stößen zwischen Elektronen und Quecksilberatomen betrachtet.

2 Theorie

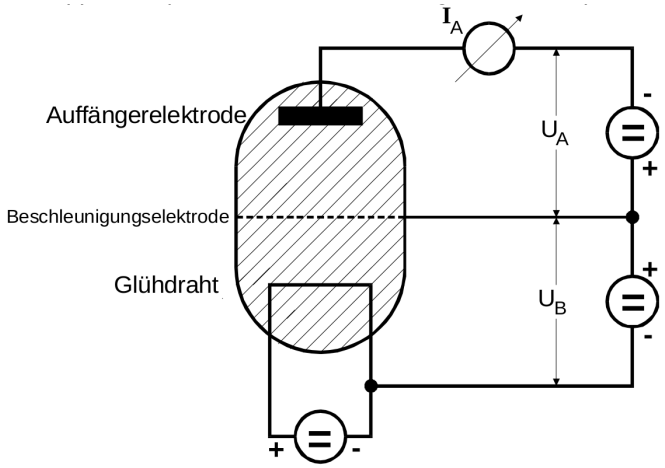
Eine Methode die Natur der Elektronenhülle zu untersuchen besteht darin Stöße zwischen Atomen und Elektronen zu beobachten. Aus den auftretenden Effekten lassen sich Rückschlüsse auf die Quantennatur der Elektronen ziehen. Auch der im folgenden dargestellte Frank-Hertz-Versuch folgt diesem Prinzip. Bei diesem werden Hg-Atome mit Elektronen beschossen. Es treten elastische sowie unelastische Stöße auf. Aufgrund der ungleich größeren Masse der Hg-Atome kommt es bei Ersteren jedoch nur zu einer Ablenkung der Elektronen, welche für das Versuchsergebnis nicht berücksichtigt werden. Für Letztere lässt sich bei nicht relativistischen Betrachtung der Energieunterschied

$$m_0 \frac{v_{\text{vor}}^2}{2} - m_0 \frac{v_{\text{nach}}^2}{2} = \Delta E = E_1 - E_0 \tag{1}$$

aufstellen. Die auftretende Energiedifferenz ΔE hebt das beschossene Atom von seinem Grundzustand E_0 in den angeregten Zustand E_1. Kurz darauf fällt es wieder in den Grundzustand zurück und emittiert dabei einen Lichtquant der Frequenz

$$f = \frac{\Delta E}{h} \text{bzw der Wellenlänge } \lambda = \frac{c \cdot h}{\Delta E}. \tag{2}$$

Abbildung 1: Der prinzipielle Aufbau des Frank-Hertz-Versuches.



Der theoretische Aufbau des Frank-Hertz Versuches folgt nach Abb. 1 . Den Kern bildet eine mit Quecksilberdampf versehene und ansonsten evakuierte Röhre. Elektronen

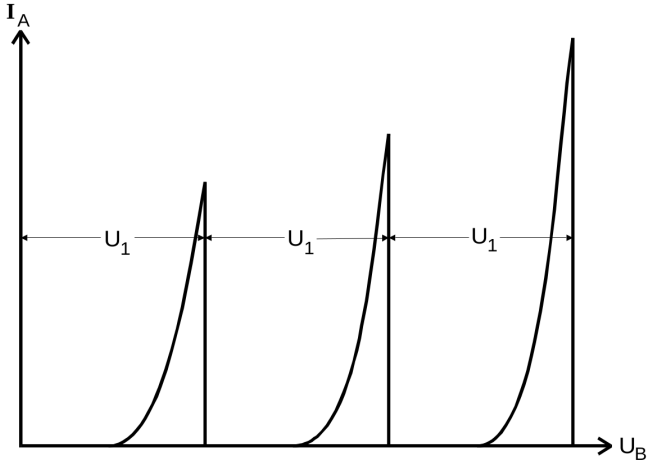
werden über eine Glühspannung aus einer Glühkathode emittiert und mittels einer Beschleunigungsspannung U_B bis zu einer in der Mitte angebrachten Elektrode beschleunigt. Die Elektronen haben danach die Energie

$$m_0 \frac{v_\mathrm{vor}^2}{2} = e_0 U_\mathrm{B}. \tag{3}$$

Anschließend werden die Elektronen mit einer Auffängerelektrode gefangen und der daraus resultierende Strom gemessen. Bei Variation von U_B folgt nach den bohrschen Postulaten eine Kurve wie in Abb. 2. Bis U_B größer ist als U_A lässt sich kein Strom messen, da die Elektronen das Gegenfeld nicht durchlaufen können. Anschließend folgt ein Anstieg der Stromstärke, bis die kinetische Energie der Elektronen ΔE übersteigt. Nun treten auch unelastische Stößen auf und die Elektronen verlieren nach dem obigen Modell ihre kinetische Energie. Daher erreichen sie die Auffängeranode nicht mehr und folgt ein plötzliches absinken der Stromstärke auf Null. Liegen höhere Spannungen an, können die Elektronen wieder ausreichend beschleunigen und die Stromstärke steigt wieder an, solange bis sich der Vorgang wiederholt. Für den Spannungsabstand zwischen 2 Stromstärkenmaxima folgt:

$$U_1 = \frac{1}{e_0} \left(E_1 - E_0 \right) \tag{4}$$

Abbildung 2: Der theoretische Verlauf der Frank-Hertz-Kurve.



Der in Abb. 2 dargestellte idealisierte Kurvenverlauf wird jedoch aufgrund mehrerer Faktoren nicht erreicht.

• 2.1 Die Auswirkungen des Kontaktpotentials

Wenn die Materialien der Glühkathode und der Beschleunigungselektrode unterschiedliche Austrittsarbeiten besitzen kommt es zu einer Verschiebung der effektiven U_B bezüglich der eingestellten. Um jedoch bereits bei verhältnismäßig niedrigen

Temperaturen hohe Emissionsraten zu erreichen, besitzt die Glühkathode ein Material mit geringer Austrittsarbeit Φ_{G}. Damit es an der Beschleunigungselektrode zu keiner Elektronenauslösung wird für diese ein Material mit ungleich höherer Austrittsarbeit gewählt. Φ_{B}. Es ergibt sich eine effektive Beschleunigungsspannung mit:

$$U_{\mathrm{B,eff}} = U_{\mathrm{B}} - K \text{ mit dem Kontaktpotential } K,\ K = \frac{1}{e_0}\left(\Phi_{\mathrm{B}} - \Phi_{\mathrm{G}}\right), \tag{5}$$

was sich in einer Verschiebung der Kurve um K widerspiegelt.

- ### 2.2 Das Energiespektrum der Elektronen

Des Weiteren ist die Energie die Elektronen im Kathodenmaterial nicht einheitlich, sondern verteilt sich gemäß der Fermi-Dirac-Verteilung. Daher treten die Elektronen mit unterschiedlichen Anfangsgeschwindigkeiten aus und kollidieren dementsprechend auch mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten. Infolgedessen fallen die Extrema geringer aus und der Graph fällt nach einem Maximum nicht mehr unstetig auf 0, sondern nähert sich dieser asymptotisch an. Zusätzlich ist der Einfluss der elastischen Stöße im Auffangbereich zu berücksichtigen, da die gemessenen Ströme ausschließlich von der Geschwindigkeitskomponente in Normalenrichtung bezüglich der Anode abhängen. Die Frank-Hertz-Kurve wird daher flacher und breiter.

- ### 2.3 Die Auswirkungen des Dampfdruckes

Damit es zu einer geeigneten Anzahl von Zusammenstößen zwischen Elektronen und Hg-Atomen kommt, muss die mittlere freie Weglänge $\overline{w}$ der Hg-Atome klein gegenüber der Beschleunigungsstrecke sein. Diese hängt vom vorherrschenden, temperaturabhängigen Sättigungsdampfdruck $p_{\text{sät}}$ ab. Damit folgt die Näherung:

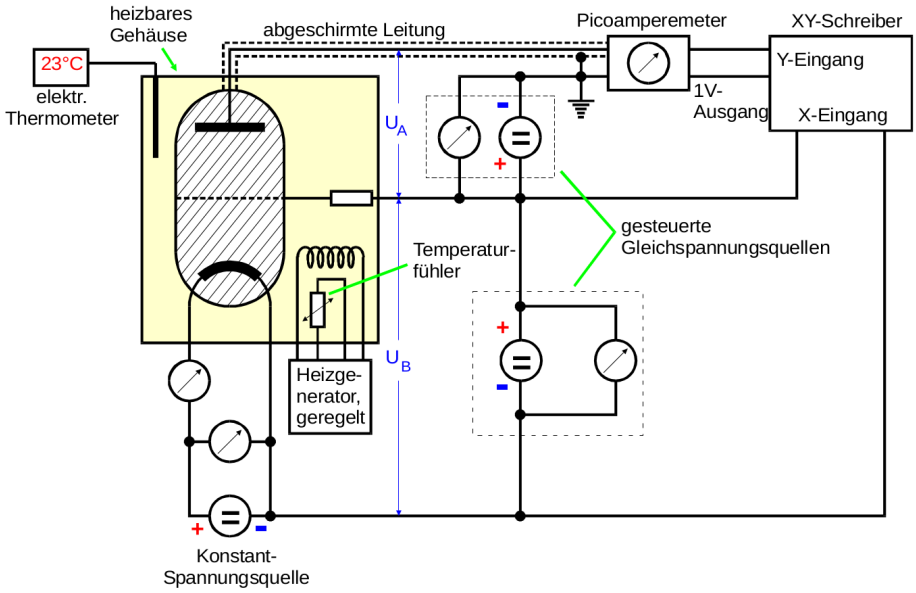
$$\overline{w}[cm] = \frac{0.0029}{5.5 \cdot 10^7} \exp\left(\frac{-6876}{T}\right), \tag{6}$$

mit der Temperatur T in Kelvin. Ist $\overline{w}$ zu groß, wächst die Wahrscheinlichkeit, dass Elektronen den Beschleunigungsbereich ohne Wechselwirkung durchlaufen. Ist $p_{\text{sät}}$ hingegen zu groß, treten zu viele elastische Stöße auf, welche die Kurve vermeidbar zerfließen lassen.

3 Aufbau

Zur Bestimmung der Energiedifferenz zwischen E_1 und E_0 sowie der Ionisierungsenergie wird ein Aufbau nach Abb.3 verwendet. Den Kern bildet eine evakuierte Glasröhre, in welcher sich ein Tropfen Quecksilber befindet. Über einen Heizgenerator lässt sich das Quecksilber verdampfen, uns anschließend dessen Sättigungsdampfdruck steuern. Die

Abbildung 3: Die Messschaltung zur Messung des Frank-Hertz-Versuches und der Aufnahme einer Kurve.



Temperatur kann über ein digitales Thermometer abgelesen werden. Auf der einen Seite der Glasröhre befindet sich eine Glühkathode, welche über eine Konstantspannungsquelle versorgt wird. In der Mitte der Röhre befindet sich eine Beschleunigungselektrode, am anderen Ende eine Auffängeranode. Zwischen Kathode und Beschleunigungselektrode wird eine Beschleunigungsspannung U_B, zwischen Beschleunigungselektrode und Aufängeranode eine Bremsspannung U_A angelegt. Beide werden jeweils über eine eigene Gleichspannungsquelle versorgt. Der an der Auffängeranode ankommende Strom wird mit einem Pikoamperemeter gemessen. Anode und Pikoamperemeter sind aufgrund der geringen Stromstärken über eine abgeschirmte Leitung verbunden. Die auftretenden Kurven der Stromstärke in Abhängigkeit von U_B oder U_A werden über einen XY-Schreiber grafisch dargestellt.

4 Durchführung

Zunächst werden Kurven zur Bestimmung der integralen Energieverteilung der beschleunigten Elektronen erstellt, einmal bei Zimmertemperatur und einmal bei ca. $140-160\,^\circ\mathrm{C}$. Hierzu wird die Beschleunigungsspannung auf 11 V eingestellt. Die Bremsspannung wird für den Kurvenverlauf zwischen $0-11$ V variiert. Für die Hochtemperatur muss zusätzlich darauf geachtet, dass die Temperatur möglichst konstant bleibt. Dazu muss die Heizleistung gegebenenfalls nachjustiert werden, da die Temperatur nicht direkt eingestellt werden kann. Dieser Vorgang ist bei den nachfolgenden Messkurvenkurvenaufzeichnungen zu beachten. Auch die Achsenskalierung und der Nullpunkt des XY-Schreibers müssen jeweils neu justiert werden. Anschließend folgt eine Messung der Ionisierungsspannung

von Hg. Hierzu wird der Quecksilberdampf auf eine Temperatur von ca. $100 - 110\,^\circ\mathrm{C}$ gebracht. Die Bremsspannung wird auf $-30\,\mathrm{V}$ eingestellt, sodass möglichst alle verfügbaren Elektronen auf die Auffängeranode treffen. Die Kurve des Auffängerstroms I_A folgt über die Variation von U_B. Der interessante Bereich endet nach dem ersten Maximum. Da die Kurve nach dem in Abb. 3 dargestellten Messaufbau im negativen Bereich verläuft, sind die Kontakte am Y-Eingang zu vertauschen.

Zuletzt werden Frank-Hertz-Kurven im Temperaturbereich zwischen $160 - 200\,^\circ\mathrm{C}$ angefertigt. Dazu wird U_A auf $1\,\mathrm{V}$ eingestellt und U_B im Bereich von $0 - 60\,\mathrm{V}$ variiert. Aufgrund der in Theorie dargestellten Fehlerquellen werden mehrere Kurven unter verschiedenen Temperaturen erstellt und die geeignetste für die Auswertung verwendet.

5 Auswertung

Die Graphen wurden sowohl mit Matplotlib [3] als auch NumPy [7] erstellt. Die Fehlerrechnung wurde mithilfe von Uncertainties [4] durchgeführt. Die Konstanten h, e_0 und c sind vom NIST [6].

5.1 Berechnung der mittleren freien Weglänge und Vergleich mit dem Abstand zwischen Kathode und Beschleunigungselektrode

Die mittlere Weglänge $\overline{w}$ lässt sich bei bekannter Temperatur T mit Formel 6 berechnen. Bei der ersten Messung bei $T = 25\,^\circ\mathrm{C}$ ergibt sich

$$\overline{w} = 0{,}55\,\mathrm{cm}.$$

Also ist der Abstand zwischen Kathode und Beschleunigungselektrode $a = 1\,\mathrm{cm}$ ca. 1.8 mal größer als die mittlere Weglänge. Bei der zweiten Messung bei $T = (150 \pm 10)\,^\circ\mathrm{C}$ liegt sie bei

$$\overline{w} = (6 \pm 2) \cdot 10^{-4}\,\mathrm{cm}.$$

Dies entspricht einem Faktor von $\frac{a}{\overline{w}} = (1{,}7 \pm 0{,}6) \cdot 10^3$. Für die dritte Messung bei $T = (105 \pm 5)\,^\circ\mathrm{C}$ ergibt sich

$$\overline{w} = (4 \pm 1) \cdot 10^{-3}\,\mathrm{cm}$$

mit dem Verhältnis $\frac{a}{\overline{w}} = (2 \pm 1) \cdot 10^2$. Eine mittlere Weglänge

$$\overline{w} = (2 \pm 1) \cdot 10^{-4}\,\mathrm{cm}$$

ergibt sich schließlich bei einer Temperatur $T = (180 \pm 20)\,^\circ\mathrm{C}$ mit dem Verhältnis $\frac{a}{\overline{w}} = (5 \pm 3) \cdot 10^3$. Da der Faktor $\frac{a}{\overline{w}}$ nur bei den Temperaturen $T = (150 \pm 10)\,^\circ\mathrm{C}$ und $T = (180 \pm 20)\,^\circ\mathrm{C}$ in dem Bereich von 1000-4000 liegt, sind nur bei diesen die Beobachtung des Franck-Hertz-Effektes zu erwarten [1].

5.2 Bestimmung der Skalierungsfaktoren

In den Graphen in den Abbildungen 4, 5, 8 und 9 sind Markierungen in jeweils 1 V bzw. 5 V Abständen eingezeichnet. Mit den gemessenen Abständen zwischen den Markierungen in den Tabellen 1, 2, 3 und 4 lassen sich daraus die Skalierungsfaktoren f bestimmen. Es ergibt sich für die mittleren Spannungen pro Zentimeter entlang der x-Achse der Graphen in den Abbildungen 4, 5, 8 und 9:

$$
\begin{aligned}
f_{\mathrm{a1}} &= (0{,}44 \pm 0{,}01)\,\frac{\mathrm{V}}{\mathrm{cm}} \\
f_{\mathrm{a2}} &= (0{,}46 \pm 0{,}01)\,\frac{\mathrm{V}}{\mathrm{cm}} \\
f_{\mathrm{b}} &= (2{,}25 \pm 0{,}10)\,\frac{\mathrm{V}}{\mathrm{cm}} \\
f_{\mathrm{c}} &= (1{,}18 \pm 0{,}07)\,\frac{\mathrm{V}}{\mathrm{cm}}.
\end{aligned}
$$

Tabelle 1: Die gemessenen Abstände zwischen den Markierungen in Abbildung 4.

Abstand / cm
2,0
2,0
2,1
2,2
2,4
2,4
2,3
2,1
2,5
2,5
2,5

Tabelle 2: Die gemessenen Abstände zwischen den Markierungen in Abbildung 5.

Abstand / cm
2,1
2,2
2,1
2,2
2,0
2,4
2,1
2,4
2,1
2,5
1,7

Tabelle 3: Die gemessenen Abstände zwischen den Markierungen in Abbildung 8.

Abstand / cm
3,1
1,7
2,2
2,2
2,2
2,3
2,0
2,3
2,1
2,2
2,1

Tabelle 4: Die gemessenen Abstände zwischen den Markierungen in Abbildung 9.

Abstand / cm
5,5
4,2
4,0
3,8
3,7
4,2

5.3 Bestimmung des Kontaktpotentials

Die in den Abbildungen 6 und 7 dargestellten Messwertepaare aus der Tabelle 5 und 6 deuten die nicht normierten Energieverteilungen der an der Auffängerelektrode ankommenden Elektronen bei den verschiedenen Temperaturen an. Diese Werte basieren auf den Steigungen der Graphen in den Abbildungen 4 und 5. Das Peak der Messwerte in Abbildung 6 würde ohne Kontaktpotential bei der Beschleunigungsspannung $U_\mathrm{B} = 8{,}5\,\mathrm{V}$ erwartet werden. Jedoch ist das Peak offenbar um das Kontaktpotential verschoben. Es kann abgelesen werden

$$K_\mathrm{a} = (1{,}77 \pm 0{,}18)\,\mathrm{V}.$$

In der Abbildung 7 ist das Peak stark abgeflacht und nach links verschoben. Dies lässt sich durch die erhöhte Anzahl von Stoßprozesse aufgrund der höheren Temperatur und dem daraus folgendem höheren Druck erklären. Durch diese elastischen Stoßprozesse geben die Elektronen Teile ihrer Energie an die Quecksilberatome ab. Folglich verschiebt sich die Energie der Elektronen größtenteils um einen kontinuierlichen Betrag nach unten.

Abbildung 4: Die bei einer Temperatur von 25 °C aufgenommene Kurve in der die integrale Energieverteilung der Elektronen zuerkennen ist.

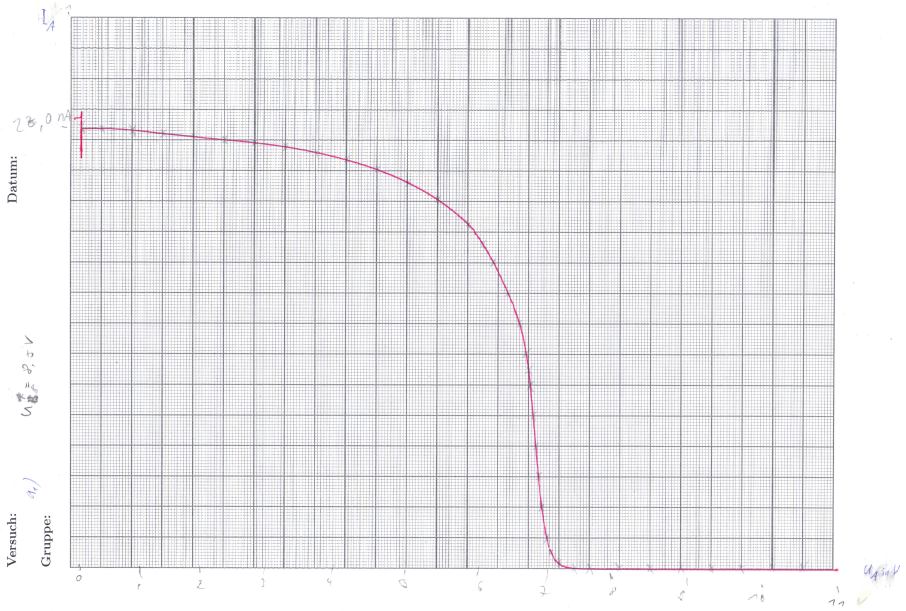


Abbildung 5: Die bei einer Temperatur von (150 ± 10) °C aufgenommene Kurve in der die integrale Energieverteilung der Elektronen zuerkennen ist.

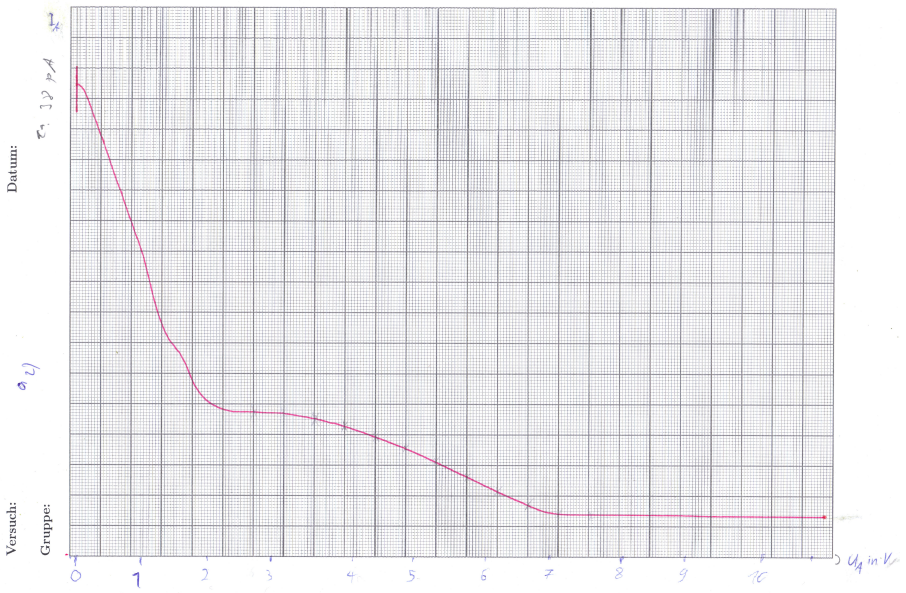


Abbildung 6: Die nicht normierte Energieverteilung der Elektronen bei einer Temperatur von 25 °C und $U_B = 8{,}5\,\mathrm{V}$.

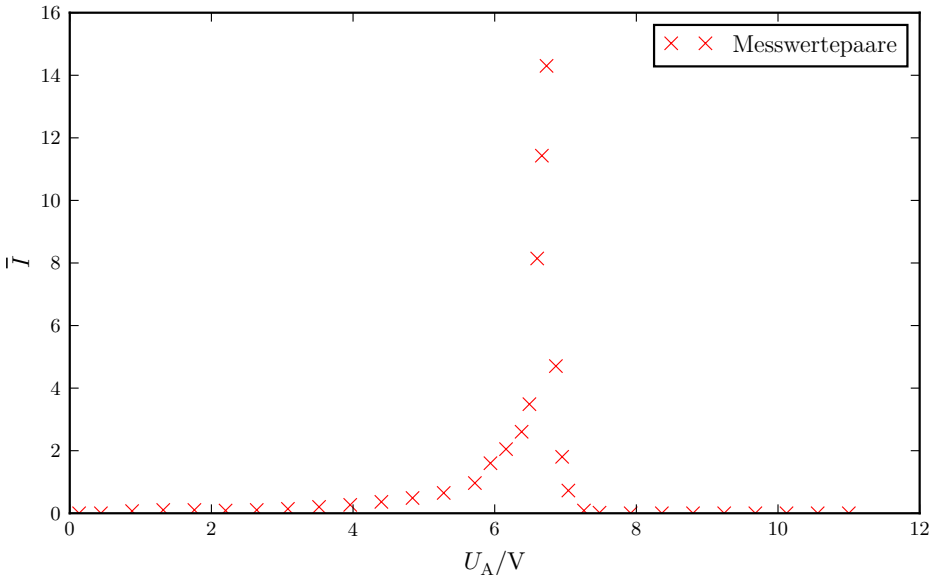


Abbildung 7: Die nicht normierte Energieverteilung der Elektronen bei einer Temperatur von (150 ± 10) °C und $U_B = 8{,}5\,\mathrm{V}$.

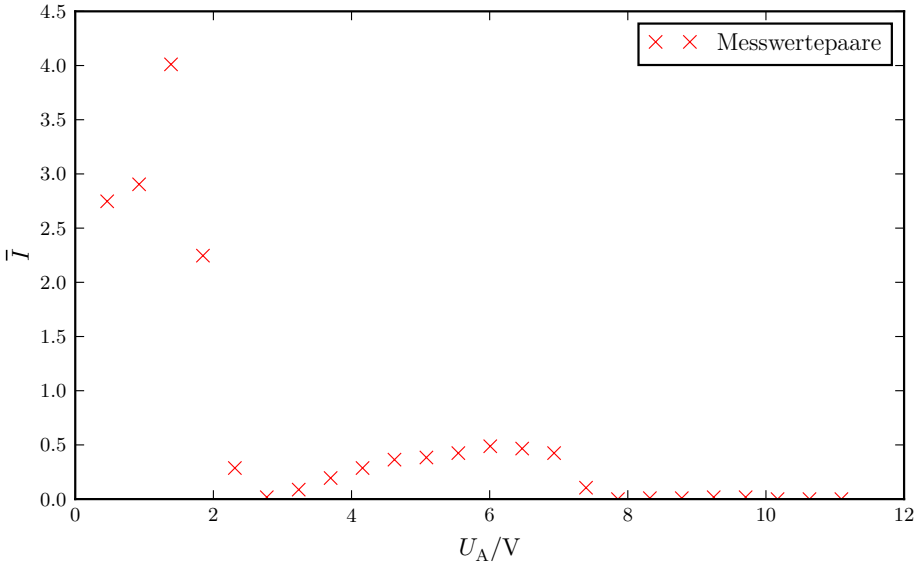


Tabelle 5: Das bei den verschieden Gegenspannungen U_A gemessene Gefälle $\overline{I}$ des Graphen in Abbildung 4.

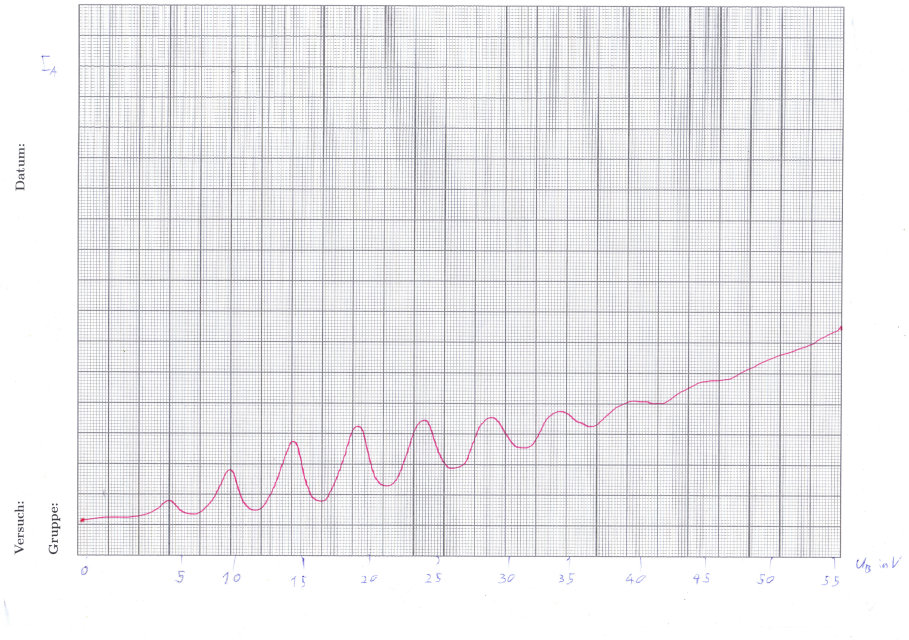
U_A/V	$\overline{I}$ / °	$\overline{I}$
0,13	0,0	0,00
0,44	0,0	0,00
0,88	4,0	0,07
1,32	6,0	0,11
1,76	6,0	0,11
2,20	5,0	0,09
2,64	6,0	0,11
3,08	8,0	0,14
3,52	11,5	0,20
3,96	15,0	0,27
4,40	20,0	0,36
4,84	26,0	0,49
5,28	33,0	0,65
5,72	44,0	0,97
5,94	58,0	1,60
6,16	64,0	2,05
6,38	69,0	2,61
6,49	74,0	3,49
6,60	83,0	8,14
6,67	85,0	11,43
6,73	86,0	14,30
6,86	78,0	4,70
6,95	61,0	1,80
7,04	36,0	0,73
7,26	5,0	0,09
7,48	1,0	0,02
7,92	0,0	0,00
8,36	0,0	0,00
8,80	0,0	0,00
9,24	0,0	0,00
9,68	0,0	0,00
10,12	0,0	0,00
10,56	0,0	0,00
11,00	0,0	0,00

Tabelle 6: Das bei den verschieden Gegenspannungen U_A gemessene Gefälle $\overline{I}$ des Graphen in Abbildung 5.

U_A/V	$\overline{I}$ / °	$\overline{I}$
0,46	70,0	2,75
0,92	71,0	2,90
1,39	76,0	4,01
1,85	66,0	2,25
2,31	16,0	0,29
2,77	1,0	0,02
3,24	5,0	0,09
3,70	11,0	0,19
4,16	16,0	0,29
4,62	20,0	0,36
5,08	21,0	0,38
5,55	23,0	0,42
6,01	26,0	0,49
6,47	25,0	0,47
6,93	23,0	0,42
7,39	6,0	0,11
7,86	0,0	0,00
8,32	0,5	0,01
8,78	0,5	0,01
9,24	1,0	0,02
9,71	1,0	0,02
10,17	0,0	0,00
10,63	0,0	0,00
11,09	0,0	0,00

5.4 Bestimmung der 1. Anregungsenergie von Quecksilber

Abbildung 8: Die bei einer Temperatur von $(180 \pm 20)\,^{\circ}\mathrm{C}$ aufgenommene Kurve in welcher der Auffängerstrom I_A gegen die Beschleunigungsspannung U_B aufgetragen ist.



Aus dem mittleren Wert für die Abstände zwischen den Peaks aus Tabelle 7 und dem zuvor bestimmten Umrechnungsfaktor f_b berechnet sich die 1. Anregungsenergie zu

$$E_1 = (4{,}82 \pm 0{,}09)\,\mathrm{eV}.$$

Mit dieser lässt sich die Wellenlänge λ der emittierten Strahlung nach

$$\lambda = \frac{hc}{E_1} \tag{7}$$

berechnen. Es ergibt sich

$$\lambda = (257 \pm 5)\,\mathrm{nm}.$$

Die Energieverluste der Elektronen bei den zentralen elastischen Stößen müssen hier nicht berücksichtigt werden, da durch diese zwar die Peaks in dem Graphen in Abbildung 8 zerfließen, jedoch die Abstände zwischen diesen nicht merklich beeinflusst werden. Für die Lage der Peaks gilt weiterhin, dass diese um das Kontaktpotential verschoben sind. Hieraus lässt sich das Kontaktpotential bestimmen, indem von der Lage des ersten Peaks die mittlere Spannungsdifferenz zwischen den Peaks U_1 abgezogen wird. Es folgt

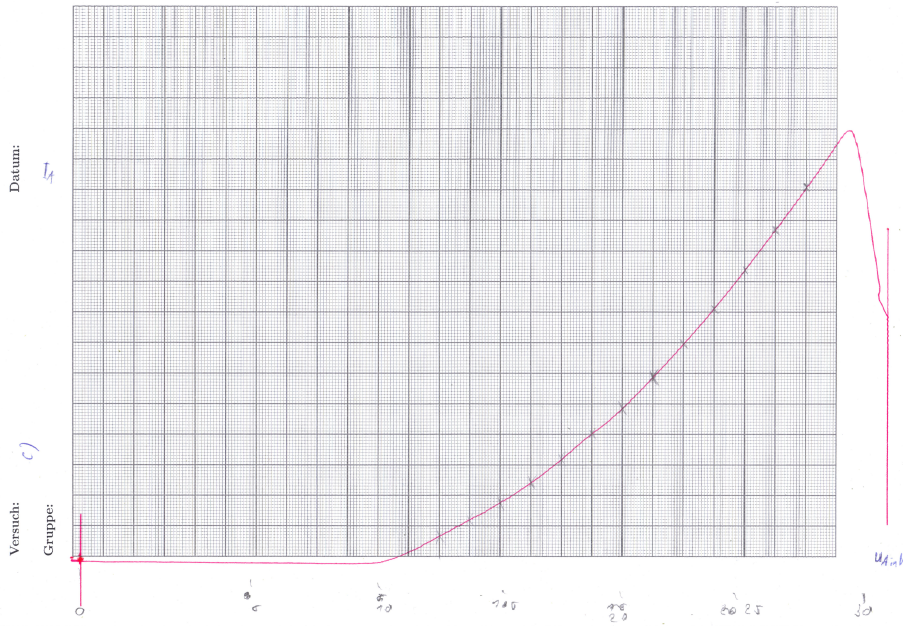
$$K_\mathrm{b} = (1{,}94 \pm 0{,}32)\,\mathrm{V}.$$

Tabelle 7: Die aus dem Graphen in Abbildung 8 entnommenen Abstände zwischen den Peaks.

Abstand / cm
2,00
2,10
2,10
2,20
2,20
2,25

5.5 Bestimmung der 1. Ionisierungsspannung von Quecksilber

Abbildung 9: Der gemessene Auffängerstrom I_A gegen die Beschleunigungsspannung U_B bei einer Gegenspannung von $-30\,\mathrm{V}$ aufgetragen.



Der lineare Fit in der Abbildung 10 besitzt die Form $y = ax + b$. Eine lineare Ausgleichsrechnung der Form $y = ax + b$ liefert mit den Wertepaaren aus Tabelle 8 für die Summe von der Ionisierungsspannung U_ion und dem Kontaktpotential K

$$U_\mathrm{ion} + K = -\frac{0{,}25 - b}{a} = (12{,}2 \pm 0{,}5)\,\mathrm{V}.$$

Hierbei wurde die 0,25 ergänzt, da der Graph in Abbildung 9 zu Beginn 0,25 cm unter der x-Achse des Graphen liegt. Daraus lässt sich nun mit dem zuvor entnommenen

Abbildung 10: Die aus dem Graphen in Abbildung 9 entnommene Wertepaare angenähert durch einen linearen Fit, wobei die Konstante C die Einheit Ampere besitzt.

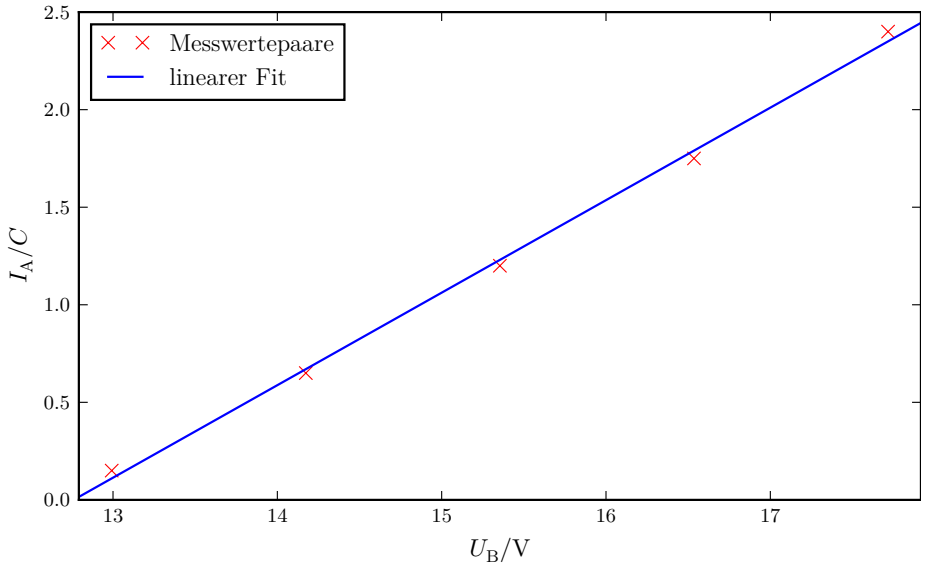


Tabelle 8: Die aus dem Graphen in Abbildung 9 entnommenen Wertepaare, wobei die Konstante C die Einheit Ampere besitzt.

U_B/V	I_A/C
12,99	0,15
14,17	0,65
15,35	1,20
16,54	1,75
17,72	2,40

Kontaktpotential $K_\mathrm{a} = (1{,}77 \pm 0{,}18)\,\mathrm{V}$ die Ionisierungsspannung U_ion berechnen. Es folgt

$$U_\mathrm{ion} = (10{,}5 \pm 0{,}6)\,\mathrm{V}.$$

6 Diskussion

Tabelle 9: Die Ergebnisse aus der Auswertung.

	gemessen/berechnet	Literaturwert[8],[5],[2]	Abweichung
K_a	$(1{,}8 \pm 0{,}2)\,\mathrm{V}$	-	-
K_b	$(1{,}9 \pm 0{,}3)\,\mathrm{V}$	-	-
E_1	$(4{,}82 \pm 0{,}09)\,\mathrm{eV}$	$4{,}85\,\mathrm{eV}$	$(0{,}01 \pm 0{,}02)\,\%$
λ	$(257 \pm 5)\,\mathrm{nm}$	$253\,\mathrm{nm}$	$(0{,}02 \pm 0{,}02)\,\%$
U_ion	$(10{,}5 \pm 0{,}6)\,\mathrm{V}$	$10{,}4375\,\mathrm{V}$	$(0{,}00 \pm 0{,}05)\,\%$

Die obige Auswertung liefert einige Ergebnisse, welche nun zu diskutieren sind. Die in 5.3 und 5.4 bestimmten Kontaktpotentiale in Tabelle 9 basieren auf einer jeweils anderen Kurve. Aufgrund des größeren Fehlers von K_b ist das Ergebnis von K_a jedoch aussagekräftiger und vorzuziehen. Die Fehler der anderen bestimmten Größen sind jedoch ungleich kleiner. So liegt der ermittelte Wert von E_1 mit seiner 1σ-Umgebung im Bereich des Literaturwertes. Der relative Fehler beträgt weniger als $0{,}04\,\%$. Die daraus ermittelte Wellenlänge zeigt dementsprechend dieselbe, geringe Abweichung. Auch die bestimmte Ionisierungsspannung liegt im Bereich des Literaturwertes, wenngleich die Unsicherheit geringfügig größer ist. Ursachen der Unsicherheiten liegen in Temperaturschwankungen während des Messvorgang sowie in Ablesefehlern bei der manuellen Auswertung. Die relativ große Ungenauigkeit bei dem Wert von K_b lässt sich auf die stark fehleranfällige Bestimmungsweise des Wertes zurückführen. Auch liegt vermutlich ein nicht näher bestimmbarer Fehler in der Messapparatur vor. Dieser verursacht in Abb. 7 bei geringen Spannungen einen Peak. Zu Abweichungen von den theoretischen Werten kann es zudem auch durch mangelnde Abschirmung der Kabel kommen.

Literatur

[1] TU Dortmund. *V601 Franck-Hertz-Versuch*. URL: http://129.217.224.2/HOMEPAGE/PHYSIKER/BACHELOR/AP/SKRIPT/V601.pdf.

[2] Georg-August-Universität Göttingen. *Der Franck-Hertz-Versuch*. URL: https://lp.uni-goettingen.de/get/text/1612 (besucht am 14. 05. 2017).

[3] John D. Hunter. *Matplotlib: A 2D Graphics Environment*. Version 1.5.3. URL: http://matplotlib.org/ (besucht am 09. 12. 2016).

[4] Eric O. Lebigot. *Uncertainties: a Python package for calculations with uncertainties*. Version 3.0.1. URL: http://pythonhosted.org/uncertainties/ (besucht am 09. 12. 2016).

[5] NIST. *Atomic Data for Mercury (Hg)*. URL: http://physics.nist.gov/PhysRefData/Handbook/Tables/mercurytable1.htm (besucht am 12. 05. 2017).

[6] NIST. *Numpy Konstanten*. URL: http://physics.nist.gov/cuu/Constants/index.html (besucht am 25. 04. 2017).

[7] Travis E. Oliphant. *NumPy: Python for Scientific Computing*. Version 1.11.1. URL: http://www.numpy.org/ (besucht am 09. 12. 2016).

[8] Universität Stuttgart. *Physikalisches Praktikum I*. URL: http://www3.physik.uni-stuttgart.de/studium/praktika/ap/pdf_dateien/A20.pdf (besucht am 12. 05. 2017).