

V601

Der Franck-Hertz-Versuch

David Venker

david.venker@tu-dortmund.de

Nico Guth

nico.guth@tu-dortmund.de

Durchführung: 30.06.2020

Abgabe: 09.07.2020

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1 Zielsetzung	3
2 Theorie	3
2.1 Aufbau des Franck-Hertz-Versuchs	3
2.2 Funktionsweise des Franck-Hertz-Versuchs	4
2.3 Einflüsse auf die Franck-Hertz-Kurve	5
3 Durchführung	6
4 Auswertung	7
4.1 Energieverteilung der Elektronen	7
4.2 Franck-Hertz-Kurve und Anregungsenergie von Hg	10
5 Diskussion	12
6 Anhang	12
Literatur	15

1 Zielsetzung

In diesem Versuch soll die Wirkungsweise des Franck-Hertz-Versuchs untersucht und damit die erste Anregungsenergie von Quecksilber (Hg) Atomen bestimmt werden.

2 Theorie

2.1 Aufbau des Franck-Hertz-Versuchs

Eine Möglichkeit die diskreten Energieniveaus eines Atoms zu zeigen sind Elektronenstoßexperimente, wie der Franck-Hertz-Versuch. Die grundlegende Idee ist dabei, die Atome mit energetischen Elektronen zu beschleunigen und den Energieverlust zu beobachten. Es treten elastische und unelastische Stöße auf. Das Elektron gibt bei einem unelastischen Stoß exakt die Energie an ein Hg-Atom ab, die benötigt wird um von seinem Grundzustand in einen angeregten Zustand überzugehen, also

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

Im Folgenden wird versucht diese Energiedifferenz zu bestimmen. Dafür wird eine Versuchsaппaratur nach Abbildung 1 verwendet.

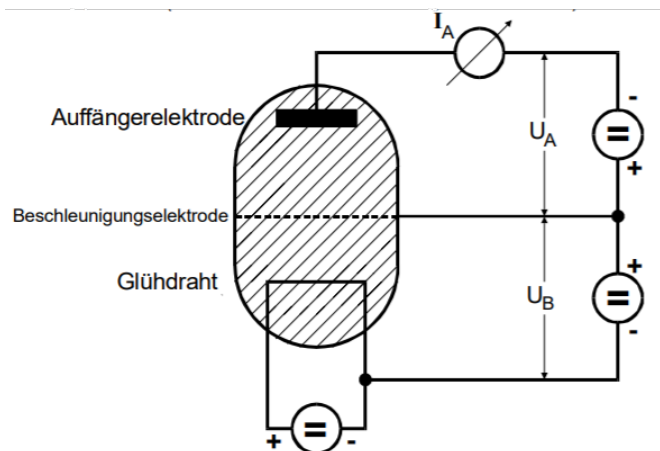


Abbildung 1: Schematischer Aufbau des Franck-Hertz-Versuchs.[1]

In einem evakuierten Gefäß wird Quecksilber zum Verdampfen gebracht, daraufhin entsteht ein Sättigungsdampfdruck $p_{\text{sät}}$, der über eine Temperatur T gesteuert werden kann. Es wird eine Glühkathode aus Wolfram auf Rotglut erhitzt, diese emittiert durch den glühelektrischen Effekt Elektronen. Die Elektronen bewegen sich zur Beschleunigungselektrode hin, an der die positive Beschleunigungsspannung U_B anliegt. Der Abstand zwischen

Elektrode und Glühkathode ist die Beschleunigungsstrecke, passieren die Elektronen diese Strecke haben sie die Energie

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

wenn zu Beginn die Geschwindigkeit 0 angenommen wird. Der letzte Teil des Gefäßes ist die Auffängerelektrode, an diese ist die Abbremsspannung U_A angelegt. Elektronen müssen diese Barriere überwinden, um zur Elektrode zu gelangen und detektiert zu werden, geschieht das kann ein Strom I_A gemessen werden.

2.2 Funktionsweise des Franck-Hertz-Versuchs

Auf der Beschleunigungsstrecke kommt es zwangsweise zu Zusammenstößen zwischen Elektronen und Hg-Atomen, diese können wie schon beschrieben elastisch oder unelastisch sein. Bei einem elastischen Stoß, war die Elektronenenergie nicht hoch genug das Atom anzuregen und es kann zu starken Richtungsänderungen kommen. Nur, wenn die Energie hoch genug ist, kommt es zu inelastischen Stößen und das Atom kann angeregt werden. Das Hg-Atom bleibt nicht in diesen Zustand, sondern sendet mit einer Relaxationszeit von etwa 10^{-8} s einen Lichtquant mit der Energie

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

aus, Dabei ist ν die Frequenz und h das Plancksche Wirkungsquantum. Danach ist das Atom wieder in seinem Grundzustand und kann erneut angeregt werden. Wird der Auffängerstrom I_A gegen die Beschleunigungsspannung U_B aufgetragen, so entsteht in der Theorie eine Kurve wie in Abbildung 2. Tatsächlich führen die in Abschnitt 2.3 aufgeführten Einflüsse zu einer etwas anders aussehenden Kurve.

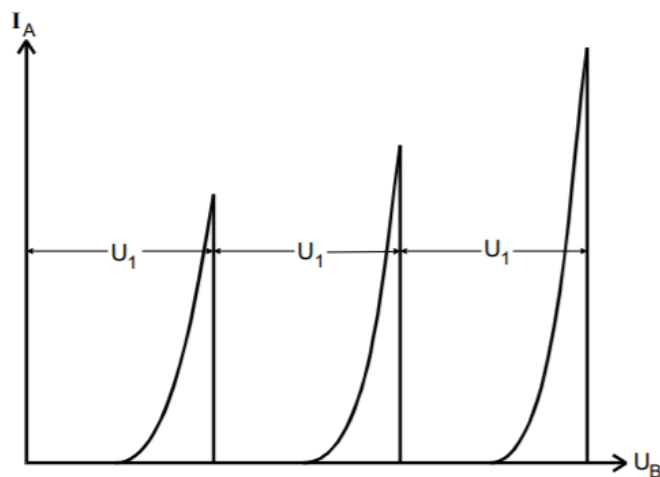


Abbildung 2: Theoretisches Ergebnis des Franck-Hertz-Versuchs.[1]

Zu Beginn ist der Zusammenhang trivial, wird U_B erhöht, sind mehr Elektronen energetisch genug um die Bremsspannung zu überwinden. Im weiteren Verlauf bricht die Kurve ein und fällt auf null, dies geschieht, weil die Elektronen die nötige Energie erreicht haben die Hg-Atome anzuregen. Durch den Energieverlust aus Gleichung 1 haben die Elektronen nach dem Zusammenstoß nicht mehr genug Energie um die Auffängerelektrode zu erreichen. Wird die Beschleunigungsspannung noch weiter erhöht besitzen sie wieder genug Energie, allerdings wird die Kurve erneut einbrechen, da sie bei genügend Beschleunigung sogar zwei mal ein Atom anregen können. Der Abstand der Maxima U_1 kann dann über

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

berechnet werden.

2.3 Einflüsse auf die Franck-Hertz-Kurve

Die tatsächliche Beschleunigung der Elektronen ist nicht durch U_B gegeben, sondern leicht verschieden. Aufgrund der Tatsache, dass die beiden Elektroden verschiedene Austrittsarbeiten besitzen und sich berühren werden Elektronen umherwandern. Dieses Phänomen wird Kontaktpotential genannt und ist in Abbildung 3 graphisch dargestellt.

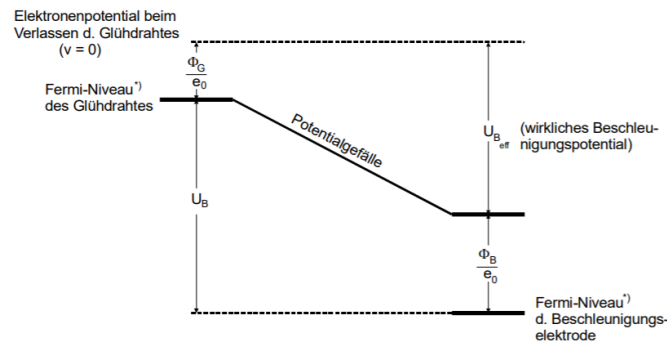


Abbildung 3: Tatsächliches Potentialverhältnis zwischen den Elektroden.[1]

Daraus ergibt sich das tatsächliche Beschleunigungspotential

$$U_{B,eff} = U_B - \frac{1}{e_0}(\Phi_B - \Phi_G) \quad (5)$$

mit dem sogenannten Kontaktpotential K

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

Die Franck-Hertz-Kurve ist um den Wert K verschoben.

Einen weiteren Einfluss hat die Energieverteilung der Elektronen, diese ist nämlich nicht konstant, sondern in einem Energiespektrum verteilt. Das bedeutet manche Elektronen

sind früher in der Lage unelastische Stöße durchzuführen als andere. Für die Kurve bedeutet das, dass sie nach Beginn des Experimentes nie mehr ganz auf null fallen wird und leicht verformt wird. Daher ist es wichtig dieses Spektrum zu kennen, bevor der eigentliche Versuch durchgeführt wird. Es kann ebenfalls einen Effekt haben, wenn die Elektronen, die zum Auffängerstrom beitragen würden durch elastische Stöße weggestoßen werden. Das führt zu einem Abflachen der Kurve.

Eine weitere wichtige Größe ist die mittlere freie Weglänge \bar{w} . Sie muss klein gegen die Beschleunigungsstrecke sein, damit es zu möglichst vielen Zusammenstößen kommt. Dabei hängt sie mit dem Sättigungsdampfdruck zusammen, und damit auch mit der Temperatur T . Die mittlere freie Weglänge lässt sich über

$$\bar{w} = \frac{0.0029}{p_{\text{sät}}} \quad (7)$$

bestimmen. Hier ist die Weglänge in cm und $p_{\text{sät}}$ in mbar angegeben. Der Sättigungsdampfdruck ist als

$$p_{\text{sät}} = 5.5 \cdot 10^7 \cdot \exp\left(\frac{-6876}{T}\right) \quad (8)$$

definiert.

3 Durchführung

Das Experiment wird nach Abbildung 4 aufgebaut.

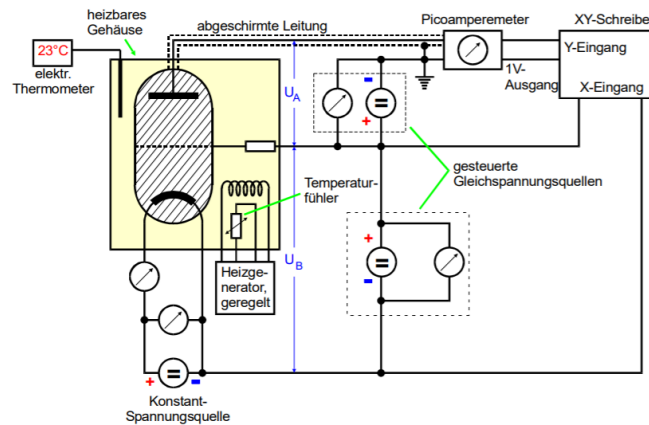


Abbildung 4: Schaltungsbild des Franck-Hertz-Versuchs.[1]

In der ersten Messreihe wird die Energieverteilung der Elektronen bestimmt. Dafür wird U_B konstant auf 11 V eingestellt und U_A von null aus zu einem Maximalwert erhöht. Die detektierte Spannung an der Auffängerelektrode wird mit einem Picoamperemeter angezeigt. Für die Darstellung wird ein XY-Schreiber verwendet, wobei U_A an den X-Eingang

angeschlossen wird, und I_A an den Y-Eingang. Die Messung wird bei Raumtemperatur durchgeführt. Es ist darauf zu achten, dass bei $U_A = 0$ ein maximaler Strom von 50 nA bis 500 nA fließen soll. Falls das nicht der Fall ist, wird die Spannung der Glühkathode dahingehend verstellt. Während oder nach dem Erstellen des XY-Schreiber-Bilds werden einige Messpunkte als Referenzwerte eingetragen, um die Auswertung möglich zu machen.

Die eigentliche Messung der Franck-Hertz-Kurve findet bei $T = 180^\circ\text{C}$ statt. U_A wird auf -1 V eingestellt. Hier wird U_B an den X-Eingang gelegt und von null aus zum Maximalwert geregelt. Auch hier werden verschiedene Messpunkte beschriftet. Eine optimale Auswertung gelingt, wenn der XY-Schreiber das Blatt möglichst effizient nutzt.

4 Auswertung

4.1 Energieverteilung der Elektronen

Um die Energieverteilung der Elektronen bei konstanter Beschleunigungsspannung $U_B = 11\text{ V}$ darzustellen, wurde mit einem XY-Schreiber ein Graph gezeichnet. Dieser ist in Abbildung 8 zu sehen.

Die Messung wurde bei einer Temperatur von ungefähr 25°C durchgeführt. Bei dieser Temperatur ergibt sich über Gleichung 7 und Gleichung 8 die mittlere freie Weglänge zu

$$\bar{w} = 0,55\text{ cm}.$$

Die Beschleunigungsstrecke der hier verwendeten Apparatur beträgt etwa $a = 1\text{ cm}$. Also ist \bar{w} nicht wesentlich kleiner als a und es kommt nur zu wenigen Zusammenstößen.

Aus dem Graphen werden in konstantem Abstand auf der X-Achse Punkte abgelesen, indem auf dem Millimeterpapier die Anzahl der Kästchen in X- und Y-Richtung zum nächsten Punkt gezählt werden. (Δx und Δy in Tabelle 1) Aus diesen Abständen in Kästchen werden die Abstände in Volt bzw. Nanoampere über

$$\Delta U_A = \Delta x \cdot \frac{9,4\text{ V}}{236\text{ Kästchen}} \quad (9)$$

$$\Delta I_A = \Delta y \cdot \frac{60\text{ nA}}{145\text{ Kästchen}} \quad (10)$$

berechnet. Dann werden die tatsächlichen Werte über

$$U_{A,k} = U_{A,k-1} + \Delta U_{A,k-1} \quad \text{mit} \quad U_{A,0} = 0,6\text{ V} \quad (11)$$

$$I_{A,k} = I_{A,k-1} - \Delta I_{A,k-1} \quad \text{mit} \quad I_{A,0} = 105\text{ nA} \quad (12)$$

berechnet. Alle gemessenen und berechneten Werte sind in Tabelle 1 aufgelistet. Außerdem wird je ein Plot der integralen Energieverteilung (Abbildung 5) und der differentiellen Energieverteilung (Abbildung 6) erstellt.

Das Kontaktpotential kann hier nicht bestimmt werden, da die integrale Energieverteilung nicht abgeflacht ist.

Tabelle 1: Abgelesene und berechnete Werte der Energieverteilung aus Abbildung 8

Δx / Kästchen	ΔU_A / V	U_A / V	Δy / Kästchen	ΔI_A / nA	I_A / nA
6	0,24	0,60	4	1,66	105,00
10	0,40	0,84	4	1,66	103,34
10	0,40	1,24	4	1,66	101,69
10	0,40	1,64	4	1,66	100,03
10	0,40	2,03	4	1,66	98,38
10	0,40	2,43	4	1,66	96,72
10	0,40	2,83	4	1,66	95,07
10	0,40	3,23	4	1,66	93,41
10	0,40	3,63	4	1,66	91,76
10	0,40	4,03	5	2,07	90,10
10	0,40	4,42	5	2,07	88,03
10	0,40	4,82	5	2,07	85,97
10	0,40	5,22	5	2,07	83,90
10	0,40	5,62	6	2,48	81,83
10	0,40	6,02	6	2,48	79,34
10	0,40	6,42	6	2,48	76,86
10	0,40	6,81	6	2,48	74,38
10	0,40	7,21	7	2,90	71,90
10	0,40	7,61	7	2,90	69,00
10	0,40	8,01	8	3,31	66,10
10	0,40	8,41	9	3,72	62,79
10	0,40	8,81	10	4,14	59,07
10	0,40	9,20	11	4,55	54,93
10	0,40	9,60	13	5,38	50,38
		10,00			45,00

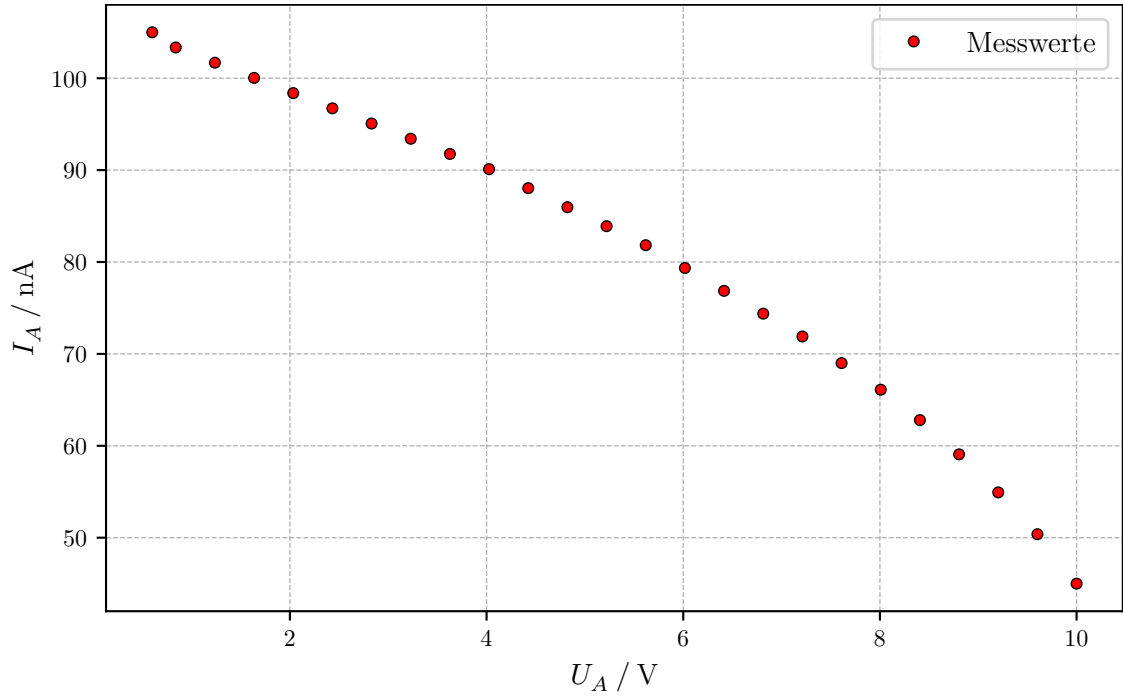


Abbildung 5: Plot der integralen Energieverteilung der Elektronen

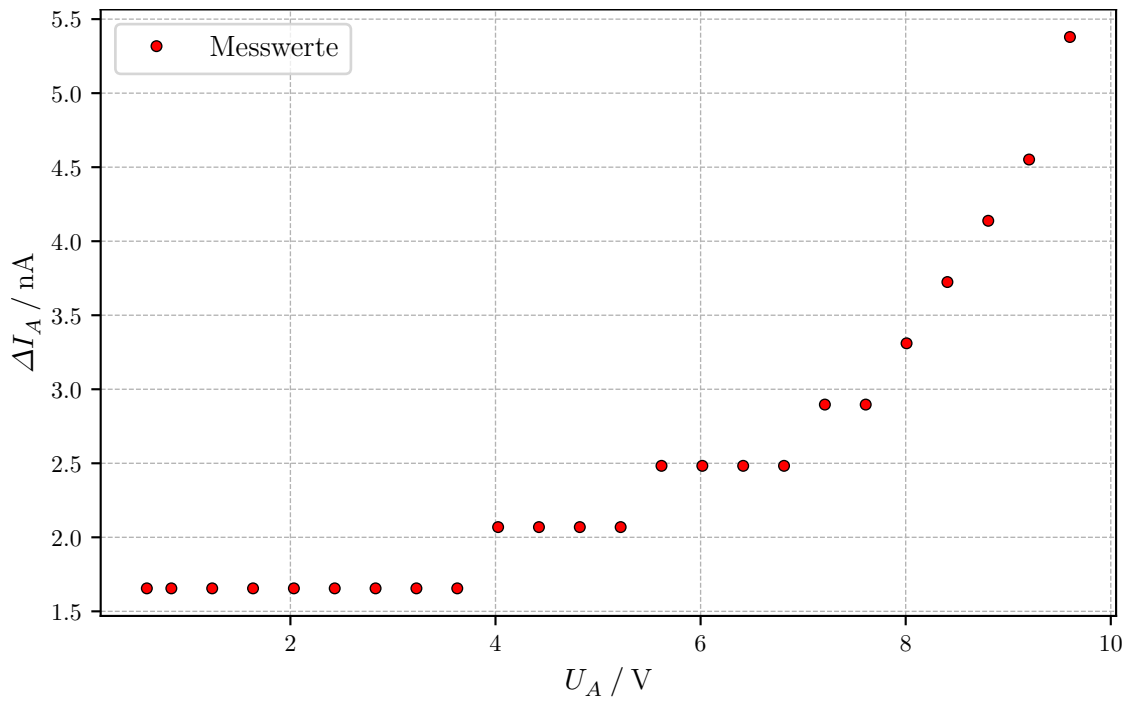


Abbildung 6: Plot der differentiellen Energieverteilung der Elektronen

4.2 Franck-Hertz-Kurve und Anregungsenergie von Hg

Bei konstanter Bremsspannung $U_A = 1 \text{ V}$ wurde mit einem XY-Schreiber der Auffängerstrom gegen die Beschleunigungsspannung aufgetragen. (siehe Abbildung 9)

Die Messung wurde bei einer Temperatur von ungefähr 180°C durchgeführt. Bei dieser Temperatur ergibt sich über Gleichung 7 und Gleichung 8 die mittlere freie Weglänge zu

$$\bar{w} = 2,05 \cdot 10^{-4} \text{ cm}.$$

Die Beschleunigungsstrecke der hier verwendeten Apparatur beträgt etwa $a = 1 \text{ cm}$. Also ist \bar{w} wesentlich kleiner als a und es kommt zu genug Zusammenstößen, sodass eine Franck-Hertz-Kurve entstehen kann.

Hier werden die Abstände Δx der relativen Maxima abgelesen und mit

$$\Delta U_B = \Delta x \cdot \frac{60 \text{ V}}{194 \text{ Kästchen}} \quad (13)$$

in Spannungsabstände umgerechnet. Die abgelesenen und berechneten Werte sind in Tabelle 2 aufgelistet.

Tabelle 2: Abgelesene und daraus berechnete Abstände der relativen Maxima der Franck-Hertz-Kurve Abbildung 7

$\Delta x / \text{Kästchen}$	$\Delta U_B / \text{V}$
16	4,95
17	5,26
18	5,57
18	5,57

Anzumerken sei, dass die Elektronen durch elastische Stöße Energie verlieren und dadurch die Franck-Hertz Kurve abgeflacht wird. Da jedoch hier nur die Abstände der Maxima in Bezug auf die Beschleunigungsspannung für Berechnungen verwendet werden, muss dieser Effekt hier nicht beachtet werden.

Aus diesen Werten wird nun der mittlere Abstand der Maxima und der entsprechende Fehler des Mittelwerts berechnet.

$$\Delta \bar{U}_B = (5,34 \pm 0,15) \text{ V}$$

Nach Gleichung 4 und $e_0 \cdot 1 \text{ V} = 1 \text{ eV}$ ist die erste Anregungsenergie des Hg-Atoms gerade

$$E_{01} = (5,34 \pm 0,15) \text{ eV}.$$

Daraus lässt sich nach Gleichung 3 die Wellenlänge λ der emittierten elektromagnetischen Strahlung über

$$\lambda = \frac{h \cdot c}{E_{01}} \quad (14)$$

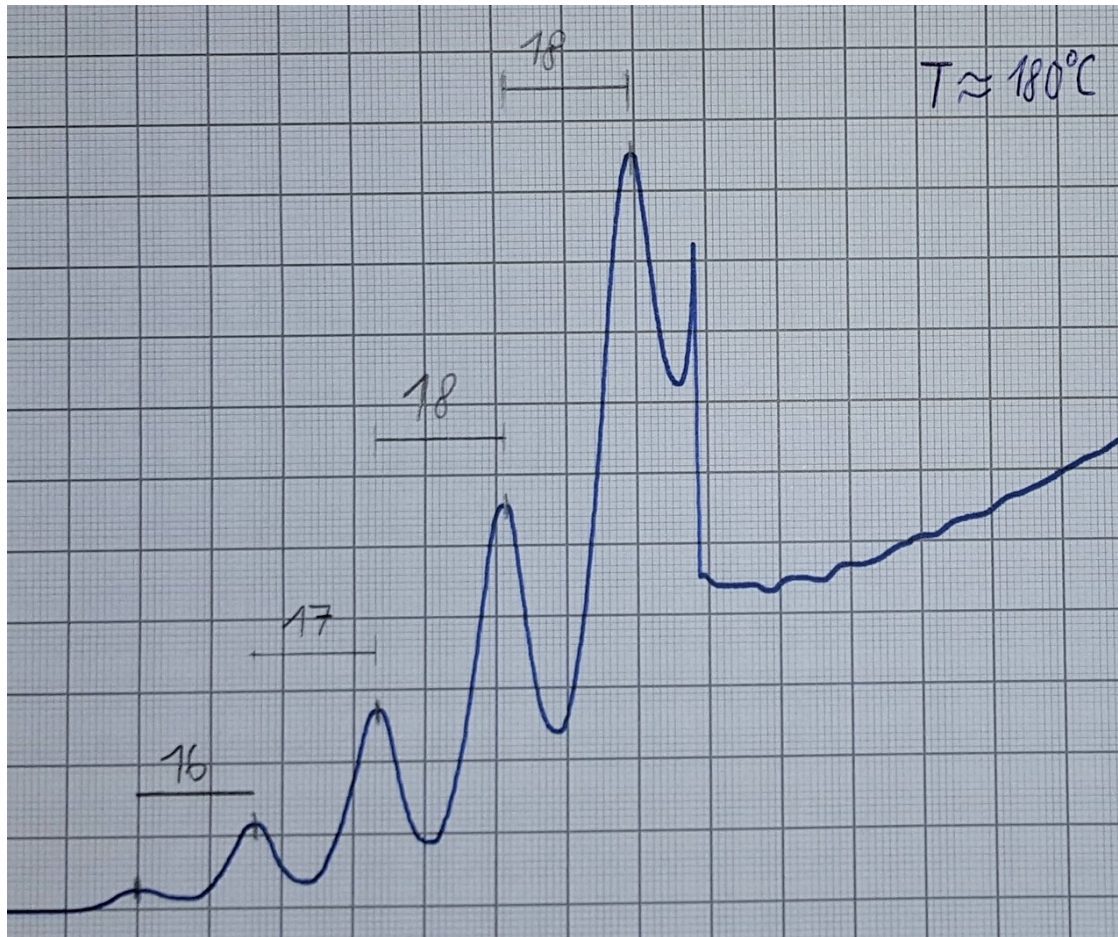


Abbildung 7: mit X-Y-Schreiber aufgenommene Franck-Hertz-Kurve

zu

$$\lambda = (2,32 \pm 0,06) \cdot 10^{-7} \text{ m}$$

berechnen.

5 Diskussion

Die Kurve der Energieverteilung der Elektronen zeigt nur teilweise das erwartete Bild. Ein zunehmendes Abfallen des Auffängerstroms ist zwar zu beobachten, allerdings scheint der Spannungsbereich der Bremsspannung für die verwendete Apparatur nicht gut gewählt zu sein, sodass kein abflachen der Kurve zu beobachten war. Eine bessere Kurve konnte jedoch nicht aufgenommen werden, da für das Einstellen des XY-Schreibers zu viel Zeit verbraucht wurde.

Die Franck-Hertz-Kurve zeigt auch das erwartete Bild, jedoch scheint ab dem fünften Maximum ein unerwarteter Effekt eingetreten zu sein. Eine Quelle dieses Effekts konnte nicht gefunden werden.

Die berechnete erste Anregungsenergie des Hg-Atoms und der entsprechende Literaturwert sind

$$\begin{aligned} E_{\text{gemessen}} &= 5,34 \text{ eV} \\ E_{\text{Literatur}} &= 4,9 \text{ eV} \cdot [2] \end{aligned}$$

Die Abweichung ist mit 9 % ausreichend gering.

6 Anhang

Datum:

Gruppe:

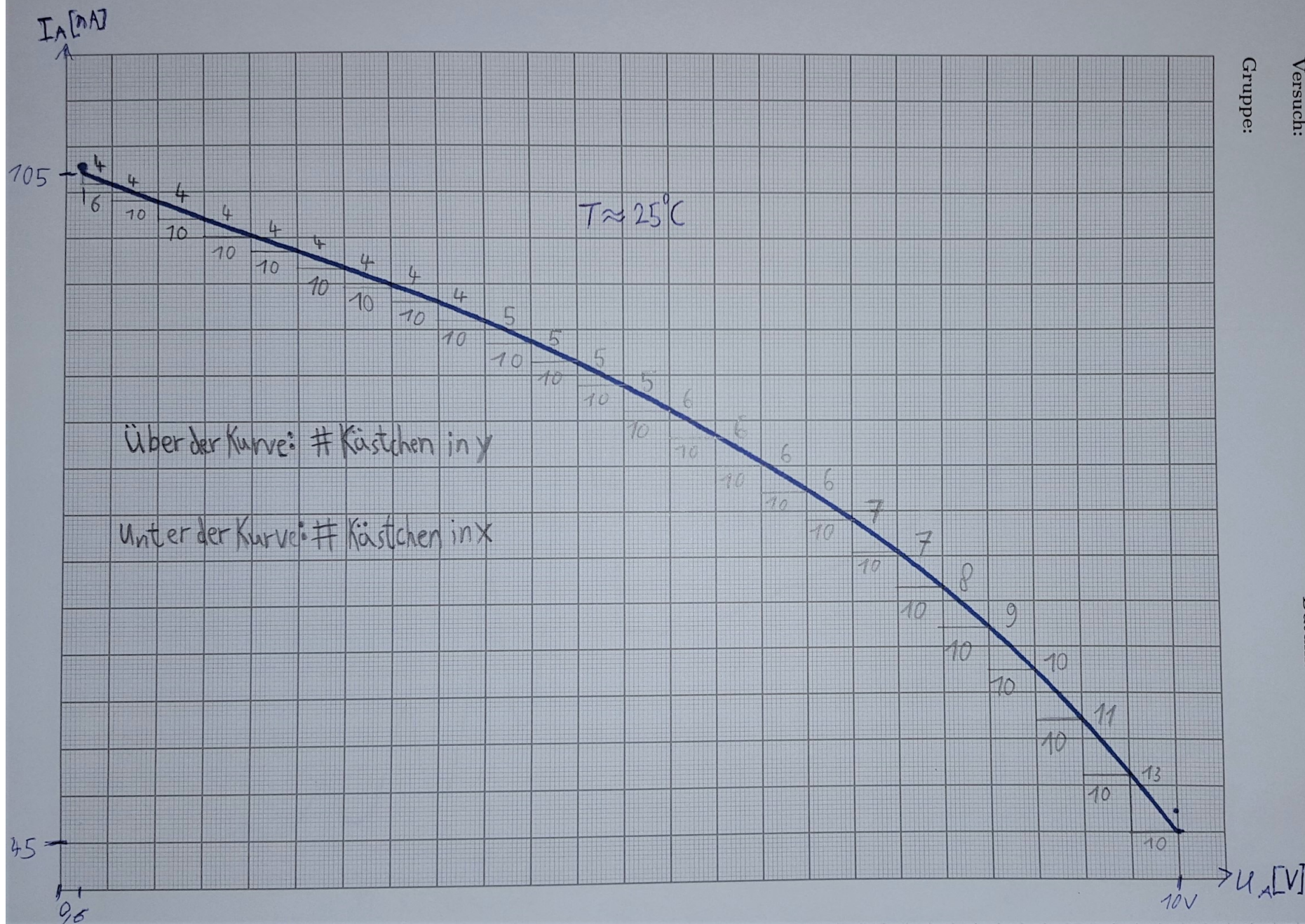


Abbildung 8: Originaldaten der integralen Energiverteilung der Elektronen

Versuch:
Gruppe:

Datum:

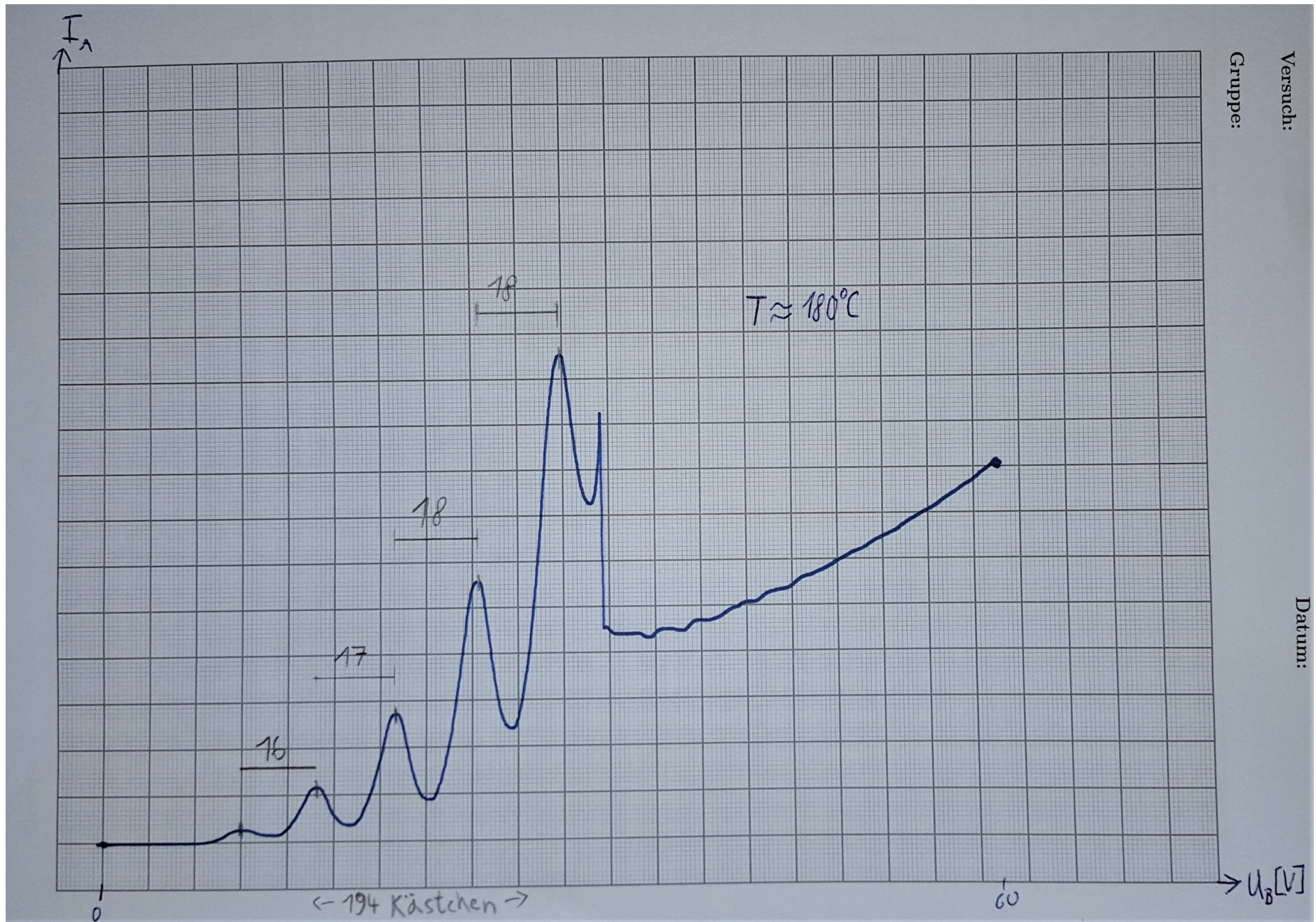


Abbildung 9: Originaldaten der Franck-Hertz-Kurve

Literatur

- [1] TU Dortmund. *Versuchsanleitung zu Versuch Nr. 601 Der Franck-Hertz-Versuch*. 2020.
- [2] James Franck und Gustav Hertz. „Über Zusammenstöße zwischen Elektronen und den Molekülen des Quecksilberdampfes und die Ionisierungsspannung desselben“. In: *Physikalische Blätter* 23.7 (1967), S. 294–301. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/phbl.19670230702>.