

V601 Frank-Hertz-Versuch

Tobias Rücker

tobias.ruecker@tu-dortmund.de

Paul Störbrock

paul.stoerbrock@tu-dortmund.de

Durchführung: 07.07.2020, Abgabe: 14.07.2020

Inhaltsverzeichnis

1 Ziel	1
2 Theorie	1
3 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung	5
4 Auswertung	6
4.1 Differentielle Energieverteilung	6
4.2 Frank-Hertz-Kurve	8
5 Diskussion	10
Literatur	11
Appendix	12

1 Ziel

Die Kenntnis über die innere Struktur der Atome bildet für die verschiedensten Bereiche der Physik wie die Festkörperphysik eine wichtige Rolle. Da Atome quantisiert sind können Elektronen nur ganz bestimmte Energiewerte annehmen. Der Übergang vom Grundzustand in den ersten angeregten Zustand wird nun mithilfe des Frank-Hertz-Versuches bestimmt.

2 Theorie

Der Frank-Hertz-Versuch gehört zu den Elektronenstoßexperimenten. Bei diesen wechselwirken Elektronen mit Atomen, wobei durch den Energieverlust der Elektronen auf den Energieübergang zurückgeschlossen werden kann.

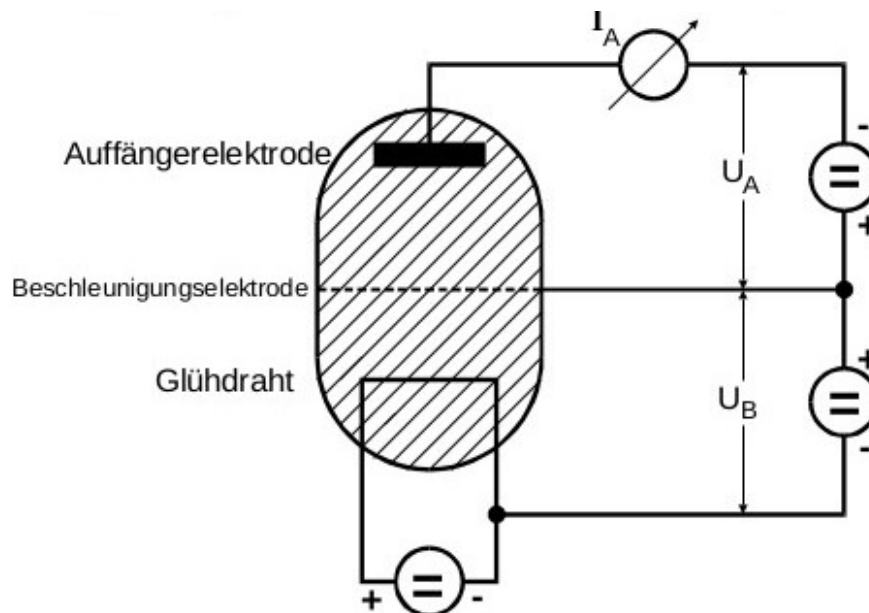


Abbildung 1: Theoretischer Aufbau des Frank-Hertz-Versuchs [1].

Bei dem Frank-Hertz-Versuch ist ein evakuiertes Gefäß mit Quecksilbergas gefüllt. Ein Glühdraht an einer Spannungsquelle emittiert dabei Elektronen, welche durch die Beschleunigungselektrode mit der Beschleunigungsspannung U_B beschleunigt werden und dann mit den Atomen wechselwirken. Wenn die Elektronen dann noch genügend Energie haben um das Gegenfeld der Auffängerelektrode zu überwinden, werden sie vom Amperemeter gemessen.

Der Versuch selbst besteht dabei aus einem evakuierten Gefäß in dem ein Tropfen Quecksilber spontan verdampft. Dieser verdampft so weit bis in dem Gefäß der Gleichgewichtsdruck

p_{st} erreicht ist. Dieser Druck hängt von der Temperatur im Gefäß ab:

$$p_{st}(T) = 5,5 \cdot 10^7 \exp\left(\frac{-6876}{T}\right) \quad (\text{p in mbar, T in K})[1] \quad (1)$$

Die Elektronen für den Versuch stammen aus einer Glühkathode, wobei die Elektronen idealerweise monoenergetisch sind. Diese werden durch eine netzförmige Elektrode mit positiver Gleichspannung U_B beschleunigt. Bei der Wechselwirkung mit den Atomen können dann 2 Fälle auftreten. Zum einen können die Elektronen eine zu geringe Energie besitzen, sodass diese nur elastische Stöße mit den Quecksilberkernen erzeugen. Der Energieübertrag ist dabei aufgrund des Masseunterschieds vernachlässigbar. Einzig die Richtungsänderung ist hier entscheidend.

Im zweiten Fall haben die Elektronen mindestens die Energie des Übergangs vom Grundzustand in den ersten angeregten Zustand

$$E = E_1 - E_0.[1] \quad (2)$$

Hierbei ist E_0 die Energie des Grundzustands und E_1 die Energie des ersten angeregten Zustands. Nach kurzer Zeit geht das Atom dann wieder unter Aussendung eines Lichtquants in den Grundzustand zurück. Die Elektronen gelangen danach zu einer Auffängerelektrode, an die eine Gegenspannung U_A angelegt wird. Dadurch können nur Elektronen gemessen werden, deren Energie, welche von der Geschwindigkeit senkrecht zur Elektrode abhängig ist, größer als das des Gegenfeldes ist. Wird nun die Beschleunigungsspannung gegen den Auffängerstrom bei konstanter Gegenspannung aufgetragen, kann dies theoretisch wie folgt aussehen:

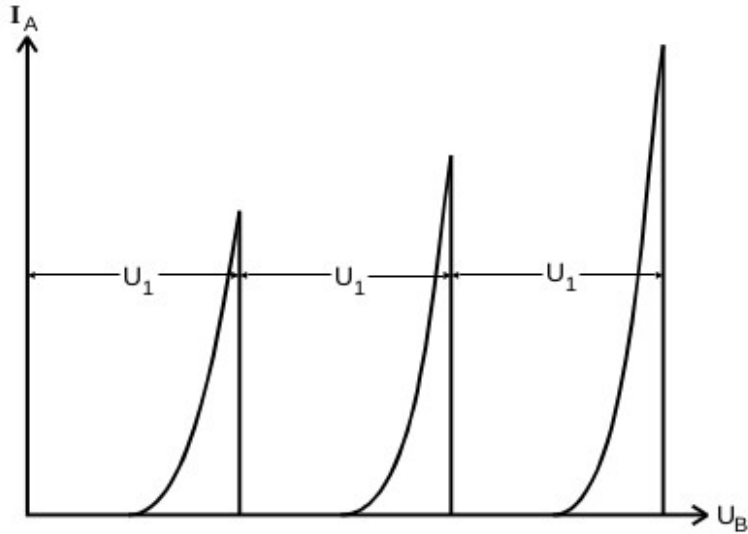


Abbildung 2: Theoretischer Verlauf einer idealen der Frank-Hertz-Kurve[1].

Bei der Frank-Hertz-Kurve ist die Beschleunigungsspannung gegen den Auffängerstrom bei einer festen Gegenspannung aufgetragen. Der Verlauf zeigt, dass mit steigender Spannung die Stromstärke erstmal stärker wird, bis die Elektronen die Energie des Übergangs vom Grundzustand zum ersten angeregten Zustand U_1 erreichen. Da fällt die Kurve schlagartig auf 0 ab, da alle Elektronen mit den Atomen wechselwirken. Bei weiterer Erhöhung steigt die Kurve weiter an bis eine Spannung von $2 U_1$ erreicht wird. Das wiederholt sich periodisch.

Bei steigender Spannung steigt der Auffängerstrom erstmal an, bis die Elektronen genügend Energie haben, um das Quecksilber anzuregen. Dann fällt die Stromstärke schlagartig ab. Dies wiederholt sich dann immer wieder, wobei die Amplituden dabei immer größer werden. Abstand zweier Maxima ist dabei

$$U_1 = \frac{1}{e_0}(E_1 - E_0).[1] \quad (3)$$

Hier ist e_0 die Elementarladung.

Die Abbildung 2 liefert hierbei nur eine idealisierte Darstellung des Verlaufs. Der tatsächliche Verlauf verändert sich durch einige Aspekte des Experiments. Zum einen bestehen Glühdraht und Beschleunigungskathode aus verschiedenen Materialien, wodurch das Potential zwischen diesen nicht genau die Beschleunigungsspannung ist. Bei dem Frank-Hertz-Versuch wird die Austrittsarbeit des Materials Φ_g der Glühkathode um einiges kleiner als die der Beschleunigungskathode Φ_B . Das Verhältnis der Potentiale lässt sich graphisch durch folgende Abbildung darstellen:

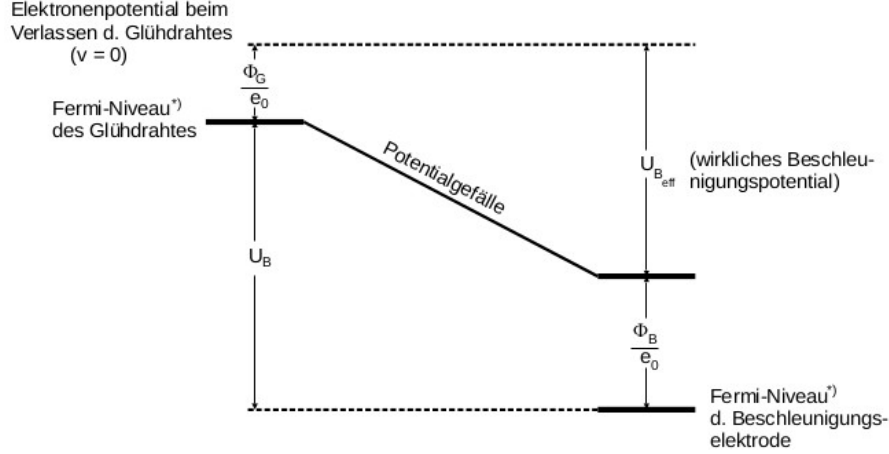


Abbildung 3: Darstellung des Potentialgefälles zwischen Beschleunigungselektrode und Glühdraht [1].

Aufgrund unterschiedlicher Materialien haben Glühdraht und Beschleunigungselektrode eine unterschiedliche Austrittsarbeit Φ_G bzw. Φ_B . Die Austrittsarbeit des Glühdrahts ist dabei geringer als die der Beschleunigungselektrode. Dadurch ist die eigentliche Beschleunigungsspannung $U_{B,eff}$.

Damit ergibt sich für die effektive Beschleunigungsspannung

$$U_{B,eff} = U_B - \frac{1}{e_0}(E_1 - E_0)[1], \quad (4a)$$

wobei der Term

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

als Kontaktpotential bezeichnet wird.

Zudem besitzen alle Elektronen nicht die gleichen Energien aufgrund der Fermi-Dirac-Verteilung. Die Verteilung der Energien ist dabei temperaturabhängig und sorgt dafür, dass die Elektronen unterschiedliche Anfangsgeschwindigkeiten besitzen. Damit gibt es keinen unstetigen Abfall, wie in Abbildung 2, sondern es fällt zu einem Minimum ab und steigt dann wieder an.

Zudem sorgt die Ablenkung der Elektronen bei den elastischen Stößen, wenn diese zwischen Beschleunigungsspannung und Auffängerelektrode stattfinden, dafür, dass deren Geschwindigkeitskomponente senkrecht zur Elektrode verändert wird. Dadurch wird die Kurve verbreitert und abgeflacht.

Damit viele Elektronen mit dem Gas wechselwirken, muss die freie Weglänge um einen Faktor 1000-4000 mal kleiner als der Abstand von der Kathode zur Beschleunigungselektrode sein. Die freie Weglänge kann über den bereits erwähnten Sättigungsdampfdruck nach der folgenden Formel reguliert werden

$$\bar{w}[cm] = \frac{0,0029}{p_{st}} [p \text{ in mbar}].[1] \quad (5)$$

3 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

Der Aufbau für den Frank-Hertz-Versuch wird in der folgenden Abbildung dargestellt:

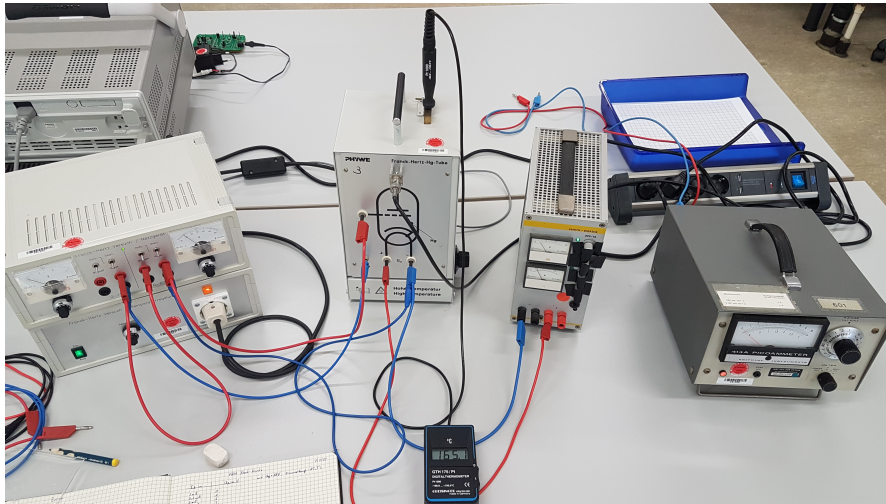


Abbildung 4: Aufbau des Frank-Hertz-Versuchs. Das zweite Gerät von links bildet die evakuierte Glasröhre, in der sich das Quecksilbergas mitsamt Glühdraht, Beschleunigungselektrode und Auffängerelektrode befindet. Links davon befindet sich das obere Gerät zur Regulierung der beiden Spannungen U_B und U_A sowie das untere Gerät zur Erhöhung der Temperatur. Ganz rechts im Bild steht das Amperemeter zur Messung des Auffängerstroms I_A . Zwischen Amperemeter und der Glasröhre befindet sich die Spannungsquelle des Glühdrahts.

Das zweite Gerät von links ist das evakuierte Glasrohr mit Auffängerelektrode, Glühdraht und Beschleunigungselektrode. Das ganz rechte Gerät ist das Amperemeter, welches den Auffängerstrom misst. Die ganz linken Geräte sind für die Einstellungen der Spannung und die Erhitzung des Glasrohrs zuständig. Das zweite Gerät von rechts ist die Spannungsquelle des Glühdrahts.

Für die Durchführung wird zuerst die Beschleunigungsspannung konstant auf 11 V eingestellt. Dann wird bei Zimmertemperatur die Gegenpannung gegen den Auffängerstrom im mesbaren Bereich gemessen. Daraufhin wird die Temperatur auf den Bereich von 140 - 160 °C erhöht und die Messung in diesem Bereich wiederholt.

Dannach wird die Gegenpannung auf 1 V gestellt und die Glasröhre auf eine Temperatur von ungefähr 164 °C erhitzt. Dann wird die Beschleunigungsspannung gegen den Auffängerstrom gemessen. Danach wird die Temperatur auf ca. 175 °C gestellt und die Messung wiederholt. Die Temperatur wird dabei möglichst konstant gehalten.

4 Auswertung

Alle Plots in der Auswertung werden mit matplotlib [2] erstellt. Alle Fehler werden mit uncertainties [3] und numpy [5] berechnet.

Der Sättigungsdampfdruck und der Wirkungsquerschnitt für die in der Aufgabe vorkommenden Temperaturen ist in der folgenden Tabelle dargestellt.

Tabelle 1: In der Tabelle sind die Temperaturen mitsamt ihres Sättigungsdampfdrucks und des Wirkungsquerschnitts dargestellt. Der Sättigungsdampfdruck wird mithilfe der Formel (1) und der Wirkungsquerschnitt mit Formel (5) berechnet. In der vierten Spalte ist dann das Verhältnis zwischen dem Abstand des Glühdrahts zur Beschleunigerelektrode a , welche hier 1 cm beträgt, gegen den Wirkungsquerschnitt aufgetragen.

T / K	$p_{\text{sät}} / \mu\text{bar}$	$\bar{w} / \mu\text{m}$	$\frac{a}{\bar{w}}$
298,4	5,43	5342,7	1,9
418,6	4049,62	7,2	1396,4
437,1	8114,80	3,6	2798,2
448,1	11 938,48	2,4	4116,7

Der Sättigungsdampfdruck wird hier mit Gleichung (1) und der Wirkungsquerschnitt mit Gleichung (5) berechnet.

4.1 Differentielle Energieverteilung

Die Tabelle mit den Messwerten für die differentielle Energieverteilung findet sich im Anhang 2. Bei den nachfolgenden Plots wird die Gegenspannung U_A gegen die Steigung aufgetragen. Für die Berechnung der Steigung wird die Differenz der zwei nachfolgenden y -Werte durch die Differenz der x -Werte gebildet

$$m = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}. \quad (6)$$

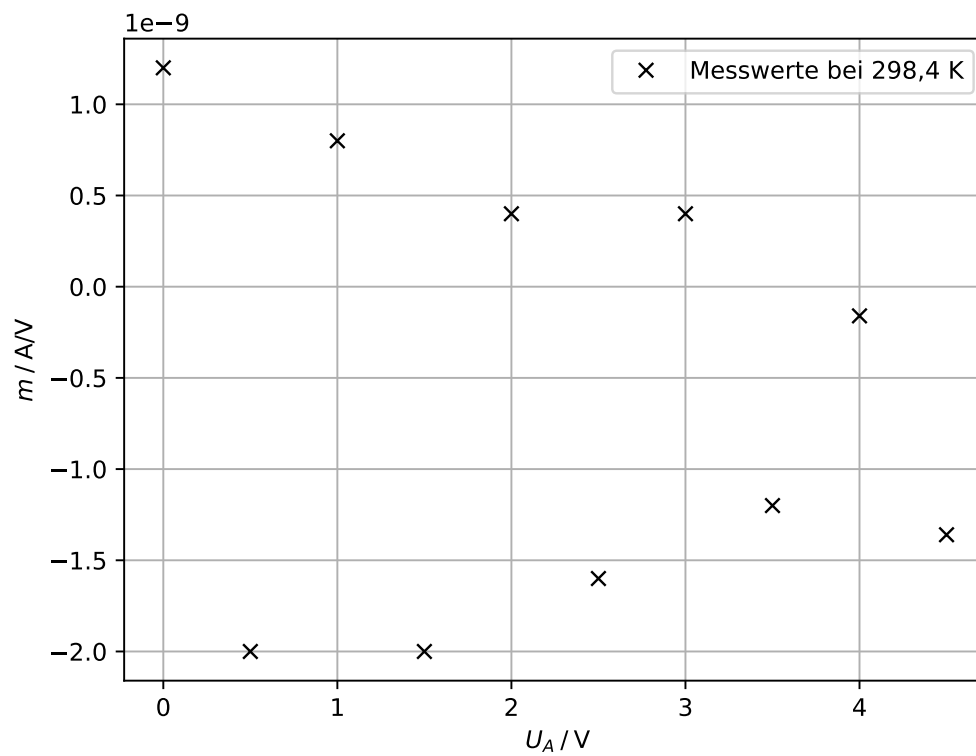


Abbildung 5: Messung der differentiellen Energieverteilung für eine Temperatur von $298,4\text{ K}$. Aufgetragen ist die Spannung des Gegenfeldes gegen die Steigung, welche aus zwei nachfolgenden Werten der Tabelle 2 jeweils gebildet wird.

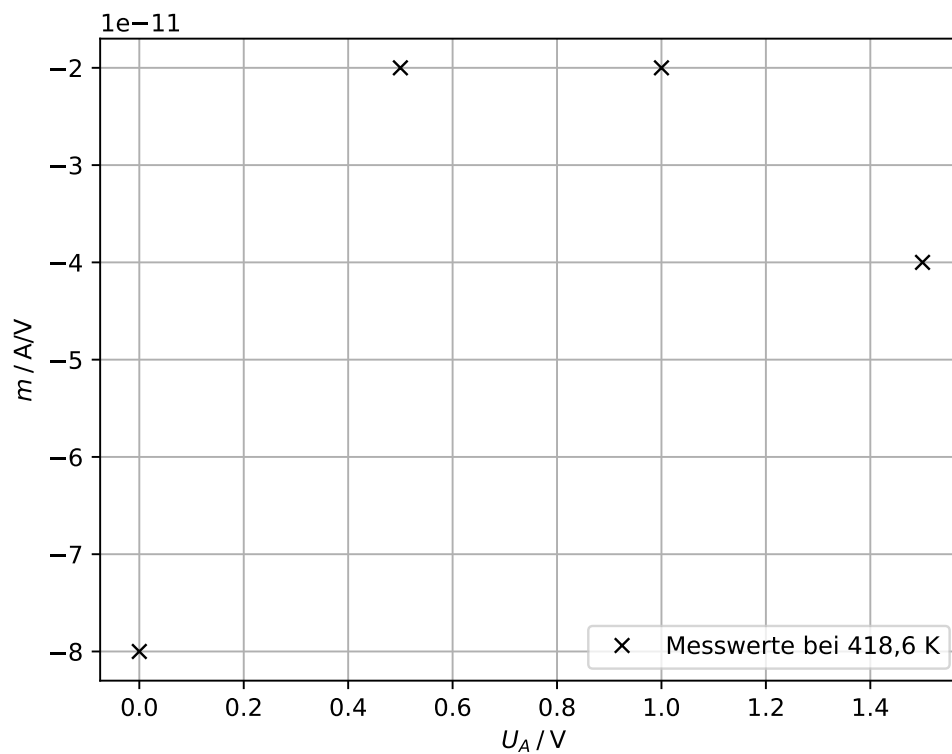


Abbildung 6: Messung der differentiellen Energieverteilung für eine Temperatur von 418,6 K. Aufgetragen ist die Spannung des Gegenfeldes gegen die Steigung, welche aus zwei nachfolgenden Werten der Tabelle 2 jeweils gebildet wird.

4.2 Frank-Hertz-Kurve

Die Messwerte für die Frank-Hertz-Kurve befindet sich im Anhang in der Tabelle 3. Werden die Messwerte graphisch aufgetragen, ergibt sich folgender Plot:

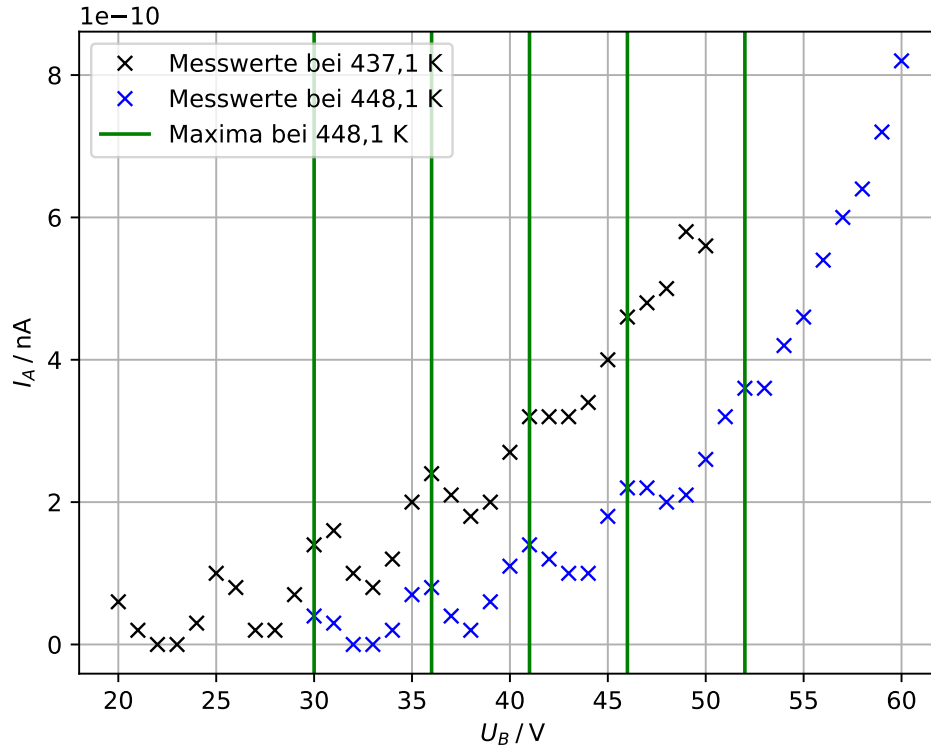


Abbildung 7: In der Abbildung werden Messwerte der Frank-Hertz-Kurve bei den Temperaturen 437,1 K und 448,1 K und einer Gegenspannung von 1 V dargestellt. Die vertikalen Linien in der Graphik zeigen die Orte der lokalen Maxima der Kurve für 448,1 K. Die erkennbaren befinden sich bei 30, 36, 41, 46 und 52 V. Der Abstand zweier Maxima definiert dabei die Übergangsenergie vom Grundzustand zum 1. angeregten Zustand.

Die eingezeichneten vertikalen Linien markieren die lokalen Maxima bei den Messwerten für 448,1 K. Der Abstand zweier Maxima bildet nach Abbildung 2 die Spannung U_1 . Bei Mittelung ergibt sich für E nach Formel (3)

$$E = (5,50 \pm 0,29) \text{ eV} . \quad (7)$$

Als Wellenlänge ausgedrückt ergibt das

$$\lambda = \frac{hc}{E} = (225 \pm 12) \text{ nm} , \quad (8)$$

wobei h das plank'sche Wirkungsquantum und c die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum ist. Für die Rechnung werden die Konstanten aus der scipy-Bibliothek verwendet. Der Fehler ergibt sich aus der Gaußschen Fehlerfortpflanzung

$$\Delta\lambda = \sigma_E \frac{hc}{E^2} . \quad (9)$$

5 Diskussion

Bei der Tabelle 1 sind bis auf die Messung bei Zimmertemperatur alle Messungen mit einem passenden Wirkungsquerschnitt nach der Theorie durchgeführt worden. Der Abstand a sollte einen Faktor 1000-4000 größer sein, damit möglichst viele Elektronen bei der passenden Energie wechselwirken. Für die Messung bei Zimmertemperatur werden weniger Elektronen wechselwirken, da hier der Wirkungsquerschnitt wesentlich geringer ist.

Ein Problem in der Auswertung stellt die Bestimmung der differentiellen Energieverteilung dar. Die aufgenommenen Daten waren sehr klein und nach ein paar Volt nicht mehr mit dem Amperemeter zu messen. Dadurch konnte aus diesen Daten kein Kontaktpotential ermittelt werden. Die Versuchsdurchführung war ursprünglich mit einem XY-Schreiber durchzuführen. Da dieser aber defekt war mussten Messwerte von Hand aufgenommen werden.

Die Übergangsenergie aus der Frank-Hertz-Kurve beträgt $(5,50 \pm 0,29)$ eV. Der relative Fehler für die Übergangsenergie beträgt hierbei

$$U1_{\text{relerr}} = \frac{E - 4,9 \text{ eV}}{4,9 \text{ eV}} = 12,24 \% . \quad (10)$$

Der Literaturwert ist dabei aus der Quelle [4] entommen worden. Eine Erklärung des relativen Fehlers bietet die stark schwankenden Temperaturen während der Messung. Es stellte sich als sehr schwierig heraus, diesen konstant zu halten. Diese Schwankungen haben teilweise 20-50 °C betragen. Auch sind Messwerte bei kleineren Spannungen teilweise nicht messbar gewesen, da sie zu klein waren, um vom Amperemeter gemessen werden zu können.

Literatur

- [1] TU Dortmund. Versuchsanleitung zu Versuch Nr.601 Frank-Hertz Versuch. 2020.
- [2] John D. Hunter. „Matplotlib: A 2D Graphics Environment“. Version 1.4.3. In: Computing in Science & Engineering 9.3 (2007), S. 90–95. URL: <http://matplotlib.org/>.
- [3] Eric O. Lebigot. Uncertainties: a Python package for calculations with uncertainties. Version 2.4.6.1. URL: <http://pythonhosted.org/uncertainties/>.
- [4] Spalt Linsen und Schirm mit Photodiode. „26 Beugung und Interferenz von Laserlicht“. In: Das physikalische Praktikum: Handbuch 2009 für Studentinnen und Studenten der Physik; 1 (2009).
- [5] Travis E. Oliphant. „NumPy: Python for Scientific Computing“. Version 1.9.2. In: Computing in Science & Engineering 9.3 (2007), S. 10–20. URL: <http://www.numpy.org/>.

Appendix

Tabelle 2: Messwerte für die differentielle Energieverteilung. Gemessen wird die Gegenspannung U_A gegen den Auffängerstrom I_A bei den Temperaturen 298,4 K und 418,6 K.

T=298,4 K		T=418,6 K	
U_A / V	I / nA	U_A / V	I / nA
0,00	3,00	0,00	0,10
0,50	3,60	0,50	0,06
1,00	2,60	1,00	0,05
1,50	3,00	1,50	0,04
2,00	2,00	2,00	0,02
2,50	2,20	2,50	0,00
3,00	1,40		
3,50	1,60		
4,00	1,00		
4,50	0,92		
5,00	0,24		

Tabelle 3: In der Tabelle werden die Messwerte der Frank-Hertz-Kurve für die beiden Temperaturen 437,5 K und 448,1 K dargestellt. Gemessen wird die Beschleunigungsspannung gegen den Auffängerstrom.

T=437,15 K		T=448,15 K		T=437,15 K		T=448,15 K	
U_B / V	I / pA	U_B / V	I / pA	U_B / V	I / pA	U_B / V	I / pA
20	60	30	40	36	240	46	220
21	20	31	30	37	210	47	220
22	0	32	0	38	180	48	200
23	0	33	0	39	200	49	210
24	30	34	20	40	270	50	260
25	100	35	70	41	320	51	320
26	80	36	80	42	320	52	360
27	20	37	40	43	320	53	360
28	20	38	20	44	340	54	420
29	70	39	60	45	400	55	460
30	140	40	110	46	460	56	540
31	160	41	140	47	480	57	600
32	100	42	120	48	500	58	640

33	80	43	100	49	580	59	720
34	120	44	100	50	560	60	820
