

V500

Photoeffekt

Toby Teasdale
toby.teasdale@tu-dortmund.de

Erich Wagner
erich.wagner@tu-dortmund.de

Durchführung: 12.04.2022

Abgabe: 20.04.2022

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1 Ziel	3
2 Theorie	3
2.1 Die Phänomene und Erklärung des Photoeffektes nach der Einsteinschen Korpuskulartheorie	3
2.2 Experimenteller Nachweis des Photoeffektes	3
3 Durchführung	6
3.1 Versuchsaufbau	6
3.2 Messung des Photostroms	6
4 Fehlerrechnung	7
5 Auswertung	7
5.1 Auftragen der Messwerte	7
5.2 Ermittlung von dem Verhältnis h/e und der Austrittsarbeit	13
5.3 Photostrom in Abhängigkeit der angelegten Spannung am Beispiel der gelben Linie	14
6 Diskussion	14
Literatur	16

1 Ziel

In dem folgenden Versuch wird der photoelektrische Effekt untersucht, der das Auslösen von Elektronen aus Metalloberflächen durch die Bestrahlung mit Licht beschreibt. Dafür wird der Zusammenhang zwischen der Wellenlänge des Lichts und der kinetischen Energie des ausgelösten Elektrons betrachtet.

2 Theorie

Experimentelle Untersuchungen zeigen, dass Licht nur durch die Quantenelektrodynamik widerspruchsfrei beschrieben werden. Für eine große Zahl von Photonen, den sogenannten Feldquanten der Elektrodynamik, kann die räumliche Ausbreitung des Lichtes durch das Wellenmodell genähert, wie es zum Beispiel in der Beugungsoptik geschieht.

Bei Wechselwirkungen zwischen Licht und Materie, wie es bei dem Photoeffekt der Fall ist, stellt das Korpuskelmodell eine bessere Beschreibung des Phänomens dar, welches im Folgenden behandelt wird.

2.1 Die Phänomene und Erklärung des Photoeffektes nach der Einsteinschen Korpuskulartheorie

Wird eine Metalloberfläche mit Photonen der Energie

$$E_{\text{photon}} = h\nu \quad (1)$$

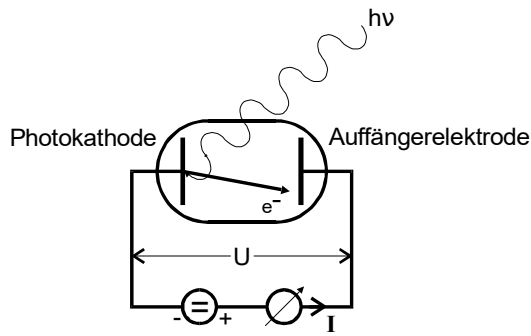
bestrahlt, können durch diese Elektronen aus dem Metall herausgelöst werden. Das Photon überträgt dabei seine Energie dem sich im Metall befindlichen Elektron. Zum Verlassen des Metalls muss die spezifische Austrittsarbeit der Kathode Φ_K geleistet werden. Die verbleibende Energie wird in die kinetische Energie $E_{\text{kin}} \geq 0$ des Elektrons umgesetzt. Die Energiebilanz für ruhende Elektronen (vgl. Abschnitt 2.2 für bewegte Elektronen) lautet

$$h\nu = \Phi_K + E_{\text{kin}}. \quad (2)$$

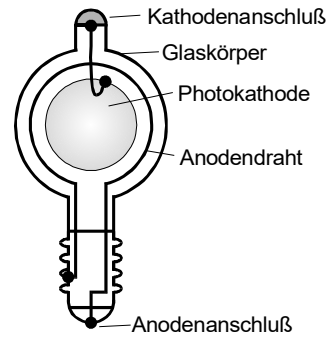
Demnach ist die Energie E_{kin} der Elektronen nach dem Stoß proportional zur Lichtfrequenz ν . Der Photoeffekt tritt nur auf wenn, $h\nu < \Phi_K$ gilt. Es existiert also eine minimale Grenzfrequenz unterhalb derer keine Elektronen mehr aus dem Metall gelöst werden können. Des Weiteren ist zu beobachten, dass die Anzahl der ausgelösten Elektronen proportional zur Intensität des Lichtes ist.

2.2 Experimenteller Nachweis des Photoeffektes

Der Nachweis des photoelektrischen Effektes geschieht durch eine Messung der ausgelösten Elektronen. In Abbildung 1a ist der prinzipieller Aufbau der Messung dargestellt, dabei wird eine positiv geladene Auffängerelektrode einer Photokathode gegenübergestellt. Dieses Konzept wird mithilfe einer Photozelle in Abbildung 1b realisiert.



(a) Schematischer Versuchsaufbau. [6]



(b) Aufbau der Photozelle. [6]

Wenn ein Elektron von der Photokathode auf die Auffängerelektrode trifft, wird ein Strom gemessen. Die Kathode besteht dabei aus einer dünnen Metallschicht im Inneren der Photozelle. Die Anode ist durch einen Draht ring wenige Millimeter vor der Kathode realisiert. Um Störeffekte mit Gasmolekülen zu vermeiden, ist das Innere des Glaskolben weitgehend evakuiert.

Zwischen Kathode und Anode wird ein elektrisches Bremsfeld erzeugt, indem eine variable Spannungsquelle angeschlossen wird. Zur Messung der ausgelösten Elektronen wird ein Picoamperemeter verwendet. Die elektrische Schaltung ist in Abbildung 2 dargestellt.

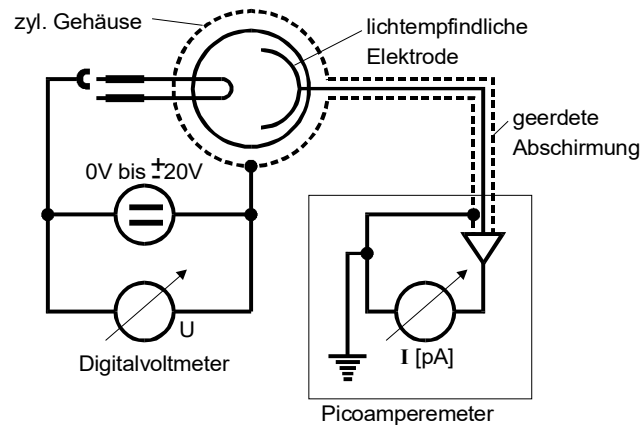


Abbildung 2: Schaltbild der Messapparatur. [6]

Durch das Bremsfeld mit der Spannung U_B können nur Elektronen mit $E_{\text{kin}} > e_0 U_B$ die Auffängerelektrode erreichen. Für die Grenzspannung

$$e_0 U_g = \frac{1}{2} m_0 v_{\text{max}}^2 \quad (3)$$

verschwindet der gemessene Strom, da selbst die Energie der schnellsten Elektronen nicht ausreicht, um die Elektrode zu erreichen. Nach Gleichung 2 gilt für diese Elektronen

$$h\nu = \Phi_K + e_0 U_g. \quad (4)$$

Elektronen mit der Geschwindigkeit $v < v_{\max}$ erreichen schon für eine Spannung $U_B < U_g$ nicht mehr die Elektrode. Deswegen sinkt der gemessene Photostrom kontinuierlich ab, bis er bei U_g Null erreicht. Dies ist in Abbildung 3 abgebildet.

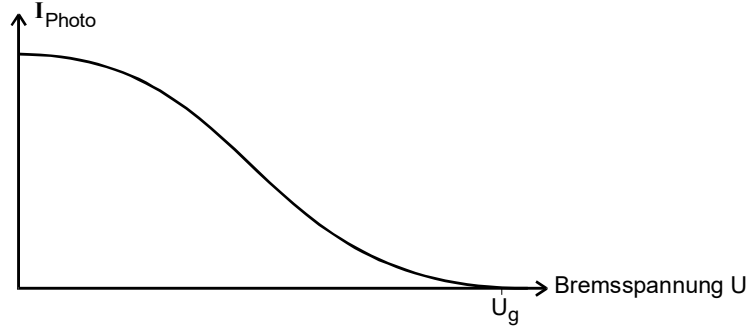


Abbildung 3: Photostrom in Abhängigkeit der Bremsspannung. [6]

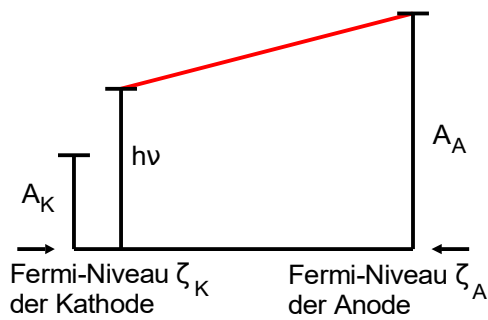
Die Energie der ausgelösten Photoelektronen hängt von der bereits in dem Festkörper vorhandenen kinetischen Energie der Elektronen ab. Diese unterschiedliche Energieverteilung verfolgt die *Fermi-Dirac-Statistik*, welche besagt, dass sich die Energie der Leitungs- und Valenzelektronen von 0 bis zur Fermi-Energie ζ erstreckt, wobei ζ materialabhängig ist.

Unter bestimmten Voraussetzungen besteht zwischen dem gemessenen Photostrom I_{Ph} und der Bremsspannung U_B der Zusammenhang

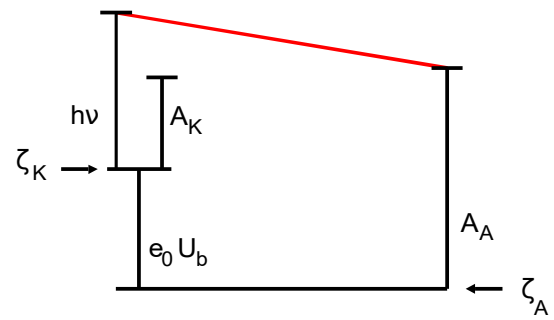
$$I_{\text{Ph}} \propto U_B .$$

Des Weiteren kann der Fall eintreten, dass zwar $\Phi_K < h\nu$ gilt, also Elektronen aus der Kathode gelöst werden, aber für die Austrittsarbeit der Anode $\Phi_A > h\nu$ gilt, sodass kein Strom an der Anode gemessen (siehe Abbildung 4a). Dies liegt an dem elektrischen Gegenfeld, welches durch die Differenz der Fermi-Niveaus von Kathode und Anode entsteht und die Elektronen so stark abbremst, dass sie die Anode nicht mehr erreichen. Nach Anlegen eines beschleunigenden Potentials U_b in Abbildung 4b kann jedoch wieder ein Photostrom gemessen werden, sodass gilt

$$h\nu + e_0 U_B \geq \Phi_A . \quad (5)$$



(a) Potentialdifferenz zwischen Anode und Kathode. [6]



(b) Anlegen eines beschleunigenden Potentials U_B zur Erzeugung eines Photostroms. [6]

3 Durchführung

3.1 Versuchsaufbau

In dem Versuchsaufbau ist wie in Unterabschnitt 2.2 bereits beschrieben eine evakuierte Photozelle mit einem Picoamperemeter und einer variablen Spannungsquelle verbunden. Für die Bestrahlung der Photokathode wird eine optische Konstruktion nach Abbildung 5 aufgebaut.

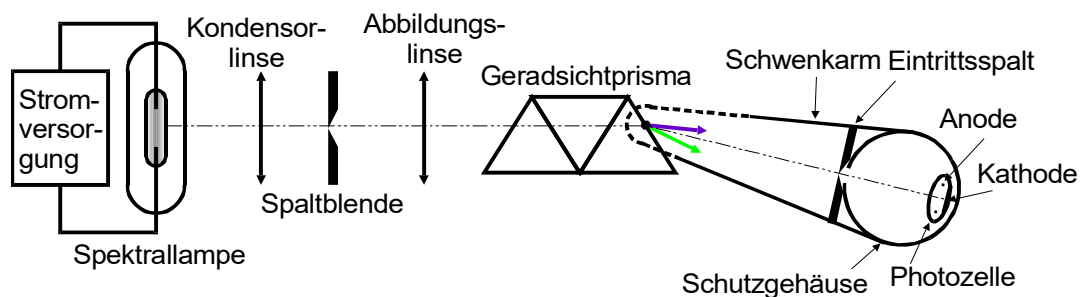


Abbildung 5: Optische Konstruktion zur Herstellung von monochromatischem Licht. [6]

Dafür wird das von einer Hg-Spektrallampe ausgesendete polychromatische Licht durch Linsen und einem Spalt fokussiert. Das Licht wird danach mit einem Prisma in monochromatische Spektrallinien bestimmter Wellenlängen zerlegt. Die Photozelle kann dabei auf einem Schwenkarm so bewegt werden, dass die zu untersuchende Spektrallinie auf die Photokathode fällt.

3.2 Messung des Photostroms

Vor Beginn der Messung wird der Versuchsraum weitmöglichst vom Tageslicht und anderen Störfelder abgeschirmt. Nach Ausrichten einer Spektrallinie auf die Photozelle wird diejenige

Bremsspannung gesucht, bei der der Photostrom Null ist. Hiernach wird in 0,5 V- bis 1,0 V-Schritten die Spannung reduziert und der Photostrom notiert, bis die Spannung null erreicht. Dies wird für die anderen erkennbaren Spektrallinien wiederholt.

Für die gelbe Spektrallinie wird zusätzlich die Spannung umgepolt und im negativem Spannungsbereich bis zu -20 V gemessen.

4 Fehlerrechnung

Im Folgenden wird die allgemeine Fehlerrechnung und alle wichtigen Größen der entsprechenden Rechnung erklärt. Die wichtigsten Werte dabei sind der

$$\text{Mittelwert} \quad \bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^n x_i \quad \text{und die} \quad (6)$$

$$\text{Standartabweichung} \quad \sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=0}^N (x_i - \bar{x})^2}. \quad (7)$$

Dabei entspricht N der Anzahl an Werten und x_i ist jeweils ein mit einem Fehler gemessener Wert. Es ergibt sich ebenfalls die statistische Messunsicherheit

$$\Delta \bar{x} = \frac{\sigma}{\sqrt{N}} = \sqrt{\frac{1}{N(N-1)} \sum_{i=0}^N (x_i - \bar{x})^2}. \quad (8)$$

Entstehen mehrere Unbekannte in einer Messung, folgen daraus auch mehrere Messunsicherheiten, die in dem weiteren Verlauf der Rechnung berücksichtigt werden müssen. Es gilt die *Gaußsche Fehlerfortpflanzung*

$$\Delta f(y_1, y_2, \dots, y_N) = \sqrt{\left(\frac{df}{dy_1} \Delta y_1\right)^2 + \left(\frac{df}{dy_2} \Delta y_2\right)^2 + \dots + \left(\frac{df}{dy_N} \Delta y_N\right)^2}. \quad (9)$$

5 Auswertung

5.1 Auftragen der Messwerte

Zunächst werden die Grenzspannungen U_G der jeweiligen Spektrallinien bestimmt. Dafür werden in Abbildung 6 bis Abbildung 10 die Gegenspannungen gegen die Wurzel des Stroms aufgetragen. Die jeweiligen Messwerte dazu sind in den Tabellen 2 - 6 zu finden. Die Grenzspannung wird durch den Ansatz

$$U_G = -\frac{b}{a}$$

berechnet, da es sich um eine Gerade handelt. Für die Ausgleichsgerade ergeben sich die in Tabelle 1 errechneten Werte.

Tabelle 1: Werte der Parameter der Regressionsgeraden

Farbe	a	b	U_G
Ultraviolett	-0.832 ± 0.029	1.188 ± 0.021	1.430 ± 0.060
Violett	-2.491 ± 0.088	3.078 ± 0.059	1.24 ± 0.05
Grün	-3.949 ± 0.164	2.711 ± 0.063	0.687 ± 0.033
Gelb	-2.856 ± 0.120	1.599 ± 0.039	0.560 ± 0.039
Rot	-0.531 ± 0.033	0.302 ± 0.010	0.570 ± 0.040

Tabelle 2: Messwerte der ultravioletten Linie.

U / V	I / 10^{-9} A
1.283	0,0
1,2	0,04
1,1	0,075
1,0	0,145
0,9	0,2
0,8	0,298
0,7	0,415
0,6	0,540
0,5	0,660
0,4	0,780
0,3	0,920
0,2	1,0
0,1	1,2
0,05	1,2
0,00	1,3

Tabelle 3: Messwerte der violetten Linie.

U / V	I / 10^{-9} A
1,152	0,0
1,1	0,08
1,0	0,34
0,9	0,72
0,8	1,2
0,7	2,0
0,6	2,9
0,5	4,0
0,4	5,0
0,3	5,9
0,2	6,8
0,1	7,0
0,05	8,2
0,00	8,7

Tabelle 4: Messwerte der grünen Linie.

U / V	I / nA
0,645	0,0
0,6	0,12
0,55	0,295
0,50	0,56
0,45	0,62
0,40	1,4
0,35	2,0
0,3	2,8
0,25	3,5
0,2	4,2
0,15	4,8
0,1	5,3
0,05	5,8
0,0	6,2

Tabelle 5: Messwerte der gelben Linie.

U / V	I / nA	U / V.1	U / nA
0,52	0,0	-0,05	2,4
0,5	0,02	-0,1	2,6
0,45	0,1	-0,5	3,8
0,4	0,22	-1,0	5,4
0,35	0,4	- 1,5	6,4
0,3	0,63	-2,0	7,6
0,25	0,96	-3,0	10,0
0,2	1,2	-4,0	12,0
0,15	1,5	-6,0	12,0
0,1	1,7	-10,0	17,0
0,05	2,0	-14,0	20,0
0,0	2,2	-18,0	20,0
NaN	NaN	19,0	21,0

Tabelle 6: Messwerte der roten Linie.

U / V	I / nA
0,5	0,0
0,45	0,005
0,4	0,0075
0,35	0,02
0,3	0,021
0,25	0,035
0,2	0,04
0,15	0,05
0,1	0,06
0,05	0,075
0,00	0,08

Abbildung 6: Regressionsgerade der ultravioletten Linie.

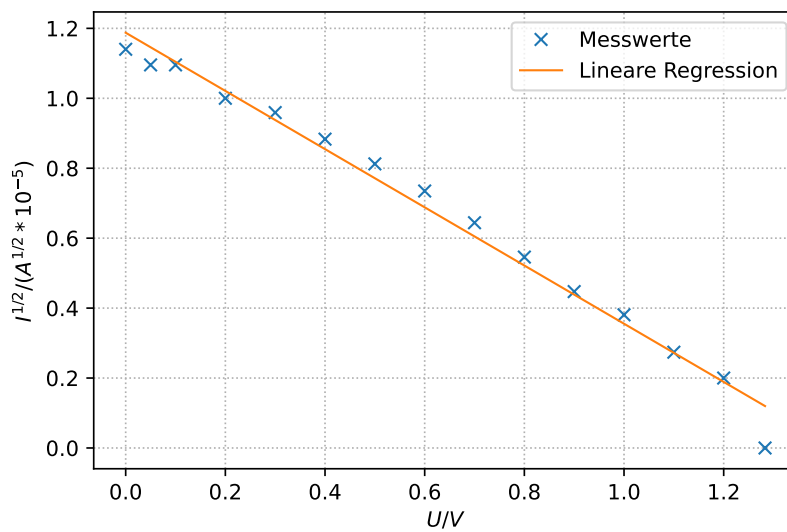


Abbildung 7: Regressionsgerade der violetten Linie.

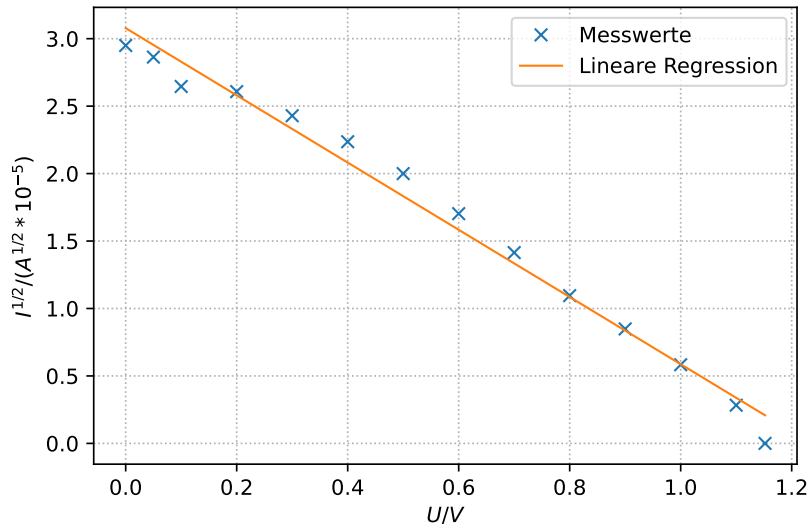


Abbildung 8: Regressionsgerade der grünen Linie.

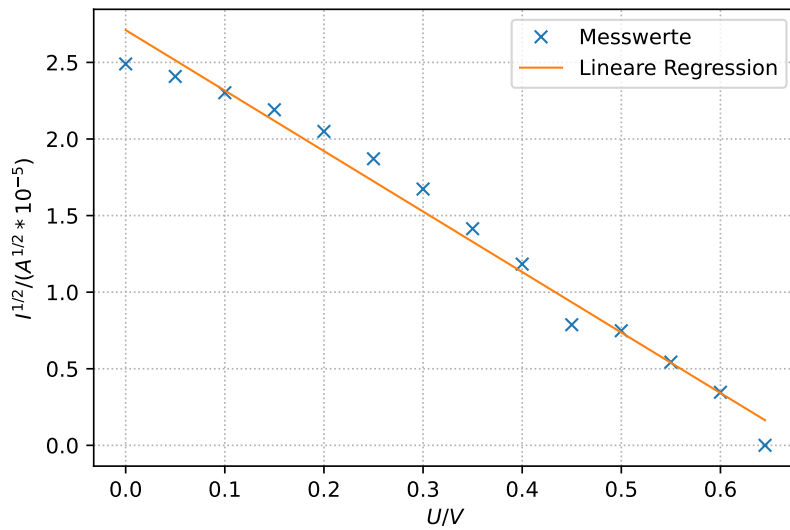


Abbildung 9: Regressionsgerade der gelben Linie.

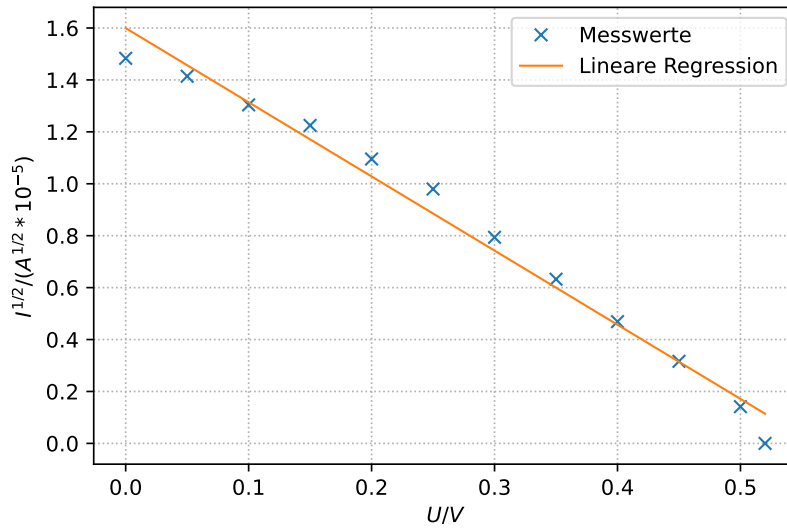
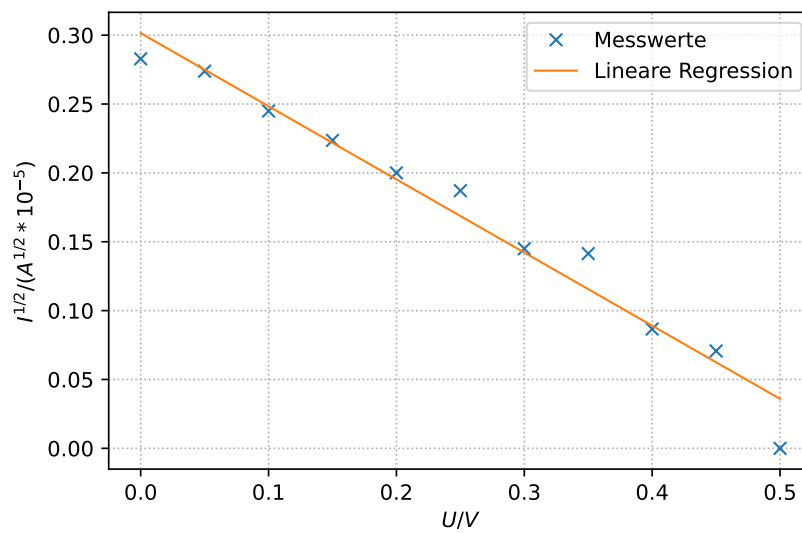


Abbildung 10: Regressionsgerade der roten Linie.



5.2 Ermittlung von dem Verhältnis h/e_0 und der Austrittsarbeit A_k

Nun wird in Abbildung 11 die Frequenz ν gegen die Grenzspannung auf der y-Achse aufgetragen. Die Frequenz berechnet sich durch

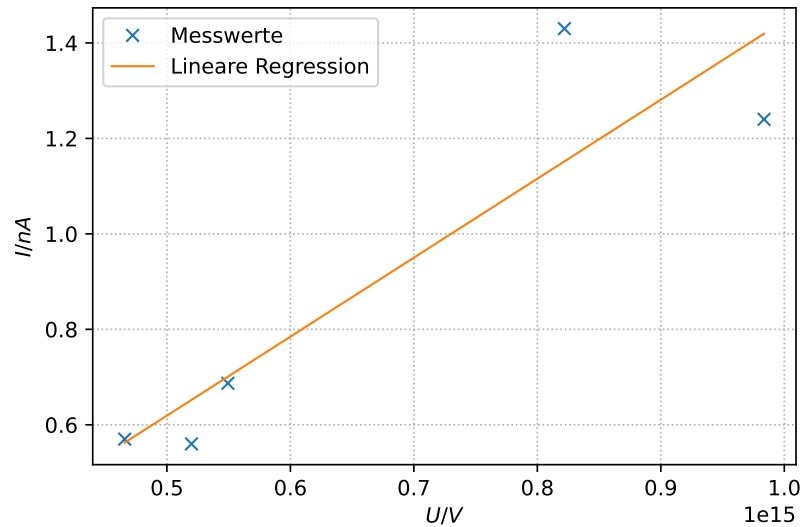
$$\nu = \frac{c}{\lambda}. \quad (10)$$

c ist dabei die Lichtgeschwindigkeit und λ ist die Wellenlänge. Die Wellenlängen sind auf dem Praktikumsblatt [6] zu finden.

Tabelle 7: Messwerte zur Bestimmung der Austrittsarbeit, sowie des Verhältnisses $\frac{h}{e_0}$.

U_G / V	$\lambda/10^{-9}$	$\nu/10^{12}\text{Hz}$
1.430	365	821.9
1.24	436	983.6
0.687	546	549.4
0.560	579	519.9
0.570	644	465.8

Abbildung 11: Regressionsgerade zur Bestimmung der Austrittsarbeit.



Für die Regressionsgerade ergeben sich die Werte

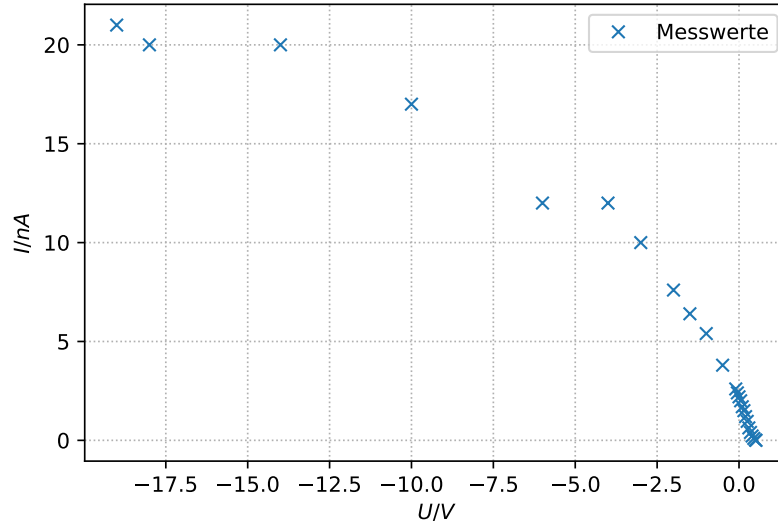
$$a = \frac{h}{e_0} = (1.65 \pm 0.44) \cdot 10^{-15} \text{eV} \quad (11)$$

$$\text{und} \quad (12)$$

$$|b| = A_K = (0.21 \pm 0.31) \text{eV}. \quad (13)$$

5.3 Photostrom in Abhängigkeit der angelegten Spannung am Beispiel der gelben Linie

Abbildung 12: Messdaten des Photostromes der gelben Linie.



Die Messwerte sind in Tabelle 5 und in Abbildung 12 dargestellt, wobei die negativen Werte einer Beschleunigungsspannung gleich sind.

6 Diskussion

Die Regressionsgeraden, dargestellt in Abbildung 6 bis Abbildung 10, sind jeweils nah an den jeweiligen Messwerten, weshalb die Messung der einzelnen Grenzspannungen eigentlich als Erfolg gewertet werden könnte. Jedoch gibt es in der folgenden Auswertung zum Verhältnis von $\frac{h}{e_0}$ große Abweichungen zum Literaturwert, der sich auf $4,136 \cdot 10^{-15} \text{eV}$ beläuft. Damit ergibt sich eine Abweichung von

$$\Delta \frac{h}{e_0} = \frac{1.654 - 4.145}{4.135} \cdot 100 = -60\%.$$

Die Abweichung ist in Anbetracht der relativ schlechten Regression angemessen und das Experiment kann noch als Erfolg angesehen werden. Die Austrittsarbeit wurde zu $A_K = (0.21 \pm 0.31) \text{eV}$ ermittelt.

Die Ergebnisse von der dritten Messung bedarf noch einer intensiven Diskussion. Zunächst ist ein Sättigungswert erwartbar, da ab einer gewissen Spannung U annähernd alle Elektronen die ausgelöst werden auch an die Anode gelangen. Diese Grenze ist durch die Intensität des Lichtes festgelegt, weshalb diese bei der Durchführung konstant war. Jedoch darf der Einfluss des äußeren Tageslichtes auf den Versuch nicht vergessen werden. Das Tageslicht

war bei diesem Versuch vermutlich die größte Fehlerquelle. Ist dieser Zusammenhang erkannt worden, ergibt sich auch kein Widerspruch zum Ohm'schen Gesetz, welches als

$$I = \frac{U}{R}$$

bekannt ist, da dieser Effekt unabhängig von diesem Gesetz ist. Der Sättigungswert kann hier aufgrund der technischen Realisierbarkeit nur asymptotisch erreicht werden, da dafür mehr als 19V als Beschleunigungsspannung nötig sind. Wollte man jedes Elektron im Strom messen, müsste man U gegen unendlich schicken. Das ist nicht realisierbar. Es sollte außerdem die Frage geklärt werden, warum der Anodenstrom bereits vor der Grenzspannung abnimmt. Dies liegt an der Verteilung der Elektronen im Metall (Fermi-Dirac-Statistik). Aufgrund dieser Verteilung besitzen die Elektronen unterschiedliche kinetische Energien bei dem Verlassen der Metalloberfläche. Die energetischsten Elektronen sind dann die Elektronen, die noch bis kurz vor der Grenzspannung an die Anode gelangen. Durch die geringe Verdampfungstemperatur des Kathodenmaterials, wodurch bereits Elektronen herausgelöst werden und sich in der Anode anlagern, entsteht ein elektrisches Feld. Deshalb kann ein dem Photostrom entgegengerichteter Strom entstehen. Es sei angemerkt, dass es sich dabei um deutlich weniger Elektronen handelt, weshalb der Sättigungswert viel schneller erreicht wird.

Literatur

- [1] 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/>.
- [2] Eric Jones, Travis E. Oliphant, Pearu Peterson u. a. *SciPy: Open source scientific tools for Python*. Version 0.16.0. URL: <http://www.scipy.org/>.
- [3] Eric O. Lebigot. *Uncertainties: a Python package for calculations with uncertainties*. Version 2.4.6.1. URL: <http://pythonhosted.org/uncertainties/>.
- [4] 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/>.
- [5] The pandas development team. *pandas-dev/pandas: Pandas*. Version latest. Feb. 2020. DOI: 10.5281/zenodo.3509134. URL: <https://doi.org/10.5281/zenodo.3509134>.
- [6] *Versuchsanleitung „Fotoeffekt“*. TU Dortmund, Fakultät Physik. 2022.