

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DORTMUND

PHYSIKALISCHES PRAKTIKUM

V500 - Der Photoeffekt

Elçin Akay, elcin.akay@tu-dortmund.de

Robin Hegering, robin.hegering@tu-dortmund.de

DURCHFÜHRUNG AM 2. APRIL 2019

ABGABE AM 9. APRIL 2019

9	Inhaltsverzeichnis	
10	1 Zielsetzung	3
11	2 Theorie	3
12	3 Durchführung	4
13	3.1 Untersuchung des Zusammenhangs zwischen Wellenlänge des Lichtes und	
14	der Maximalenergie der emittierten Elektronen	5
15	3.2 Untersuchung der Abhängigkeit des Elektronenstroms von der an der	
16	beleuchteten Photozelle angelegten Spannung	6
17	4 Auswertung	6
18	4.1 Bestimmung der Grenzspannungen für die verschiedenen Spektrallinien . .	6
19	4.2 Bestimmung des Verhältnisses $\frac{h}{e_0}$	12
20	4.3 Betrachtung der orangenen Spektralfarbe in dem Intervall $-20\text{ V} < U < 20\text{ V}$	13
21	5 Diskussion	15
22	Literatur	16

1 Zielsetzung

In diesem Versuch soll der Photoeffekt untersucht werden. Dazu wird der Zusammenhang zwischen emittierter Lichtfrequenz und kinetischer Maximalenergie der emittierten Elektronen und außerdem die Abhängigkeit des Photostroms von der angelegten Bremspannung untersucht.

2 Theorie

Die Quantenelektrodynamik erlaubt eine widerspruchslöse Erklärung von Licht. Zur besseren Veranschaulichung werden oft Wellencharakter und Teilchencharakter als Grenzfälle der Theorie betrachtet. Kann über eine große Anzahl von Photonen gemittelt werden, so eignet sich das Wellenmodell zur Beschreibung des Lichts am sinnvollsten. Das Teilchenmodell hingegen eignet sich für die Erklärung der Phänomene, welche auftreten, wenn Licht mit Materie wechselwirkt. Der Teilchencharakter ist eine anschauliche Hilfe, um den Photoeffekt zu erklären. Ein Photon trifft mit der Energie $h\nu$ auf ein Elektron, welches sich in einem Metall befindet. Überschreitet die Energie des Photons die Austrittsarbeit A_k des Elektrons, so wird dies aus dem Metall gelöst. Somit folgt für die Energiebilanz

$$h\nu = E_{\text{kin}} + A_k. \quad (1)$$

Die kinetische Energie E_{kin} beschreibt die Energie der Elektronen, die sie durch ihre Bewegung erlangt haben. Die Intensität des Lichts ist unabhängig von der Energie, allerdings nicht von der Frequenz ν . Ist jedoch die Intensität des Lichts höher, so steigt die Anzahl der Photonen. Somit können mehr Elektronen ausgelöst werden.

Der Photoeffekt kann mit Hilfe einer Photozelle beobachtet werden, welche in Abbildung 2 dargestellt ist. Der Glaskolben der Photozelle ist vakuumiert, sodass die gelösten Elektronen nicht mit anderen Teilchen wechselwirken. Die Kathode befindet sich in der Innenseite des Kolbens als eine Metallschicht. Eine kreisförmige Anode ist vor der Kathodenoberfläche angebracht, um ausgelöste Elektronen anzuziehen.

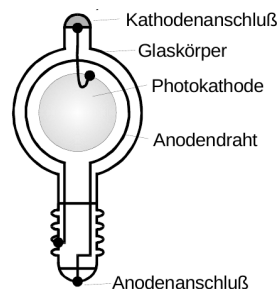


Abbildung 1: Schematische Darstellung einer Photozelle [2].

Ein Photostrom entsteht durch die gelösten Elektronen. Um den Zusammenhang zwischen der Energie der Photonen und ihrer Frequenz zu ermitteln, wird die Gegenfeldmethode genutzt. Dies liegt daran, dass es keinen direkten Weg gibt, die Energie der

Elektronen zu bestimmen. Deutlich wird nur, dass die Energie E proportional zu ihrer Frequenz ν und antiproportional zu ihrer Wellenlänge λ ist. Um die Gegenfeldmethode zu nutzen, wird an den Kathodenanschluss und den Anodenanschluss eine variable Spannung U angelegt. Wenn die angelegte Spannung U den Photostrom durch ihre Gegenwirkung aufhebt, gilt die Energierelation

$$e_0 U_G = \frac{1}{2} m_0 v_{\max}^2. \quad (2)$$

Hierbei ist e_0 die Elementarladung, m_0 die Ruhemasse der Elektronen, U_G die Grenzspannung der Elektronen und v_{\max} die maximale Geschwindigkeit, die die Elektronen annehmen. In die Formel (1) kann nun die kinetische Energie aus der Formel (2) eingesetzt werden, und es folgt

$$h\nu = e_0 U_G + A_k. \quad (3)$$

Um die Energieverteilung von Elektronen in Festkörpern beschreiben zu können, wird die Fermi-Dirac-Statistik genutzt.

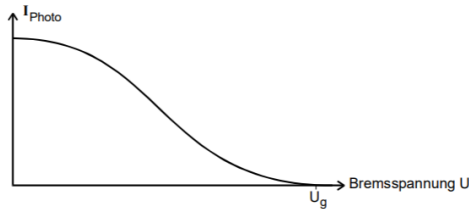


Abbildung 2: Abhängigkeit des Photostroms von der Bremsspannung bei Bestrahlung einer Photozelle mit monochromatischem Licht [2].

Diese beschreibt die Quantenstatistik von Fermionen. Die Statistik beruht auf dem Pauli-Prinzip. Elektronen können folglich bereits im Kathodenmaterial eine bestimmte Energie besitzen, diese liegt in einem Intervall von 0 bis ζ . Hierbei stellt ζ die Fermi-Energie der Elektronen dar. In der Nähe der Grenzspannung kann der parabolische Zusammenhang zwischen Photostrom und der Gegenspannung

$$I_{\text{Ph}} \propto U^2 \quad (4)$$

als Näherung genutzt werden.

3 Durchführung

Zur Untersuchung des Photoeffekts wird der in Abbildung 3 dargestellte Aufbau verwendet. Das von der Spektrallampe ausgesendete Licht wird dabei zunächst mit einer Kondensorlinse so gebündelt, dass die gesamte Intensität durch die Spaltblende fällt. Mit der Abbildungslinse wird der Lichtstrahl dann über ein Geradsichtprisma auf den Eintrittsspalt der Photozelle gelenkt. Mithilfe des Geradsichtprismas wird der Lichtstrahl in seine spektralen Anteile zerlegt, um die Photozelle mit monochromatischem Licht bestrahlen zu können. Die Wellenlänge des auf die Photozelle treffenden Lichts kann dann mit dem Schwenkarm gesteuert werden.

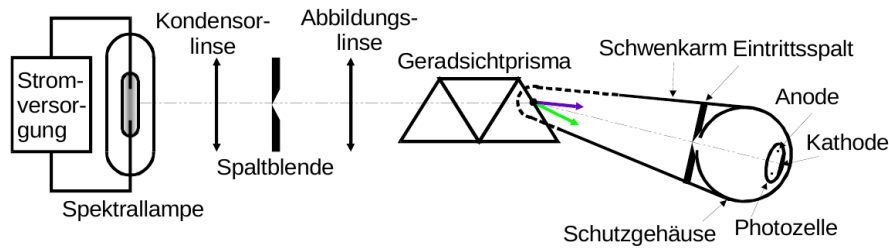


Abbildung 3: Versuchsaufbau mit Photozelle und optischen Elementen zur Steuerung der Wellenlänge des einfallenden Lichts [2].

3.1 Untersuchung des Zusammenhangs zwischen Wellenlänge des Lichtes und der Maximalenergie der emittierten Elektronen

Im ersten Teil des Versuchs soll der Zusammenhang zwischen Wellenlänge des von der Spektrallampe ausgesendeten monochromatischen Lichts und der maximalen Energie der ausgelösten Elektronen betrachtet werden. Dazu wird die sogenannte Gegenfeldmethode verwendet. Das elektrische Schaltbild dafür ist in Abbildung 4 dargestellt. Bei der Gegenfeldmethode wird zwischen Kathode und Anode eine Spannung U angelegt, die ein elektrisches Feld erzeugt, das eine bremsende Wirkung auf den Elektronenfluss hat. Dabei reduziert sich die Anzahl der an der Anode eintreffenden Elektronen auf diejenigen, deren Energie größer ist als $e_0 \cdot U$. Aus diesem Grund ist kein Strom mehr vorhanden, sobald Gleichung (2) erfüllt ist. Zur Untersuchung der Abhängigkeit der Maximalenergie der emittierten Elektronen von der Wellenlänge des einfallenden Lichts werden nacheinander fünf Spektrallinien der Quecksilberdampfampe auf die Photozelle gerichtet. Anschließend werden jeweils die Gegenspannung von 0 V bis maximal 1 V hochgeregt und der Photostrom aufgenommen. Für die erste Spektrallinie wird der Messbereich bereits bei -1 V mit einer Saugspannung begonnen, um den Wertebereich einschätzen zu können.

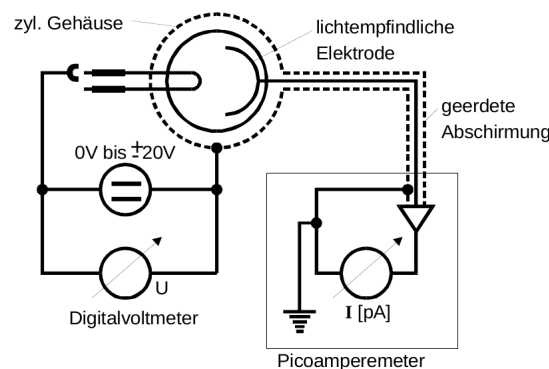


Abbildung 4: Elektrisches Schaltbild des Versuchsaufbaus bei der Gegenfeldmethode [2].

93 3.2 Untersuchung der Abhängigkeit des Elektronenstroms von der an der 94 beleuchteten Photozelle angelegten Spannung

95 Zur Untersuchung der Abhängigkeit des Elektronenstroms von der anliegenden Spannung
96 wird ebenfalls der Versuchsaufbau aus Abbildung 4 verwendet. Nun wird aber die
97 Wellenlänge des einfallenden monochromatischen Lichts konstant gelassen. Außerdem
98 muss auf eine konstante Lichtintensität geachtet werden. Die zwischen Kathode und
99 Anode anliegende Spannung wird nun von -20 V bis 20 V hoch reguliert. Dabei wird der
100 auftretende Photostrom aufgezeichnet.

101 4 Auswertung

102 Im Folgenden werden die durchgeführten Messreihen zur Untersuchung des Photoeffekts
103 ausgewertet.

104 4.1 Bestimmung der Grenzspannungen für die verschiedenen Spektrallinien

Die zur Bestimmung der jeweiligen Grenzspannungen aufgenommenen Messwerte sind in Tabelle 1 bis 5 dargestellt. Daraus wird die Wurzel des Photostroms gegen die angelegte Spannung aufgetragen. Die Grenzspannung berechnet sich mithilfe einer linearen Ausgleichsrechnung. Die Theoriekurve ergibt sich dabei aus dem in der Nähe der Grenzspannung näherungsweise quadratischen Zusammenhang $I_{\text{ph}} \propto U^2$ zu

$$\sqrt{I_{\text{ph}}} = a \cdot U + b.$$

Daraus folgt für die Grenzspannung

$$U_{\text{G}} = -\frac{a}{b}.$$

105 Daraus ergeben sich bei der Ausgleichsrechnung mit Python für die verschiedenen Spek-
106 trallinien die in Tabelle 6 angegebenen Werte. In Abbildung 5 bis 9 sind die Messwerte
107 graphisch dargestellt und außerdem die berechneten Ausgleichsgeraden eingezeichnet.
108 Anzumerken ist dabei, dass für die Ausgleichsgerade in Abbildung 5 nur die offensichtlich
109 linear abfallenden Messwerte verwendet werden, da davon ausgegangen wird, dass im
110 ersten Teil ein Fehler bei der Einstellung der Gegenspannungsquelle unterlaufen ist (siehe
111 Abschnitt 5). Außerdem werden bei allen Messreihen die gemessenen Nullstellen nicht be-
112 rücksichtigt, da diese per Ausgleichsrechnung bestimmt werden und bei den verwendeten
113 Messgeräten kein eindeutiger Nullpunkt feststellbar ist.

Tabelle 1: Messwerte des Photostrom bei entsprechender Gegenspannung für die Spektrallinie mit $\lambda = 578 \text{ nm}$.

Gegenspannung U/V	Photostrom I/nA	$\sqrt{I}/\mu\text{A}$
−1,000	1,400	37,417
−0,800	1,400	37,417
−0,599	1,240	35,214
−0,400	1,200	34,641
−0,201	0,500	22,361
−0,001	0,200	14,142
0,001	0,500	22,361
0,050	0,320	17,889
0,100	0,240	15,492
0,150	0,210	14,491
0,200	0,150	12,247
0,250	0,090	9,487
0,300	0,055	7,416
0,350	0,031	5,568
0,400	0,018	4,243
0,450	0,007	2,646
0,500	0,000	0,000

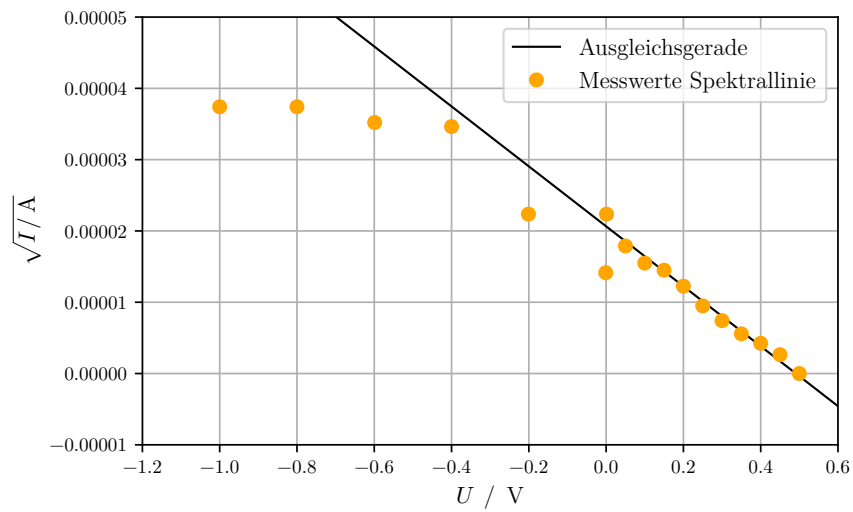


Abbildung 5: Graphische Darstellung der Messwerte des Photostroms bei entsprechender Gegenspannung für die Spektrallinie mit $\lambda = 578 \text{ nm}$.

Tabelle 2: Messwerte des Photostroms bei entsprechender Gegenspannung für die Spektrallinie mit $\lambda = 546 \text{ nm}$.

Gegenspannung U/V	Photostrom I/nA	$\sqrt{I}/\mu\text{A}$
0,001	0,650	25,495
0,050	0,490	22,136
0,101	0,360	18,974
0,150	0,330	18,166
0,203	0,260	16,125
0,250	0,170	13,038
0,303	0,125	11,180
0,350	0,070	8,367
0,400	0,003	1,844
0,450	0,010	3,162
0,486	0,000	0,000

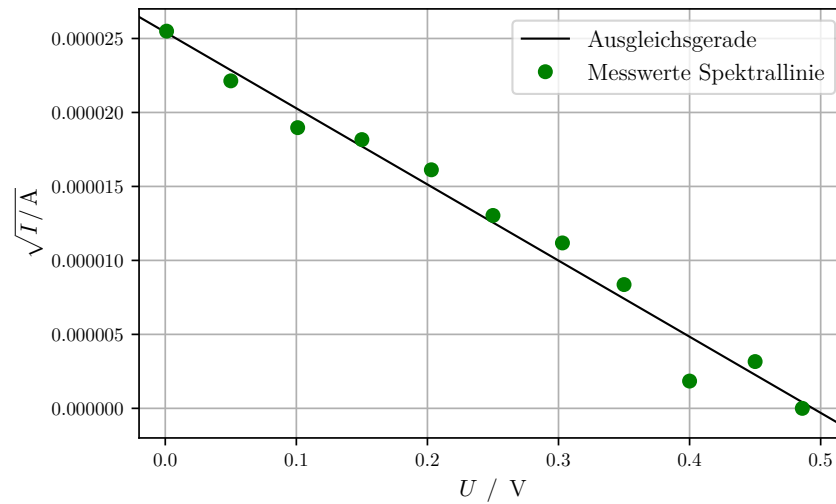


Abbildung 6: Graphische Darstellung der Messwerte des Photostroms bei entsprechender Gegenspannung für die Spektrallinie mit $\lambda = 546 \text{ nm}$.

Tabelle 3: Messwerte des Photostroms bei entsprechender Gegenspannung für die Spektrallinie mit $\lambda = 492 \text{ nm}$.

Gegenspannung U/V	Photostrom I/nA	$\sqrt{I}/\mu\text{A}$
0,001	0,150	12,247
0,050	0,130	11,402
0,100	0,120	10,954
0,154	0,094	9,695
0,201	0,064	8,000
0,250	0,053	7,280
0,300	0,048	6,928
0,350	0,036	6,000
0,400	0,028	5,292
0,450	0,021	4,583
0,500	0,017	4,123
0,550	0,012	3,464
0,600	0,009	3,000
0,650	0,005	2,236

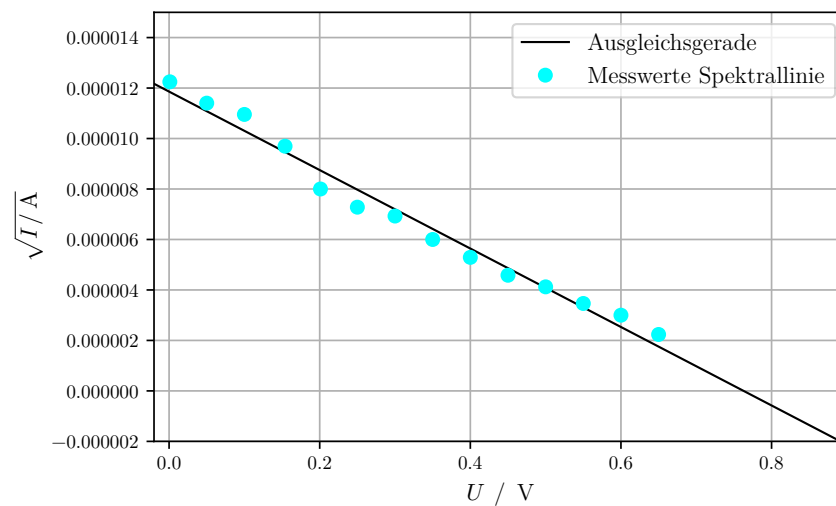


Abbildung 7: Graphische Darstellung der Messwerte des Photostroms bei entsprechender Gegenspannung für die Spektrallinie mit $\lambda = 492 \text{ nm}$.

Tabelle 4: Messwerte des Photostroms bei entsprechender Gegenspannung für die Spektrallinie mit $\lambda = 405 \text{ nm}$.

Gegenspannung U/V	Photostrom I/nA	$\sqrt{I}/\mu\text{A}$
0,001	1,200	34,641
0,050	1,050	32,404
0,100	1,000	31,623
0,150	0,860	29,326
0,200	0,750	27,386
0,250	0,710	26,646
0,299	0,635	25,199
0,354	0,540	23,238
0,400	0,460	21,448
0,450	0,390	19,748
0,500	0,320	17,889
0,600	0,249	15,780
0,706	0,170	13,038
0,802	0,070	8,367
0,850	0,038	6,164
0,900	0,014	3,742

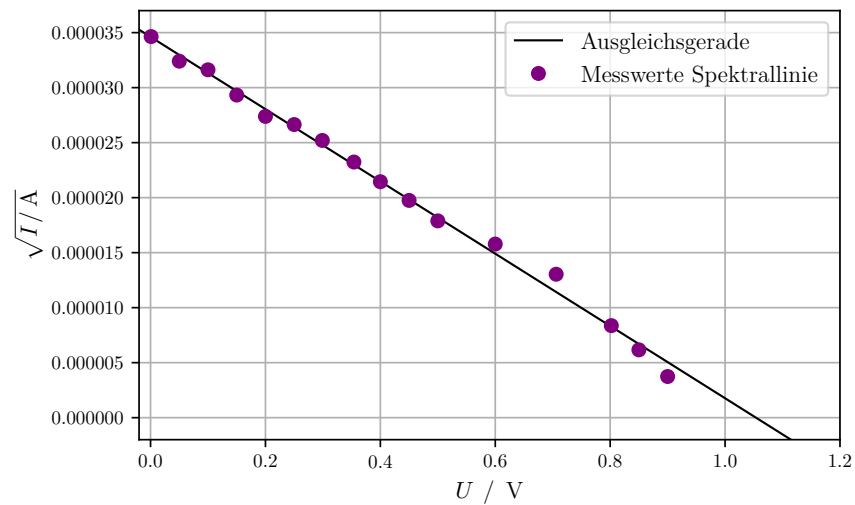


Abbildung 8: Graphische Darstellung der Messwerte des Photostroms bei entsprechender Gegenspannung für die Spektrallinie mit $\lambda = 405 \text{ nm}$.

Tabelle 5: Messwerte des Photostroms bei entsprechender Gegenspannung für die Spektrallinie mit $\lambda = 365 \text{ nm}$.

Gegenspannung U/V	Photostrom I/nA	$\sqrt{I}/\mu\text{A}$
0,001	0,520	22,804
0,050	0,490	22,136
0,100	0,560	23,664
0,150	0,430	20,736
0,201	0,380	19,494
0,250	0,350	18,708
0,300	0,400	20,000
0,350	0,330	18,166
0,405	0,300	17,321
0,450	0,220	14,832
0,507	0,195	13,964
0,552	0,180	13,416
0,609	0,145	12,042
0,700	0,125	11,180
0,800	0,064	8,000
0,900	0,034	5,831

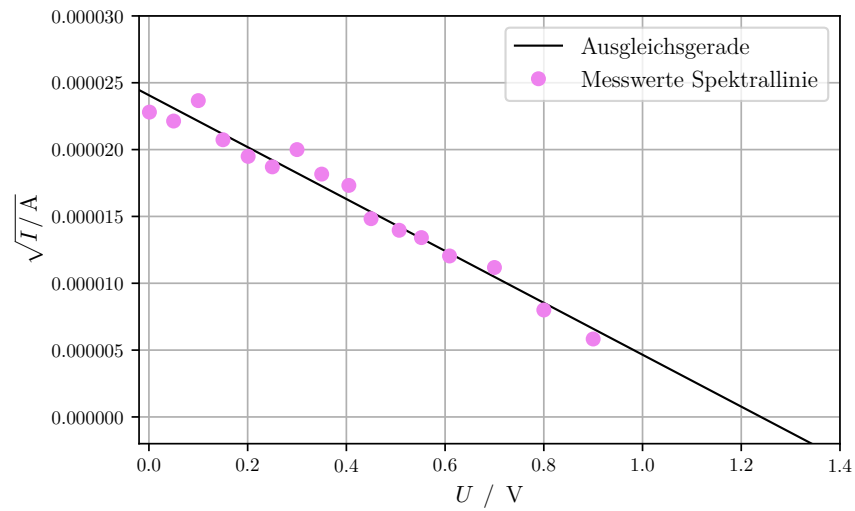


Abbildung 9: Graphische Darstellung der Messwerte des Photostroms bei entsprechender Gegenspannung für die Spektrallinie mit $\lambda = 365 \text{ nm}$.

Tabelle 6: Ergebnisse der Ausgleichsrechnungen zur Bestimmung der Grenzspannung für die einzelnen Spektralfarben.

Wellenl. λ/nm	Steigung $a / 10^{-5} \frac{\sqrt{\text{A}}}{\text{V}}$	Parameter $b / 10^{-5} \sqrt{\text{A}}$	Grenzspg. U_G / V
578	$-4,204 \pm 0,197$	$2,065 \pm 0,025$	$0,491 \pm 0,026$
546	$-5,147 \pm 0,262$	$2,543 \pm 0,077$	$0,494 \pm 0,029$
492	$-1,555 \pm 0,063$	$1,186 \pm 0,024$	$0,763 \pm 0,034$
405	$-3,285 \pm 0,062$	$3,461 \pm 0,031$	$1,053 \pm 0,022$
365	$-1,941 \pm 0,091$	$2,407 \pm 0,043$	$1,240 \pm 0,062$

114 4.2 Bestimmung des Verhältnisses $\frac{h}{e_0}$

Nun wird das Verhältnis zwischen Planckschem Wirkungsquantum h und Elementarladung e_0 anhand der Ergebnisse aus Abschnitt 4.1 bestimmt. Dazu werden die Resultate der Ausgleichsrechnungen aus Tabelle 6 in Abbildung 10 graphisch dargestellt. Die zur Bestimmung des Verhältnisses $\frac{h}{e_0}$ durchgeführte Ausgleichsrechnung erfolgt nach Gleichung (2). Umgestellt nach dem zu bestimmenden Verhältnis ergibt sich daraus

$$U_G = \frac{h}{e_0} \cdot f - \frac{A_k}{e_0}.$$

Bei einer Ausgleichsrechnung mit Python ergeben sich dabei die Parameter

$$\begin{aligned} \frac{h}{e_0} &= (2,573 \pm 0,187) \cdot 10^{-15} \text{ V s} \\ \frac{A_k}{e_0} &= (8,586 \pm 1,232) \cdot 10^{-1} \frac{\text{J}}{\text{C}} \\ \Rightarrow A_k &= (8,586 \pm 1,232) \cdot 10^{-1} \text{ eV}. \end{aligned}$$

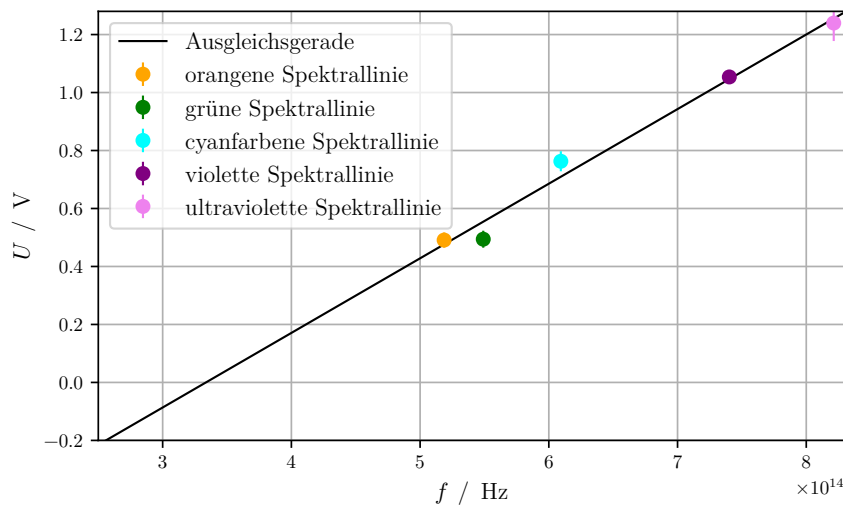


Abbildung 10: Graphische Darstellung der errechneten Gegenspannungen bei entsprechender Lichtfrequenz der Spektrallinien.

4.3 Betrachtung der orangenen Spektralfarbe in dem Intervall $-20 \text{ V} < U < 20 \text{ V}$

In diesem Teil der Versuchsreihe wird der Photostrom für die orangene Spektralfarbe in dem Intervall von $-20 \text{ V} < U < 20 \text{ V}$ betrachtet. Die verwendeten Messwerte sind in der Tabelle 7 dargestellt.

Bei der Versuchsreihe ist jedoch aufgefallen, dass lediglich das Intervall, welches in der Tabelle dargestellt ist, Sinn ergeben hat. Daher wird nur das Intervall $-5,5 \text{ V} < U < 1 \text{ V}$ wird berücksichtigt und in Abbildung 11 graphisch dargestellt.

Bei Betrachtung der Abbildung fällt besonders auf, dass bei hohen Beschleunigungsspannungen die Kurve gegen einen bestimmten Grenzwert konvergiert. Dadurch, dass die Anzahl der Elektronen nur von der Lichtintensität abhängt, wird bei einer bestimmten Spannung der Maximalwert der Elektronen erreicht. So kann durch eine konstante Lichtintensität die Anzahl auslösbarer Elektronen nicht weiter erhöht werden.

Es wird aber deutlich, dass dieser Sättigungswert nur asymptotisch erreicht wird, da auch die Elektronen einer Streuung unterliegen. Um dem Elektronenverlust zu entgehen, muss der Aufbau eine kugelförmige Kathode enthalten, in deren Innerem die Anode liegt, welche vom Licht bestrahlt wird.

Eine weitere Auffälligkeit ist das Absinken des Photostroms kurz vor dem Erreichen der Grenzspannung. Dieses Verhalten lässt sich jedoch mit der Fermi-Dirac-Verteilung erklären, da ein Großteil der Elektronen bereits beim Austritt aus dem Festkörper eine Energie $> 0 \text{ eV}$ besitzen.

Es ist außerdem zu erwähnen, dass die Anode dem lichtelektrischen Effekt unterliegt, was aufgrund der Oberfläche und des verwendeten Materials deutlich geringer ist als bei der Kathode. Die Fläche der Anode ist im Vergleich zur Kathode sehr gering, und

Tabelle 7: Aufgenommene Messwerte bei der orangenen Spektrallinie.

Spannung U/V	Strom I/nA	Spannung U/V	Strom I/nA
1	-0,018	-0,5	1,45
0,75	-0,015	-0,75	1,9
0,5	-0,005	-1	2,35
0,3	0,02	-1,5	4
0,2	0,25	-2	3,9
0,1	0,39	-2,5	4,5
0,02	0,55	-3	5
-0,02	0,6	-3,51	5,6
-0,1	0,78	-4	5,8
-0,2	0,9	-4,5	6,1
-0,31	1,15	-5,02	6,3
-0,41	1,3	-5,5	6,4

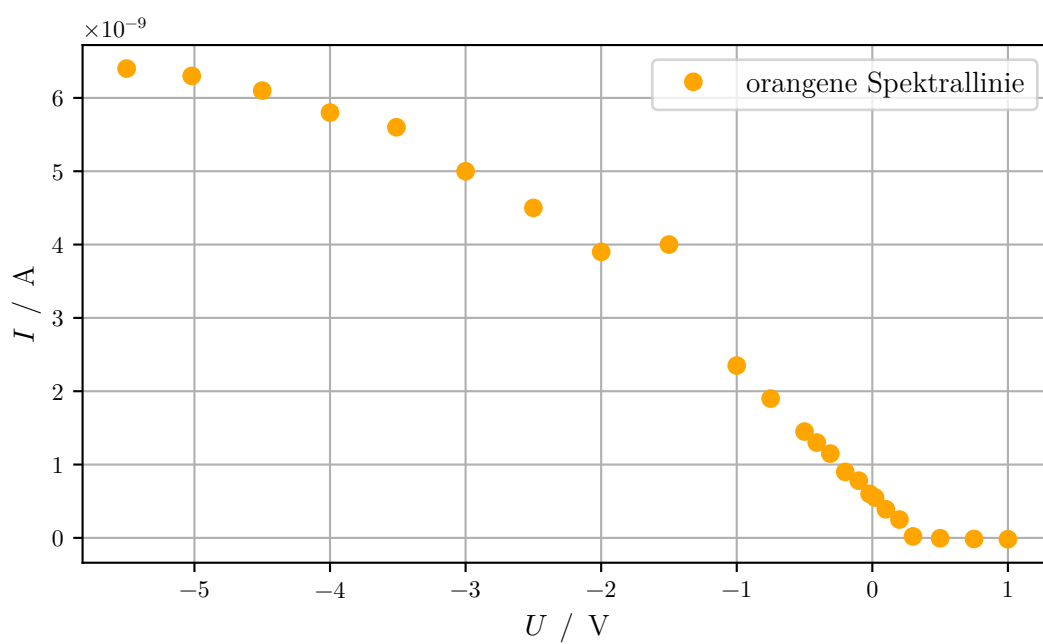


Abbildung 11: Photostrom der Spektrallinie mit $\lambda = 578 \text{ nm}$ in Abhängigkeit von der anliegenden Spannung als graphische Abbildung.

139 somit ist ein Sättigungswert deutlich schneller erreicht. Tritt der negative Strom schon
140 bei energiearmen Licht auf, ist die Austrittsarbeit vermutlich ziemlich gering und in der
141 Größenordnung in der Kathode.

142 5 Diskussion

Der experimentell bestimmte Wert für $\frac{h}{e_0}$ liegt bei

$$(2,573 \pm 0,187) \cdot 10^{-15} \text{ V s.}$$

Verglichen mit dem Literaturwert von $\frac{h}{e_0}$ von $4,136 \cdot 10^{-15} \text{ V s}$ liegt eine Abweichung von $p = 37,8 \%$ vor. Diese berechnet sich nach

$$p = \frac{h/e_{0\text{exp}}}{h/e_{0\text{theoret}}} - 1.$$

143 Für das Auftreten dieses Fehlers sind mehrere Ursachen möglich. Die größte Fehlerquelle
144 war der Aufbau selbst. Das Amperemeter zeigte erhebliche Schwankungen, die auch schon
145 bei kleinsten Bewegungen aufgetreten sind. Somit musste die Messreihe der orangenen
146 Spektrallinie dreimal neuangefertigt werden, weil die Werte unwahrscheinlich stark
147 geschwankt haben. Außerdem ist die Beleuchtung im Raum auch eine große Fehlerquelle,
148 da man die Lampen nie komplett von den Messgeräten wegdrehen konnte. Auch stellt
149 die Apparatur, wo die Photozelle befestigt war, einen Grund für die Messfehler dar. Die
150 Photozelle wurde mittels einer Schiene auf einem Teilkreisbogen befestigt und um den
151 Aufbau herumgefahren, um die Spektren aufnehmen zu können. Jedoch ist dieser Aufbau
152 auch sehr wackelig, weshalb bei der Messung die Photozelle immer verrutschte. Somit
153 konnte die Intensität nicht konstant gehalten werden, was für schwankende Anzahl an
154 Elektronen sorgt.

155 Die Quecksilber-Dampfampe ist ebenfalls eine Fehlerquelle. Bei Betrachtung der
156 Spektrallinien auf dem Schirm war eine rote Linie zu erkennen, welche jedoch bei
157 einer Quecksilber-Dampfampe nicht auftreten sollte [1]. Dies lässt sich eventuell durch
158 Lufteinschlüsse in der Lampe erklären. Die Abweichungen sind dann auf systematische
159 Fehler zurückzuführen, da der Aufbau den größten Teil der Fehler ausmacht.

160 Zusätzlich sind Probleme beim Einstellen der Gegenspannung aufgetreten. Zur Ermitt-
161 lung der Messwerte bei der orangenen Spektrallinie (siehe Tabelle 1) wurde zunächst
162 mit einer Beschleunigungsspannung gearbeitet, um den Wertebereich einschätzen zu
163 können. Aus der dazugehörigen Abbildung 5 ist allerdings ersichtlich, dass durch die
164 Umpolung der lineare Verlauf sehr stark verfälscht wird. Dabei handelt es sich um einen
165 systematischen Fehler, der dadurch entsteht, dass die näherungsweise Proportionalität
166 $I \propto I^2$ nur in der Nähe der Grenzspannung gilt und insbesondere bei einer Umpolung
167 stark verfälscht ist.

168 Alles in allem wurde jedoch das Grundprinzip des photoelektrischen Effektes sehr
169 deutlich, und die Apparatur eignet sich gut für die Veranschaulichung dieses Experiments.

170 Literatur

- 171 [1] Jahrgang 11. *Spektralanalyse mit dem optischen Gitter*. 3. Apr. 2019. URL: [https://physikunterricht-online.de/jahrgang-11/spektralanalyse-optisches-](https://physikunterricht-online.de/jahrgang-11/spektralanalyse-optisches-gitter/)
172 [gitter/](https://physikunterricht-online.de/jahrgang-11/spektralanalyse-optisches-gitter/).
173
- 174 [2] TU Dortmund. *Versuchsanleitung zum Versuch V500*. 1. Apr. 2019. URL: <http://129.217.224.2/HOMEPAGE/MEDPHYS/BACHELOR/AP/SKRIPT/V500.pdf>.
175