

V500

Der Photoeffekt

Evelyn Romanjuk
evelyn.romanjuk@tu-dortmund.de

Ramona-Gabriela Kallo
ramonagabriela.kallo@tu-dortmund.de

Durchführung: 17.04.18

Abgabe: 24.04.18

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1 Zielsetzung	3
2 Theorie	3
3 Experimentelle Untersuchung des Photoeffektes	4
4 Versuchsaufbau und Durchführung	6
5 Auswertung	7
5.1 Bestimmung der Gegenspannungen	7
5.2 Bestimmung des Verhältnisses $\frac{h}{e_0}$ und der Austrittsarbeit A_K	13
5.3 Untersuchung des Photostroms bei gelbem Licht der Wellenlänge	14
6 Diskussion	16
Literatur	17

1 Zielsetzung

In diesem Versuch sollen die Erscheinungen des Photoeffekts näher untersucht werden. Zuerst wird die Frequenz beziehungsweise die Wellenlänge des Lichtes und ihr Zusammenhang mit der Elektronenenergie untersucht, um die Austrittsarbeit A_K und die Größe $\frac{h}{e_0}$ zu bestimmen. Dann wird an einer beleuchteten Photozelle die Abhängigkeit des Elektronenstromes von der Spannung gemessen und der Kurvenverlauf erklärt.

2 Theorie

Der Photoeffekt beschreibt das Herauslösen von Elektronen aus einem Metall durch Photonen, also durch Bestrahlung von Licht. Für die Erklärung des Photoeffekts und anderer physikalischen Erscheinungen muss von einer korpuskularen Theorie des Lichtes ausgegangen werden.

Die klassische Physik ist hier nicht in der Lage eine Beschreibung des Lichtes zu liefern. Dafür gibt es die Quantenelektrodynamik, die im Grenzfall erklären kann, dass die Energie des Lichtes in Photonen über eine räumliche Ausbreitung erfolgen kann, also sie kann über den Raum transportiert werden. Diese sind nach Einstein gleich mit den Planckschen Energiequanten und die ersten Erklärungen zu den lichtelektrischen Effekten konnte Einstein abgeben.

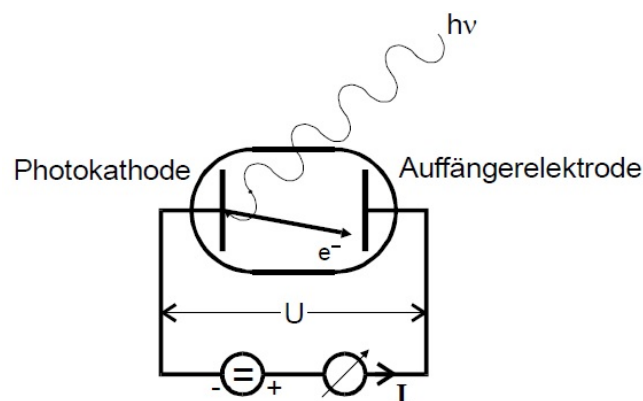


Abbildung 1: Schematischer Aufbau des Photoeffektes und dessen Untersuchung anhand der Bestrahlung des Materials mit monochromatischem Licht, [1, S. 2].

In der Abbildung 1 ist eine Vakuumapparatur zu sehen, in der die ausgelösten Elektronen aus elektrischer Strom nachgewiesen werden können. Das Material wird zuerst mit monochromatischem Licht bestrahlt. Dieser Elektrode, die negativ geladen ist, wird eine zweite gegenüber gestellt, die positiv geladen ist, so dass der elektrische Strom beobachtet werden kann. Bei der Durchführung dieses Experimentes wird zum einen die Beobachtung gemacht, dass die Anzahl der ausgelösten Elektronen pro Zeitintervall proportional zur Lichtintensität sind, die Energie der Elektronen proportional zur Lichtfrequenz und

unabhängig von der Lichtintensität ist und es eine Grenzfrequenz gibt. Die Photonen, die sich mit der Lichtgeschwindigkeit c bewegen, besitzen die Energie $h\nu$, wobei h das Plancksche Wirkungsquantum ist. Um die Elektronen aus dem Metall herauszulösen, muss Arbeit verrichtet werden. Die Energie wird auf die Elektronen des Kathodenmaterials übertragen, damit sich das Elektron überhaupt lösen kann. Diese wird als Austrittsarbeit A_k bezeichnet. Als wichtigste Beobachtung ist die maximale kinetische Energie E_{\max} , die an das Elektron abgegeben wird. Als Energiebilanz ergibt sich:

$$h \cdot \nu = E_{\max} + A_k \quad (1)$$

wobei A_k die Austrittsarbeit ist und vom bestrahlten Material abhängt. Außerdem bestimmt die Anzahl der Photonen pro Zeit- und Raumwinkelintervall die Lichtintensität. Dabei hängt die Energie $h\nu$ von der Frequenz ν des Lichtes ab. Aus der Gleichung 1 lässt sich erschließen, dass der Photoeffekt nicht mehr eintreten kann, wenn

$$h\nu < A_k$$

gilt, weil dann keine Elektronen mehr ausgelöst werden können.

3 Experimentelle Untersuchung des Photoeffektes

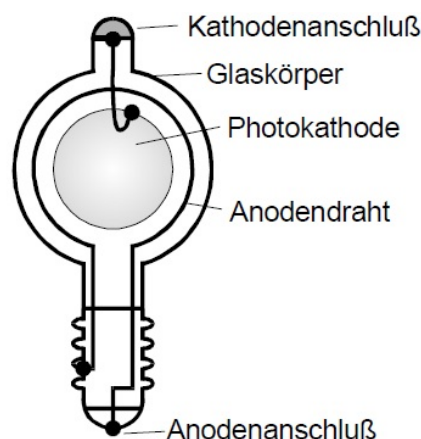


Abbildung 2: Aufbau einer Photozelle, [1, S. 4].

In der Abbildung 2 ist der schematische Aufbau einer Photozelle zu sehen. Zu sehen ist ein evakuierter Glaskörper, welcher zwei Elektroden enthält. Zum einen besteht die Photokathode aus einer Metall- oder Legierungsschicht, die vom Licht bestrahlt werden kann und zum anderen wird bei der Anode ein Draht verwendet, sodass er nah an der Kathode vorbeiführen kann.

In der Abbildung 3 wird mit Hilfe der Gegenmethode die Energie des ausgelösten Elektronen untersucht. Die beiden Elektroden werden, wie in der Abbildung 3 zu sehen ist, über ein Potential U angelegt. Der Strom beginnt von der Kathode bis zur Anode an

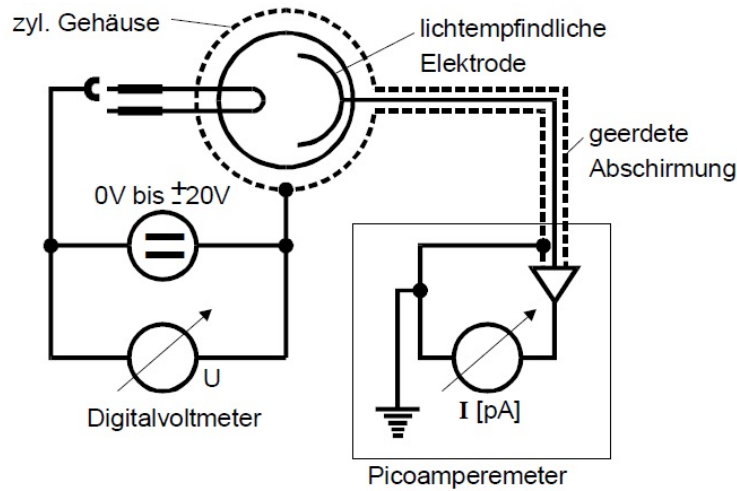


Abbildung 3: Elektrische Verbindung der Photozelle, [1, S. 5].

zu fließen. Es erreichen nur die Elektronen zur Anode, deren Energie größer ist als $e_0 U$. Der Strom verschwindet erst wenn:

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

gilt, wobei m_0 die Masse des Elektrons, e_0 die Elementarladung und v_{\max} die Geschwindigkeit der schnellsten Elektronen sind. Die Energie der schnellsten Elektronen lassen sich mit der Hilfe der Gleichungen 1 und 2 bestimmen und in der folgenden Form umschreiben:

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

Der Photostrom in Abhängigkeit von der Bremsspannung nimmt immer mehr ab, solange $U < U_g$ gilt. Der Verlauf ist in der Abbildung 4 zu sehen. Dies lässt sich dadurch

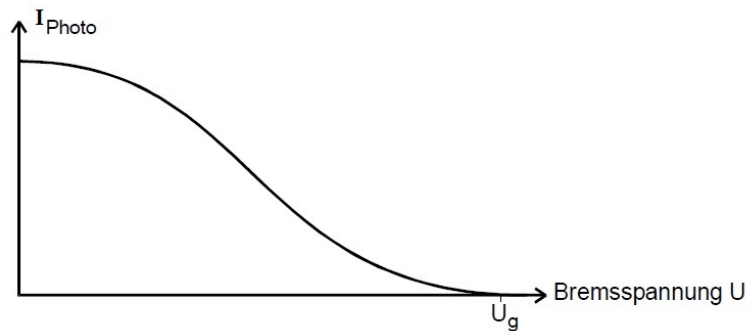


Abbildung 4: Verlauf des Photostroms in Abhängigkeit der Bremsspannung, [1, S. 6].

erklären, dass die Photoelektronen alle unterschiedliche Geschwindigkeiten zwischen 0 und $\frac{1}{2} m_0 v_{\max}^2$ besitzen, weil sie unterschiedliche Energien besitzen. Über diese Energie

gibt es die Fermi-Dirac-Statistik, die besagt, dass die Energie der Elektronen in einem Intervall von 0 bis ζ liegt, wobei ζ die Fermi-Energie ist und je nach Material mehrere eV betragen kann. Unter bestimmter Voraussetzungen ergibt sich ein parabolischer Zusammenhang zwischen dem Photostrom I_{ph} und Bremsspannung U :

$$I_{\text{ph}} \propto U^2.$$

Es gibt auch den Fall, dass der Photostrom nicht auftreten kann, wenn die Austrittsarbeit der Anode A_a höher ist als $h\nu$. Dann müssten die Elektronen gegen ein Gegenfeld anlaufen, um die Anode zu erreichen. Es wird erst dann ein Photostrom beobachtet, wenn ein Potential angelegt wird, sodass:

$$h\nu + e_0 U_b \geq A_a$$

gilt, wobei U_b ein beschleunigendes Potential ist.

4 Versuchsaufbau und Durchführung

Der gesamte Versuchsaufbau befindet sich in der Abbildung 5. Das Licht von der Kondensorlinse wird durch einen Spalt geleitet, mit einer Linse gebündelt und dann an einem Prisma gebrochen. Die Abbildungslinse muss so justiert werden, dass ein scharfes Bild entsteht. Mit Hilfe des Geradsichtprismas wird das Licht in seine Spektrallinien aufgespaltet, sodass sie zu unterscheiden sind. Dazu gibt es auch noch eine Mattscheibe, die vor die Photokathode gestellt werden kann, um die schwerer sichtbaren Spektrallinien zu beobachten.

Zuerst wird die Gegenfeldmethode untersucht, um die Energie des ausgelösten Elektronen zu bestimmen. Für diese Methode werden 5 verschiedene Spektrallinien gebraucht. Es werden jeweils 10 Messwerte für die Spannung U und den Strom I notiert, wobei mit abnehmender Spannung der Strom zunimmt. Zu der anderen zweiten Messung wird eine Wellenlänge von ca. $\lambda = 579,1 \text{ nm}$ benötigt, um den Photostrom in Abhängigkeit der Spannung zwischen der Anode und Kathode zu messen. Dafür muss die Spannung zwischen -20 V und 20 V hochgeregelt werden. Zwischen den Bereich 1 V und 2 V werden die Messwerte in zweier Schritte notiert. Insgesamt werden aber mehr als 30 Messwerte notiert.

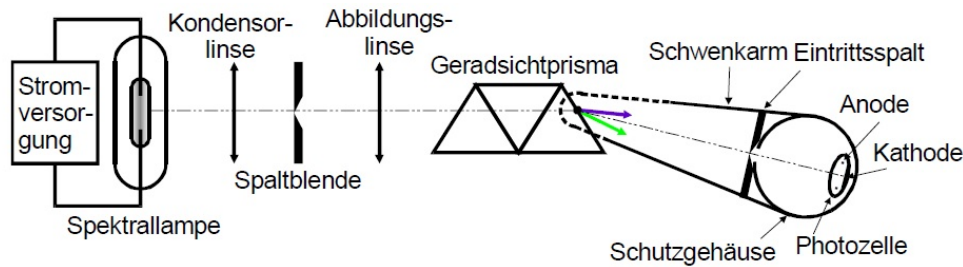


Abbildung 5: Genereller Versuchsaufbau zur Untersuchung des Photoeffektes, [1, S. 4].

5 Auswertung

5.1 Bestimmung der Gegenspannungen

In den Tabellen 1 bis 5 sind die eingestellten Ströme I und die dabei gemessenen Spannungen U der fünf verschiedenen Linien zu finden. Die jeweiligen Grenzspannungen U_g können berechnet werden, indem die Wurzeln der Photoströme gegen die Spannungen aufgetragen werden. Durch die Punkte wird mithilfe von Scipy curve-fit eine Ausgleichsgerade gelegt. Dabei werden die Steigung a und der Y-Achsenabschnitt b ausgegeben. Über die allgemeine Geradengleichung kann dann der Schnitt mit der X-Achse, was der Grenzspannung U_g entspricht, bestimmt werden:

$$\begin{aligned}
 -a \cdot x + b &= 0 \\
 \Leftrightarrow x &= \frac{b}{a} = U_g
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

Tabelle 1: Messwerte der gelben Linie.

U / V	$I / 10^{-9} \text{ A}$	$\sqrt{I} / 10^{-5} \text{ A}^{\frac{1}{2}}$
0,49	0,01	0,32
0,46	0,02	0,45
0,43	0,03	0,55
0,41	0,04	0,63
0,39	0,05	0,71
0,37	0,06	0,77
0,36	0,07	0,84
0,35	0,08	0,89
0,34	0,09	0,95
0,33	0,1	1

$$\begin{aligned}
 \text{Orangene Linie: } a &= (4,14 \pm 0,13) \cdot 10^{-5} \frac{\text{A}^{\frac{1}{2}}}{\text{V}} \\
 b &= (2,34 \pm 0,05) \cdot 10^{-5} \text{ A}^{\frac{1}{2}}
 \end{aligned}$$

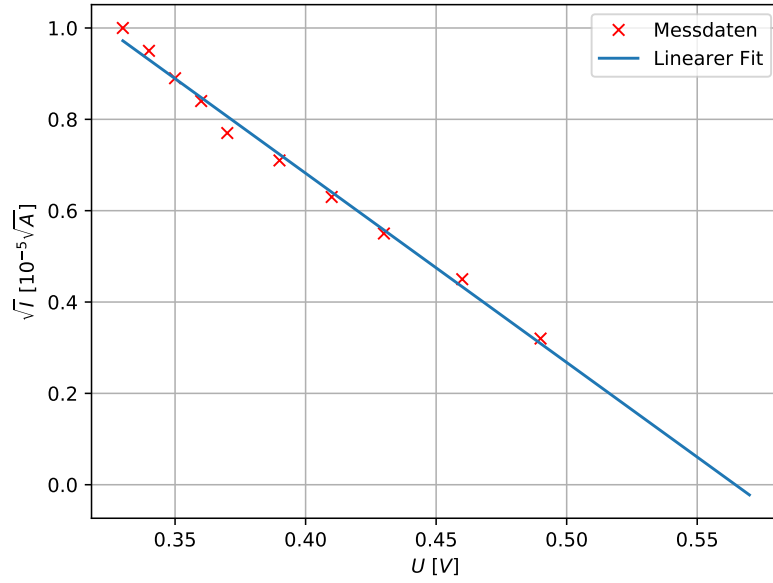


Abbildung 6: Ausgleichsgerade zur Bestimmung der Grenzspannung der gelben Linie.

Da es sich bei a und b um fehlerbehaftete Größen handelt, muss der Fehlers von U_g über die Gaußsche Fehlerfortpflanzung berechnet werden.

$$\begin{aligned}
 \Delta U_g &= \sqrt{\left(\frac{\delta U_g}{\delta b}\right)^2 \cdot (\Delta b)^2 + \left(\frac{\delta U_g}{\delta a}\right)^2 \cdot (\Delta a)^2} \\
 &= \sqrt{\frac{1}{a^2} \cdot (\Delta b)^2 + \frac{b^2}{a^4} \cdot (\Delta a)^2} \\
 &= \sqrt{\frac{(\Delta b)^2 \cdot a^2 + b^2 \cdot (\Delta a)^2}{a^4}}
 \end{aligned} \tag{5}$$

Werden a und b sowie deren Fehlerwerte in die Gleichungen 4 und 5 eingesetzt, so ergibt sich für die gesuchte Grenzspannung der orangenen Linie:

$$U_{g,\text{gelb}} = (0,57 \pm 0,02) \text{ V}$$

Analog können so auch die Grenzspannungen der anderen Linien berechnet werden.

Tabelle 2: Messwerte der grünen Linie.

U/V	$I/10^{-9}\text{ A}$	$\sqrt{I}/10^{-5}\text{ A}^{\frac{1}{2}}$
0,64	0,01	0,32
0,61	0,02	0,45
0,59	0,03	0,55
0,57	0,04	0,63
0,55	0,05	0,71
0,54	0,06	0,77
0,52	0,07	0,84
0,51	0,08	0,89
0,50	0,09	0,95
0,49	0,1	1

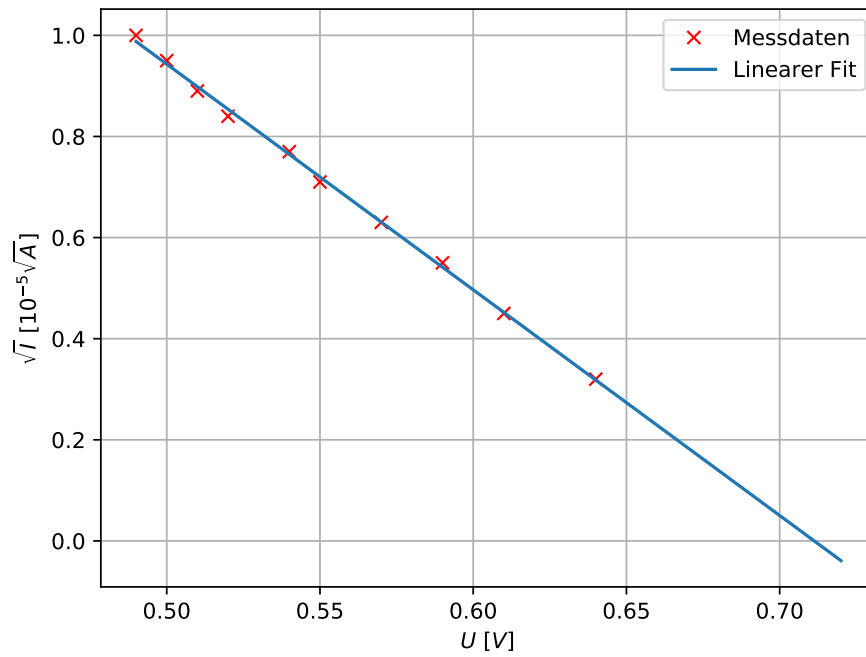


Abbildung 7: Ausgleichsgerade zur Bestimmung der Grenzspannung der grünen Linie.

$$\begin{aligned}
 \text{Grüne Linie: } a &= (4,46 \pm 0,06) \cdot 10^{-5} \frac{\text{A}^{\frac{1}{2}}}{\text{V}} \\
 b &= (3,18 \pm 0,03) \cdot 10^{-5} \text{ A}^{\frac{1}{2}} \\
 \Rightarrow U_{\text{g,grün}} &= (0,7130 \pm 0,0117) \text{ V}
 \end{aligned}$$

Tabelle 3: Messwerte der cyanen Linie.

U/V	$I/10^{-9}\text{ A}$	$\sqrt{I}/10^{-5}\text{ A}^{\frac{1}{2}}$
0,54	0,01	0,32
0,39	0,02	0,45
0,23	0,03	0,55
0,08	0,04	0,63
0,11	0,05	0,71

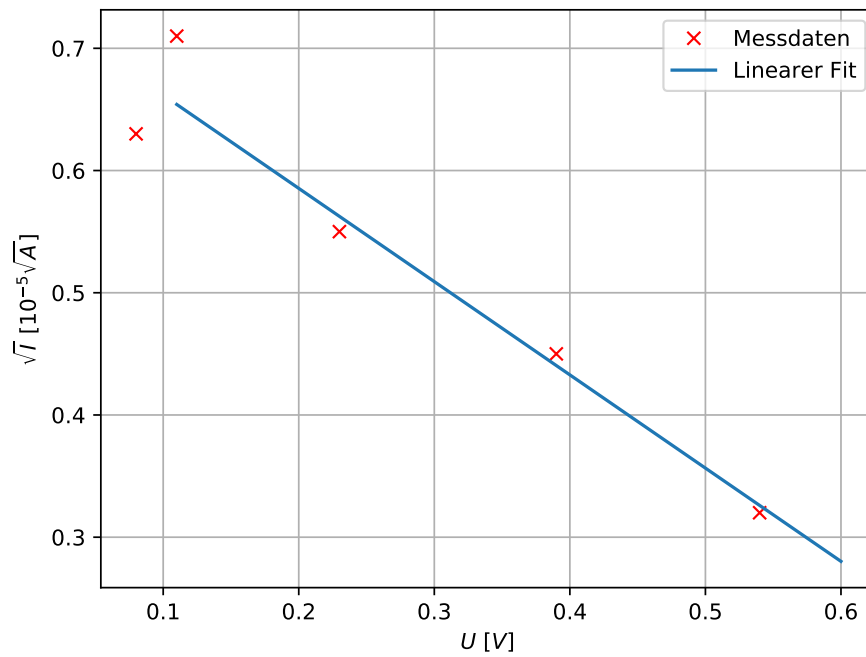


Abbildung 8: Ausgleichsgerade zur Bestimmung der Grenzspannung der cyanen Linie.

$$\begin{aligned}
 \text{Cyane Linie: } a &= (0,763 \pm 0,112) \cdot 10^{-5} \frac{\text{A}^{\frac{1}{2}}}{\text{V}} \\
 b &= (0,74 \pm 0,04) \cdot 10^{-5} \text{ A}^{\frac{1}{2}} \\
 \Rightarrow U_{\text{g,cyan}} &= (0,96 \pm 0,15) \text{ V}
 \end{aligned}$$

Tabelle 4: Messwerte der ersten violetten Linie.

U/V	$I/10^{-9}\text{ A}$	$\sqrt{I}/10^{-5}\text{ A}^{\frac{1}{2}}$
1,16	0,01	0,32
1,12	0,02	0,45
1,08	0,03	0,55
1,05	0,04	0,63
1,03	0,05	0,71
1,01	0,06	0,77
0,98	0,07	0,84
0,97	0,08	0,89
0,96	0,09	0,95
0,93	0,1	1

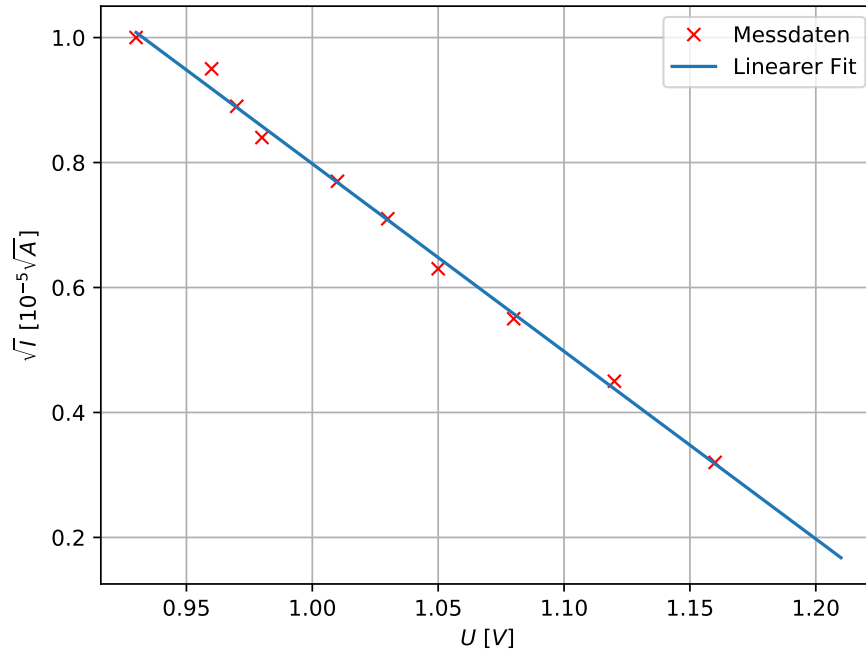


Abbildung 9: Ausgleichsgerade zur Bestimmung der Grenzspannung der ersten violetten Linie.

$$\text{Erste violette Linie: } a = (3,00 \pm 0,07) \cdot 10^{-5} \frac{\text{A}^{\frac{1}{2}}}{\text{V}}$$

$$b = (3,80 \pm 0,07) \cdot 10^{-5} \text{ A}^{\frac{1}{2}}$$

$$\Rightarrow U_{\text{g,violett1}} = (1,27 \pm 0,04) \text{ V}$$

Tabelle 5: Messwerte der zweiten violetten Linie.

U/V	$I/10^{-9}\text{ A}$	$\sqrt{I}/10^{-5}\text{ A}^{\frac{1}{2}}$
1,33	0,01	0,32
1,27	0,02	0,45
1,22	0,03	0,55
1,19	0,04	0,63
1,15	0,05	0,71
1,13	0,06	0,77
1,10	0,07	0,84
1,08	0,08	0,89
1,06	0,09	0,95
1,03	0,1	1

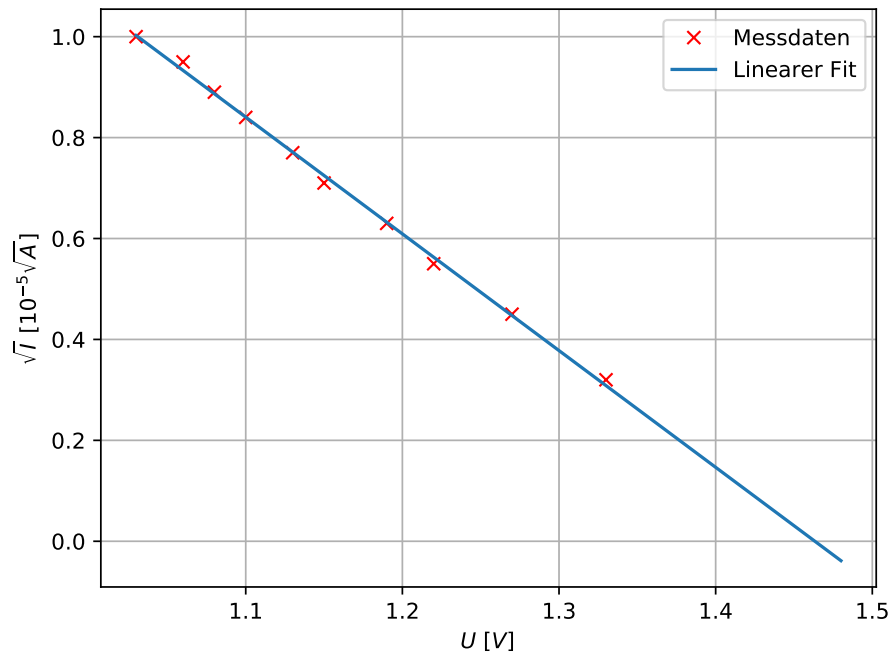


Abbildung 10: Ausgleichsgerade zur Bestimmung der Grenzspannung der zweiten violetten Linie.

$$\text{Erste violette Linie: } a = (2,31 \pm 0,04) \cdot 10^{-5} \frac{\text{A}^{\frac{1}{2}}}{\text{V}}$$

$$b = (3,39 \pm 0,04) \cdot 10^{-5} \text{ A}^{\frac{1}{2}}$$

$$\Rightarrow U_{\text{g,violett1}} = (1,47 \pm 0,03) \text{ V}$$

5.2 Bestimmung des Verhältnisses $\frac{h}{e_0}$ und der Austrittsarbeit A_K

Um das Verhältnis $\frac{h}{e_0}$ und die Austrittsarbeit A_K zu bestimmen, müssen die berechneten Gegenspannungen U_g gegen die Lichtfrequenzen ν aufgetragen werden. Zu finden sind diese in Tabelle 6. Die Wellenlängen werden aus den Versuchsunterlagen entnommen. Die Umrechnung von Wellenlänge in Frequenz geschieht über die Lichtgeschwindigkeit $c = 299792458 \frac{\text{m}}{\text{s}}$:

$$\nu = \frac{c}{\lambda}. \quad (6)$$

Tabelle 6: Messwerte zur Bestimmung von $\frac{h}{e_0}$ und A_K .

U_g / V	$\lambda / 10^{-9} \text{ m}$	$\nu / 10^{12} \text{ Hz}$
0,57 \pm 0,02	557,0	538,23
0,7130 \pm 0,0117	546,0	549,07
0,96 \pm 0,15	491,6	609,83
1,27 \pm 0,04	435,8	687,91
1,47 \pm 0,03	407,8	735,15

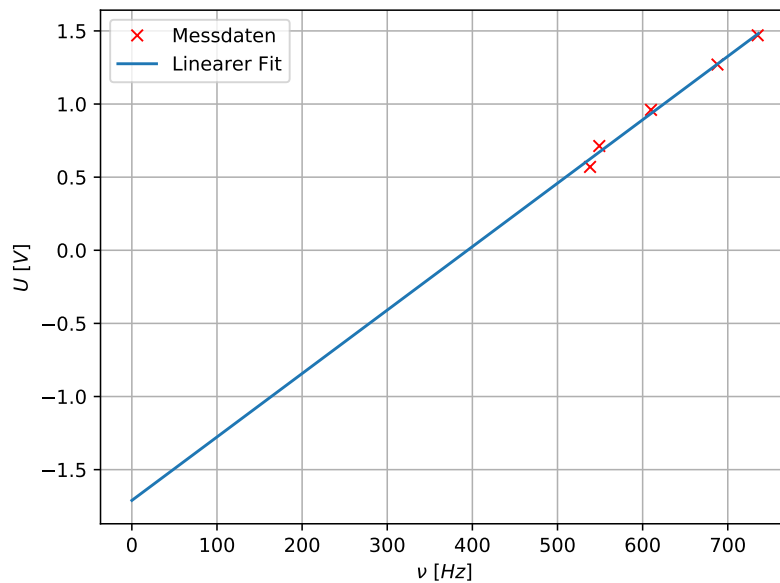


Abbildung 11: Ausgleichsgerade zur Bestimmung des Verhältnisses $\frac{h}{e_0}$ und der Austrittsarbeit A_K .

Nach Formel 3 ist das Verhältnis $\frac{h}{e_0}$ gleich der Steigung der Ausgleichsgeraden, die Austrittsarbeit A_K entspricht dem Y-Achsenabschnitt. Mithilfe von Scipy curve-fit werden diese zu

$$\frac{h}{e_0} = (4,3 \pm 0,2) \cdot 10^{-15} \frac{\text{Js}}{\text{C}}$$

$$A_K = (1,71 \pm 0,15) \text{ eV}$$

bestimmt.

5.3 Untersuchung des Photostroms bei gelbem Licht der Wellenlänge

Zuletzt wird der Photostrom von gelbem Licht in Abhängigkeit von der Spannung, welche in einem Intervall von -20 V bis 20 V eingestellt werden soll, untersucht. Die Messwerte sind in Tabelle 7 zu finden. Aufgetragen sind sie in Abbildung 12.

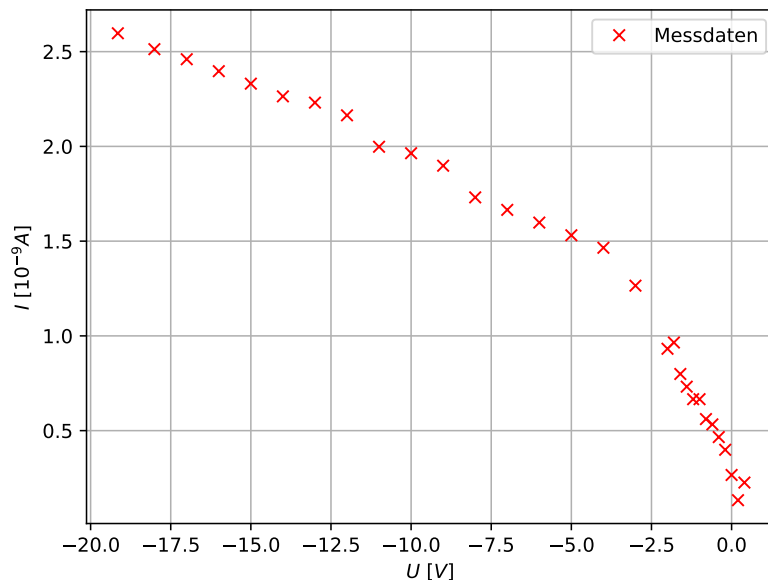


Abbildung 12: Verlauf des Photostroms in Abhängigkeit der Spannung bei orangenen Licht.

Wie in Abbildung 12 vage zu erkennen ist, geht der Photostrom für hohe Beschleunigungsspannungen gegen einen Sättigungswert. Grund dafür ist, dass es auf der Kathode nur endlich viele Elektronen gibt, die heraustreten können. Würden all diese durch die Beschleunigungsspannung zur Anode wandern, würde sich ein Sättigungswert einstellen, der von der Anzahl der Elektronen abhängt, welche wiederum auch mit der Lichtintensität zusammenhängt. In der Praxis wird dieser Sättigungswert allerdings nur asymptotisch erreicht, da wegen der kleineren Fläche der Anode nicht alle Elektronen auftreffen. Hier

Tabelle 7: Messwerte zur Untersuchung des Photostroms bei gelbem Licht.

U/V	$I/10^{-9}\text{ A}$
−19,15	2,597
−18,01	2,513
−17,00	2,460
−16,00	2,397
−15,00	2,331
−14,00	2,264
−13,00	2,231
−12,00	2,164
−11,00	1,998
−10,00	1,964
−9,00	1,898
−8,00	1,731
−7,00	1,665
−6,00	1,598
−5,00	1,531
−4,00	1,465
−3,00	1,265
−2,00	0,932
−1,80	0,965
−1,60	0,799
−1,40	0,732
−1,20	0,666
−1,00	0,666
−0,80	0,561
−0,60	0,533
−0,40	0,466
−0,20	0,399
0,00	0,266
0,2	0,133
0,4	0,226

könnte also beispielsweise eine größere Anode eingesetzt werden, damit mehr Elektronen zum Photostrom beitragen können. Es fällt ebenso auf, dass der Photostrom schon für Spannungen fällt, die kleiner sind als die Grenzspannung. Dies lässt sich mit der Fermi-Dirac-Verteilung erklären. Die Elektronen in der Kathode besitzen unterschiedliche Energien, woraus folgt, dass es auch bei einer einheitlichen Lichteinstrahlung eine Energieverteilung der ausgetretenen Elektronen gibt. Somit bricht der Photostrom mit einer bestimmten Grenzspannung nicht abrupt ab, weil es auch energiereichere Elektronen gibt, die eine höhere Bremsspannungen benötigen und ebenso gibt es energieärmere Elektronen, die schon bei geringen Bremsspannungen nicht die Anode erreichen.

Beim Photoeffekt ist es möglich, einen negativen Photostrom zu erreichen. Da das Material der Kathode schon bei 20°C verdampft und sich auf der Anode absetzt, kann auch dort der Photoeffekt stattfinden. Auf diese Weise würden bei einer angelegten Bremsspannung Elektronen aus der Anode zur Kathode wandern und so einen negativen Photostrom bewirken. Da die Anzahl der Elektronen in diesem Fall aber geringer ist, wird der Sättigungswert schneller erreicht. Die Tatsache, dass schon energiearmes Licht einen solchen Photostrom auslöst spricht dafür, dass die Anode eine geringe Austrittsarbeit besitzt, sodass die Elektronen leicht austreten können.

6 Diskussion

Im ersten Versuchsteil wurden folgende Grenzspannungen ermittelt:

$$\begin{aligned}U_{g,\text{gelb}} &= (0,57 \pm 0,02) \text{ V} \\U_{g,\text{grün}} &= (0,7130 \pm 0,0117) \text{ V} \\U_{g,\text{cyan}} &= (0,96 \pm 0,15) \text{ V} \\U_{g,\text{violett1}} &= (1,27 \pm 0,04) \text{ V} \\U_{g,\text{violett2}} &= (1,47 \pm 0,03) \text{ V}\end{aligned}$$

Anhand der Fehlerwerte lässt sich erkennen, dass bis auf die cyane Linie alle Ergebnisse recht genau sind. Zu sehen ist dies auch in den Plots, bei denen die Messwerte nur in wenigen Fällen etwas stärker von der Ausgleichsgerade abweichen. Die ungenaue Bestimmung der Grenzspannung der cyanen Linie hängt damit zusammen, dass aus messtechnischen Gründen weniger Werte zur Verfügung standen als für die anderen Linien.

Im zweiten Versuchsteil wurden die Grenzspannungen gegen die Frequenzen aufgetragen. Trotz der wenigen Messdaten ist kann die lineare Regression als genau angenommen werden, da sich die Werte nah an der Ausgleichsgerade befinden. Die Austrittsarbeit A_K und das Verhältnis $\frac{h}{e_0}$ betragen

$$\begin{aligned}A_K &= (1,71 \pm 0,15) \text{ eV} \\ \frac{h}{e_0} &= (4,3 \pm 0,2) \cdot 10^{-15} \frac{\text{Js}}{\text{C}}.\end{aligned}$$

Auch hier ist zu sehen, dass die Fehler klein sind. Ein Vergleichswert für $\frac{h}{e_0}$ ergibt sich aus den Literaturwerten für h und e_0 [2]:

$$\begin{aligned} h &= 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \\ e_0 &= 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C} \\ \Rightarrow \frac{h}{e_{0 \text{ Literatur}}} &= 4,136 \cdot 10^{-15} \frac{\text{Js}}{\text{C}}. \end{aligned}$$

Der im Versuch ermittelte Wert von $\frac{h}{e_0}$ weicht somit um 3,9% von dem Literaturwert ab, was eine kleine Abweichung ist. Somit ist diese Messung aussagekräftig.

Der letzte Versuchsteil zeigt die schlechtesten Ergebnisse vor. Dass der Photostrom einen Sättigungswert erreicht ist nur ansatzweise zu erkennen, weshalb die verschiedenen Eigenschaften des Photoeffekts, die gezeigt werden sollen, nicht sehr deutlich zum Vorschein kommen. Zudem ist der Messbereich kleiner als vorgegeben, da messtechnisch keine weiteren Messungen ab 0,4 V möglich waren. Es ist anzunehmen, dass mit genaueren Versuchs- und Messgeräten bessere Ergebnisse erzielt werden können, die die Vorgänge beim Photoeffekt anschaulicher machen.

Literatur

- [1] TU Dortmund. *Versuch 500: Der Photoeffekt*. 2018. URL: <http://129.217.224.2/HOMEPAGE/MEDPHYS/BACHELOR/AP/SKRIPT/V500.pdf> (besucht am 21.04.2018).
- [2] National Institute of Standards und Technology. *Fundamental Physical Constants*. URL: <https://physics.nist.gov/cuu/Constants/Table/allascii.txt> (besucht am 23.04.2018).