

Durchführung: 08.05.2018

Abgabe: 15.05.2018

Korrektur: 23.05.2018

PRAKTIKUMSPROTOKOLL V500

DER PHOTOEFFEKT

Carolin Harkort¹,
Jacqueline Schlingmann²

¹carolin.harkort@tu-dortmund.de

²jacqueline.schlingmann@tu-dortmund.de

1 Theorie

Ziel des Versuchs ist die Bestimmung des Verhältnisses zwischen h und e_0 . Der Photoeffekt ist ein Beweis für den Teilchencharakter von Licht.

1.1 allgemeiner Photoeffekt

Ein prinzipieller Versuchsaufbau ist in Abbildung 1 zu sehen.

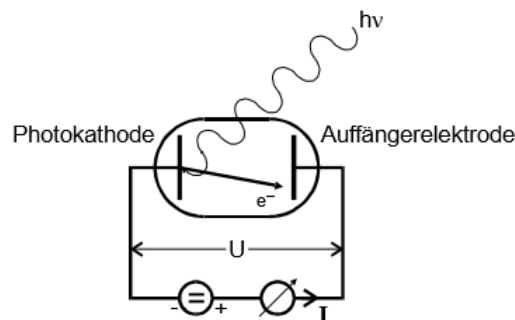


Abbildung 1: Prinzipielle Anordnung zur Untersuchung des Photoeffektes
[1]

Die Photokathode wird mit Licht bestrahlt und Elektronen treten aus. Dabei kann ein Photon höchstens ein Elektron auslösen.

Aus der prinzipiellen Untersuchung des Photoeffekts ergibt sich, dass die Zahl der ausgelösten Elektronen proportional zur Lichtintensität ist und dass die Energie der Photoelektronen proportional zur Lichtfrequenz und unabhängig von der Lichtintensität ist. Außerdem existiert eine Grenzfrequenz. Unterhalb dieser Frequenz kann der Photoeffekt nicht ausgelöst werden. Diese Ergebnisse lassen sich nicht mit dem Wellenbild erklären. Darum wird nun vom Teilchenmodell ausgegangen und dass die Energie von Photonen, den Lichtquanten, transportiert wird. Aus dieser Annahme folgt nun, dass ein Photon die Energie $h\nu$ besitzt. Die Energie eines Photons, die beim Verlassen des Metalls momentan auf ein Elektron übertragen wird teilt sich in die Austrittsarbeit A_k und die kinetische Energie auf.

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

Damit der Photoeffekt auftritt, muss die Energie größer als die Austrittsarbeit sein.

1.2 experimentelle Untersuchung des Photoeffektes mit Photozelle

In Abbildung (2) ist eine Photokathode zu sehen, die im durchzuführenden Versuch verwendet wird. In ihr findet die Auslösung der Elektronen statt.

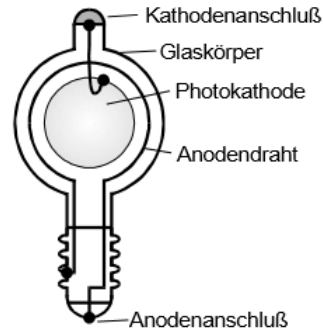


Abbildung 2: Die Photozelle
[1]

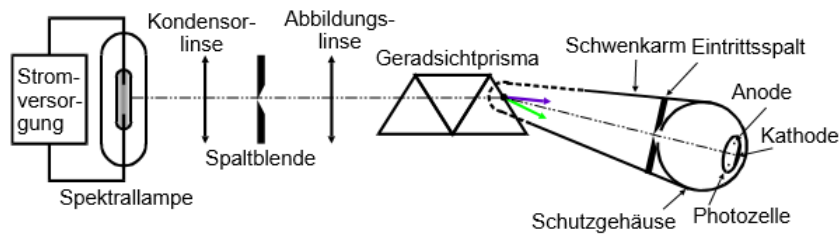


Abbildung 3: Versuchsaufbau
[1]

Der hier verwendete Versuchsaufbau ist in Abbildung (3) zu sehen. Mit Hilfe dieser Apparatur wird das Licht in seine einzelnen Spektrallinien aufgeteilt. Die einzelnen Farben besitzen unterschiedliche Wellenlängen. Durch den Schwenkarm ist es möglich die unterschiedlichen Farben, also das monochromatische Licht, einzeln zu messen. An die Strecke zwischen Kathode und Anode wird eine Spannung U angelegt. Dadurch wird ein elektronen-abbremsendes Feld erzeugt. Der zu messende Strom verschwindet, wenn gilt:

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

Dabei ist e_0 die Elementarladung, m_0 die Ruhemasse, v_{\max} die Geschwindigkeit der schnellsten Elektronen und U_g eine Gegenspannung und Grenzspannung. Daraus folgt also der Zusammenhang

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

Ist die Bremsspannung U gleich der Grenzspannung U_g verschwindet der Photostrom nicht schlagartig. Er sinkt schon für Werte, die größer sind als U_g . Das liegt daran, dass

die Photoelektronen nicht monoenergetisch sind. Sie besitzen eine Energieverteilung von 0 bis $(1/2)mv_{\max}^2$.

Über diese Energieverteilung macht die Fermi-Dirac-Statistik eine Aussage. Laut dieser ist es möglich, dass Elektronen austreten, deren Energie größer ist als $h\nu - A_k$.

Nicht alle Photoelektronen erreichen die Anode nach verlassen der Kathode. Das liegt zum einen daran, dass die Oberfläche viel zu klein ist. Zum anderen an der hohen Austrittsarbeit A_A des Anodenmetalls. Es tritt kein Photostrom auf wenn $h\nu < A_A$.

In Abbildung 4 ist der Photostrom in Abhängigkeit von der Bremspannung aufgetragen. Um den Punkt U_g wird die Funktion quadratisch genähert, sodass unter bestimmten

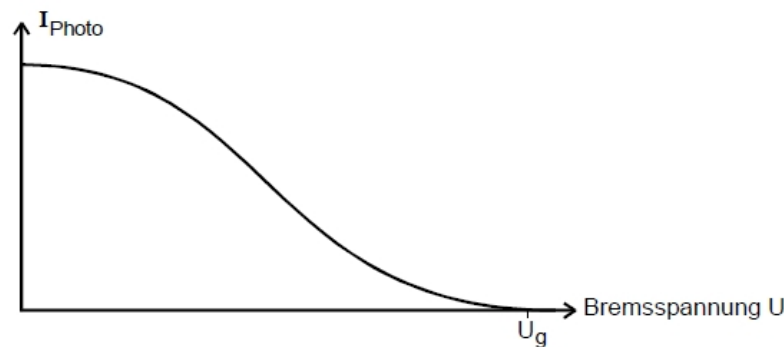


Abbildung 4: Photostrom in Abhängigkeit von der Bremspannung in einer mit monochromatischem Licht bestrahlte Photozelle

[1]

Voraussetzungen ein parabolischer Zusammenhang zwischen dem Photostrom und der Bremspannung besteht.

2 Durchführung

Zunächst werden die Aufbauten so eingestellt, dass die einzelnen Farben den Schlitz, der zur Photozelle führt, komplett überdecken.

Im ersten Teil des Versuchs wird für unterschiedliche Spannungen und Farben der Photostrom gemessen. Die Spannung wird im Bereich von -2V bis +2V gewählt. Es werden die Farben orange, grün, blau, grün-blau und zwei lila Farben für zwei unterschiedliche Wellenlängen gemessen.

Die Messung wird für zehn unterschiedliche Spannungen durchgeführt. Die ungefähren Wellenlängen sind in tabelle 1 zu finden.

Im zweiten Teil des Versuchs wird das gelbe Licht eingestellt, bei ca. 578nm. Es wird wieder der Photostrom gemessen. Diesmal wird die Beschleunigungsspannung zwischen -5 bis +20V eingestellt.

Tabelle 1: Berechnete Frequenzen

Farbe	Wellenlänge in nm
orange	587,6
grün	501,6 - 504,8
grün-blau	492,2
blau	471,3
lila	447,1
lila	438,8

3 Auswertung

3.1 Bestimmung der Gegenspannung

Zur Bestimmung der Gegenspannung U_G der einzelnen Spektrallinien wird die Wurzel des Photostroms \sqrt{I} gegen die Brems- bzw. Beschleunigungsspannung U aufgetragen. Dafür werden fünf unterschiedliche Wellenlängen ausgewählt. Die Messergebnisse für die unterschiedlichen Farben sind aus Tabelle ?? zu entnehmen.

U / V	$I_{\text{orange}} / \text{nA}$	$I_{\text{grün}} / \text{nA}$	$I_{\text{blaugrün}} / \text{nA}$	$I_{\text{lila}} / \text{nA}$	$I_{\text{dunkellila}} / \text{nA}$
-0,4	0,030	0,165	0,026	1,05	0,79
-0,2	0,155	0,450	0,048	1,40	0,90
-0,1	0,235	0,600	0,056	1,60	1,00
0,1	0,340	0,800	0,072	2,00	1,25
0,2	0,400	0,900	0,089	2,20	1,30
0,4	0,480	1,050	0,092	2,40	1,50
0,6	0,560	1,200	0,105	2,80	1,75
0,8	0,620	1,350	0,115	3,00	1,90
1,0	0,680	1,500	0,125	3,40	2,10
1,2	0,740	1,600	0,135	3,60	2,25

Tabelle 2: Aufgenommene Spannungen und Stromstärken

Für die Berechnung der Gegenspannungen sind allerdings nur die Werte mit einem negativen Vorzeichen relevant, da nur diese bei einer anliegenden Bremsspannung aufgenommen wurden.

Die daraus resultierenden Diagramme sind in den Abbildungen 5 bis 9 zu sehen.

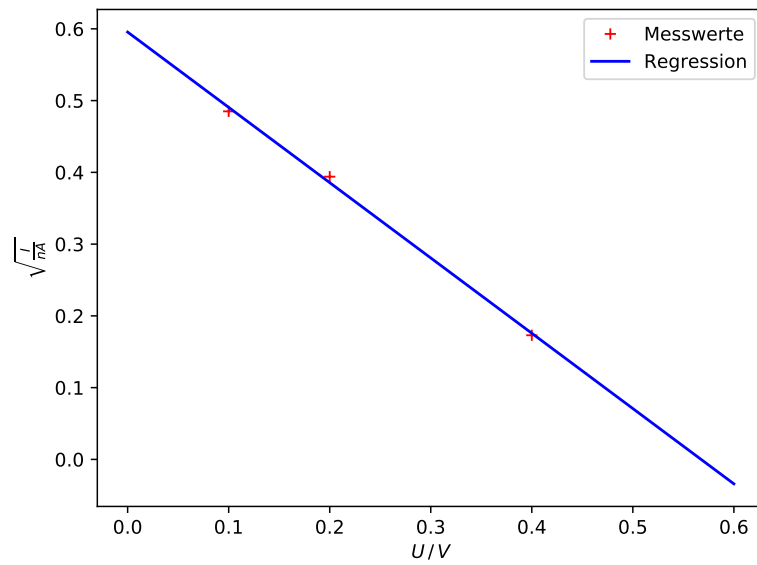


Abbildung 5: Gemessene Stromstärke in Abhängigkeit der angelegten Spannung für die orangene Spektralfarbe

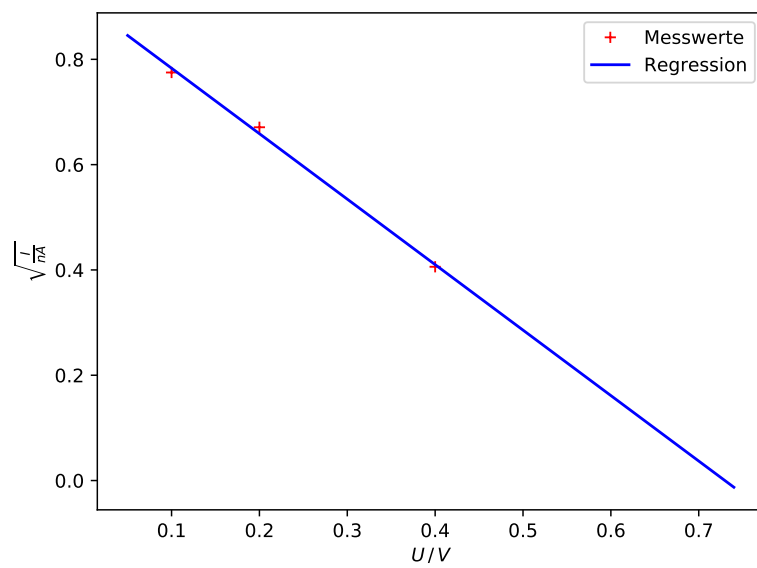


Abbildung 6: Gemessene Stromstärke in Abhängigkeit der angelegten Spannung für die grüne Spektralfarbe ($\lambda = 546 \text{ nm}$)

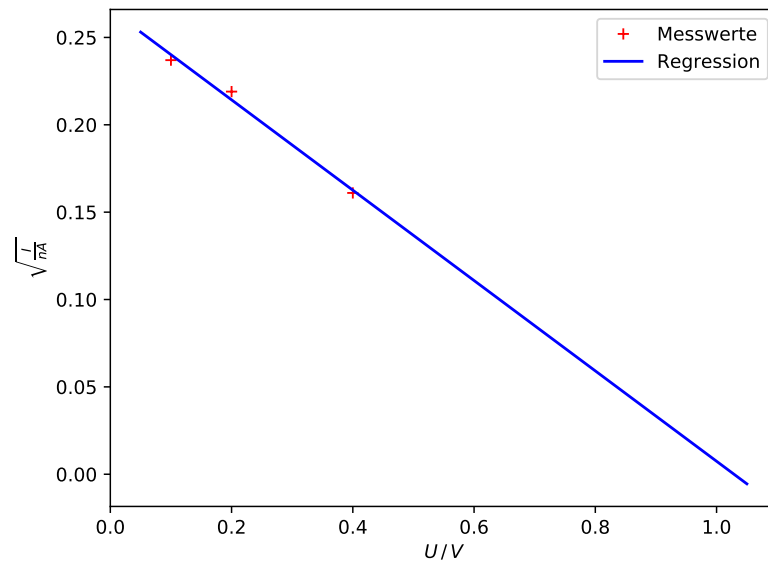


Abbildung 7: Gemessene Stromstärke in Abhängigkeit der angelegten Spannung für die blaugrüne Spektralfarbe ($\lambda = 492 \text{ nm}$)

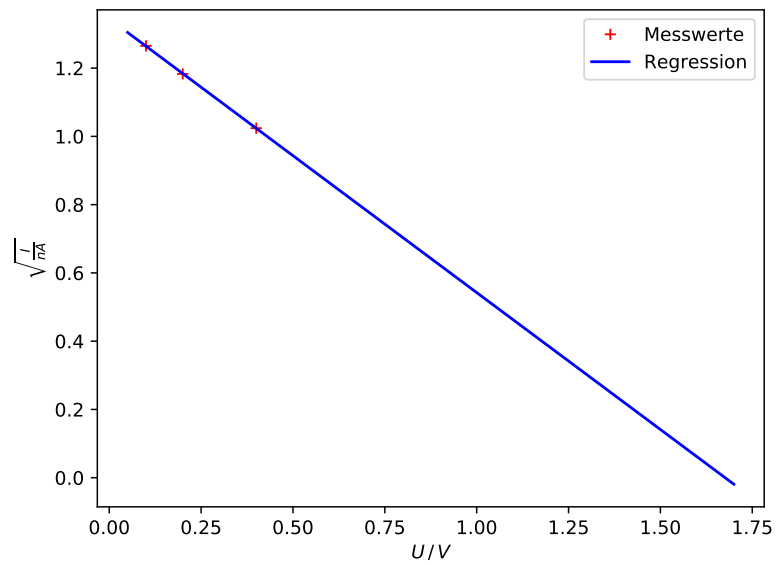


Abbildung 8: Gemessene Stromstärke in Abhängigkeit der angelegten Spannung für die lila Spektralfarbe ($\lambda = 447 \text{ nm}$)

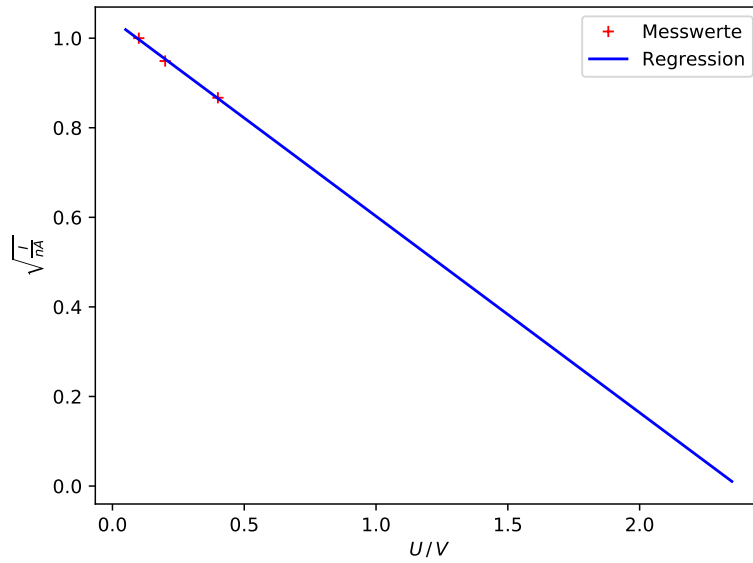


Abbildung 9: Gemessene Stromstärke in Abhängigkeit der angelegten Spannung für die lila Spektralfarbe ($\lambda = 438 \text{ nm}$)

Durch die linearen Regressionen der Form

$$I(U) = a \cdot U + b \quad (4)$$

für die einzelnen Spektralfarben ergeben sich die Parameterwerte a , b und die daraus resultierende Gegenspannung. Dabei ist diese genau der Schnittpunkt mit der x-Achse. Über den Zusammenhang

$$U_G = -\frac{b}{a} \quad (5)$$

wird die Gegenspannung berechnet.

Die Parameterwerte a , b und die Gegenspannungen sind in Tabelle 3 dargestellt.

Tabelle 3: Parameterwerte und berechnete Gegenspannung für die Spektralfarben

λ / nm	a / nA	b / nA	U_G / V
587	$1,050 \pm 0,050$	$0,5950 \pm 0,0130$	$0,5667 \pm 0,0297$
546	$1,240 \pm 0,070$	$0,9070 \pm 0,0190$	$0,7314 \pm 0,1587$
492	$0,259 \pm 0,027$	$0,2660 \pm 0,0070$	$1,0270 \pm 0,1104$
447	$0,802 \pm 0,006$	$1,3445 \pm 0,0016$	$1,6764 \pm 0,0127$
438	$0,439 \pm 0,025$	$1,0410 \pm 0,0070$	$2,3710 \pm 0,1340$

Der Fehler der Gegenspannung lässt sich mit der Gauß'schen Fehlerfortpflanzung

$$\Delta U_G = \sqrt{\frac{b^2}{a^4}(\Delta a)^2 + \frac{1}{a^2}(\Delta b)^2} \quad (6)$$

berechnen.

3.2 Bestimmung des Quotienten $\frac{h}{e_0}$ und der Austrittsarbeit

Um die Austrittsarbeit A_k und das Verhältnis $\frac{h}{e_0}$ zu bestimmen, wird zuerst die Frequenzen ν der Spektralfarben bestimmt. Diese berechnen sich durch

$$\nu = \frac{c}{\lambda}. \quad (7)$$

Dabei ist c die Lichtgeschwindigkeit und λ die Wellenlänge der jeweiligen Spektralfarbe. In Tabelle 4 sind die berechneten Frequenzen zu sehen und in Abbildung 10 die Gegenspannungen der unterschiedlichen Lichtfrequenzen.

Tabelle 4: Berechnete Frequenzen

λ / nm	$\nu / 10^{14} \text{ Hz}$	U_G / V
587	5,11	0,5667
546	5,49	0,7314
492	6,10	1,0270
447	6,71	1,6764
438	6,85	2,3710

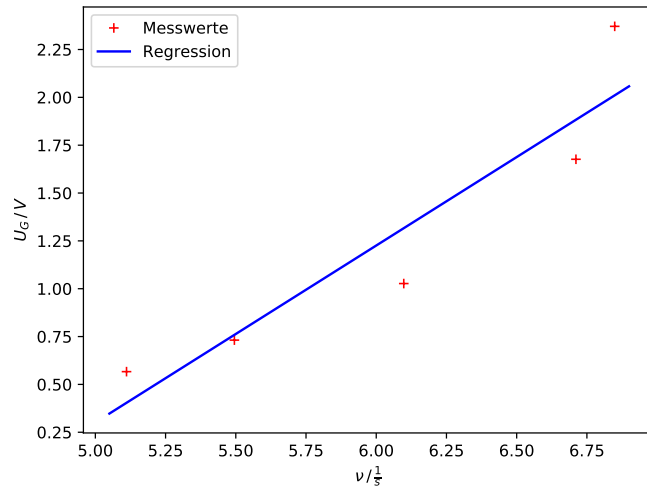


Abbildung 10: Gegenspannung der verschiedenen Lichtfrequenzen

Durch die lineare Ausgleichsgerade der Form $U_G(\nu) = a\nu + b$ ergeben sich für die beiden Parameter a und b folgende Werte

$$a = (6,8 \pm 1,1) \cdot 10^{-15} \text{ Vs}$$

$$b = -(3,0 \pm 0,6) \text{ V}$$

Hierbei wurde die Frequenz für die dunkellilane Spektralfarbe $\lambda = 438 \text{ nm}$ aus der linearen Regression herausgenommen. Bei dieser ist der berechnete Wert für die Ausgangsspannung U_G sehr groß, was zu einer größeren Steigung der Geraden führt und somit zu einer größeren prozentualen Abweichung.

Die Steigung der Geraden entspricht dem Quotienten des planckschen Wirkumsquantums h und der Elementarladung e_0 . Daraus ergibt sich der Zusammenhang

$$a = \frac{h}{e_0} = (6,8 \pm 1,1) \cdot 10^{-15} \text{ Vs}.$$

Die Austrittsarbeit beträgt dann

$$A_k = -b = (3,0 \pm 0,6) \text{ eV}.$$

3.3 Messung für die gelbe Spektralfarbe $\lambda=578\text{ nm}$

Im letzten Teil des Versuchs wird für gelbes Licht der Wellenlänge $\lambda=578\text{ nm}$ die Spannung im Verhältnis zum Photostrom gemessen. Die Messwerte sind in Tabelle 5 zu sehen.

Tabelle 5: Messung für die gelbe Spektralfarbe ($\lambda= 578\text{ nm}$)

U/V	I/nA
-0,5	0,008
-0,4	0,034
-0,3	0,085
-0,2	0,185
-0,1	0,265
0,1	0,380
0,5	0,560
1,0	0,760
2,0	1,250
3,0	1,750
4,0	2,050
5,0	2,200
6,0	2,350
7,0	2,500
8,0	2,700
9,0	2,800
10,0	3,000
11,0	3,000
12,0	3,200
14,0	3,200
16,0	3,400
19,0	3,600

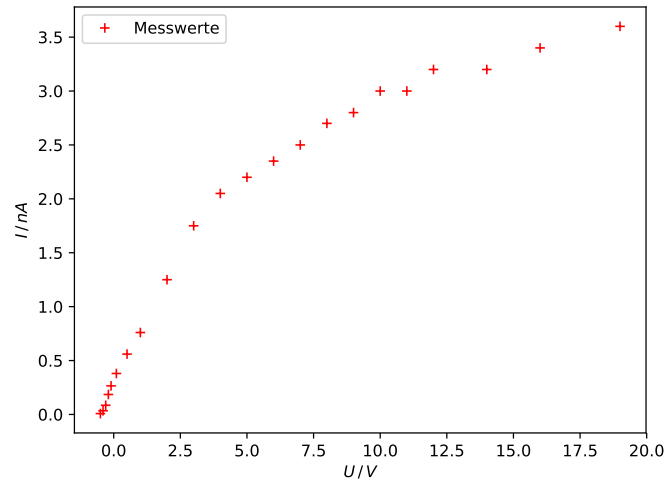


Abbildung 11: Gemessene Stromstärke in Abhängigkeit der angelegten Spannung für die gelbe Spektralfarbe

In Abbildung 11 ist der Kurvenverlauf des Photostroms in Abhängigkeit der Spannung für $\lambda=578\text{ nm}$ zu sehen.

Auffällig am Kurvenverlauf ist die Konvergenz gegen einen bestimmten Sättigungswert für hohe beschleunigenden Spannungen. Dieser Sättigungswert lässt sich dadurch erklären, dass nur eine bestimmte Anzahl von Elektronen aus der Festkörperoberfläche herausgelöst werden kann. Nur von der Lichtintensität hängt diese Elektronenanzahl ab.

Das Ohmsche Gesetz beschreibt einen proportional ansteigenden Strom in Abhängigkeit der Spannung. Da die Anzahl der Ladungsträger aber in diesem Versuch begrenzt ist, kann das Ohmsche Gesetz hier nicht erfüllt werden.

Der Grund für das asymptotische Verhalten am Grenzwert ist die Elektronenstreuung, weshalb einige Elektronen die Anode nicht erreichen. Um diesen Elektronenverlust zu verhindern, müsste die Oberfläche der Anode vergrößert werden.

Beim Anlegen einer Gegenspannung fällt der Photostrom aufgrund der Fermi-Dirac-Verteilung nicht abrupt auf 0 ab. Diese Verteilung beschreibt die Energieverteilung der Elektronen im Festkörper, wobei ausgelöste Elektron häufige unterschiedliche Energien besitzen.

Zur Beobachtung eines negativen Photostroms muss nur die Bremsspannung groß genug eingestellt werden. Dies führt allerdings dazu, dass der Photostrom der Kathode überlagert wird. Von der Anode ausgehend werden Elektronen zur Kathode hin beschleunigt. Dieser negative Photostrom erreicht durch die geringe Freisetzung ausgelöster Elektronen einen kleineren Sättigungswert.

Unter der Einstrahlung von energiearmen Licht tritt bereits der negative Strom auf. Somit ist die Austrittsarbeit der Anode an die Austrittsarbeit der Kathode festgelegt.

4 Diskussion

Bei der Bestimmung der Regresionsparamter traten nur kleine Fehler auf. Allerdings konnten diese immer nur aus drei Wesswerten bestimmt werden, da alle anderen Werte bei einer Beschleunigungsspannung aufgenommen wurden.

Beim Auftragen der Gegenspannungen gegen die Frequenz sind schon deutlich größere Abweichungen zu erkennen. Das Ergebnis für den Quotienten aus dem planckschen Wirkungsquantum h und der Elementarladung e_0 ist im Vergleich zum Literaturwert nochmal aufgelistet:

$$\left(\frac{h}{e_0}\right)_{\text{experimentell}} = 6,8 \text{ eV}$$

$$\left(\frac{h}{e_0}\right)_{\text{Literatur}} = 1.436 \text{ eV}.$$

Der berechnete Quotient $\frac{h}{e_0}$ weist mit einer prozentualen Abweichung von 374 % einen großen Fehler zum Literaturwert [2] auf. Die prozentuale Abweichung wird durch den Betrag von

$$\Delta C = \frac{C_{\text{experimentell}} - C_{\text{Literatur}}}{C_{\text{Literatur}}} \quad (8)$$

bestimmt. Dieser große Fehler lässt sich vor allem auf die letzte Messung der dunkellilaenen Spektralfarbe mit $\lambda = 438 \text{ nm}$ zurückführen. Während der Messreihe hat sich dort merklich das emittierte Licht der Lampe nicht mehr auf die Photokathode konzentriert. Hier ist es gut möglich, dass ein Teil einer anderen Spektrallinie mitgemessen wurde. Die gemessene Gegenspannung von $U_G = 2,371 \text{ V}$ lässt zu mindest darauf schließen, dass dies die größte Fehlerquelle war.

Auch bei den anderen Spektralfarben lassen sich Abweichungen feststellen, die sind allerdings deutlich geringer als die der dunkellilaenen. Diese lassen sich aber durch den nicht komplett abgedunkelten Raum und auf die Empfindlichkeit der Messgeräte zurückführen. Die angesprochenen Fehler und besonders die geringe Anzahl an Messwerten führen zu der großen prozentualen Abweichung, weshalb der Quotient nicht besonders aussagekräftig erscheint.

Trotzdem lassen sich in diesem Versuch die experimentell gewonnen Ergebnisse des Photoeffekts gut erkennen.

Literatur

- [1] TU Dortmund. *Versuchsanleitung zu Versuch 500*. URL: <http://129.217.224.2/HOMEPAGE/MEDPHYS/BACHELOR/AP/SKRIPT/V500.pdf> (besucht am 14.05.2018).
- [2] *Naturkonstante*. URL: <http://www.szallies.de/Konstanten.htm> (besucht am 14.05.2018).