

V500

Der Photoeffekt

Robin Pelkner
robin.pelkner@tu-dortmund.de

Joshua Althüser
joshua.althueser@tu-dortmund.de

Durchführung: 28.05.2019

Abgabe: 04.06.2019

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1 Zielsetzung	3
2 Theorie	3
3 Durchführung	5
4 Auswertung	5
5 Diskussion	12
Literatur	13

1 Zielsetzung

In diesem Versuch sollen die Eigenschaften des Photoeffekts untersucht werden, also die Frequenzabhängigkeit und Intensitätsunabhängigkeit der Elektronenenergie, beim Austritt aus von Licht beschienenem Metall.

2 Theorie

Der Photostrom, welcher entsteht, wenn Metall mit Licht bestrahlt wird, kann nicht mit dem Wellenbild der klassischen Elektrodynamik erklärt werden. Hierzu wird von der Korpuskeltheorie ausgegangen, bei der sich die Energie eines Lichtteilchens, eines Photons, über

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

berechnet. Dabei ist h das Planck'sche Wirkungsquantum und ν die Frequenz des Lichtes.

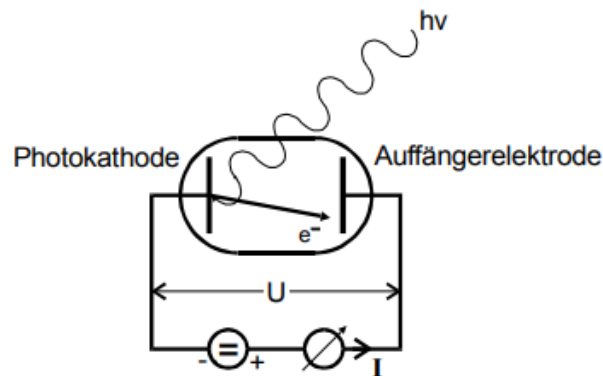


Abbildung 1: Schematischer Aufbau der Versuchsaapparatur zur Untersuchung des Photoeffekts [1].

Zur Untersuchung des Photoeffekts werden zwei Elektroden im Vakuum, wie in Abbildung 1 zu sehen, gegenüber gestellt. Die Photokathode wird anschließend mit monochromatischem Licht bestrahlt. Dies sorgt dafür, dass sich Elektronen aus dem Material lösen. Es stellt sich heraus, dass die Elektronenanzahl pro Zeitintervall proportional zu der Intensität des Lichtes und die Elektronenenergie abhängig von der Frequenz des Lichtes ist.

Aus dem Zusammenhang

$$E_{\text{kin}} = h\nu - A_{\text{k}}, \quad (2)$$

bei dem A_{k} die Austrittsarbeit der Elektronen aus dem Material ist, folgt, dass es eine Mindestfrequenz des Lichtes geben muss, unter der kein Photostrom zu messen ist. Wenn nun eine beschleunigende Spannung U angelegt wird, sodass

$$h\nu + eU \geq A_k \quad (3)$$

gilt, kann dennoch ein Strom gemessen werden. Dabei ist e die Elementarladung. Des Weiteren wird während des Vorgangs ein einzelnes wechselwirkendes Photon vollständig annihiliert. Seine gesamte Energie wird an ein Elektron übertragen. Dennoch stellt man fest, dass die kinetische Energie der Elektronen ein kontinuierliches Spektrum ist. Dies liegt an der Fermi-Dirac-Verteilung im Material selbst. Diese sagt aus, dass die Elektronen in jenem bereits eine gewisse Energie zwischen 0 und der Fermie-Energie χ besitzen, welche statistisch verteilt ist. Dabei kann χ einige Elektronenvolt groß sein. Zur Bestimmung eben jener kinetischen Energie wird die sogenannte Gegenfeldmethode genutzt. Dazu wird an der Anode eine Gegenspannung U angelegt, welche die Elektronen abbremst. Diese erreichen die Elektrode nun ausschließlich, wenn ihre Energie größer als eU ist. Also verschwindet der gemessene Strom an der Anode, wenn

$$eU = \frac{1}{2}m_e v_{\max}^2 \quad (4)$$

erfüllt ist, wobei m_e die Elektronenmasse und v_{\max} die maximale Geschwindigkeit der Elektronen ist.

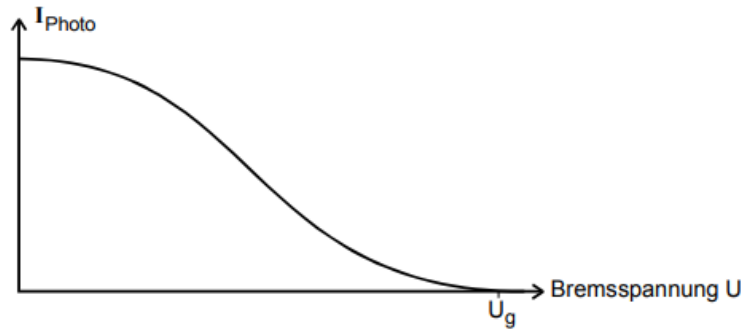


Abbildung 2: Der Photostrom einer mit monochromatischen Licht bestrahlten Photozelle aufgetragen gegen die Bremsspannung [1].

Des Weiteren ist aufgrund der oben erwähnten Fermi-Dirac-Verteilung zu bemerken, dass der Elektronenstrom bei einer bestimmten Spannung U nicht auf 0 abfällt, sondern sich bereits vorher dieser annähert. Die zu erwartende Kurve ist in Abbildung 2 zu sehen. Des Weiteren gilt unter bestimmten Voraussetzungen ein parabolischer Zusammenhang zwischen dem Photostrom I_{Ph} und U :

$$I_{\text{Ph}} \propto U^2. \quad (5)$$

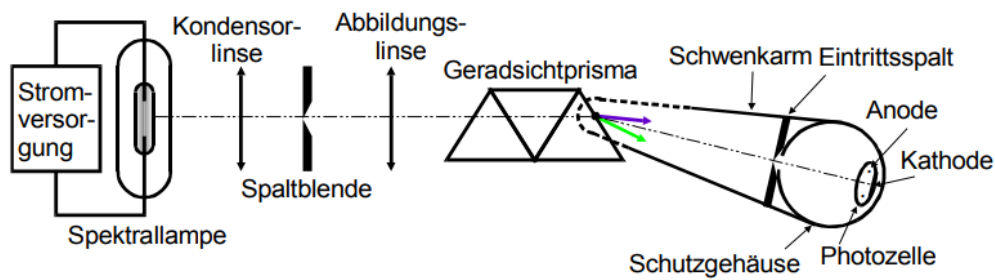


Abbildung 3: Anordnung der optischen und elektrischen Elemente zur Untersuchung des Photoeffekts [1].

3 Durchführung

Zunächst werden die einzelnen Elemente gemäß Abbildung 3 aufgestellt. Das Licht, welches durch die Kondensorlinse kommt, wird so auf dem Spalt gebündelt, dass das Bild dieselbe Größe wie der Spalt hat. Die Abbildungslinse wird so verschoben, dass an der Photozelle ein scharfes Bild zu sehen ist. Das Prisma fächert die Strahlen so auf, dass mit der Photozelle genau eine Spektrallinie aufgenommen werden kann. Als Spektrallampe wird in diesem Versuch eine Quecksilberdampfampe genutzt.

Zunächst wird für die verschiedenen zu sehenden Spektrallinien der Photostrom gemessen, während die Gegenspannung variiert wird. Die Messung wird beendet, sobald der Photostrom auf 0 A absinkt. Es ist weiterhin darauf zu achten, dass zu jeder Linie mindestens 10 Messwerte aufgenommen werden.

Im letzten Versuchsteil wird die Photozelle auf der gelben Spektrallinie ($\lambda = 577 \text{ nm}$) ausgerichtet. Nun wird die Gegenspannung von -20 V bis +20 V geregelt und der jeweilige Photostrom notiert.

4 Auswertung

Zur Bestimmung der Austrittsarbeit A_K und des Verhältnisses $\frac{h}{e_0}$ werden zunächst die Grenzspannungen U_g der gemessenen Spektrallinien errechnet. Dazu werden die Wurzeln der gemessenen Stromstärken I gegen die Gegenspannungen U aufgetragen. Die verwendeten Werte sind in Tabelle 1 aufgelistet. Für jede der ausgemessenen Spektrallinien wird mittels des Python 3.7.0 Paketes Curve Fit eine lineare Ausgleichsrechnung der Form

$$\sqrt{I} = a_1 \cdot U + b_1 \quad (6)$$

durchgeföhrt. Die entsprechenden Fits sind in Abbildung 4 zu sehen. Die Parameter a und b ergeben sich jeweils zu

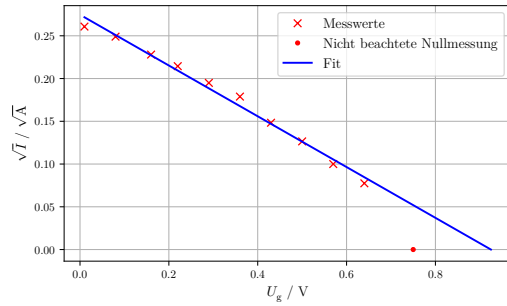
$$\begin{aligned}
a_{\lambda=491,6} &= (-0,30 \pm 0,01) \frac{\sqrt{A}}{V} \\
b_{\lambda=491,6} &= (0,274 \pm 0,004) \sqrt{A} \\
a_{\lambda=577,0} &= (-1,17 \pm 0,09) \frac{\sqrt{A}}{V} \\
b_{\lambda=577,0} &= (0,64 \pm 0,02) \sqrt{A} \\
a_{\lambda=546,0} &= (-1,49 \pm 0,09) \frac{\sqrt{A}}{V} \\
b_{\lambda=546,0} &= (1,03 \pm 0,02) \sqrt{A} \\
a_{\lambda=640} &= (-0,16 \pm 0,01) \frac{\sqrt{A}}{V} \\
b_{\lambda=640} &= (0,101 \pm 0,003) \sqrt{A} \\
a_{\lambda=435,8} &= (-1,26 \pm 0,07) \frac{\sqrt{A}}{V} \\
b_{\lambda=435,8} &= (1,49 \pm 0,04) \sqrt{A} \\
a_{\lambda=404,7} &= (-0,64 \pm 0,03) \frac{\sqrt{A}}{V} \\
b_{\lambda=404,7} &= (0,86 \pm 0,02) \sqrt{A}.
\end{aligned}$$

Zu erwöhnen sei hierbei, dass die Nullmessung bei jedem Fit nicht beachtet wird, da diese, wie in den Abbildungen zu sehen, teilweise sehr stark von den anderen Werten abweicht und diese Messung in der Durchführung bereits ungenau war. Die gesuchten Grenzspannungen $U_{g,i}$ sind die Nullstellen der Fits an der Spannungsachse. Daher ergibt sich der Zusammenhang $U_{g,i} = -\frac{b_i}{a_i}$, womit sich die Grenzspannungen zu

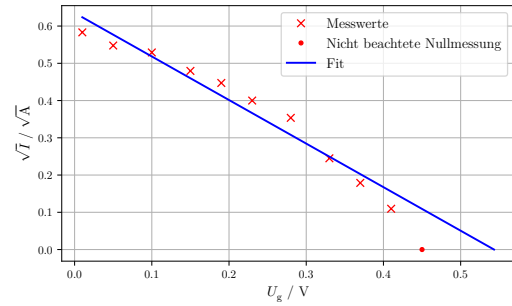
$$\begin{aligned}
U_{\lambda=491,6} &= (0,92 \pm 0,04) \text{ V} \\
U_{\lambda=577,0} &= (0,54 \pm 0,04) \text{ V} \\
U_{\lambda=546,0} &= (0,68 \pm 0,04) \text{ V} \\
U_{\lambda=640} &= (0,61 \pm 0,05) \text{ V} \\
U_{\lambda=435,8} &= (1,18 \pm 0,07) \text{ V} \\
U_{\lambda=404,7} &= (1,34 \pm 0,07) \text{ V}
\end{aligned}$$

ergeben.

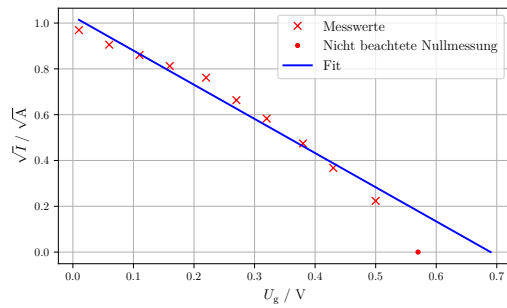
Zur Bestimmung des Verhältnisses $\frac{h}{e_0}$, sowie der Austrittsarbeit A_K werden die berechneten Grenzspannungen U_g gegen die zugehörigen Frequenzen der Spektrallinien abgetragen.



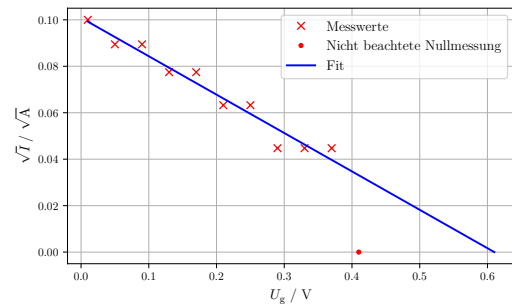
(a) Blaugrün $\lambda = 491,6 \text{ nm}$



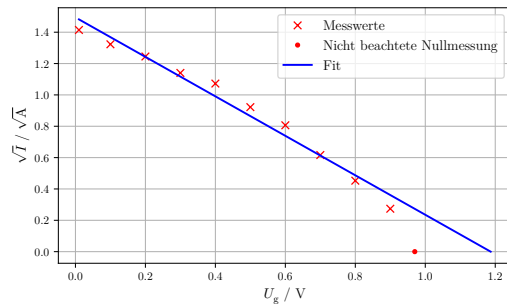
(b) Gelb $\lambda = 577 \text{ nm}$



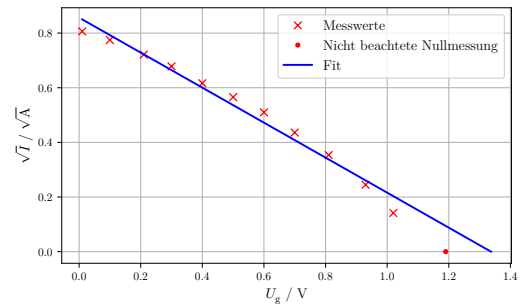
(c) Grün $\lambda = 546 \text{ nm}$



(d) Rot $\lambda = 640 \text{ nm}$



(e) Violett $\lambda = 435,8 \text{ nm}$



(f) Violett $\lambda = 404,7 \text{ nm}$

Abbildung 4: Plots der Wurzeln der Stromstärken I gegen die Gegenspannung U bei verschiedenen Wellenlängen λ mit Ausgleichsgeraden.

Tabelle 1: Gemessene Stromstärken und zugehörige Spannungen verschiedener Spektrallinien.

(a) Blaugrün, $\lambda = 491,6$ nm.			(b) Gelb, $\lambda = 577,0$ nm.		
I / A	$\sqrt{I} / \sqrt{\text{A}}$	U / V	I / A	$\sqrt{I} / \sqrt{\text{A}}$	U / V
0,068	0,261	0,01	0,340	0,583	0,01
0,062	0,249	0,08	0,300	0,548	0,05
0,052	0,228	0,16	0,280	0,529	0,10
0,046	0,214	0,22	0,230	0,479	0,15
0,038	0,194	0,29	0,200	0,447	0,19
0,032	0,179	0,36	0,160	0,400	0,23
0,022	0,148	0,43	0,125	0,353	0,28
0,016	0,126	0,50	0,060	0,245	0,33
0,010	0,100	0,57	0,032	0,179	0,37
0,006	0,077	0,64	0,012	0,109	0,41
0	0	0,75	0	0	0,45
(c) Grün, $\lambda = 546,0$ nm.			(d) Rot, $\lambda = 640$ nm.		
I / A	$\sqrt{I} / \sqrt{\text{A}}$	U / V	I / A	$\sqrt{I} / \sqrt{\text{A}}$	U / V
0,940	0,096	0,01	0,010	0,100	0,01
0,820	0,905	0,06	0,008	0,089	0,05
0,740	0,860	0,11	0,008	0,089	0,09
0,660	0,812	0,16	0,006	0,077	0,13
0,580	0,761	0,22	0,006	0,077	0,17
0,440	0,663	0,27	0,004	0,063	0,21
0,340	0,583	0,32	0,004	0,063	0,25
0,225	0,474	0,38	0,002	0,045	0,29
0,135	0,367	0,43	0,002	0,045	0,33
0,050	0,224	0,50	0,002	0,045	0,37
0	0	0,57	0	0	0,41
(e) Violett, $\lambda = 435,8$ nm.			(f) Violett, $\lambda = 404,7$ nm.		
I / A	$\sqrt{I} / \sqrt{\text{A}}$	U / V	I / A	$\sqrt{I} / \sqrt{\text{A}}$	U / V
2,000	1,414	0,01	0,650	0,806	0,01
1,750	1,323	0,10	0,600	0,774	0,10
1,550	1,245	0,20	0,520	0,721	0,21
1,300	1,140	0,30	0,460	0,678	0,30
1,150	1,072	0,40	0,380	0,616	0,40
0,850	0,921	0,50	0,320	0,566	0,50
0,650	0,806	0,60	0,260	0,510	0,60
0,380	0,616	0,70	0,190	0,436	0,70
0,205	0,453	0,80	0,125	0,353	0,81
0,075	0,274	0,90	0,060	0,245	0,93
0	0	0,97	0,020	0,141	1,02
			0	0	1,19

Tabelle 2: Grenzspannungen, sowie Wellenlänge und Frequenzen der Spektrallinien.

Grenzspannung U_g / V	Wellenlänge λ / nm	Frequenz f / 10^{14} Hz
$0,92 \pm 0,04$	491,6	6,10
$0,54 \pm 0,04$	577,0	5,19
$0,68 \pm 0,04$	546,0	5,49
$0,61 \pm 0,05$	640,0	4,87
$1,18 \pm 0,07$	435,8	6,88
$1,34 \pm 0,07$	404,7	7,41

Diese sind in Tabelle 2 zu sehen. Die Frequenzen errechnen sich hierbei über

$$f = \frac{c}{\lambda}, \quad (7)$$

wobei c die Lichtgeschwindigkeit bezeichnet. Die benötigten Wellenlängen λ sind den Angaben an der Apparatur entnommen. Hierbei ist zu bemerken, dass sich im Experiment Spektrallinien, welche nahe bei einander liegen, überlagern. Zur Auswertung wird hier jeweils die Wellenlänge verwendet, welche die höhere Intensität aufweist. Dabei wird eine lineare Ausgleichsrechnung der Form

$$U_g = d \cdot f + b \quad (8)$$

mittels des Python 3.7.0 Paktes Curve Fit durchgeführt. Die Grenzspannungen und die zugehörigen Frequenzen, sowie der Fit sind in Abbildung 5 zu sehen. Die gesuchten Parameter ergeben sich damit zu

$$\begin{aligned} \frac{h}{e_0} &= d = (3,0 \pm 0,4) \cdot 10^{-15} \text{ Vs} \\ A_K &= |b| = (0,9 \pm 0,2) \text{ eV}. \end{aligned}$$

Im letzten Versuchsteil wird das Verhalten des Photostroms bei einer Bremsspannung von -20 V bis 20 V an der gelben Spektrallinie ($\lambda = 577$ nm) untersucht. Die gemessenen Werte sind in Tabelle 3 aufgelistet. Der Plot dieser Werte ist in Abbildung 6 zu sehen. Wie zu sehen, konvergiert die Bremsspannungskurve bei hohen Beschleunigungsspannungen gegen einen Grenzwert. Dieser kann damit erklärt werden, dass bei hohen Beschleunigungsspannungen annähernd alle Elektronen die Anode erreichen, die Kurve somit physikalisch gesehen also nicht weiter ansteigen kann. Es können nicht mehr Elektronen herausgelöst werden als es der Sättigungswert zulässt, da die Stromstärke proportional zur Lichtintensität ist, welche ebenfalls endlich ist. Der tatsächliche Sättigungswert kann allerdings nicht erreicht werden, sondern nur asymptotisch angenähert werden. Dies liegt unter anderem daran, dass die Elektronen immer einer gewissen, wenn auch geringen Streuung unterworfen sind. Der Aufbau kann in dieser Hinsicht dadurch verbessert werden,

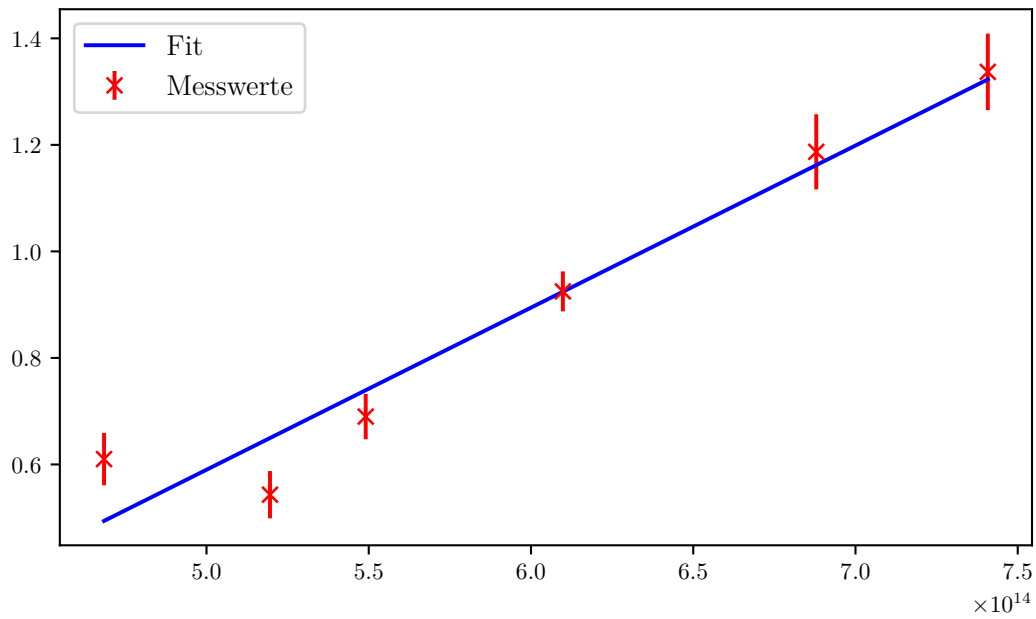


Abbildung 5: Auftragung der Grenzspannung U_g gegen die Frequenz ν mit Ausgleichsgerade.

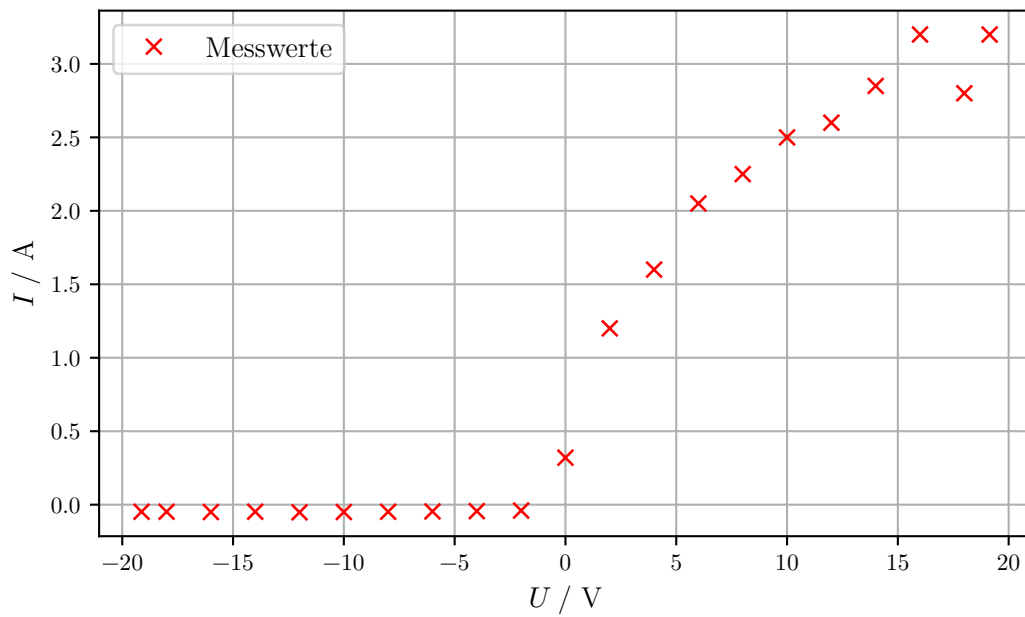


Abbildung 6: Auftragung des Photostroms gegen die angelegte Bremsspannung im Bremsspannungsbereich von -20 V bis 20 V.

Tabelle 3: Messdaten der Messung mit vergrößertem Bremsspektrum.

Gegenspannung U / V	Stromstärke I / nA
19,14	3,200
18,00	2,800
16,00	3,200
14,00	2,850
12,00	2,600
10,00	2,500
8,00	2,250
6,00	2,050
4,00	1,600
2,00	1,200
0,00	0,320
-2,00	-0,040
-4,00	-0,044
-6,00	-0,046
-8,00	-0,048
-10,00	-0,050
-12,00	-0,052
-14,00	-0,048
-16,00	-0,050
-18,00	-0,048
-19,13	-0,048

dass die Lichtquelle und die Photokathode in eine evakuierte kugelförmige Anode gebracht werden. Die Elektronen würden dadurch zwangsläufig immer die Anode erreichen.

Des Weiteren ist festzusetzen, dass der gemessene Photostrom bereits vor Erreichen der Grenzspannung U_g zu sinken beginnt. Das ist dadurch zu erklären, dass die herausgelösten Elektronen laut der Fermi-Dirac-Statistik ein Spektrum an verschiedenen Energien aufweisen und daher einige Elektronen schon bei leicht niedrigeren Spannungen nicht mehr die Anode erreichen können. Es ist aber auch festzusetzen, dass der Strom bei höheren Bremspannungen als U_g nicht komplett auf 0 abfällt. Stattdessen wird ein geringer Gegenstrom erzeugt. Dieser lässt sich dadurch erklären, dass das Kathodenmaterial schon bei Raumtemperatur verdampft und sich das verdampfte Material an der Anode ablagert, wodurch sich auch hier ein geringer photoelektrischer Strom einstellt. An sich gilt, dass die Anode aus einem Material gefertigt ist, welches eine deutlich höhere Austrittsarbeit als die Kathode aufweist. Da sich das Kathodenmaterial aber auf der Anode ablagert, wird die Austrittsarbeit an dieser geringer, womit sich vermuten lässt, dass sich der Wert der Austrittsarbeit an der Anode, dem an der Kathode annähert. Der geringe Sättigungsstrom, welcher sich schon bei geringen Bremspannungen einstellt, ist damit zu erklären, dass die Anode eine wesentlich geringere Oberfläche aufweist als die Kathode. Der Photostrom kann daher schon bei geringen Energien des Lichtes die Kathode erreichen.

5 Diskussion

Das im ersten Teil bestimmte Verhältnis

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

weicht um ungefähr 27,36% vom Theoriewert

$$\frac{h}{e_0} = 4,13 \cdot 10^{-15} \text{ Vs}$$

ab. Trotz dieser auf den ersten Blick hoch erscheinenden Abweichung ist die Messung als gut anzusehen, da einige Fehlerquellen vorliegen. Hierzu zählen, wie in der Auswertung bereits erwähnt, die Schwierigkeit die einzelnen Spektrallinien, welche nahe beieinander liegen, auseinander zu halten, da dies auf optischem Weg in diesem Aufbau nicht möglich ist. Die verwendeten Wellenlängen und die damit bestimmten Frequenzen gelten somit nur bedingt. Hinzu kommt des Weiteren, dass die Messung der roten Spektrallinie ($\lambda = 640 \text{ nm}$) auf Grund nur sehr geringer Photoströme sehr ungenau verlief, da die Skala des verwendeten Amperemeters nicht ausreicht. Des Weiteren ist die Messung mit einem analogen Amperemeter ohnehin immer fehlerbehaftet, da nur mit optischer Genauigkeit abgelesen werden kann. Dies wurde zudem zusätzlich dadurch erschwert, dass sich einige Messwerte schwer ablesen ließen, da der Photostrom teilweise leicht schwankte. Der Fehler der Nullmessung ist in der Auswertung berücksichtigt und nimmt daher keinen Einfluss auf das Ergebnis. Die bestimmte Austrittsarbeit

$$A_K = (0,9 \pm 0,2) \text{ eV}$$

ist im Allgemeinen allerdings auch als gut einzuschätzen. Der Effekt welcher der Gegenstrom der Anode, wie in der Auswertung beschrieben, ist zwar vorhanden, allerdings als sehr gering einzustufen, weshalb der Wert der Austrittsarbeit dadurch nicht stark beeinflusst wird.

Literatur

- [1] TU Dortmund. *V500 - Der Photoeffekt*. 2019.