

Versuch 500

Der Photoeffekt

Jonah Nitschke
lejonah@web.de

Sebastian Pape
sepa@gmx.de

Durchführung: 16.05.2017

Abgabe: 23.05.2017

1 Theorie

Wird ein Festkörper mit Licht bestrahlt, werden unter gewissen Voraussetzungen Elektronen aus diesem gelöst. Dieses Phänomen wird im Versuch V500: "Der Photoeffekt" untersucht.

Eine widerspruchsfreie Erklärung von Licht erlaubt nur die Quantenelektrodynamik. Dieses Modell behandelt den Wellencharakter und den Teilchencharakter von Licht als Grenzfälle. Das Wellenmodell zur Beschreibung von Licht ist immer dann sinnvoll, wenn über eine große Anzahl von Photonen gemittelt werden kann. Hingegen eignet sich das Teilchenmodell zur Erklärung der Phänomene die Auftreten, wenn Licht mit Materie wechselwirkt. Der Photoeffekt lässt sich mit Hilfe des Teilchencharakters anschaulich erklären. Ein Photon trifft mit der Energie $h\nu$, wobei ν die Frequenz darstellt auf ein in der Oberfläche befindliches Elektron. Überschreitet die Energie des Photons die Austrittsarbeit des Elektrons, wird dieses aus der Oberfläche gelöst. Die Energiebilanz des Photoeffektes sieht wie folgt aus:

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

Der Photoeffekt tritt unabhängig von der Intensität des Lichtes auf, nur die Frequenz ν ist ausschlaggebend. Intensiveres Licht erhöht lediglich die Anzahl der Photonen, sodass mehr Elektronen ausgelöst werden.

Mittels einer Photozelle (vgl. Abb. 1) kann der Photoeffekt beobachtet werden. Der Glaskolben der Photozelle ist evakuiert, sodass gelöste Elektronen nicht von Luftmolekülen eingefangen werden können. Auf die Innenseite des Kolbens ist eine Metallschicht aufgedampft, die die Kathode darstellt. Vor der Kathodenoberfläche ist eine kreisförmige Anode angebracht, die auf gelöste Elektronen eine anziehende Kraft ausübt.

Die gelösten Elektronen bilden einen Photostrom. Die Energie der Elektronen des Photostroms kann durch die Gegenstrommethode bestimmt werden. Dabei wird an den Kathodenanschluß und den Anodenanschluß (vgl. Abb. 1) eine variable Spannung U angelegt. Wenn die angelegte Spannung den Photostrom kompensiert, gilt folgende Energierelation.

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

Dabei ist e_0 die Elementarladung, m_0 die Ruhemasse der Elektronen und v_{max} die Geschwindigkeit der schnellsten Elektronen des Photostroms. Die rechte Seite von Gleichung (2) beschreibt die kinetische Energie der schnellsten Elektronen. Allgemein gilt für diese nach (1) :

$$h\nu = e_0 U_{\text{g}} + A_{\text{k}}. \quad (3)$$

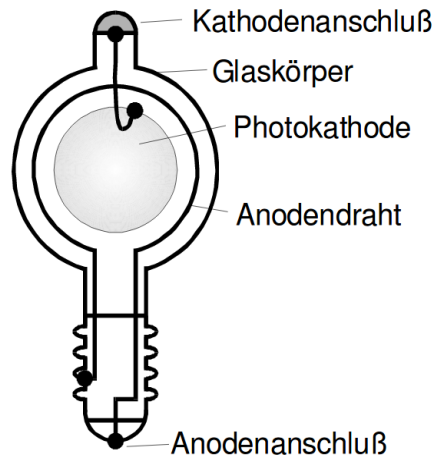


Abbildung 1: Schematische Darstellung einer Photozelle [1].

2 Aufbau und Durchführung

Für den Versuch wird eine Photozelle, eine monochromatische Lichtquelle und ein lichtspaltendes Linsensystem verwendet. Durch das verwendete Linsensystem wird das Licht in seine Spektralfarben aufgeteilt. Eine Hg-Quelle bildet die monochromatische Quelle.

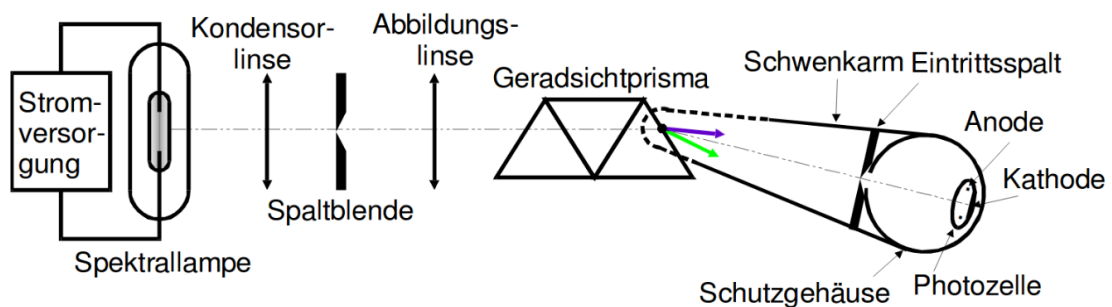


Abbildung 2: Schematische Darstellung des verwendeten Linsensystems [1].

Desweiteren werden für die Messung noch Apparaturen zur Bestimmung des Photostroms und der Gegenspannung benötigt. In Abb. 3 ist ein Schaltplan der verwendeten Messapparaturen dargestellt.

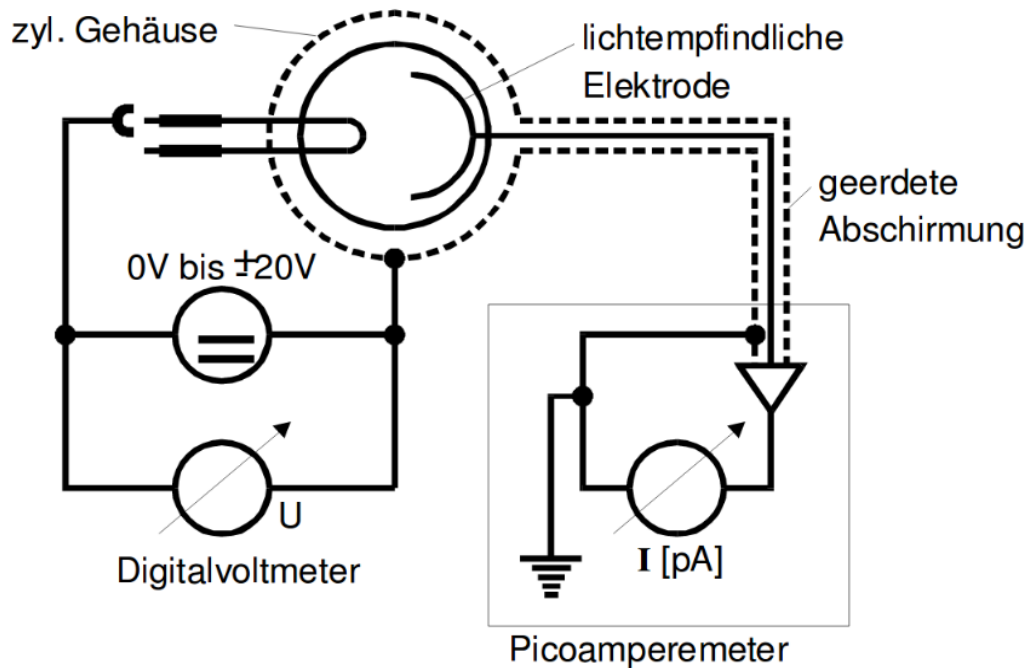


Abbildung 3: Schaltplan der verwendeten Messapparaturen [1].

Das Picoamperemeter misst den Photostrom und das Digitalvoltmeter liefert die variable Spannung.

Zu Beginn der Messung wird das Linsensystem so justiert, dass die Spektrallinien der Hg-Quelle deutlich zu erkennen sind. Dabei ist entscheidend, dass sich die Spektrallinien nicht überschneiden, sodass sie einzeln vermessen werden können. Nach Beendigung der Justage wird die gelbe Spektrallinie für verschiedene Spannungen vermessen. Die Photozelle muss so ausgerichtet werden, dass nur die gelbe Spektrallinie in sie einfällt. Die Spannung wird auf 20 V geregelt, damit die Elektronen beschleunigt werden. Die Spannung wird während der Aufnahme der Messwerte soweit herunter geregelt, bis der Photostrom verschwindet. Als Messwerte werden immer die eingestellte Spannung und der zugehörige Photostrom genommen.

Danach werden die anderen Spektrallinien vermessen. Deren Messung beginnt bei einer Spannung von 0 V und die Bremsspannung wird immer solange erhöht, bis der Photostrom komplett verschwindet. Das Vorgehen ist dabei das gleiche wie bei der gelben Spektrallinie. Die Anzahl der Messwerte wird nach eigenem Ermessen bestimmt.

3 Auswertung

In der folgenden Auswertung werden alle Berechnungen mit Python durchgeführt. Bei der linearen Regression wird an eine Funktion der folgenden Form gefittet:

$$f(x) = m \cdot x + b \quad (4)$$

3.1 Bestimmung der Gegenspannung für die verschiedenen Spektralfarben

Für die Bestimmung der Gegenspannung der gelben Spektrallinie werden aus der Tabelle 9 lediglich die Werte für $U \geq 0 \text{ V}$ betrachtet und in Abb. 4 grafisch dargestellt.

Mithilfe einer linearen Regression gemäß der Formel (4) wird die Gegenspannung bestimmt, indem der Schnittpunkt der Ausgleichsgeraden mit der Spannungsachse nach folgender Formel ermittelt wird:

$$x_0 = -\frac{b}{m}. \quad (5)$$

Damit ergeben sich für die Gegenspannungen der verschiedenen Spektralfarben die folgenden Werte.

Tabelle 1: Bestimmte Grenzspannungen für verschiedene Spektralfarben.

λ in nm	U_g in V	σ_U in V
578	0.57	0.04
546	0.69	0.04
492	0.88	0.03
435	1.15	0.07
405	1.19	0.05
365	1.25	0.04

Die für die Bestimmung der Gegenspannung verwendeten Parameter aus der linearen Regression für die einzelnen Farbspektren sind noch einmal in Tabelle 8 zu sehen.

Im Folgenden sind die gemessenen Messwerte sowie die dazugehörigen Abbildungen für jede Spektralfarbe zu sehen. Die Abweichungen von den gemessenen und errechneten Nullstellen kommen vermutlich daher, dass bei den gemessenen Nullstellen schon ein negativer Photostrom vorhanden war, welcher allerdings nicht angezeigt wurde.

Tabelle 2: Aufgenommene Werte bei der gelben Spektralfarbe.

U in V	$I \cdot 10^9$ in A	$\sqrt{I} \cdot 10^5$ in $A^{\frac{1}{2}}$
0	0.7	2.65
0.1	0.45	2.12
0.2	0.32	1.79
0.31	0.14	1.18
0.4	0.05	0.7
0.55	0	0

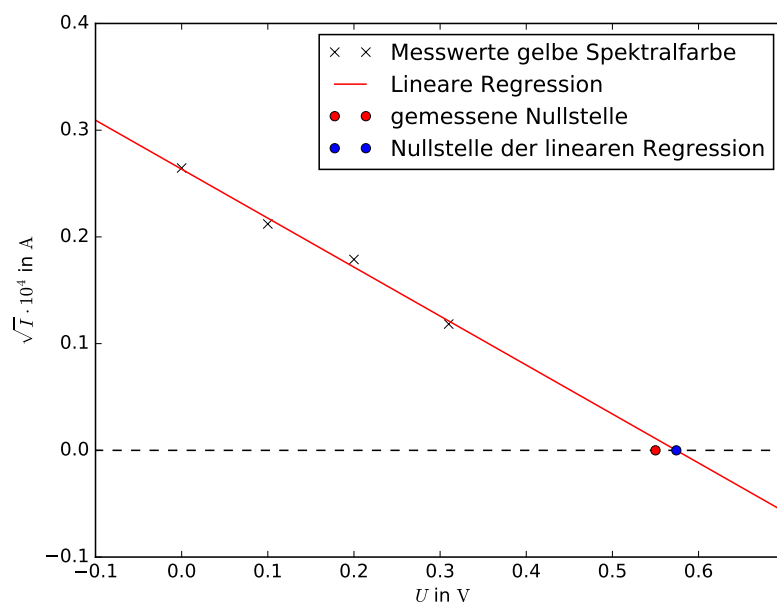


Abbildung 4: Gemessene Stromstärke in Abhängigkeit der angelegten Spannung für die gelbe Spektralfarbe.

Tabelle 3: Aufgenommene Werte bei der gruenen Spektralfarbe.

U in V	$I \cdot 10^9$ in A	$\sqrt{I} \cdot 10^5$ in $A^{\frac{1}{2}}$
0.01	1.2	3.46
0.1	1	3.16
0.2	0.8	2.83
0.3	0.5	2.24
0.4	0.22	1.48
0.5	0.09	0.95
0.6	0.02	0.45
0.64	0	0

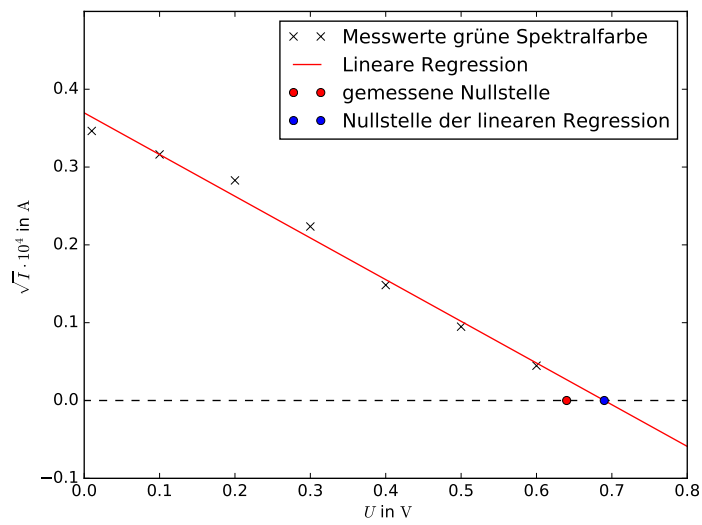


Abbildung 5: Gemessene Stromstärke in Abhängigkeit der angelegten Spannung für die grüne Spektralfarbe.

Tabelle 4: Aufgenommene Werte bei der blau-grünen Spektralfarbe.

U in V	$I \cdot 10^9$ in A	$\sqrt{I} \cdot 10^5$ in $A^{\frac{1}{2}}$	U in V	$I \cdot 10^9$ in A	$\sqrt{I} \cdot 10^5$ in $A^{\frac{1}{2}}$
0.01	0.3	1.73	0.45	0.08	0.89
0.05	0.29	1.7	0.55	0.04	0.63
0.1	0.22	1.48	0.6	0.03	0.55
0.151	0.2	1.41	0.65	0.02	0.45
0.202	0.2	1.41	0.7	0.01	0.32
0.253	0.18	1.34	0.75	0.01	0.32
0.3	0.15	1.22	0.8	0	0
0.35	0.12	1.1			

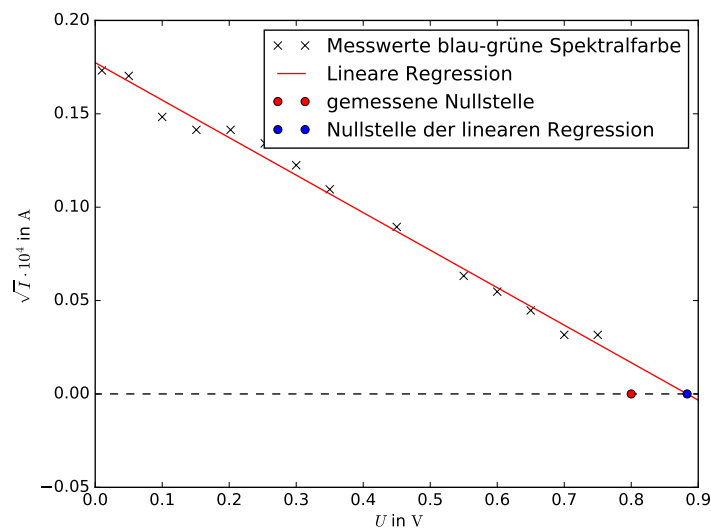


Abbildung 6: Gemessene Stromstärke in Abhängigkeit der angelegten Spannung für die blau-grüne Spektralfarbe.

Tabelle 5: Aufgenommene Werte bei der blauen Spektralfarbe.

U in V	$I \cdot 10^9$ in A	$\sqrt{I} \cdot 10^5$ in $A^{\frac{1}{2}}$	U in V	$I \cdot 10^9$ in A	$\sqrt{I} \cdot 10^5$ in $A^{\frac{1}{2}}$
0.01	7.4	8.6	0.6	2.3	4.8
0.1	6.6	8.12	0.7	1.4	3.74
0.21	6.4	8	0.81	0.6	2.45
0.31	5.6	7.48	0.9	0.33	1.82
0.4	4.0	6.32	1.0	0.1	1
0.5	3.2	5.66	1.07	0	0

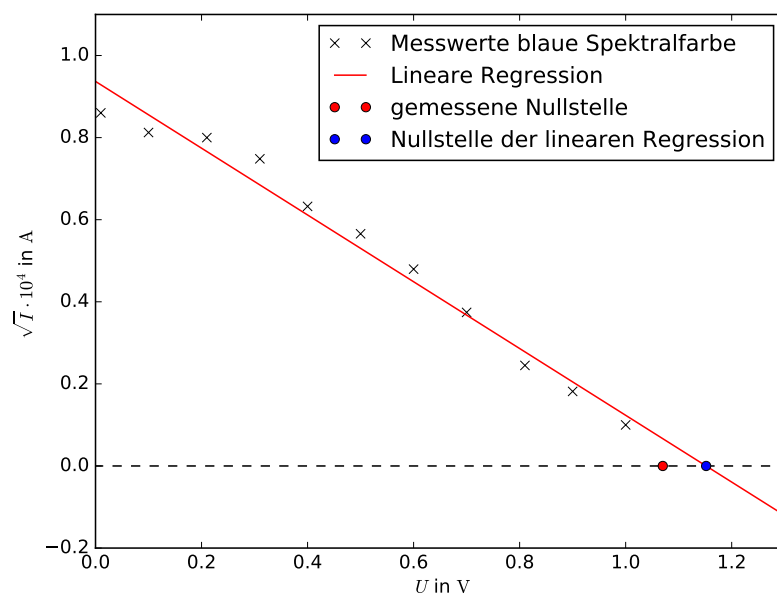


Abbildung 7: Gemessene Stromstärke in Abhängigkeit der angelegten Spannung für die blaue Spektralfarbe.

Tabelle 6: Aufgenommene Werte bei der 1. ultravioletten Spektralfarbe.

U in V	$I \cdot 10^9$ in A	$\sqrt{I} \cdot 10^5$ in $A^{\frac{1}{2}}$	U in V	$I \cdot 10^9$ in A	$\sqrt{I} \cdot 10^5$ in $A^{\frac{1}{2}}$
0.001	2.7	5.2	0.7	0.52	2.28
0.1	2.4	4.9	0.8	0.28	1.67
0.2	2.2	4.7	0.9	0.16	1.26
0.3	1.9	4.36	1	0.08	0.89
0.4	1.7	4.12	1.1	0.01	0.32
0.5	1.1	3.32	1.12	0	0
0.6	0.7	2.65			

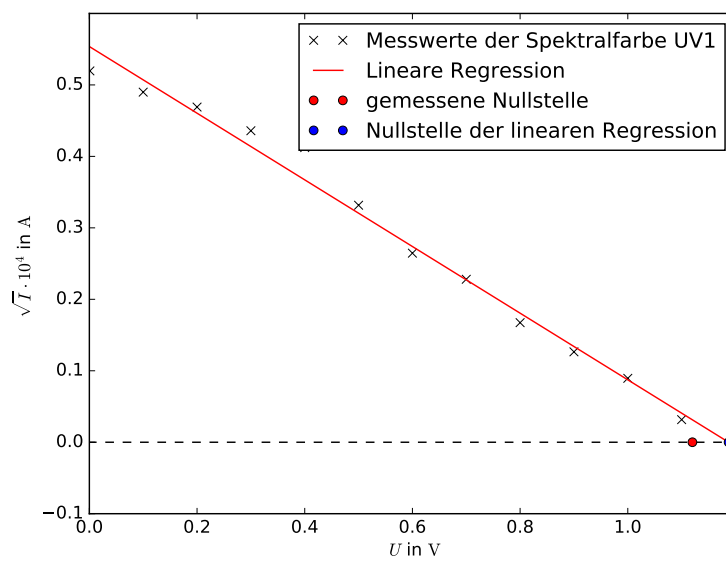


Abbildung 8: Gemessene Stromstärke in Abhängigkeit der angelegten Spannung für die 1. ultraviolette Spektralfarbe.

Tabelle 7: Aufgenommene Werte bei der 2. ultravioletten Spektralfarbe.

U in V	$I \cdot 10^9$ in A	$\sqrt{I} \cdot 10^5$ in $A^{\frac{1}{2}}$	U in V	$I \cdot 10^9$ in A	$\sqrt{I} \cdot 10^5$ in $A^{\frac{1}{2}}$
0.001	0.3	1.73	0.6	0.09	0.95
0.1	0.26	1.61	0.7	0.06	0.77
0.2	0.23	1.52	0.8	0.04	0.63
0.3	0.19	1.38	0.9	0.02	0.45
0.4	0.16	1.26	1	0	0
0.5	0.12	1.1			

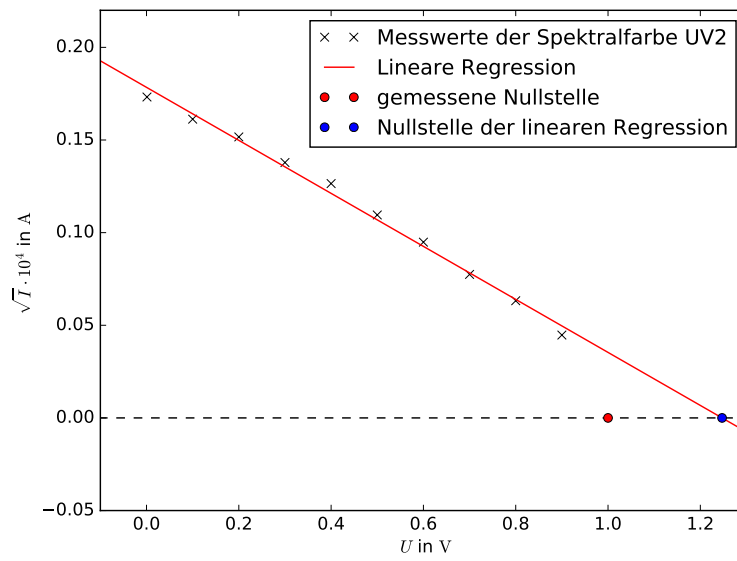


Abbildung 9: Gemessene Stromstärke in Abhängigkeit der angelegten Spannung für die 2.ultraviolette Spektralfarbe.

Die folgenden Parameter für Steigung und Achsenabschnitt wurden aus der linearen Regression gemäß Formel (4) entnommen. Die angegebenen Fehler wurden dabei mit Python berechnet.

Tabelle 8: Bestimmte Werte für die Steigung sowie den Achsenabschnitt der linearen Regression für die verschiedenen Farbspektren.

Farbspektrum	$(m \pm \Delta m) \cdot 10^5 \text{ in } \frac{A^{1/2}}{V}$	$(b \pm \Delta b) \cdot 10^5 \text{ in } A^{1/2}$
Gelb	-4.59 ± -0.29	2.63 ± 0.06
Grün	-5.36 ± -0.28	3.70 ± 0.10
Blau	-8.10 ± -0.40	9.37 ± 0.24
Blau-Grün	-2.01 ± -0.06	1.77 ± 0.03
UV1	-4.66 ± -0.18	5.54 ± 0.12
UV2	-1.43 ± -0.04	1.78 ± 0.02

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

$$U_g = \frac{h}{e_0} \cdot \nu + \frac{A_k}{e_0} \quad (6)$$

$$f(x) = m \cdot x + b \quad (7)$$

$$m = \frac{h}{e_0} \quad (8)$$

$$b = \frac{A_k}{e_0}. \quad (9)$$

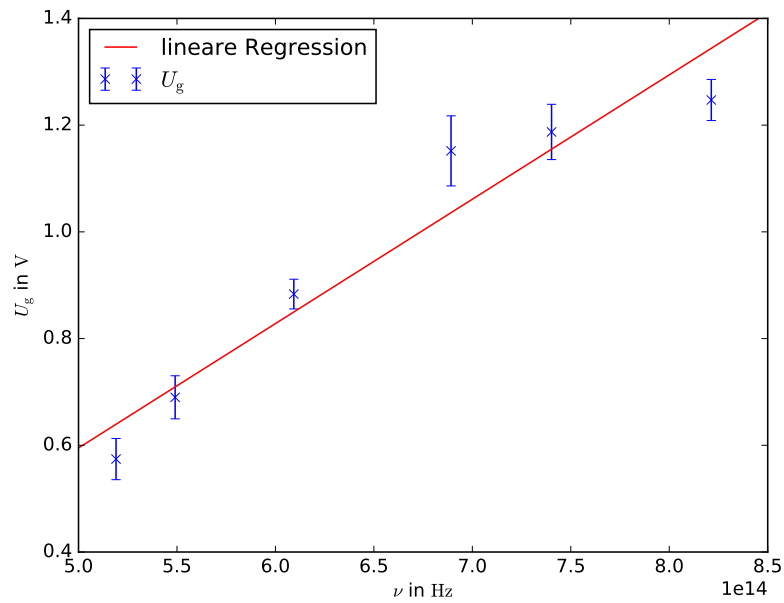


Abbildung 10: Gegenspannungen der verschiedenen Lichtfrequenzen.

Mithilfe der in Messung 3.1 erhaltenen Gegenspannungen für die verschiedenen Spektralfarben (siehe Tab. 1) lassen sich die gesuchten Parameter aus Gleichung (6) bestimmen. Dafür wird eine lineare Regression nach Formel (7) durchgeführt (siehe Abb. 10), welche für die Parameter folgende Werte ausgibt:

$$m = \frac{h}{e_0} = (2,33 \pm 0,33) \cdot 10^{-15} \text{ eV} \quad (10)$$

$$b = \frac{A_k}{e_0} = A_k = (0,57 \pm 0,22) \text{ eV} \quad (11)$$

3.3 Betrachtung der gelben Spektralfarbe in einem Intervall von $U \in [-20, 20]$ V

Tabelle 9: Aufgenommene Werte bei der gelben Spektralfarbe.

U in V	$I \cdot 10^9$ in A	$\sqrt{I} \cdot 10^5$ in $A^{\frac{1}{2}}$	U in V	$I \cdot 10^9$ in A	$\sqrt{I} \cdot 10^5$ in $A^{\frac{1}{2}}$
-19.15	8.3	9.11	-4.04	4.3	6.56
-17.05	8	8.94	-3.05	3.9	6.25
-15.01	7.65	8.75	-2.02	2.7	5.2
-13.02	7.3	8.54	-1.01	2	4.47
-10.99	6.6	8.12	0	0.7	2.65
-9.99	6.4	8	0.1	0.45	2.12
-9.0	6.15	7.84	0.2	0.32	1.79
-8.05	5.9	7.68	0.31	0.14	1.18
-7.05	5.5	7.42	0.4	0.05	0.7
-6.02	5.1	7.14	0.55	0	0
-5.05	4.8	6.93			

In dem letzten Teil des Versuches wird noch einmal der Photostrom für die gelbe Spektralfarbe in einem Messintervall von $-20 < U < 5$ V betrachtet. Die verwendeten Werte sind in die obige Tabelle 9 eingetragen. Die Abbildung 11a zeigt das ganze Messintervall und Abbildung 11b ein Intervall für $-3 < U < 1$ V.

Bei Betrachtung der beiden Abbildungen fallen einige Besonderheiten auf. Zum Beispiel konvergiert die Kurve bei hohen Beschleunigungsspannungen gegen einen bestimmten Grenzwert. Dies wird durch die Eigenschaft hervorgerufen, dass die Anzahl der ausgelösten Elektronen lediglich von der Lichtintensität abhängt. Bei einer bestimmten Spannung wird somit die maximale Anzahl an auslösbaren Elektronen erreicht, welche durch eine konstante Lichtintensität nicht erhöht werden kann.

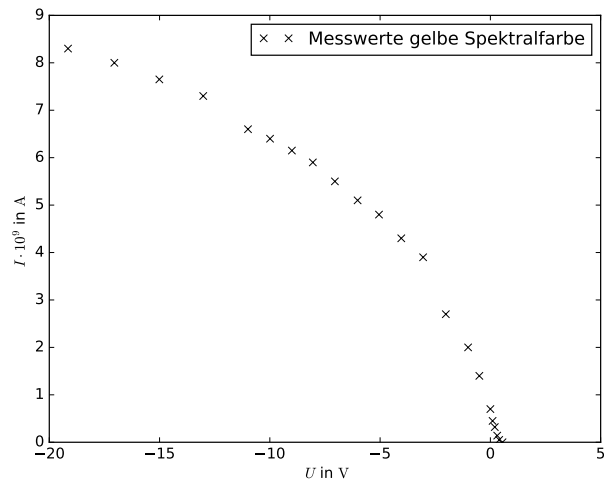
Dieser Sättigungswert wird allerdings lediglich asymptotisch erreicht, da auch die Elektronen einer gewissen Streuung unterliegen. Um dieses Problem auszugleichen, würde eine kugelförmige Kathode in deren Inneren die Anode von dem Licht bestrahlt wird, benötigt werden. Solch ein Aufbau würde keinen Elektronenverlust zulassen.

Eine weitere Auffälligkeit ist das Absinken des Photostroms schon vor Erreichen der Gegenspannung. Dieses Verhalten kann mit der Fermi-Dirac-Verteilung erklärt werden, da jedes ausgelöste Elektron eine andere Energie besitzt.

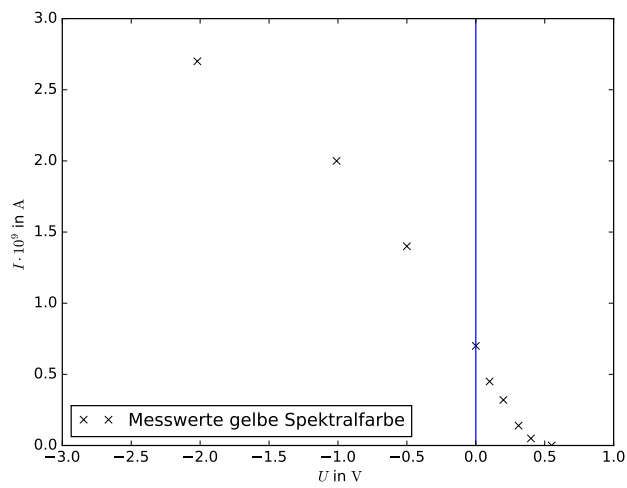
Ein bei uns nicht aufgetretener Effekt, aber zur Vollständigkeit im Folgenden erwähnt, wäre außerdem noch das Auftreten eines dem Photostrom entgegengerichteten Stromes gewesen. Dies ist dadurch zu erklären, dass auch die Anode einem lichtelektrischen Effekt unterworfen ist, der allerdings aufgrund der Oberfläche und des verwendeten Materials (höhere Bindungsenergie) deutlich geringer ist als bei der Kathode. Allerdings verdampft das für die Kathode verwendete Material schon bei sehr geringen Temperaturen.

Dadurch könnten sich Materialreste auf der Anode ablagern, die für eine Verringerung der Austrittsarbeit sorgen.

Jedoch ist die Fläche der Anode im Vergleich zur Kathode sehr gering und somit wird der Sättigungswert deutlich schneller erreicht. Tritt der negative Strom schon bei sehr energiearmen Licht auf (laut Anleitung bei $\lambda \approx 650 \text{ nm}$, [1]), ist die Austrittsarbeit vermutlich ziemlich gering und in der Größenordnung der Kathode.



(a) Gesamtes Messintervall $-20 < U < 5$ V.



(b) Gesamtes Messintervall $-3 < U < 1$ V.

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

4 Diskussion

Bei der Bestimmung der Regressionsparameter im Abschnitt 3.1 traten lediglich kleine Fehler auf. Bei Abschnitt 3.2 ergab die Regression ziemlich große Fehler mit einer Regressionsgeraden, die teilweise weit von den Werten entfernt liegt. Jedoch schneiden die Fehlerbalken größtenteils die Regressionsgerade. Wird der experimentell bestimmte Wert für $\frac{h}{e_0}$ mit dem Literaturwert[2] verglichen, ist festzustellen, dass eine Abweichung von ca. 44 % vorliegt.

$$\left(\frac{h}{e_0}\right)_{\text{lit}} = 4,136 \text{ eV} \quad (12)$$

$$\left(\frac{h}{e_0}\right)_{\text{exp}} = 2,33 \text{ eV} \quad (13)$$

Für das Auftreten dieses Fehlers sind mehrere Ursachen möglich. Ein große Fehlerquelle ist dabei vor allem der Aufbau selbst. Das Amperemeter zeigte bei den Messungen erheblich Schwankungen, weswegen für das gelbe Licht zum Beispiel eine neue Messreihe angefertigt wurde. Ein Grund hierfür ist auch die verwendete Apparatur. Die Photozelle wurde mittels einer Schiene auf einem Teilkreisbogen um den Aufbau herumgefahren, damit die verschiedenen Farbspektren betrachtet werden können. Jedoch war die Schiene schief, sodass die Photozelle beim Messen immer wieder leicht verrutschte und die Intensität nicht konstant gehalten werden konnte. Selbst nach versuchter Stabilisierung der Schiene ergab sich keine Besserung. Zudem hatte auch die schwankende Intensität der Hg-Dampfampe noch großen Einfluss auf die Messwerte.

Eine weitere Fehlerquelle ist vermutlich die Hg-Dampfampe. Bei Betrachtung der aufgespaltenen Lichtspektren auf einem Schirm war auch deutlich eine rote Spektralfarbe erkenntlich, welche bei einer Hg-Dampfampe eigentlich nicht vorkommen sollte. Dieser Effekt beruht vermutlich auf Lufteinschlüssen in der Lampe.

Da der Aufbau wie beschrieben großen Anteil an den auftretenden Fehlern hat, sind die Abweichungen der bestimmten Werte auf systematische Fehler zurückzuführen.

Jedoch sind die Grundprinzipien des Photoeffektes bei der verwendeten Apparatur deutlich geworden, womit das Experiment zur Beobachtung des Photoeffektes geeignet ist.

Literatur

- [1] TU-Dortmund. *V500: Der Photoeffekt*. 16. Mai 2017. URL: <http://129.217.224.2/HOMEPAGE/PHYSIKER/BACHELOR/AP/SKRIPT/V500.pdf>.
- [2] Wikipedia. *Planksches Wirkungsquantum*. 2. Mai 2017. URL: https://de.wikipedia.org/wiki/Planksches_Wirkungsquantum.