

V 500

Der Photoeffekt

Felix Symma

felix.symma@tu-dortmund.de

Joel Koch

joel.koch@tu-dortmund.de

Durchführung: 26.04.2022

Abgabe: 03.05.2022

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1 Zielsetzung	3
2 Theorie	3
3 Durchführung	5
4 Auswertung	6
5 Diskussion	11
6 Anhang	12
Literatur	14

1 Zielsetzung

Ziel des Versuches ist es grundlegende Eigenschaften von Licht herauszufinden. Es werden hierfür Elektronen mithilfe monochromatischen Lichtes aus einer Metalloberfläche gelöst. Um dieses Phänomen erklären zu können, ist nur die Quantenelektrodynamik fähig, wie im folgenden erläutert wird.

2 Theorie

Es ist nicht möglich mithilfe der Maxwell'schen Gleichungen und dem daraus folgenden Wellencharakter des Lichtes diesen Versuch zu erklären. Um das Herauslösen der Elektronen aus der geladenen Metalloberfläche, also den Photoeffekt, verstehen zu können, wird die Korpuskeltheorie von Einstein verwendet. Sie besagt, dass sich Licht in Form von Teilchen mit diskreten Energien und Impulsen bewegt. Diese Teilchen werden Photonen genannt. Da jedoch Experimente wie Beugung und Interferenz auch den Wellencharakter von Licht bestätigen, können sowohl die Einstein'sche Korpuskeltheorie, als auch die Wellentheorie das Licht nicht vollständig beschreiben. Als ein Kompromiss der beiden verschiedenen Theorien, ist nur die Quantenelektrodynamik dazu imstande das Licht mit seinem widersprüchlichen Charakter zu beschreiben. Dazu wird der Wellen- und Teilchencharakter miteinander vereint. Teilchen werden mit einer Wahrscheinlichkeitsverteilung versehen, sodass die Teilchen mit einer Wahrscheinlichkeit auftreten, dessen Charakter einer Welle gleicht. Erst durch die Quantenelektrodynamik kann zum Beispiel der Young'sche Doppelspaltversuch vollständig beschrieben werden.

Für die Untersuchung des Photoeffektes dient die in Abbildung 1 abgebildete Schaltung.

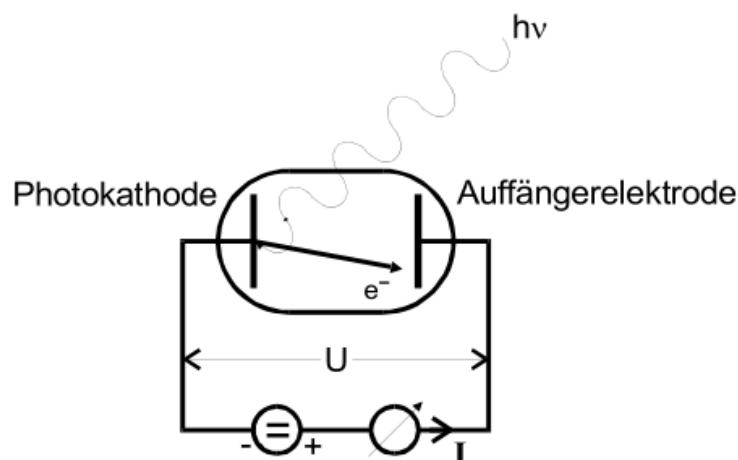


Abbildung 1: Prinzipielle Anordnung des Versuches zum Photoeffekt [1].

Bei dem Versuch wird ein Strom aus den Elektronen gemessen, die aus der mit monochromatischem Licht bestrahlten Photokathode herausgelöst werden. Die aus diesem

Versuch gewonnenen experimentellen Beobachtungen lassen sich in die folgenden drei Punkte zusammenfassen [1].

- a) Die Zahl der pro Zeiteinheit ausgelösten Elektronen ist proportional zur Lichtintensität.
- b) Die Energie der Photoelektronen - gemessen über ihre Geschwindigkeit - ist proportional zur Lichtfrequenz und unabhängig von der Lichtintensität.
- c) Es existiert eine Grenzfrequenz, unterhalb derer der Photoeffekt nicht auftritt.

Zwar lassen sich diese drei Phänomene auch mit dem Wellenmodell erklären, allerdings muss angenommen werden, dass die Energie des Lichtes gleichmäßig über die ausgestrahlte Wellenfläche verteilt ist. Es ist aber festzustellen, dass die Energie quantisiert in Photonen übertragen wird. Daraus lassen sich die folgenden Erkenntnisse ableiten [1].

1. Monochromatisches Licht der Frequenz ν besteht aus Photonen, die sich mit der Lichtgeschwindigkeit c geradlinig bewegen und die alle die Energie $E = h\nu$ besitzen (h entspricht dem Planck'schen Wirkungsquantum).
2. Ein Photon überträgt seine Energie auf ein Elektron. Diese teilt sich auf in die sogenannte Austrittsarbeit W_k , das heißt, die Energie, die notwendig ist, damit das Elektron die Festkörperoberfläche verlassen kann, und in die kinetische Energie des Elektrons. Diese Energiebilanz beim Photoeffekt hat somit die Gestalt

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

Aus der Gleichung (1) folgt außerdem die Grenzfrequenz unter derer der Photoeffekt nicht mehr auftreten kann. Des weiteren folgt, dass die kinetische Energie proportional zur Frequenz des Lichtes ist.

3. Die Lichtintensität ist proportional zur Zahl der Photonen pro Zeit- und Raumwinkeleinheit. Da ein Photon höchstens ein Elektron aus der Metalloberfläche lösen kann, kann die Beobachtung a) mit der 3. Erkenntnis erklärt werden.

Um die Energie der Photoelektronen zu messen, wird die Gegenfeldmethode verwendet. Somit können nur die Elektronen zur Messanode gelangen, deren kinetische Energie größer ist als die Energie des angelegten Gegenfeldes. Somit folgt, dass der Strom spätestens dann verschwindet, wenn die folgende Relation

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

gilt. Dabei ist v_{\max} die Geschwindigkeit der schnellsten Elektronen, m_0 die Ruhemasse des Elektrons und e_0 die Elementarladung. Nach den beiden Gleichungen (1) und (2) kann die kinetische Energie der schnellsten Elektronen bestimmt werden,

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

Da die Elektronen jedoch nicht monoenergetisch sind, sondern vielmehr eine Energieverteilung durch ihre Energie in dem Festkörper haben, fällt der Photostrom bei $U = U_G$ nicht sofort auf null und fällt stattdessen bereits bei $U < U_G$ merklich ab. Die Strom-Spannungskurve sieht in etwa so aus, wie in Abbildung 2. Unter bestimmten Voraussetzungen besteht zwischen der Bremsspannung und dem Photostrom ein parabolischer Zusammenhang

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

Dieser Zusammenhang wird auch dazu genutzt die Spannung U_G zu bestimmen, indem \sqrt{I} gegen die Spannung U aufgetragen und U_G als Schnittpunkt der erhaltenen Geraden mit der U-Achse bestimmt wird.

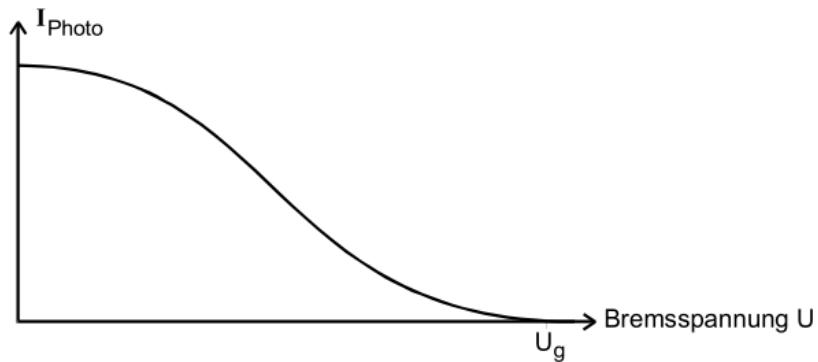


Abbildung 2: Photostromkurve in Abhängigkeit der Bremsspannung in einer mit monochromatischem Licht bestrahlten Photozelle [1].

3 Durchführung

Der Versuch wird nach Abbildung 3 aufgebaut.

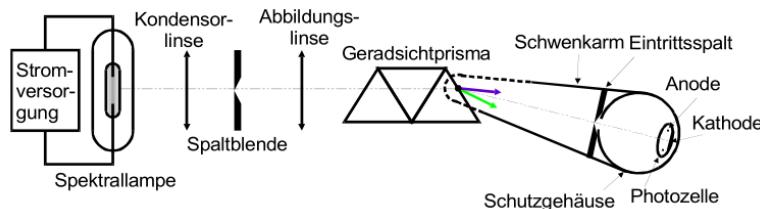


Abbildung 3: Schematischer Aufbau des Versuches [1].

Das Licht wird mit einer Quecksilberdampflampe erzeugt, indem Elektronen des Quecksilberatoms angeregt werden und somit Photonen emittiert werden. Die Photonen sind somit in einem Bereich gewisser Wellenlängen, jedoch noch polychromatisch. Durch den Strahlengang, den das Licht durchzulaufen hat, wird es gebündelt und durch das Geradsichtprisma in verschiedene Wellenlängen aufgespaltet, sodass die Photozelle mit

monochromatischem Licht bestrahlt wird.

Der prinzipielle Aufbau der Photozelle, der Teil des Versuchsaufbaus, in dem der eigentliche Photoeffekt stattfindet, ist in Abbildung 4 abgebildet. In der Photozelle befinden sich zwei Elektroden, die auf der Innenseite mit einer Metalllegierung bedampft sind. Der Glaskolben ist evakuiert, sodass die Elektronen nicht mit Gasmolekülen wechselwirken.

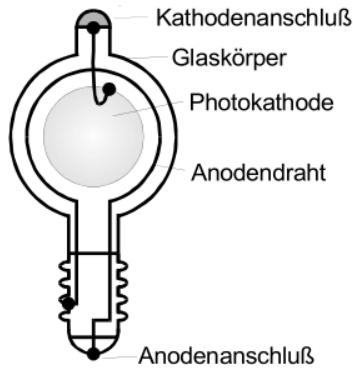


Abbildung 4: Schematische Darstellung der verwendeten Photozelle [1].

Zuerst wird für fünf verschiedenen Farben aus dem Spektrum der Photostrom I_{Ph} in Abhängigkeit der Bremsspannung U_{Br} gemessen. In einem zweiten Versuchsschritt wird das gelbe Licht mit einer Wellenlänge von 579 nm näher untersucht. Dafür wird eine Beschleunigungsspannung angelegt und schrittweise um 1 V verringert. Gemessen wird in einem Bereich von 20 V bis -20 V.

4 Auswertung

Es werden jeweils für die fünf untersuchten Farben bzw. Wellenlängen die eingestellten Bremsspannungen U_{B} gegen die Wurzel des gemessenen Photostromes $\sqrt{I_{\text{P}}}$ geplottet. Die Darstellung der Messergebnisse für die rote Spektrallinie sind in Abbildung 5, die für die orangene in Abbildung 6, die für die grüne in Abbildung 7, die für die blaue in Abbildung 8 und die für die violette in Abbildung 9 zu finden. Für jede Messreihe wurde zusätzlich eine lineare Regression berechnet und eingezeichnet. Dazu wurden die Pythonerweiterungen Numpy [2], Matplotlib [3], Scipy [4] und Uncertainties [5] verwendet.

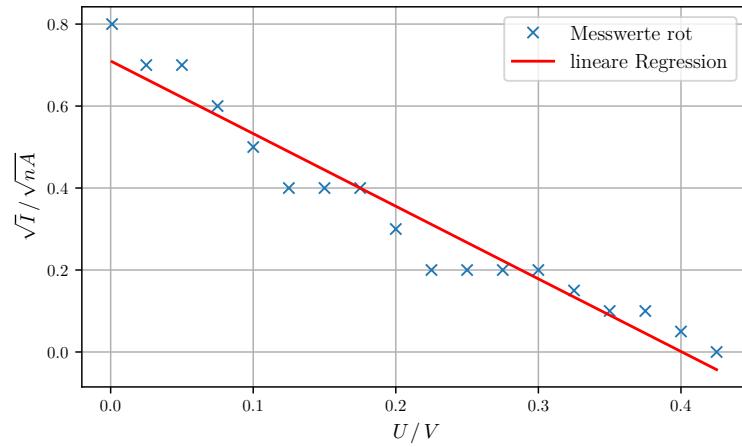


Abbildung 5: Wurzel des Photostroms in Relation zur Bremsspannung für die rote Spektrallinie.

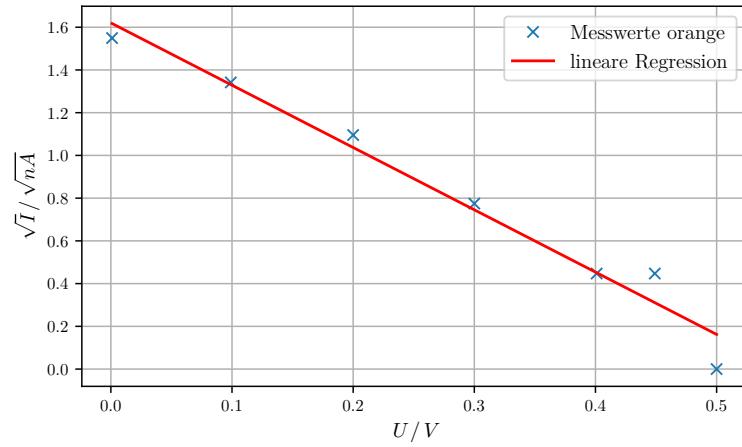


Abbildung 6: Wurzel des Photostroms in Relation zur Bremsspannung für die orangene Spektrallinie.

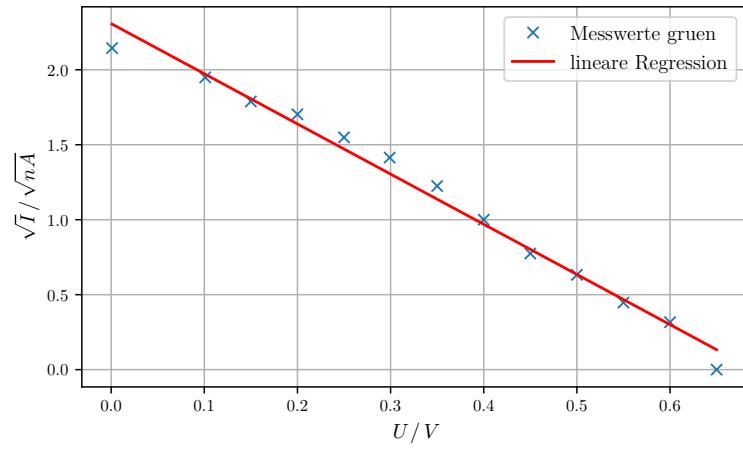


Abbildung 7: Wurzel des Photostroms in Relation zur Bremsspannung für die grüne Spektrallinie.

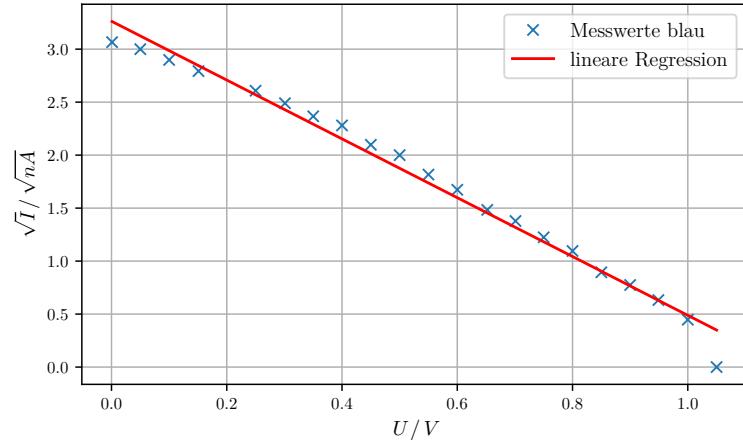


Abbildung 8: Wurzel des Photostroms in Relation zur Bremsspannung für die blaue Spektrallinie.

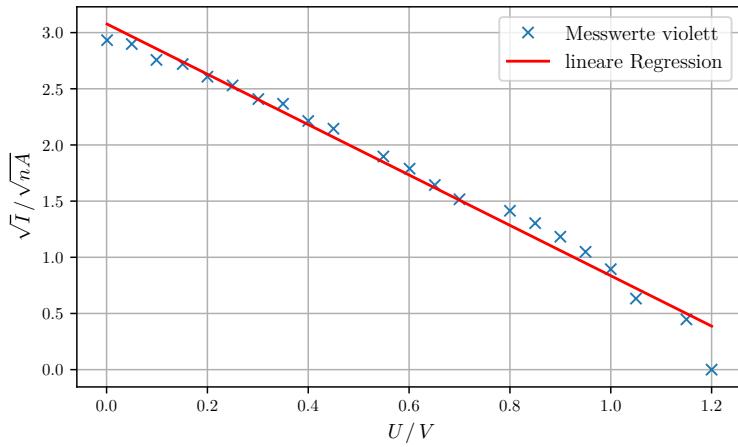


Abbildung 9: Wurzel des Photostroms in Relation zur Bremsspannung für die violette Spektrallinie.

Mit Hilfe der linearen Regressionen, die der Form $y = a \cdot x + b$ entsprechen, lassen sich nun die verschiedenen Gegenspannungen U_G bestimmen. Es werden hiefür $y = \sqrt{I_P}$, $x = U_B$ und $U_G = -\frac{b}{a}$ verwendet. Die jeweiligen Werte für a und b und die aus ihnen resultierenden Spannungen U_G sind mit den zugehörigen Farben in Tabelle 1 aufgeführt.

Farbe	a	b	U_G / V
Rot	$-1,77 \pm 0,11$	$0,71 \pm 0,03$	$0,40 \pm 0,03$
Orange	$-2,91 \pm 0,23$	$1,62 \pm 0,07$	$0,56 \pm 0,05$
Grün	$-3,35 \pm 0,12$	$2,31 \pm 0,05$	$0,69 \pm 0,03$
Blau	$-2,78 \pm 0,08$	$3,26 \pm 0,05$	$1,17 \pm 0,04$
Violett	$-2,24 \pm 0,07$	$3,08 \pm 0,05$	$1,38 \pm 0,05$

Tabelle 1: Werte der linearen Regression.

Die berechneten Gegenspannungen werden nun gegen die jeweilige Frequenz des Lichtes geplottet und erneut eine lineare Regression durchgeführt. Dies ist in Abbildung 10 dargestellt.

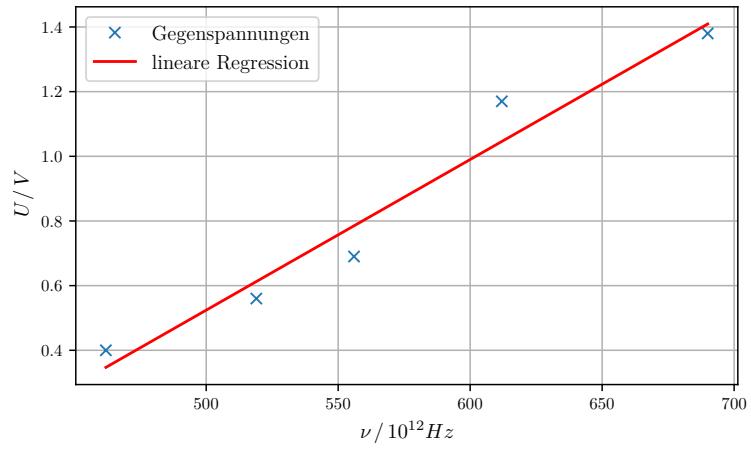


Abbildung 10: Gegenspannungen mit jeweils zugehöriger Frequenz.

Aus der linearen Regression folgt mit Gleichung (3) $a = \frac{h}{e_0}$ und $b = A_K$. Dies liefert die Werte

$$\begin{aligned}\frac{h}{e_0} &= (4,66 \pm 0,58) \cdot 10^{-15} \text{V s}, \\ A_K &= (1,81 \pm 0,33) \text{ eV}.\end{aligned}$$

In Abbildung 11 sind die Messwerte des Photostroms der orangenen Spektrallinie für eine Beschleunigungsspannung von 0 bis 19 V zu sehen.

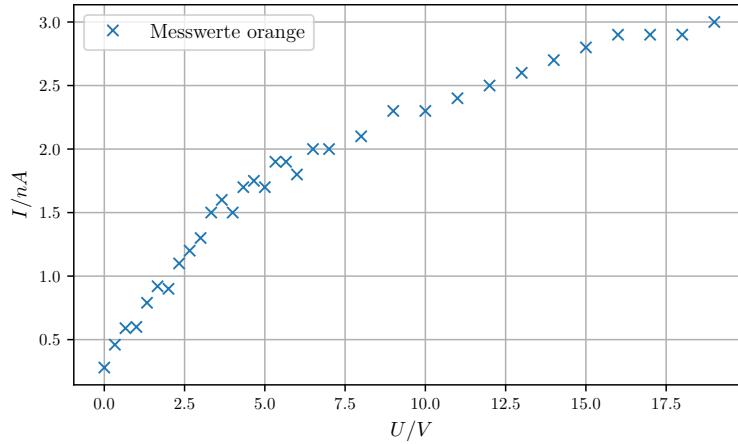


Abbildung 11: Photostrom in Abhängigkeit der Bremsspannung für die orangene Spektrallinie.

Die einzelnen Messwerte bilden den erwarteten Kurvenverlauf. Für höher werdende Beschleunigungsspannungen erreicht der Photostrom einen Sättigungswert, der nicht überschritten wird. Dies liegt daran, dass die Intensität des Lichtes unverändert bleibt und so die Anzahl an Elektronen, die aus dem Material gelöst werden, begrenzt ist. Dass sich die Kurve schon bei Bremsspannungen kleiner der Gegenspannung Null nährt liegt daran, dass die Elektronen nicht monoenergetisch sind, sondern Energien auf einem Energieintervall besitzen, dessen obere Grenze durch die Gegenspannung definiert ist. Ein Großteil der Elektronen hat somit eine Energie darunter.

5 Diskussion

Der ermittelte Wert für $\frac{h}{e_0}$ beläuft sich auf $(4,66 \pm 0,58) \cdot 10^{-15} \text{ V s}$. Dies bedeutet eine Abweichung von 12,6% vom Literaturwert von $(4,14 \pm 0,58) \cdot 10^{-15} \text{ V s}$.

Insgesamt entsprechen alle Ergebnisse den Erwartungen. Die Messung der roten Spektrallinie könnte hierbei noch den größten Einfluss auf die Abweichung zum Literaturwert liefern, da der Spannungsbereich, der sich für die Messungen eignet, aufgrund der geringen maximalen Gegenspannung sehr klein ist. Die Spannungsschritte zwischen den einzelnen Messungen des Photostroms wurden deshalb bei dieser Messung kleiner gewählt, als bei den anderen. Da es allerdings, aufgrund der Messapparatur für den Photostrom, nicht möglich war, diesen beliebig genau abzulesen, wurden teilweise für mehrere Gegenspannungen die selben Stromstärken gemessen. Dies erklärt den deutlich in Abbildung 5 zu sehenden treppenartigen Verlauf der Messwerte.

6 Anhang

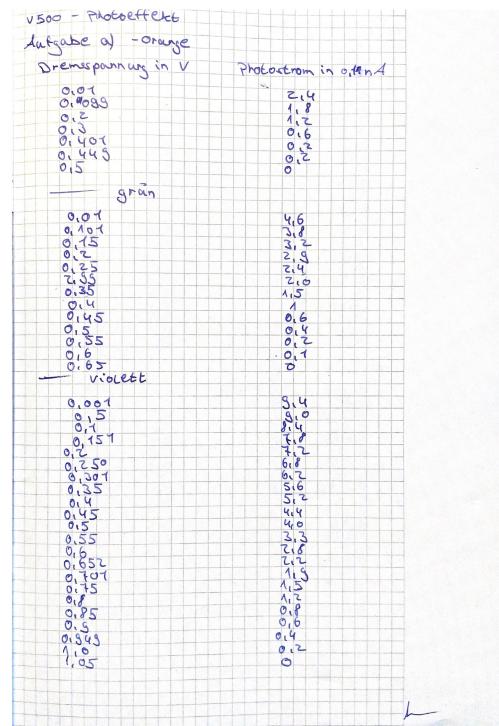


Abbildung 12: Originale Messdaten des Versuches.

Bremsspannung in V blau (links von rechts)	Photostrom in 0,1 nt
0,001	8,6
0,050	8,4
0,099	7,6
0,151	7,4
0,2	6,8
0,25	6,4
0,307	5,8
0,35	5,6
0,4	4,9
0,45	4,6
0,5	4,1
0,545	3,6
0,607	3,2
0,657	2,7
0,7	2,3
0,75	1,9
0,8	1,4
0,85	1,1
0,9	0,8
0,95	0,6
1,0	0,4
1,05	0,3
1,1	0,1
1,15	0
1,2	0
<hr/>	
0,001	0,8
0,025	0,4
0,05	0,7
0,075	0,6
0,1	0,5
0,125	0,4
0,15	0,4
0,175	0,4
0,2	0,3
0,225	0,2
0,25	0,2
0,275	0,2
0,3	0,1
0,325	0,15
0,35	0,1
0,375	0,1
0,4	0,5
0,425	0

Abbildung 13: Originale Messdaten des Versuches.

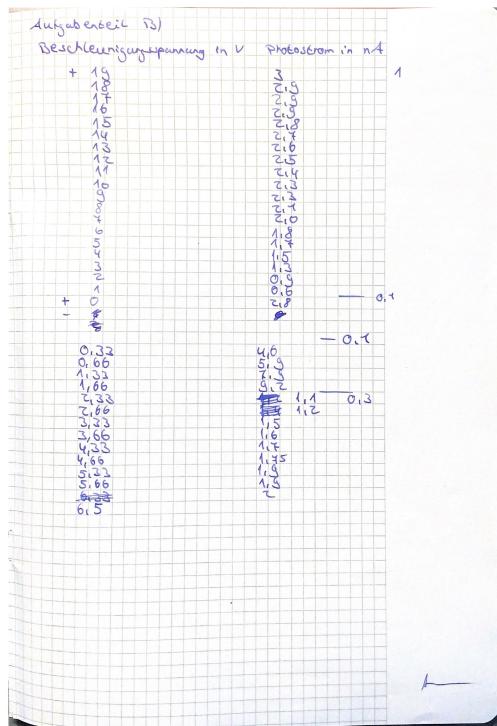


Abbildung 14: Originale Messdaten des Versuches.

Literatur

- [1] *Versuch 500 - Der Photoeffekt*. TU Dortmund, Fakultät Physik. 2022.
- [2] Travis E. Oliphant. „NumPy: Python for Scientific Computing“. Version 1.9.2. In: *Computing in Science & Engineering* 9.3 (2007), S. 10–20. URL: <http://www.numpy.org/>.
- [3] John D. Hunter. „Matplotlib: A 2D Graphics Environment“. Version 1.4.3. In: *Computing in Science & Engineering* 9.3 (2007), S. 90–95. URL: <http://matplotlib.org/>.
- [4] Eric Jones, Travis E. Oliphant, Pearu Peterson u. a. *SciPy: Open source scientific tools for Python*. Version 0.16.0. URL: <http://www.scipy.org/>.
- [5] Eric O. Lebigot. *Uncertainties: a Python package for calculations with uncertainties*. Version 2.4.6.1. URL: <http://pythonhosted.org/uncertainties/>.