

ANFÄNGERPRAKTIKUM 2015/2016

Der Photoeffekt

Durchführung: 03.05.16

Clara RITTMANN¹
Anja BECK²

Betreuer:
Joshua LUCKEY

¹clara.rittmann@tu-dortmund.de

²anja.beck@tu-dortmund.de

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	2
2	Theorie	2
3	Der Versuch	4
3.1	Aufbau	4
3.2	Mögliche Schwierigkeiten dieses Aufbaus	4
4	Auswertung	6
4.1	Statistische Formeln	6
4.1.1	Fehlerrechnung	6
4.1.2	Regression	7
4.2	Bestimmung der Gegenspannung	8
4.3	Bestimmung des Verhältnisses $\frac{h}{e_0}$	14
4.4	Photostrom des orangenen Spektrallinie	15
5	Diskussion	18

1 Einleitung

Als photoelektrischer Effekt (auch lichtelektrischer Effekt oder kurz Photoeffekt) wird das Herauslösen einzelner Elektronen aus einer Metalloberfläche durch elektromagnetische Strahlung bezeichnet. Mit der allgemein akzeptierten Vorstellung von Licht als elektromagnetischer Welle¹, konnte der Photoeffekt lange nicht erklärt werden. Erst Albert Einstein gelang es mit Hilfe eines Teilchenmodells eine konsistente Erklärung zu formulieren. Der Photoeffekt galt daher lange als ein Schlüssel-Experiment, das den Teilchencharakter des Lichts beweist.²

2 Theorie

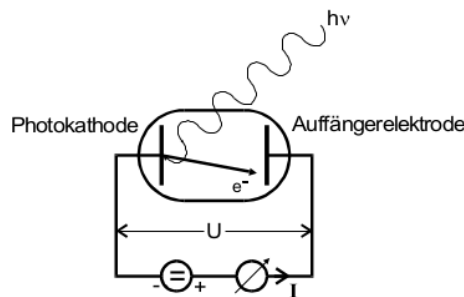


Abbildung 1: Schematische Versuchsanordnung zur Beobachtung des Photoeffekts [V500]

Um den Photoeffekt beobachten zu können kann ein Versuchsaufbau, wie er in Abbildung 1 dargestellt ist verwendet werden. Das Licht überträgt seine Energie auf die Elektronen in der Photokathode. Ist diese Energie mindestens so groß, wie die Austrittsarbeit A_K , werden Elektronen ausgelöst und bewegen sich in Richtung Auffängerelektrode, wo sie mit dem Ampère-Meter als (Photo-)Strom gemessen werden können. Die Beschleunigungsspannung U zwischen den beiden Elektroden ist variabel. Nur wenn ein Elektron nach dem Austritt eine kinetische Energie von mindestens

$$E = \frac{1}{2}mv^2 = eU, \quad (1)$$

mit der Elementarladung e , hat, kann es die Auffängerelektrode erreichen und als Strom detektiert werden. Die Spannung, bei der gerade keine Elektronen mehr die Auffängerelektrode erreichen heißt Grenzspannung U_{Grenz} und ist ein Maß für die maximale kinetische Energie der ausgelösten Elektronen (Photoelektronen)

$$E_{\text{max}} = eU_{\text{Grenz}}. \quad (2)$$

Der Photostrom beschreibt die Anzahl der Photoelektronen pro Zeit.

Das Wellenmodell des Lichts suggeriert folgendes Verhalten: Die Elektronen an der Metalloberfläche werden durch das elektrische Feld des Lichts zu erzwungenen Schwingungen

¹Der Wellencharakter des Lichts schien eindeutig, durch Interferenz-Experimente und die Maxwell-Gleichungen, aus denen direkt elektromagnetische Wellen abgeleitet werden können.

²In den 1960er Jahren gelang es den Photoeffekt mit der klassischen Wellentheorie zu erklären, sodass er nicht mehr als absoluter Beweis eines Welle-Teilchen-Dualismus gesehen werden kann.

angeregt. Wenn die Schwingungsamplitude groß genug ist, können die Elektronen aus dem Metall austreten. Das bedeutet für die Erwartung an die Messung:

- Aufgrund von Resonanzphänomenen muss der Photostrom bei Lichtfrequenzen, die den Resonanzfrequenzen der Elektronen entsprechen, besonders hoch sein.
- Die Intensität beschreibt die Energie pro Zeit und Fläche. Daher sorgt sehr intensives Licht für sehr energiereiche Elektronen.
- Auch bei sehr langwelligem Licht mit hoher Intensität werden Elektronen ausgelöst.

Die tatsächlichen Beobachtungen widersprechen diesen Erwartungen:

- Der Photostrom ist proportional zur Lichtintensität.
- Die kinetische Energie der Photoelektronen ist proportional zur Lichtfrequenz und unabhängig von der Intensität.
- Es existiert eine Grenzfrequenz, unterhalb der der Photoeffekt nicht auftritt. Andere ausgezeichnete Frequenzen existieren nicht.

Aus der Wellenbeschreibung des Lichts folgt, dass die Energie der Strahlung gleichmäßig und proportional zur Intensität verteilt ist. Dem Experiment zufolge beschreibt eine Welle das Licht aber nur unzureichend. Einsteins Vorschlag lautete also:

Licht besteht aus räumlich verschwindend kleinen Teilchen, den Photonen. Sie bewegen sich mit der Lichtgeschwindigkeit c und transportieren die Energie in diskreten Mengen, mit dem Wert $E = h\nu$. Dabei ist ν die Lichtfrequenz und h das Plancksche Wirkungsquantum.

Der Photoeffekt lässt sich damit gut erklären: Die Photonen bewegen sich auf das Metall zu. Dort stößt ein Photon mit genau einem Elektron und gibt seine gesamte Energie ab. Wenn gilt

$$h\nu > A_K ,$$

verwendet das Elektron einen Teil der ihm übertragenen Energie zum Austritt aus der Metalloberfläche. Der andere Teil geht über in seine kinetische Energie

$$E = h\nu - A_K . \tag{3}$$

Gleichung 3 wird auch Einstein-Gleichung genannt [**Gerthsen**].

Die Frequenz ν_g , für die gilt

$$h\nu_g = A_K ,$$

wird Grenzfrequenz genannt. Bei jeder Frequenz $\nu < \nu_g$ ist die Energie des Photons kleiner als die Austrittsarbeit. Das heißt kein Elektron kann das Metall mehr verlassen, es tritt kein Photoeffekt auf.

3 Der Versuch

3.1 Aufbau

In diesem Experiment zum Photoeffekt sieht der Versuchsaufbau wie in Abbildung 2 aus. Gemessen wird der Photostrom am Ampèremeter in Abhängigkeit von der angelegten Gegenspannung. Das „zylindrische Gehäuse“ beinhaltet die Photozelle. Eine Photozelle besteht aus einem evakuierten Glaskolben und zwei Elektroden. Eine davon ist die Photokathode. Sie besteht aus einer aufgedampften Metall- oder Legierungsschicht. Diese Schicht wird vom Licht bestrahlt. Die andere Elektrode, die Auffangelektrode, ist ein Drahring, der wenige Millimeter neben der Kathodenoberfläche verläuft. Um Licht verschiedener

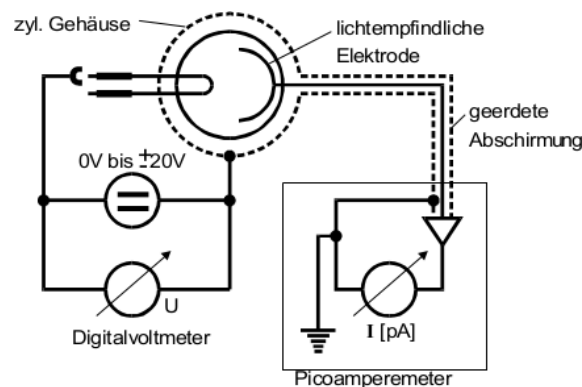


Abbildung 2: Verwendeter Versuchsaufbau [V500]

Wellenlängen, also verschiedener Frequenzen, messen zu können wird zusätzlich noch eine Kombination aus Linsen (siehe Abbildung 3) benötigt. Das Prisma sorgt dafür, dass das Licht der Hg-Lampe in seine Spektrallinien aufgeteilt wird. Die Linsen werden dann so verschoben, dass die Linien möglichst scharf erkennbar sind. Mit dem Schwenkarm kann das Schutzgehäuse, indem die Photozelle sitzt, so nach links und rechts verschoben werden, dass die gewünschte Spektrallinie durch den Eintrittspalt fällt.

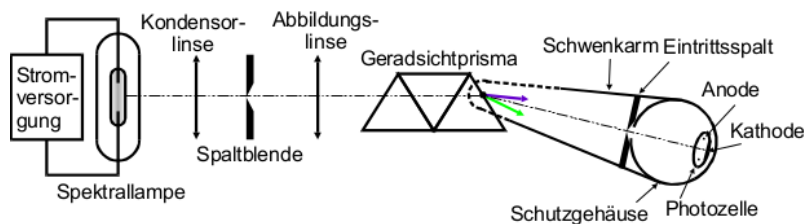


Abbildung 3: Optischer Aufbau, der benötigt wird um mit einer Spektrallampe Licht verschiedener Frequenzen messen zu können [V500]

3.2 Mögliche Schwierigkeiten dieses Aufbaus

Die Messung kann durch verschiedene Faktoren vom erwarteten Ergebnis abweichen.

1. Die Photoelektronen sind nicht monoenergetisch, da die Elektronen schon vorher im gebundenen Zustand verschiedene Energien hatten (Die Energieverteilung wird

durch die Fermi-Dirac-Statistik beschrieben, wobei $0 \leq E \leq \zeta$ (Fermi-Energie) gilt.). Das sorgt dafür, dass der Photostrom bei der Grenzspannung nicht sofort und schlagartig verschwindet, sondern absinkt und erst bei einer Spannung $U < U_g$ nicht mehr vorhanden ist. (siehe Abbildung 4)

2. Die Austrittsarbeit des Anodenmaterials A_A ist sehr groß, insbesondere größer, als die Austrittsarbeit des Kathodenmaterials A_K . Es kann dann passieren, dass die Elektronen aus der Kathode austreten können, da $h\nu > A_K$, aber kein Photostrom gemessen werden kann, weil die Energie der Elektronen kleiner ist, als die Fermi-Energie des Anodenmaterials. Um dennoch einen Photostrom messen zu können, muss die angelegte Spannung beschleunigend wirken.

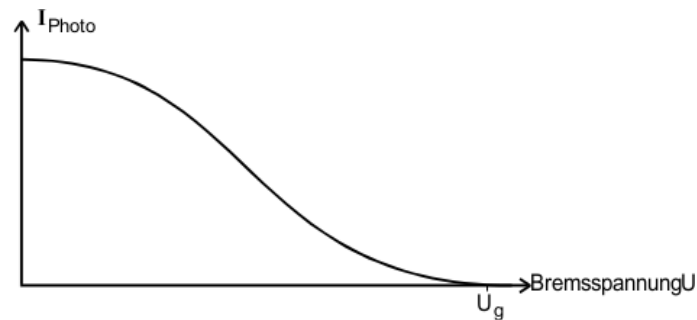


Abbildung 4: Photostrom in Abhängigkeit von der Bremsspannung bei einer mit monochromatischem Licht bestrahlten Photozelle [V500]

Werden die beschriebenen Schwierigkeiten beachtet und bestimmte Annahmen gemacht, gilt der Zusammenhang

$$I \propto U^2 \quad (4)$$

zwischen dem Photostrom I und der angelegten Spannung U .

4 Auswertung

4.1 Statistische Formeln

4.1.1 Fehlerrechnung

Im folgenden wurden Mittelwerte von N Messungen der Größe x berechnet

$$\bar{x} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N x_i, \quad (5)$$

sowie die Varianz

$$V(x) = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \quad (6)$$

woraus die Standardabweichung folgt

$$\sigma_x = \sqrt{V(x)}. \quad (7)$$

Die Standardabweichung des Mittelwertes

$$\Delta_x = \frac{\sigma_x}{\sqrt{N}}, \quad (8)$$

kürzer auch Fehler des Mittelwertes genannt, bezieht noch die Anzahl der Messungen mit ein.

Des weiteren ist die Gaußsche Fehlerfortpflanzung definiert als

$$\sigma_A = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial A(x_1, \dots, x_N)}{\partial x_i} \right)^2 \sigma_{x_i}^2}. \quad (9)$$

4.1.2 Regression

Nachfolgend wird eine lineare Regression für Wertepaare (x_i, y_i) durchgeführt. Dafür müssen die Steigung

$$m = \frac{n \cdot \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \cdot \sum_{i=1}^n y_i}{n \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \quad (10)$$

und der y-Achsenabschnitt

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2 \cdot \sum_{i=1}^n y_i - \sum_{i=1}^n x_i \cdot \sum_{i=1}^n x_i y_i}{n \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \quad (11)$$

berechnet werden. Den jeweiligen Fehler erhält man mit

$$s_m^2 = s_y^2 \cdot \frac{n}{n \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \quad (12)$$

$$s_b^2 = s_y^2 \cdot \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{n \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2} . \quad (13)$$

s_y ist hierbei die Abweichung der Regressionsgeraden in y-Richtung.

$$s_y^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\Delta y_i)^2}{n - 2} = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - b - m x_i)^2}{n - 2} \quad (14)$$

4.2 Bestimmung der Gegenspannung

Um die Gegenspannung der einzelnen Spektrallinien zu bestimmen wird der Photostrom in Abhängigkeit einer angelegten Bremsspannung U gemessen. Für jede der fünf ausgewerteten Spektrallinien werden zehn Messwerte im Bereich von -2 bis 2 Volt notiert. Die hier betrachteten Spektrallinien der Quecksilberlampe sind:

rot: 615 nm
 grün: 546 nm
 lila: 435 nm
 blau: 405 nm
 UV: 365 nm

Die gemessenen Daten sind in Tabelle 1 zu sehen, in Tabelle 2 die Wurzel ihre gezogen und in Abbildung 5 grafisch dargestellt. Wobei die Wurzel des Photostromes aufgetragen wird, um einen linearen Zusammenhang zu erhalten. Es gilt allgemein

$$I \sim U^2 \quad . \quad (15)$$

Deswegen wurden die negativen Photostöme nicht weiter beachtet, sodass zum Beispiel bei der roten Spektrallinie nur sechs von zehn Messwerten in der Auswertung berücksichtigt werden.

Tabelle 1: Gemessene Photoströme / pA

Gegenspannung / V	rot	grün	lila	blau	UV

Tabelle 2: Wurzel der gemessene Photoströme / $\sqrt{\text{pA}}$

Gegenspannung / V	rot	grün	lila	blau	UV
-2.00	2.8	16.1	24.5	18.7	19.0
-1.60	2.4	15.5	22.8	16.7	17.3
-1.20	2.4	14.1	20.0	15.8	16.4
-0.80	2.0	11.8	17.6	14.1	15.2
-0.40	1.4	9.5	14.8	11.8	12.6
0.00	0.0	5.5	9.5	9.5	10.5
0.40	–	–	7.1	6.2	8.1
0.80	–	–	0.0	2.8	4.7
1.20	–	–	–	–	2.0
1.60	–	–	–	–	–
2.00	–	–	–	–	–

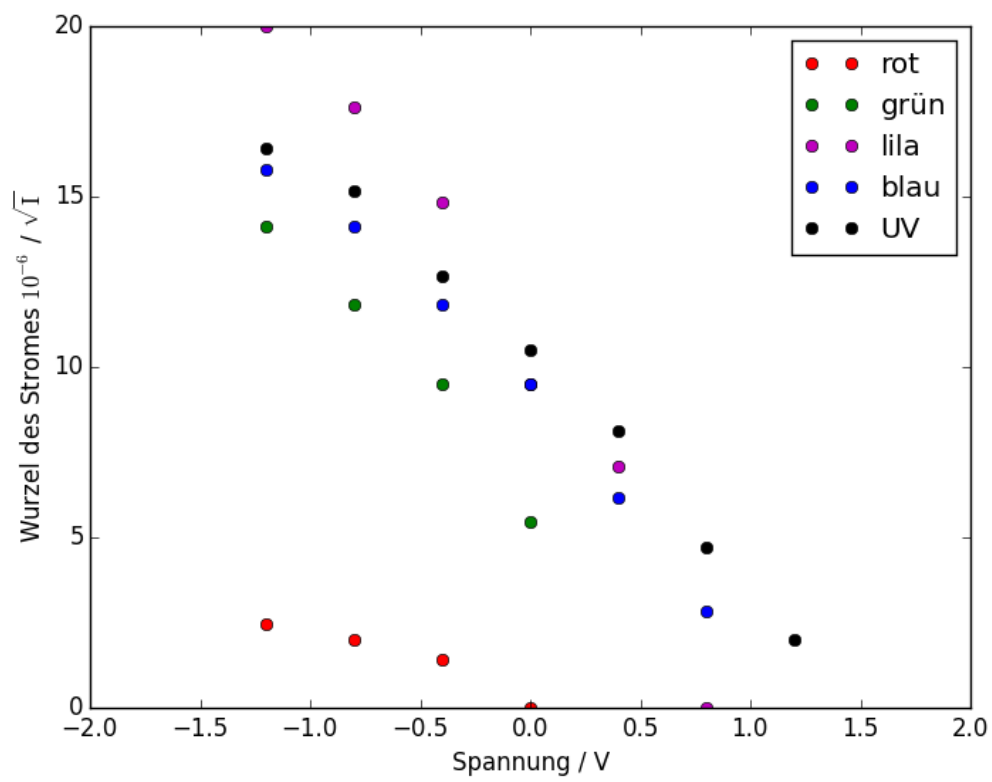


Abbildung 5: gemessene Spektrallinien

Um die Grenzspannung U_g zu bestimmen werden Ausgleichsgeraden mit Hilfe von Python nach den Formeln aus Kapitel 4.1.2 erstellt und jeweils der x-Achsenabschnitt berechnet

$$\sqrt{I} = mU + b = 0 \quad \Leftrightarrow \quad U_g = -\frac{b}{m} \quad (16)$$

Die Ausgleichsgeraden und Messwerte für jede Spektrallinie sind in den Abbildungen 6, 7, 8, 9 und 10 dargestellt. Die berechneten Parameter sind

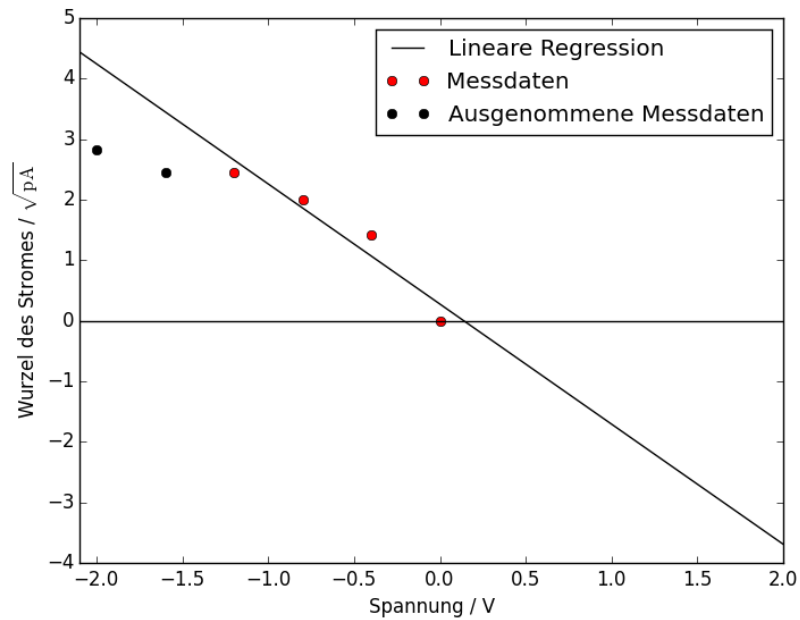
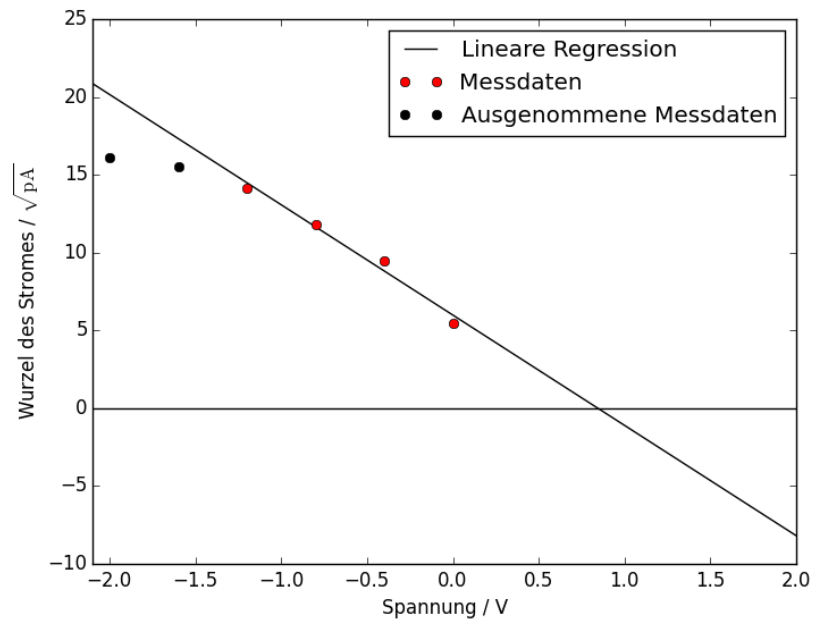
$$\begin{aligned} \text{rot:} \quad m &= (-2.0 \pm 0.4) \sqrt{\text{pA}}/\text{V} \\ b &= (0.3 \pm 0.3) \sqrt{\text{pA}} \\ U_g &= (0.1 \pm 0.2) \text{ V} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{grün:} \quad m &= (-7.1 \pm 0.7) \sqrt{\text{pA}}/\text{V} \\ b &= (6.0 \pm 0.5) \sqrt{\text{pA}} \\ U_g &= (0.8 \pm 0.1) \text{ V} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{lila:} \quad m &= (-9.8 \pm 0.9) \sqrt{\text{pA}}/\text{V} \\ b &= (9.5 \pm 0.6) \sqrt{\text{pA}} \\ U_g &= (1.0 \pm 0.1) \text{ V} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{blau:} \quad m &= (-6.5 \pm 0.4) \sqrt{\text{pA}}/\text{V} \\ b &= (8.7 \pm 0.3) \sqrt{\text{pA}} \\ U_g &= (1.3 \pm 0.1) \text{ V} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{UV:} \quad m &= (-6.1 \pm 0.3) \sqrt{\text{pA}}/\text{V} \\ b &= (9.9 \pm 0.2) \sqrt{\text{pA}} \\ U_g &= (1.62 \pm 0.09) \text{ V} \end{aligned}$$

**Abbildung 6:** Regression der roten Spektrallinie**Abbildung 7:** Regression der grünen Spektrallinie

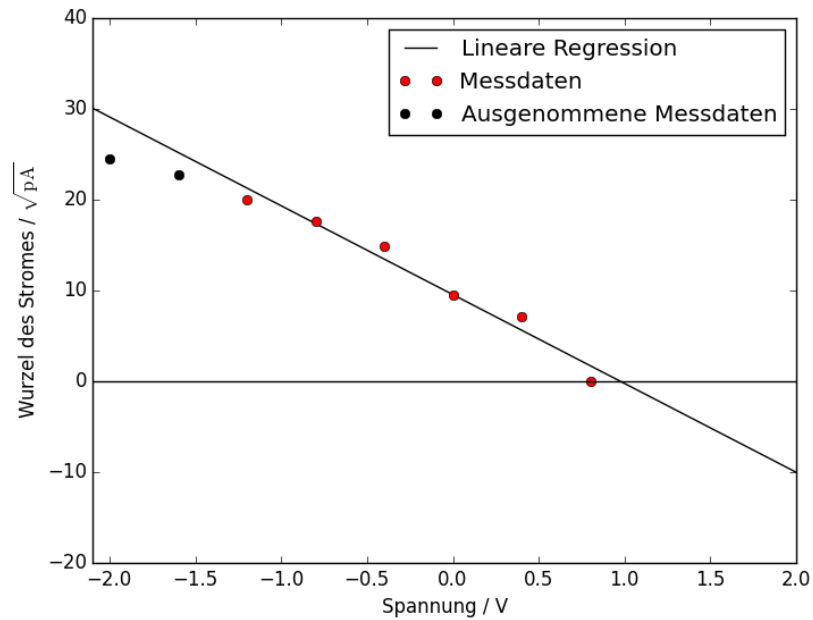


Abbildung 8: Regression der lila Spektrallinie

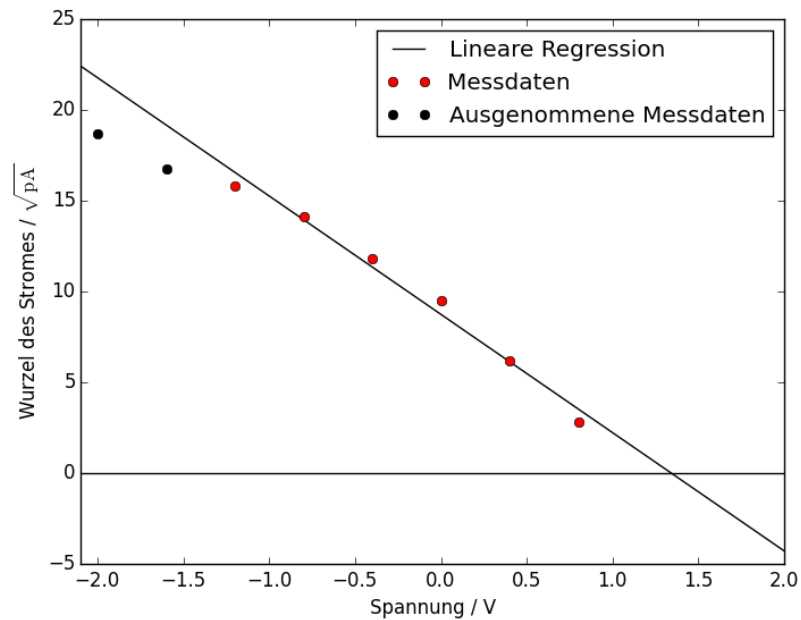


Abbildung 9: Regression der blauen Spektrallinie

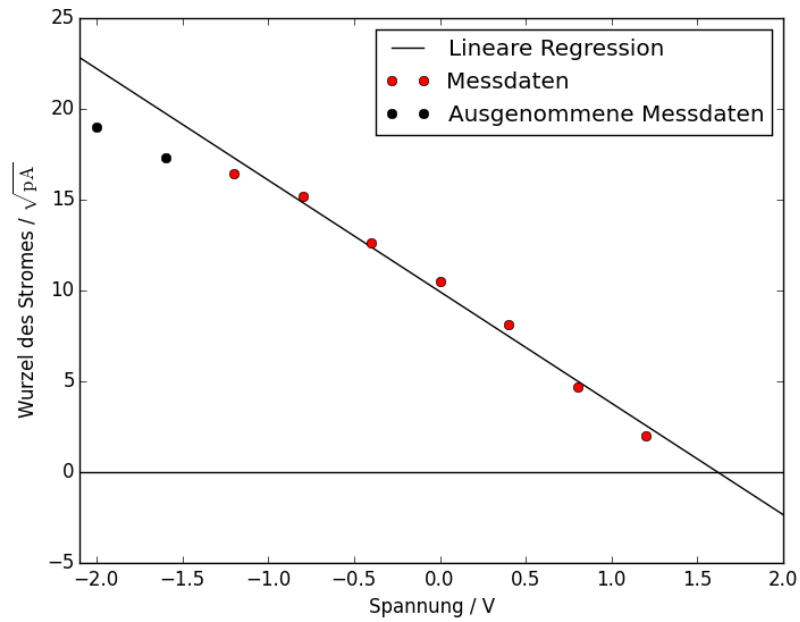
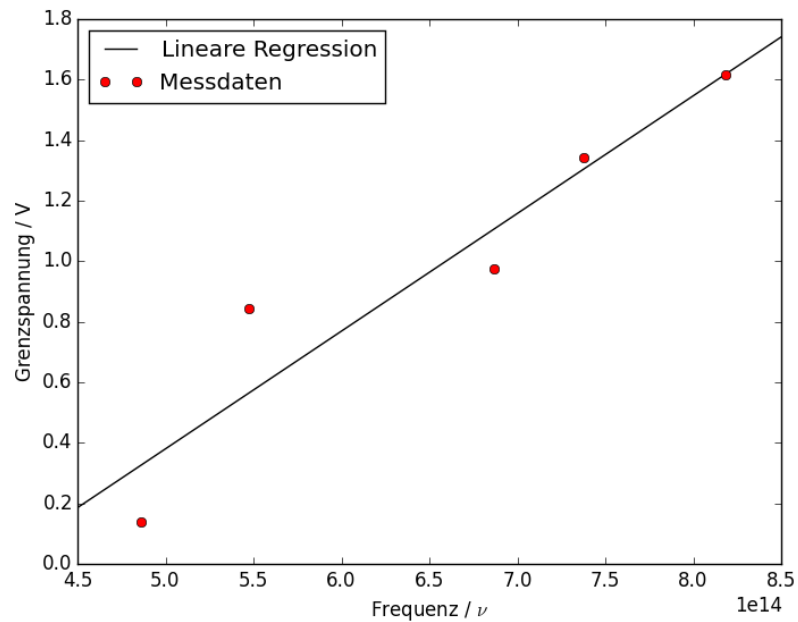


Abbildung 10: Regression der ultravioletten Spektrallinie

Abbildung 11: Regression zur Bestimmung von h und A_k

4.3 Bestimmung des Verhältnisses $\frac{h}{e_0}$

Die Gleichungen (1) und (3) liefern beide einen Ausdruck für die Energie der Photoelektronen. Durch Gleichsetzen ergibt sich

$$h\nu = e_0 U_g . \quad (17)$$

Da nach dem vorigen Kapitel die Gegenspannungen bekannt sind, kann mit Hilfe einer linearen Regression das Verhältnis vom Planckschen Wirkungsquantum h zur Elementarladung e_0 bestimmt werden. Auch die Austrittsarbeit A_k kann auf diese Weise bestimmt werden.

$$U_g = -\frac{A_k}{e_0} + \nu \frac{h}{e_0} = b + m \cdot \nu \quad (18)$$

Die Wellenlänge des Lichtes wird zunächst in die Frequenz umgerechnet

$$\nu = \frac{c}{\lambda}, \quad c = 298\,792\,458 \frac{\text{m}}{\text{s}} . \quad (19)$$

Die Werte sind in Tabelle 3 aufgetragen.

Tabelle 3: Gemessene Photoströme / pA

Gegenspannung / V	Wellenlänge / nm	Frequenz / THz
0.14	615	486
0.84	546	547
0.98	435	687
1.34	405	738
1.62	365	819

Die lineare Regression liefert schlussendlich den Graph, der in Abbildung 11 dargestellt ist und folgende Werte:

$$m = \frac{h}{e_0} = (3.89 \pm 0.77) \cdot 10^{-15} \text{ V s} \quad (20)$$

$$\Rightarrow h = (3.89 \pm 0.77) \cdot 10^{-15} \text{ eV s} \quad (21)$$

$$b = -\frac{A_k}{e_0} = (-1.56 \pm 0.51) \text{ V} \quad (22)$$

$$\Rightarrow A_k = (1.56 \pm 0.51) \text{ eV} \quad (23)$$

4.4 Photostrom des orangenen Spektrallinie

Bei der orangenen Spektrallinie ($\lambda = 578 \text{ nm}$) wird der Photonenstrom wie bei den anderen Spektrallinien auch gemessen - hier aber über ein größeres Intervall der Bremsspannung von -20 bis 20 Volt . Die Daten (siehe Tabelle 4) werden aufgetragen und der in Abbildung 12 dargestellte Plot beschrieben.

Für hohe beschleunigende Spannungen – d.h. niedrige Bremsspannung – erreicht der Photonenstrom einen Grenzwert. Das liegt daran, dass nicht beliebig viele Elektronen zur Verfügung stehen, sondern nur so viele, wie durch die Lichtquelle aus der Elektronenkathode ausgelöst werden. Das heißt, dass die Intensität der Lichtquelle den Grenzwert des Photonenstromes bestimmt.

Dieser Grenzwert wird mit der vorliegenden Versuchsanordnung allerdings nie erreicht werden. Nicht alle freiwerdenden Elektronen erreichen die Anode, da ihre Kapazität beschränkt ist. Eine Verbesserung im Versuchsaufbau, um möglichst nah an den Grenzwert zu kommen, ist eine größere Anode.

Der Photostrom bricht nicht abrupt auf null ab, wenn die Grenzspannung erreicht ist. Die Elektronen haben bereits in dem Material eine Energie (Fermi-Energie), die in Abhängigkeit von den Elektronenkonfigurationen variiert. Obwohl alle Elektronen die gleiche Lichtintensität erfahren, werden deswegen einige Elektronen die Anode bereits erreichen, während andere nicht über die hinreichende Energie verfügen.

Für hinreichend große Bremsspannungen tritt ein negativer Photonenstrom auf. Wegen der niedrigen Verdampfungstemperatur der Kathode, wird schon bei Raumtemperatur Material der Kathode freigesetzt, das sich auf der Anode ansammelt. Als Folge tritt ein Photoeffekt an der Anode auf: Es werden Elektronen freigesetzt, die zu einem negativen Strom führen.

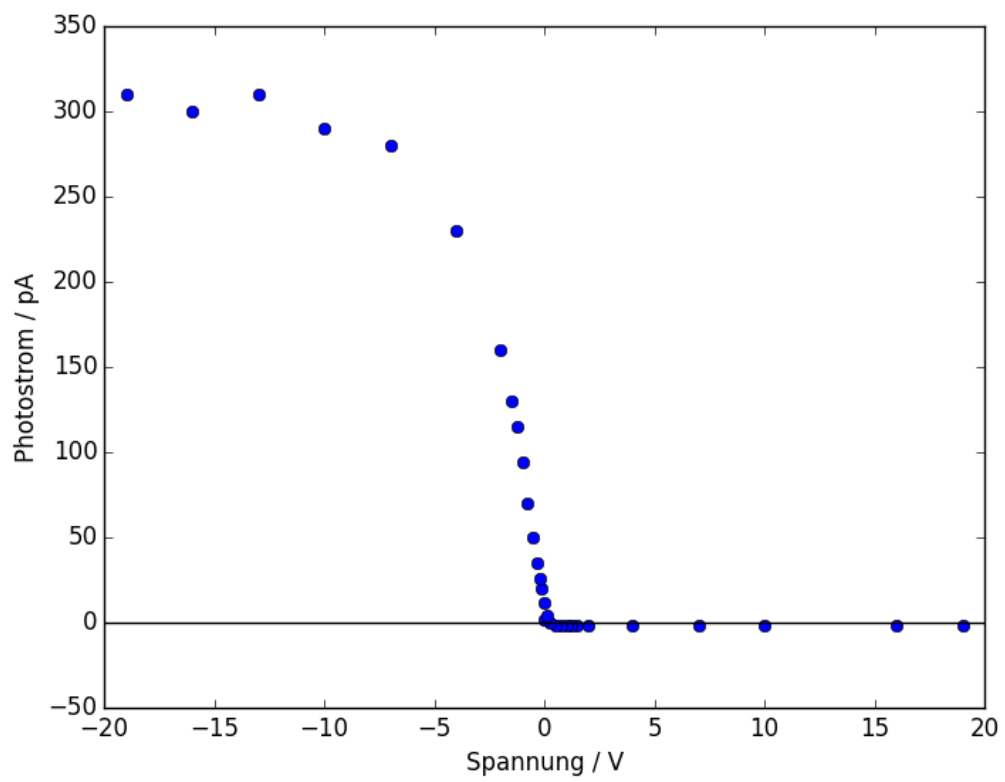


Abbildung 12: Photonenstrom der $\lambda = 578\text{nm}$ Spektrallinie

Tabelle 4: Gemessenen Photostrom der $\lambda = 578\text{nm}$ Spektrallinie

Gegenspannung / V	Photostrom / pA
19.00	-2
16.00	-2
10.00	-2
7.00	-2
4.00	-2
2.00	-2
1.50	-2
1.25	-2
1.00	-2
0.75	-2
0.50	-2
0.25	0
0.02	2
0.10	4
0.00	12
-0.10	20
-0.20	26
-0.30	35
-0.50	50
-0.75	70
-1.00	94
-1.25	115
-1.50	130
-2.00	160
-4.00	230
-7.00	280
-10.00	290
-13.00	310
-16.00	300
-19.00	310

5 Diskussion

In diesem Versuch wurde qualitativ erfolgreich gezeigt, dass Einsteins Theorie der Lichtkorpuskeln den Photoeffekt beschreibt. Es ist nichts beobachtet worden, was diesen Erklärungen widerspricht.

Bei der Bestimmung der Gegenspannung (Abschnitt 4.2) mussten jeweils zwei Messwerte ausgelassen werden, um den Bereich einer linearen Steigung nicht zu verlassen. Die Ungenauigkeiten der aus den Fit-Parametern errechneten Grenzspannung sind sehr gering. Nur die rote Spektrallinie zeigt eine Ungenauigkeit der Grenzspannung, die doppelt so groß ist, wie der Wert selbst. Diese Linie ist nur schwach sichtbar. Die quantitative Genauigkeit der Messung kann lediglich über das hier berechnete Planksche Wirkungsquantum (Abschnitt 4.3) im Vergleich mit Literaturwerten überprüft werden.

Tabelle 5: Vergleich mit Literaturwerten [Walcher]

gemessen	Literaturwert	Abweichung
$3.89 \cdot 10^{-15} \text{ eV}$	$4.135\,669\,2 \cdot 10^{-15} \text{ eV}$	-5.9%

Die Abweichung kann über einige äußere Einflüsse auf das Experiment erklärt werden. Wenn es in der Umgebung ein bisschen heller wird, zum Beispiel da an den umliegenden Versuchen Lampen verwendet werden, steigt der Photonenstrom direkt an. Des Weiteren ist das Photoelement beweglich und verrutscht manchmal, was dazu führt, dass der Lichtstrahl nicht komplett einfällt.

Aus der gleichen linearen Regression, mit der das Planksche Wirkungsquantum bestimmt wird, ergibt sich auch die Austrittsarbeit (23). Sie liegt ungefähr zwischen 1 und 2 eV. Laut Tabellenwerk³ (VERWEIS) kommen entweder Caesium (1.7-2.14 eV), Barium (1.8-2.52 eV), Bariumoxid (1 eV) oder Strontiumoxid (1 eV) als Kathodenmaterial in Frage.

³<http://www.chemie.de/lexikon/Austrittsarbeit.html>

Abbildungsverzeichnis

1	Schematische Versuchsanordnung zur Beobachtung des Photoeffekts [V500]	2
2	Verwendeter Versuchsaufbau [V500]	4
3	Optischer Aufbau, der benötigt wird um mit einer Spektrallampe Licht verschiedener Frequenzen messen zu können [V500]	4
4	Photostrom in Abhängigkeit von der Bremsspannung bei einer mit monochromatischem Licht bestrahlten Photozelle [V500]	5
5	gemessene Spektrallinien	9
6	Regression der roten Spektrallinie	11
7	Regression der grünen Spektrallinie	11
8	Regression der lila Spektrallinie	12
9	Regression der blauen Spektrallinie	12
10	Regression der ultravioletten Spektrallinie	13
11	Regression zur Bestimmung von h und A_k	13
12	Photonenstrom der $\lambda = 578\text{nm}$ Spektrallinie	16

Tabellenverzeichnis

1	Gemessene Photoströme / pA	8
2	Wurzel der gemessene Photoströme / $\sqrt{\text{pA}}$	8
3	Gemessene Photoströme / pA	14
4	Gemessenen Photostrom der $\lambda = 578\text{nm}$ Spektrallinie	17
5	Vergleich mit Literaturwerten [Walcher]	18