

V500

# Der Photoeffekt

Jonas Osterholz

Moritz Rempe

Durchführung: 23.04.2019

Abgabe: 30.04.2019

TU Dortmund – Fakultät Physik

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Zielsetzung</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Theorie</b>	<b>3</b>
2.1	Der lichtelektrische Effekt . . . . .	3
2.2	Experimentelle Erkenntnisse . . . . .	3
2.3	Die Gegenfeldmethode . . . . .	4
<b>3</b>	<b>Aufbau</b>	<b>6</b>
<b>4</b>	<b>Auswertung</b>	<b>7</b>
4.1	Photostrom - Bremsspannung . . . . .	7
4.2	Bestimmung des $h/e_0$ Verhältnisses und der Austrittsarbeit . . . . .	15
4.3	Genauere Untersuchung des gelben Spektralbereiches . . . . .	17
<b>5</b>	<b>Diskussion</b>	<b>17</b>
<b>6</b>	<b>Literatur</b>	<b>18</b>

# 1 Zielsetzung

Das Ziel dieses Experimentes bestand darin, die Korpuskulartheorie von Licht nachzuweisen. Außerdem wird das Plancksche Wirkungsquantum bestimmt.

## 2 Theorie

### 2.1 Der lichtelektrische Effekt

Der Photoeffekt beschreibt den Vorgang, bei dem sich Elektronen durch Lichtbestrahlung von Metalloberflächen lösen. Hierzu wird das Teilchenmodell von Licht aus der Quantendynamik zur Erklärung des Phänomens verwendet. Dabei wird angenommen, dass das Licht als nicht weiter zerlegbare Energieportionen auftritt, die auch Photonen oder Lichtquanten genannt werden.

### 2.2 Experimentelle Erkenntnisse

Prinzipiell wird beim Photoeffekt ein im Vakuum befindliches Metall, welches als Photokathode bezeichnet wird, mit Licht bestrahlt und der dabei entstehende Strom gemessen.

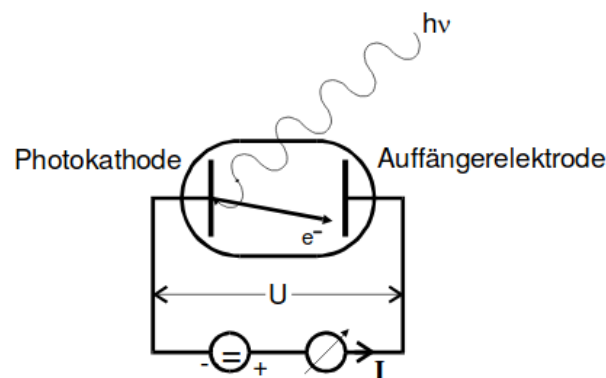


Abbildung 1: Prinzipieller Versuchsaufbau.

Im Gegensatz dazu den Photoeffekt mit dem Teilchenmodell zu erklären, könnte die theoretische Annahme getroffen werden, dass die Elektronen durch das schwingende elektromagnetische Feld des Lichts aus dem Metall gelöst werden. So würde eine langfristige Bestrahlung mit genügend hoher Intensität jeder Wellenlänge bzw. jeder Frequenz Elektronen lösen und es könnte zu Resonanzfällen kommen. Das Experiment liefert aber andere Beobachtungen. Zunächst lässt sich sagen, dass die Zahl der pro Zeiteinheit gelösten Elektronen proportional zu der Lichtintensität ist. Außerdem ist die Energie der gelösten Elektronen, die über den gemessenen Strom berechnet wird, linear in der Lichtfrequenz  $\nu$  und unabhängig von der Lichtintensität. Des Weiteren existiert eine minimale Frequenz, die auch als Grenzfrequenz bezeichnet wird, unter der keine Elektronen gelöst werden.

Unter der Annahme des Teilchenmodells nach Einstein sind diese Beobachtungen nun zu erklären. Das Licht wird nicht mehr nur als Welle, in der die Energie über den Wellenraum gleichmäßig verteilt wäre, sondern auch als subatomares Teilchen von praktisch vernachlässigbarer Ausdehnung angenommen, bei dem die Energie portionsweise auf die Photonen verteilt ist. Dies hat zur Folge, dass monochromatisches Licht somit nur Photonen gleicher Energien  $h\nu$  aufweist. Dieser Zusammenhang, dass die Photonenenergie proportional zur Lichtfrequenz ist, wird über die Energie der Elektronen und den damit verbundenen Strom folgendermaßen bestimmt. Das Photon gibt seine Energie an das Elektron ab, wobei sich die Energie in die Austrittsarbeit  $A_K$ , die aufgebracht werden muss um das Elektron vom Feststoff zu lösen, und die kinetische Energie nach

$$h\nu = \frac{m_0}{2} v_{\max}^2 + A_K \quad (1)$$

aufteilt. Der Photoeffekt tritt also nur für  $h\nu \geq A_K$  auf. Zusätzlich folgt aus Gleichung 1, dass die Energie der gelösten Elektronen nur linear in der Frequenz ist. Des Weiteren ist die Lichtintensität proportional zur Zahl der auf das Metall auftreffenden Photonen pro Zeiteinheit, was die Intensitätsabhängigkeit der gelösten Elektronen pro Zeiteinheit erklärt.

### 2.3 Die Gegenfeldmethode

Bei der Gegenfeldmethode befinden sich im Vakuum zwei Elektroden, einerseits die Auffängerelektrode bzw. Anode und andererseits die Photokathode. Zwischen den beiden Elektroden wird wie in Abbildung 1 gezeigt eine Spannung angelegt, die die gelösten Elektronen auf dem Weg zur Anode entweder beschleunigt oder abbremst. Da die angelegte Spannung die Elektronen meistens abbremsen soll, wird diese Gegenspannung auch  $U_{\text{geg}}$  genannt und der Versuch als Gegenfeldmethode bezeichnet. Somit gelangen nur Elektronen zur Anode, die eine genügend hohe kinetische Energie besitzen um das elektrische Potential zu überwinden. Zur Bestimmung der kinetischen Energie der Elektronen wird die Gegenspannung so eingestellt, dass der Strom verschwindet und

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

gilt. Nach den Gleichungen 1 und 2 ergibt sich für die spannungsabhängige Energie der Photonen

$$h\nu = e_0 U_{\text{geg}} + A_K. \quad (3)$$

Daraus ergibt sich dann der lineare Zusammenhang zwischen Spannung und Lichtfrequenz mit

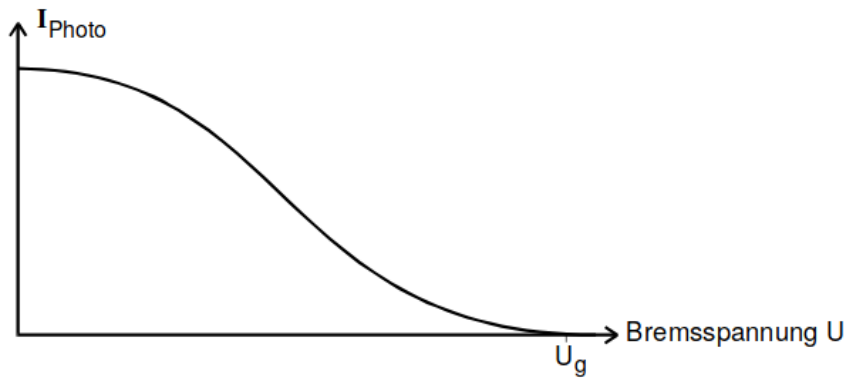
$$U_{\text{geg}} = \frac{h\nu}{e_0} - \frac{A_K}{e_0}. \quad (4)$$

Über diese Voraussetzung lässt sich dann experimentell das Plancksche Wirkungsquantum  $h$  bestimmen.

Der ebenfalls zu untersuchende Spannung-Strom-Zusammenhang wird in Abbildung 2 angetragen. Aus folgendem Grund erschwert sich die Messung der Grenzspannung  $U_{\text{geg}}$ . Dies ergibt sich daraus, dass die Elektronen im Metall aufgrund des Pauli-Prinzips und des Spins unterschiedliche Energien besitzen, was anhand der Fermi-Diracschen-Wahrscheinlichkeitsverteilung gezeigt werden kann. So erstreckt sich beim Temperaturnullpunkt  $T = 0 \text{ K}$  das Energiespektrum der Leitungselektronen von 0 bis zur Fermie-Energie  $\zeta$ .

Bei Temperaturen  $T > 0 \text{ K}$  können auch Elektronen mit höheren Energien als der Fermie-Energie auftreten. So gibt es auch die geringe Möglichkeit, dass Elektronen bei endlichen Temperaturen eine Energie haben, die größer als  $h\nu - A_K$  ist. Dadurch erschwert sich die Messung der Grenzspannung  $U_g$ , weil sich für die hochenergetischen Elektronen die Grenzspannung verschiebt, da mehr Arbeit aufgebracht werden muss um diese abzubremesen.

Außerdem kann nicht gewährleistet werden, dass alle gelösten Elektronen die Auffängerelektrode erreichen und somit zum gemessenen Strom beitragen. Das äußert sich im Spannung-Strom-Diagramm in Abbildung 2 dadurch, dass kontinuierlich Photostrom bereits bei  $U < U_g$  deutlich und nichtlinear gegen null geht, und nicht erst bei  $U_{\text{geg}} = U_g$ .



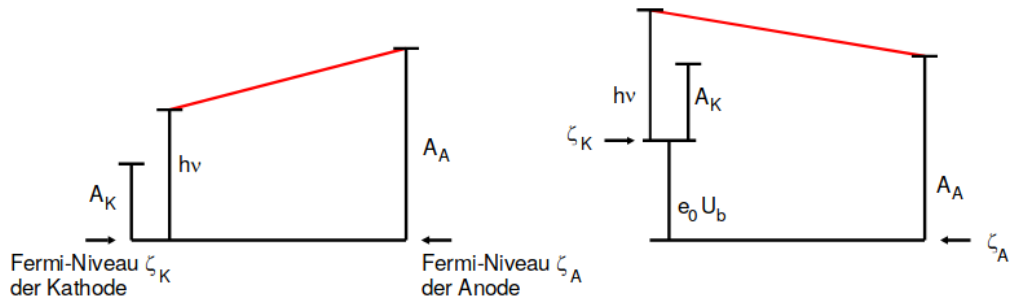
**Abbildung 2:** Experimentelle Kurve des Photostroms  $I_{\text{Photo}}$  und der Gegenspannung  $U_{\text{geg}}$  und Eintrag der Grenzspannung  $U_g$

Des Weiteren werden die Elektronen falls die Austrittsarbeit der Anode  $A_A$  größer ist als die der Photokathode  $A_K$ , zusätzlich gebremst. Dies wird in Abbildung 3 so dargestellt, dass eine zusätzliche Beschleunigungsspannung nötig wäre damit Elektronen in die Anode eintreten könnten und ein Photostrom messbar wäre.

In der Umgebung von  $U_g$  lässt sich der Zusammenhang zwischen der angelegten Gegenspannung und des Photostroms mit

$$I_{\text{Ph}} \propto U_{\text{geg}}^2 \quad (5)$$

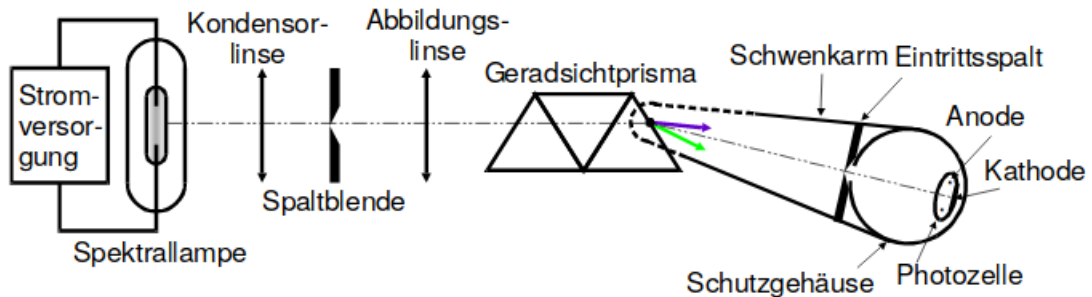
nähern. Die Grenzspannung  $U_g$  gibt dabei die Schnittstelle mit der Spannungsachse wieder.



**Abbildung 3:** Energieniveaus der Photo- und Auffangelektrode ohne (links) und mit (rechts) Beschleunigungsspannung.

### 3 Aufbau

Der experimentelle Aufbau zur Untersuchung des Photoeffektes ist in Abbildung 4 dargestellt. Hier wird zunächst das Licht einer Spektrallampe durch verschiedene optische Geräte und letztendlich durch ein ein Prisma in Spektrallinien aufgebrochen.



**Abbildung 4:** .Optischer Aufbau des Experimentes

Dieses nahezu monochromatische Licht wird dann auf die Photozelle geworfen. Die Photozelle ist ein vakuumierter Glaskolben, der einerseits die Photokathode enthält, die aus einer auf der Innenseite aufgedampften Metall oder Legierungsschicht besteht. Andererseits ist kreisförmig um die Photokathode die Auffanganode als Draht angebracht. In Abbildung 5 werden diese beiden Elektroden deutlich. Des Weiteren kann eine Spannung an den beiden Anschlüssen angelegt werden, die die Elektronen entweder beschleunigt oder abbremst.

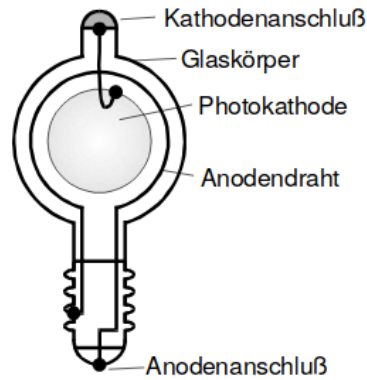


Abbildung 5: .Aufbau der Photozelle

## 4 Auswertung

### 4.1 Photostrom - Bremsspannung

Zu Beginn werden die bestimmten Photoströme  $\sqrt{I}$  gegen die jeweilige Bremsspannung  $U_{\text{geg}}$  aufgetragen. Im Folgenden sind in den Abbildungen 6 bis 10 die Messwerte der gelben ( $\lambda = 587 \text{ nm}$ ), grünen ( $\lambda = 546 \text{ nm}$ ), blaugrünen ( $\lambda = 492 \text{ nm}$ ), blauen ( $\lambda = 434 \text{ nm}$ ) und ultravioletten ( $\lambda = 365 \text{ nm}$ ) Spektrallinien abgebildet. Die Messdaten sind in den Tabellen 1 bis 5 aufgelistet.

**Tabelle 1:** Messdaten der Spektrallinie  $\lambda = 365 \text{ nm}$ .

$\frac{U_{\text{geg}}}{V}$	$\frac{I}{nA}$	$\sqrt{\frac{I}{nA}}$
1.46	0.000	0.000
1.30	0.005	0.071
1.20	0.010	0.100
1.10	0.018	0.134
1.00	0.020	0.141
0.90	0.030	0.173
0.80	0.040	0.200
0.70	0.046	0.214
0.60	0.062	0.249
0.50	0.062	0.249
0.40	0.070	0.265
0.30	0.075	0.274
0.20	0.086	0.293
0.10	0.100	0.316
0.00	0.110	0.332

**Tabelle 2:** Messdaten der Spektrallinie  $\lambda = 434\text{nm}$ .

$\frac{U_{\text{geg}}}{V}$	$\frac{I}{nA}$	$\sqrt{\frac{I}{nA}}$
1.17	0.000	0.000
1.10	0.005	0.071
1.00	0.016	0.126
0.90	0.018	0.134
0.80	0.035	0.187
0.70	0.046	0.214
0.60	0.056	0.237
0.50	0.067	0.259
0.40	0.110	0.332
0.30	0.130	0.361
0.20	0.180	0.424
0.10	0.190	0.436
0.00	0.230	0.480

**Tabelle 3:** Messdaten der Spektrallinie  $\lambda = 492\text{nm}$ .

$\frac{U_{\text{geg}}}{V}$	$\frac{I}{nA}$	$\sqrt{\frac{I}{nA}}$
1.02	0.000	0.000
1.00	0.005	0.071
0.90	0.028	0.167
0.80	0.039	0.197
0.70	0.088	0.297
0.60	0.120	0.346
0.50	0.150	0.387
0.40	0.230	0.480
0.30	0.250	0.500
0.20	0.300	0.548
0.10	0.330	0.584
0.00	0.350	0.592



**Tabelle 4:** Messdaten der Spektrallinie  $\lambda = 546\text{nm}$ .

$\frac{U_{\text{geg}}}{V}$	$\frac{I}{nA}$	$\sqrt{\frac{I}{nA}}$
0.57	0.000	0.000
0.55	0.002	0.045
0.50	0.010	0.100
0.45	0.024	0.155
0.40	0.044	0.210
0.35	0.049	0.221
0.30	0.064	0.253
0.25	0.100	0.316
0.20	0.120	0.346
0.15	0.174	0.417
0.10	0.210	0.458
0.05	0.222	0.471
0.00	0.240	0.490

**Tabelle 5:** Messdaten der Spektrallinie  $\lambda = 587\text{nm}$ .

$\frac{U_{\text{geg}}}{V}$	$\frac{I}{nA}$	$\sqrt{\frac{I}{nA}}$
0.50	0.000	0.000
0.55	-0.002	—
0.60	-0.002	—
0.65	-0.004	—
0.70	-0.004	—
0.45	0.000	0.000
0.42	0.003	0.055
0.40	0.004	0.063
0.38	0.008	0.089
0.36	0.010	0.100
0.34	0.012	0.110
0.32	0.016	0.126
0.30	0.017	0.130
0.28	0.022	0.148
0.26	0.027	0.164
0.24	0.030	0.173
0.22	0.030	0.173
0.20	0.033	0.182
0.18	0.042	0.205
0.16	0.048	0.219
0.14	0.054	0.232
0.12	0.058	0.241
0.10	0.067	0.259
0.08	0.070	0.265
0.06	0.080	0.283
0.04	0.078	0.279
0.02	0.058	0.241
0.00	0.065	0.255
-0.05	0.080	0.283
-0.10	0.082	0.286
-0.15	0.092	0.303
-0.20	0.094	0.307
-0.25	0.085	0.292

Die Ausgleichsgerade wird mit Hilfe linearer Regression erstellt. Es besteht folgender Zusammenhang:

$$U_g = -\frac{b}{a} \quad (6)$$

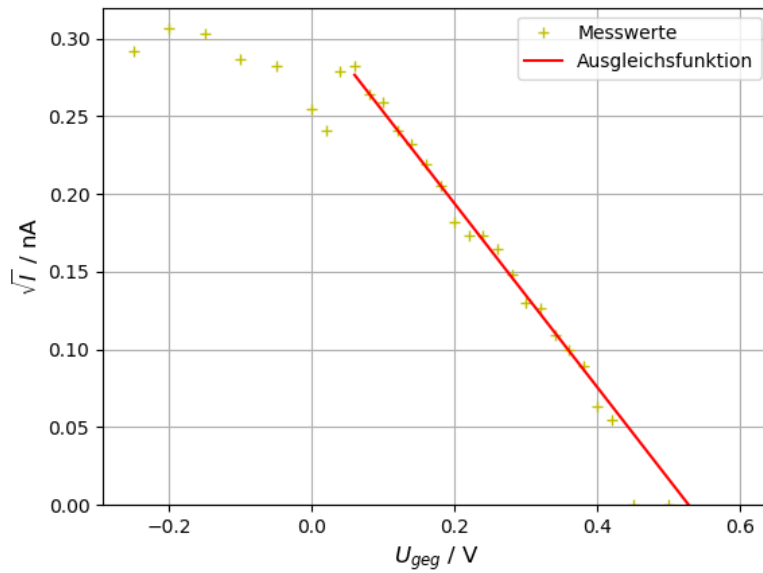
Über den Zusammenhang  $\sqrt{I} \sim U$  (4) können die Werte  $b$  und  $a$  per Regression mithilfe

der Gleichung

$$\sqrt{I} = a \cdot U_{\text{geg}} + b$$

bestimmt werden.  $a$  ist in den folgenden Fits die Steigung und  $b$  der y-Achsen-Abschnitt. In den folgenden Fits wurden zudem teilweise Werte ausgelassen. Für die Regression müssen nur die linear abfallenden Werte berücksichtigt werden, bei manchen Messreihen flachten die Messwerte jedoch zu stark ab, als das ein linearer Zusammenhang angenommen werden konnte. Der Fehler der Grenzspannung  $U_g$  wird bestimmt durch

$$\Delta U_g = \sqrt{\left(\left(-\frac{1}{a}\right) \cdot \Delta b\right)^2 + \left(\frac{b}{a^2} \cdot \Delta a\right)^2}. \quad (7)$$



**Abbildung 6:** Photostrom  $\sqrt{I}$  bei gelber Spektralfarbe ( $\lambda = 587\text{nm}$ ).

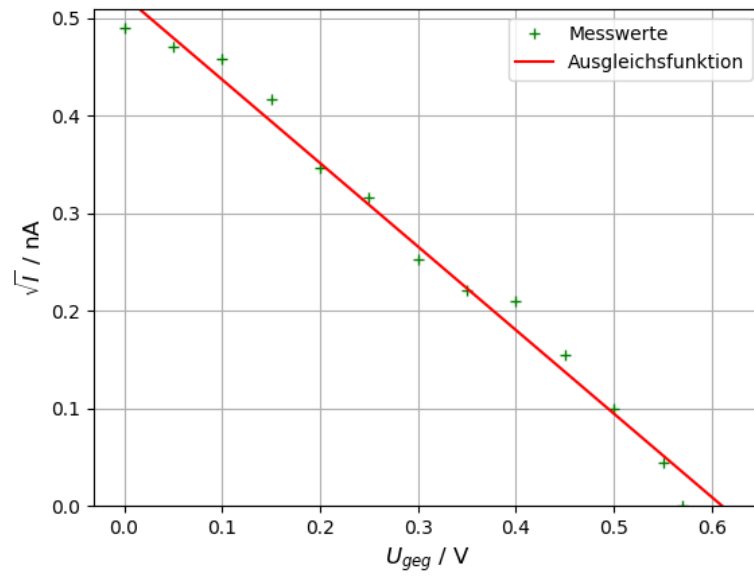
Für die gelbe Spektrallinie ergibt sich:

$$a = -0.5916 \pm 0.0002$$

$$b = 0.3121 \pm 0.0$$

und somit

$$U_g = (0,5276 \pm 0,0002) \text{ eV}.$$



**Abbildung 7:** Photostrom  $\sqrt{I}$  bei grüner Spektralfarbe ( $\lambda = 546\text{nm}$ ).

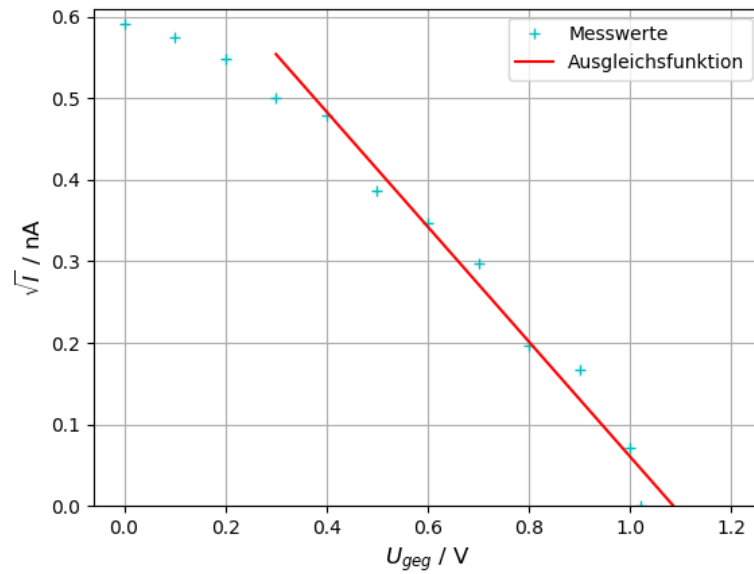
Für die grüne Spektrallinie ergibt sich:

$$a = -0.8563 \pm 0.0010$$

$$b = 0.5228 \pm 0.0001$$

und somit

$$U_{\text{g}} = (0,6105 \pm 0,0007) \text{ eV}.$$



**Abbildung 8:** Photostrom  $\sqrt{I}$  bei blaugrüner Spektralfarbe ( $\lambda = 492\text{nm}$ ).

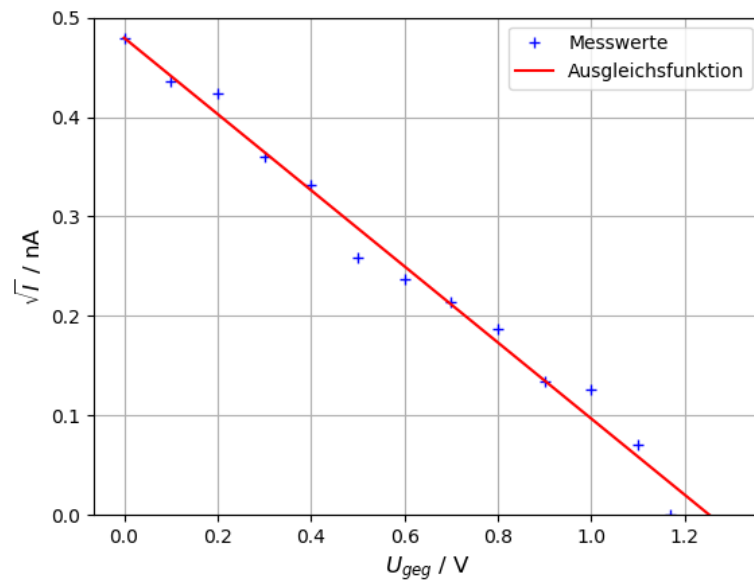
Für die blaugüne Spektrallinie ergibt sich: Für die grüne Spektrallinie ergibt sich:

$$a = -0.705 \pm 0.004$$

$$b = 0.766 \pm 0.003$$

und somit

$$U_{\text{g}} = (1,0850 \pm 0,0070) \text{ eV}.$$



**Abbildung 9:** Photostrom  $\sqrt{I}$  bei blauer Spektralfarbe ( $\lambda = 434\text{nm}$ ).

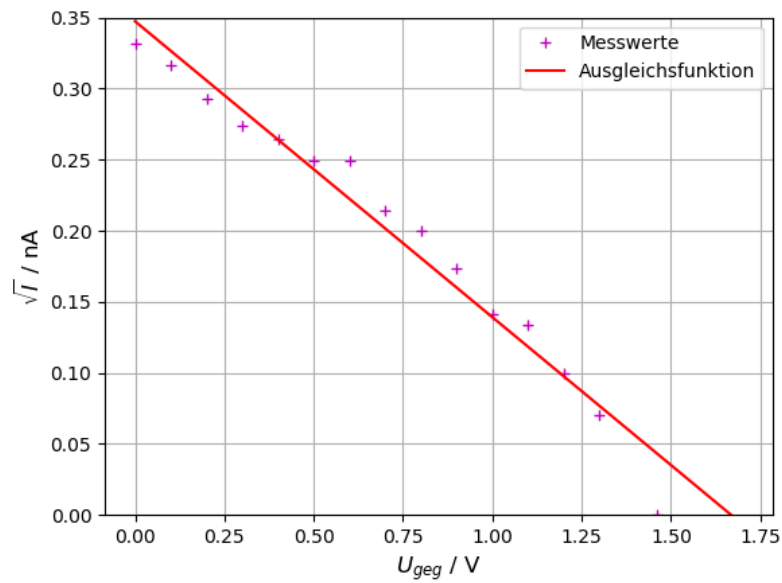
Für die blaue Spektrallinie ergibt sich:

$$a = -0.3828 \pm 0.0002$$

$$b = 0.4796 \pm 0.0001$$

und somit

$$U_{\text{g}} = (1,2529 \pm 0,0007) \text{ eV}.$$



**Abbildung 10:** Photostrom  $\sqrt{I}$  bei UV-Spektralfarbe ( $\lambda = 365\text{nm}$ ).

Für die UV-Spektrallinie ergibt sich:

$$a = -0.2082 \pm 0.0001$$

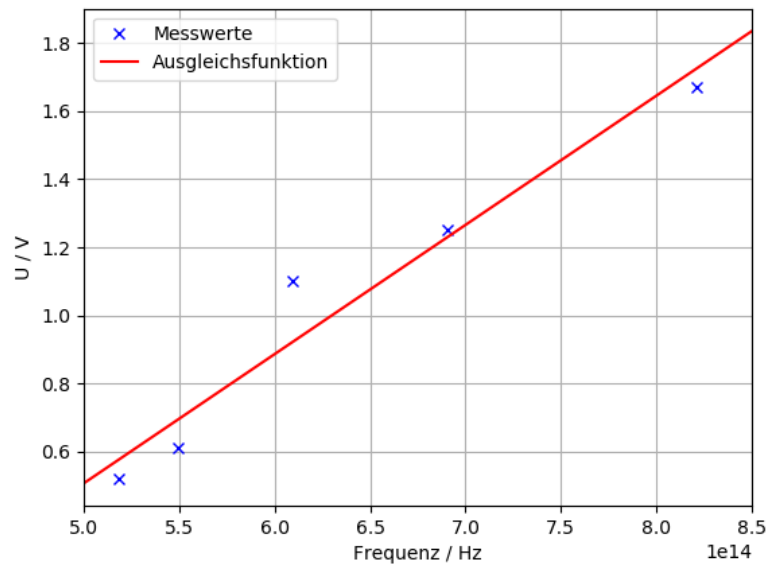
$$b = 0.3473 \pm 0.0$$

und somit

$$U_g = (1,6685 \pm 0,0010) \text{ eV}.$$

## 4.2 Bestimmung des $h/e_0$ Verhältnisses und der Austrittsarbeit

In Abbildung 11 ist die Grenzspannung  $U_g$  gegen die Lichtfrequenz der in Abschnitt 4.1 genannten Spektralfarben abgebildet.



**Abbildung 11:** Grenzspannung  $U_g$  gegen Lichtfrequenz der in Abschnitt 4.1 genannten Spektralfarben.

Die verwendeten Wellenlängen sind in Tabelle 6 aufgelistet und mithilfe der Gleichung

$$\nu = \frac{c}{\lambda}$$

in die Frequenz umgeformt.

**Tabelle 6:** Verwendete Wellenlängen und Frequenzen der verschiedenen Spektralfarben.

Farbe	$\lambda/\text{nm}$	$\nu/10^{14}\text{Hz}$
gelb	578	5.187
grün	546	5.491
blaugrün	492	6.093
blau	434	6.908
UV	365	8.213

Per linearer Regression und dem Zusammenhang

$$U_g = a \cdot \nu + b$$

bzw.

$$U_g = \frac{h\nu}{e_0} - \frac{A_k}{e_0}$$



kann nun das Verhältnis  $h/e_0$  und die Austrittsarbeit  $A_k$  bestimmt werden:

$$a = \frac{h}{e_0} = (3.792 \pm 0.000) \cdot 10^{-15} \text{ J s C}^{-1}$$
$$b = A_k = (1,39 \pm 0,11) \text{ eV}$$

### 4.3 Genauere Untersuchung des gelben Spektralbereiches

Im letzten Versuchsteil wird der Spektralfarbenbereich bei  $\lambda = 578 \text{ nm}$  genauer untersucht. Das heißt, es werden mehr Werte aufgenommen. Es wird auch bei negativer Gegenspannung, also Beschleunigungsspannung gemessen. Die Werte sind in Abbildung 6 abgebildet. Die Beschleunigungsspannung liegt bei den Werten links des Wertes  $U_{\text{geg}} = 0$ . Die dazugehörigen Messwerte sind in Tabelle 5 aufgelistet.

Die Kurve erreicht bei anliegender Beschleunigungsspannung einen Grenzwert. Dies ist damit zu erklären, dass die Anzahl der ausgelösten Elektronen von der Lichtintensität abhängen. Es kann also nur eine endliche Anzahl an Elektronen die Anode erreichen. Die Beschleunigungsspannung bewirkt, dass auch energiearme Elektronen die Anode erreichen. Ab einem bestimmten Wert erreichen alle Elektronen die Anode, weshalb der gemessene Strom nicht größer werden kann. Es besteht daher kein Widerspruch zum Ohmschen Gesetz.

Der Photostrom fällt bei  $U_g$  nicht direkt auf 0, sondern sinkt bereits eher. Die im Metall gebundenen Elektronen besitzen bereits Energie. Somit muss eine größere Bremsspannung aufgebracht werden um den Photostrom komplett zu stoppen.

Bei höherer Bremsspannung als Gegenspannung entsteht ein entgegengesetzter, wenn auch geringer, Strom. Das Kathodenmaterial beginnt bereits bei Raumtemperatur zu verdampfen, sodass Elektroden aus dem Kathodenmaterial entweichen und teilweise an der Anode ablagern. An der Anode tritt nun auch der Photoeffekt auf und durch die Bremsspannung werden die Elektronen zur Kathode hin beschleunigt. Der Sättigungswert tritt hierbei deutlich früher auf, da es sich um nur wenige Elektronen handelt. Da dieser negative Strom bereits bei einer Licht-Wellenlänge von  $\lambda \approx 650 \cdot 10^{-9} \text{ m}$  auftritt, kann davon ausgegangen werden, dass die Austrittsarbeit der Anode mindestens so klein ist wie die der Kathode.

## 5 Diskussion

Bei dem Versuch entstanden traten nur geringe Fehler. Es kann davon ausgegangen werden, dass trotz vieler möglicher Fehlerquellen, die Messdaten nahe an der Theorie liegen. Dies erkennt man an den Plots, beziehungsweise an den Regressionen, da diese sehr nah an den Werten liegen und zudem nur kleine Fehler liefern. Mögliche Fehlerquellen sind das Ablesen des Amperemeters, ein nicht genauer Aufbau der Apparaturen und eine Schwankung der Lichtintensität. Diese Schwankung kann die Messung bei der gelben Spektrallinie erklären. Dies ist die einzige Messreihe, welche ungenaue und teils nicht

annehmbare Werte hervorbrachte, da der gemessene Photostrom immer wieder plötzlich abfiel. Auch können externe Lichtquellen zu Abweichungen der Messwerte führen. Es kann der Wert von  $h/e_0$  mit dem Literaturwert verglichen werden. Der Literaturwert beträgt

$$h/e_0 = 4,316 \cdot 10^{-15} \text{ eV}.$$

Der anhand der Messwerte ermittelte Wert beträgt

$$h/e_0 = 3,792 \cdot 10^{-15} \text{ eV}.$$

Es besteht also eine Abweichung von 13,8%.

## **6 Literatur**

[1] TU Dortmund. Versuchsanleitung zum Experiment V500 - Der Photoeffekt. 2019.