

500

Der Photoeffekt

Christopher Krause
christopher2.krause@tu-dortmund.de

Lucas Witthaus
lucas.witthaus@tu-dortmund.de

Durchführung: 17.04.2018

Abgabe: 24.04.2018

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1 Zielsetzung	3
2 Theorie	3
2.1 Grundlagen des Photoeffektes	3
2.2 Experimentelle Methode zur Untersuchung des Photoeffektes	4
3 Durchführung	6
4 Auswertung	7
4.1 Berechnung der Grenzspannung des Lichtes verschiedener Wellenlänge . .	7
4.2 Bestimmung der Austrittsarbeit und des Verhältnisses h/e_0	17
5 Diskussion	18
Literatur	18

1 Zielsetzung

In diesem Versuch sollen verschiedene Eigenschaften von Licht und Elektronen bei dem Photoeffekt untersucht werden.

2 Theorie

[1]

2.1 Grundlagen des Photoeffektes

Der Photoeffekt lässt sich nur schlüssig erklären, wenn Licht durch das Korpuskelmodell beschrieben wird. Mit monochromatischem Licht wird eine Festkörperoberfläche bestrahlt. Die einzelnen Photonen übertragen ihre Energie auf die Elektronen in der Festkörperoberfläche. Die Energie teilt sich in die Austrittsarbeit A_k und die kinetische Energie E_{kin} der Elektronen auf. Die Austrittsarbeit ist die nötige Energie um ein Elektron aus der Oberfläche zu lösen.

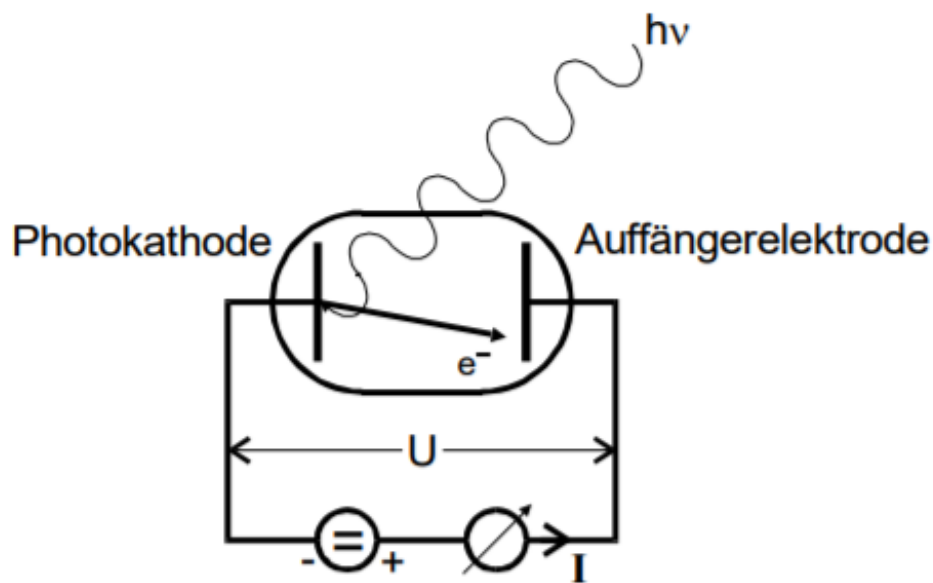


Abbildung 1: Grundlegender Aufbau zur Untersuchung des Photoeffektes. [1]

Hinter der Festkörperoberfläche befindet sich eine Metallplatte, welche in Bezug auf die Photokathode ein positives Potenzial besitzt. Treffen Elektronen auf diese Platte kann ein Strom gemessen werden.

Die Photonen haben die Energie

$$E = h\nu. \quad (1)$$

Da sich diese Energie beim Auslösen der Elektronen auf A_k und E_{kin} aufteilt, gilt:

$$h\nu = E_{kin} + A_k \quad (2)$$

Ist die Energie der Photonen kleiner als die Austrittsarbeit können keine Elektronen ausgelöst werden und es fließt kein Strom, weshalb es eine Grenzfrequenz geben muss, die diesen Fall beschreibt.

Gleichung (2) zeigt außerdem, dass die kinetische Energie ausschließlich proportional zur Frequenz des Lichtes ist.

2.2 Experimentelle Methode zur Untersuchung des Photoeffektes

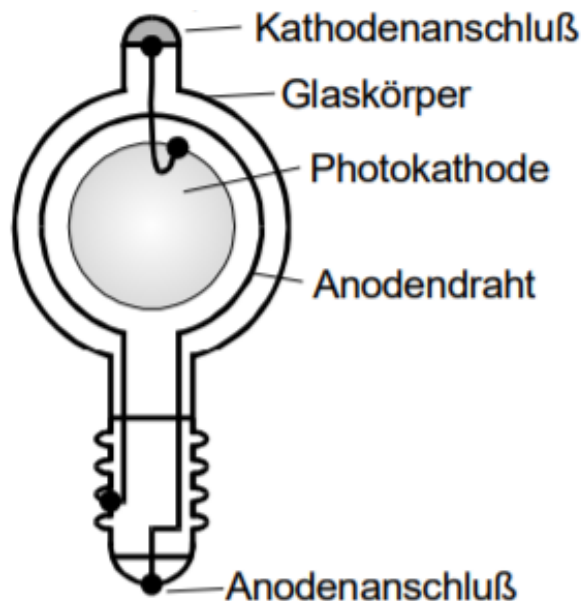


Abbildung 2: Aufbau einer Photozelle. [1]

In einer Photozelle werden Elektronen ausgelöst. Sie besteht aus einer Photokathode, welche mit Licht bestrahlt werden kann. Diese besteht im Innern aus einer aufgedampften Metall- oder Legierungsschicht. Die Anode ist ein kreisförmiger Draht, welche parallel zur Kathodenoberfläche angebracht ist.

Um die Energie der ausgelösten Elektronen zu bestimmen wird die Gegenfeldmethode verwendet.

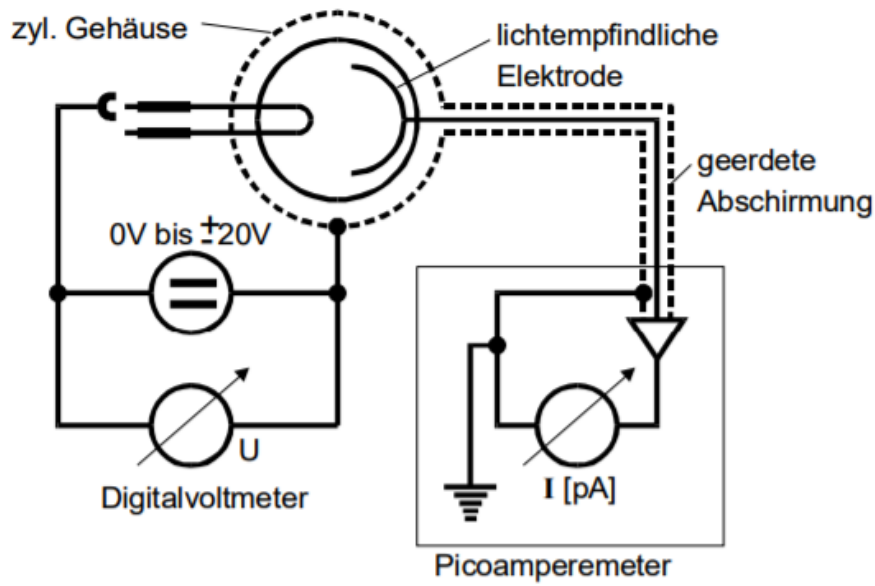


Abbildung 3: Messapparatur für die Gegenfeldmethode. [1]

An die Kathoden-Anoden-Strecke wird eine variable Spannung U angelegt. Diese wird so stark eingestellt, sodass die schnellsten Elektronen gerade nicht die Anode erreichen. Dann entspricht die Energie des Gegenfeldes gerade die der Elektronen.

$$e_0 U_g = \frac{1}{2} m_0 v_{max}^2 \quad (3)$$

Dabei ist e_0 die Elementarladung, v_{max} die maximale Geschwindigkeit der Elektronen und U_g die dafür nötige Spannung des Gegenfeldes.

Dann gilt für die Energie der schnellsten Elektronen:

$$h\nu = e_0 U_g + A_k \quad (4)$$

Bei der praktischen Durchführung verschwindet der Photostrom jedoch nicht schlagartig bei der Grenzspannung, sondern schon bei geringeren Spannungen deutlich. Der Grund dafür ist, dass die Elektronen nicht monoenergetisch sind, sondern eine Energieverteilung von 0 bis $\frac{1}{2} m v_{max}^2$ besitzen. Die Strom-Spannungs-Kurve ist in Abbildung 4 dargestellt.

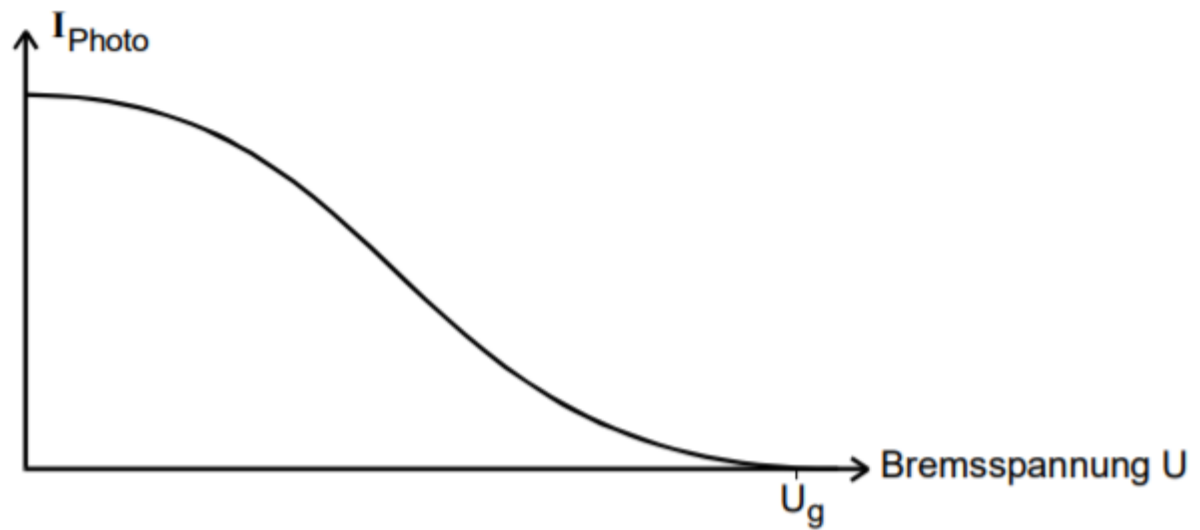


Abbildung 4: Photostrom in Abhängigkeit von der Bremsspannung. [1]

Unter bestimmten Voraussetzungen gibt es zwischen dem Photostrom I_{Ph} und der Bremspannung einen parabolischen Zusammenhang.

$$I_{Ph} \propto U^2$$

Hat das Anodenmaterial eine hohe Austrittsarbeit A_A so können Elektronen, welche zwar ausgelöst werden nicht die Anode erreichen, falls ihre Energie kleiner als A_A ist. Wird ein beschleunigendes Potential U_b angelegt, können die Elektronen die Anode wieder erreichen, wenn gilt:

$$h\nu + e_0 U_b \geq A_A \quad (5)$$

3 Durchführung

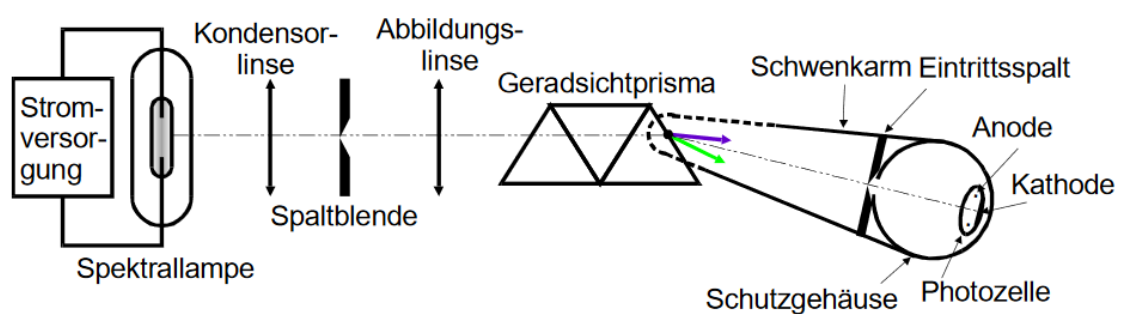


Abbildung 5: Aufbau zur Modifikation des Lichtweges. [1]

Der Versuch wird entsprechend Abbildung 5 aufgebaut. Zudem wird an die Photozelle eine Spannung angelegt, welche mit einem ebenfalls angeschlossenen Digitalvoltmeter gemessen werden kann (Abbildung 4). Hinzu kommt noch ein Picoamperemeter, welches zur Messung des Photostroms dient. Anschließend werden die optischen Elemente des Aufbaus genau justiert, sodass an der Photozelle möglichst scharfe leuchtende Streifen der einzelnen Farben zu erkennen sind. Dabei gelingt es nicht, die Farben rot und gelb eindeutig sichtbar zu machen. Der rote Streifen ist nur leicht sichtbar, wohingegen der eigentlich gelbe Streifen in ein leichtes orange übergeht. Da dieses Problem sich jedoch auch nach mehreren Lösungsversuchen nicht vollkommen beheben lässt, wird der Versuch mit der best möglichen zu erreichenden Konfiguration durchgeführt. Als erstes wird die Apparatur so ausgerichtet, dass das orangene (gelbe) Licht in das Loch der Photozelle fällt. Sogleich wird eine Spannung zwischen Anode und Kathode angelegt. In Abhängigkeit von dieser Spannung wird nun der Photostrom mithilfe des Picoamperemeters gemessen. Dies wird für mehrere Spannungsbeträge zwischen -20V und 20V durchgeführt. Anschließend wird diese Messung auch für alle anderen vorhandenen Farben (rot, grün, violett, ultraviolett) wiederholt. Dabei wird sich jedoch nur auf den Spannungsbereich konzentriert, in dem sich der Photostrom am stärksten ändert. Um das Einfallen der entsprechenden Farben in das Loch der Photozelle zu realisieren, muss die Apparatur wiederum entsprechend ausgerichtet werden.

4 Auswertung

4.1 Berechnung der Grenzspannung des Lichtes verschiedener Wellenlänge

Die gemessene Stromstärke in Abhängigkeit von der Bremsspannung wird für das grüne Licht in Tabelle 1 dargestellt. Negative Spannungen bezeichnen dabei das Gegenfeld, also die Spannung mit der Elektronen gebremst werden. Positive Spannungen beschleunigen die Elektronen.

Tabelle 1: Gemessene Stromstärke bei verschiedenen Spannungen für grünes Licht

U/V	I/nA
-0,5	0
-0,3	0,02
-0,1	0,08
0	0,13
0,1	0,21
0,3	0,30
0,5	0,49
0,7	0,66
1,0	0,80
1,5	1,49
2,0	2,50
3,0	5,10
5,0	9,60
8,0	11,0
12,0	11,0

Für die lineare Regression werden die letzten drei Messwerte weggelassen, da bei hinreichend großen Spannungen kein lineares Verhältnis mehr zu sehen ist und somit die lineare Regression ungenauer macht. Die Anpassungsfunktion wird mit Python erstellt.

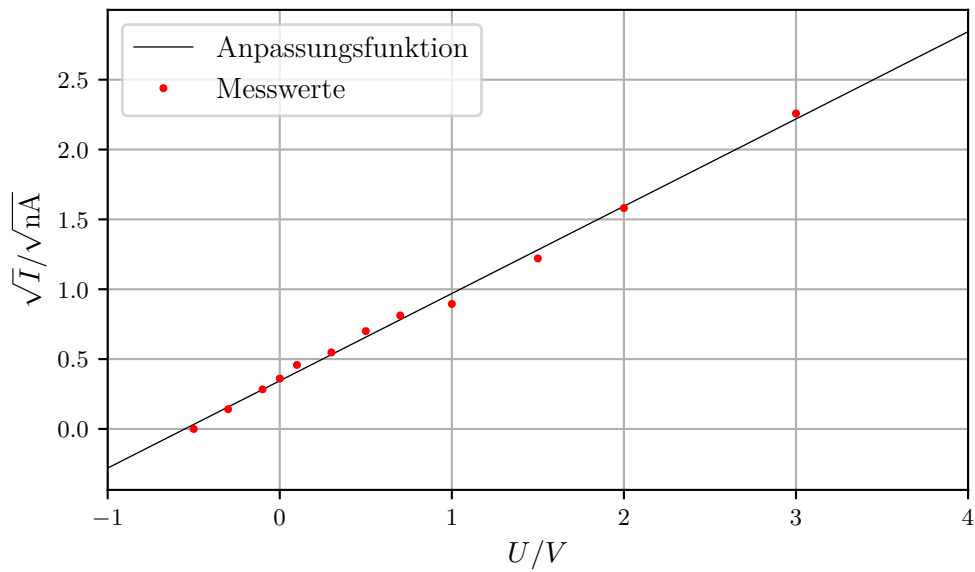


Abbildung 6: Lineare Regression der Messwerte für das grüne Licht

Die Parameter betragen:

$$a_1 = (0,62 \pm 0,01) \sqrt{\text{nA}}/\text{V}$$

$$b_1 = (0,34 \pm 0,02) \sqrt{\text{nA}}$$

Die Fehler werden mit Python berechnet.

Für U_B muss der Schnittpunkt der Geraden mit der U-Achse ermittelt werden, die x-Koordinate ist dann U_B . Es gilt $U_B = -\frac{b}{a}$. Für U_B ergibt sich somit:

$$U_B = (-0,55 \pm 0,03) \text{ V}$$

In Tabelle 2 wird die gemessene Stromstärke und die zugehörige Spannung für das rote Licht dargestellt.

Tabelle 2: Gemessene Stromstärke bei verschiedenen Spannungen für rotes Licht

U/V	I/nA
0	0
1,0	0,014
2,0	0,040
3,0	0,080
4,0	0,125
6,0	0,16
8,0	0,18
10,0	0,20
15,0	0,20

Mit diesen Messwerten wird erneut eine lineare Regression durchgeführt, wobei wieder die letzten drei Messwerte aus den oben genannten Gründen vernachlässigt werden.

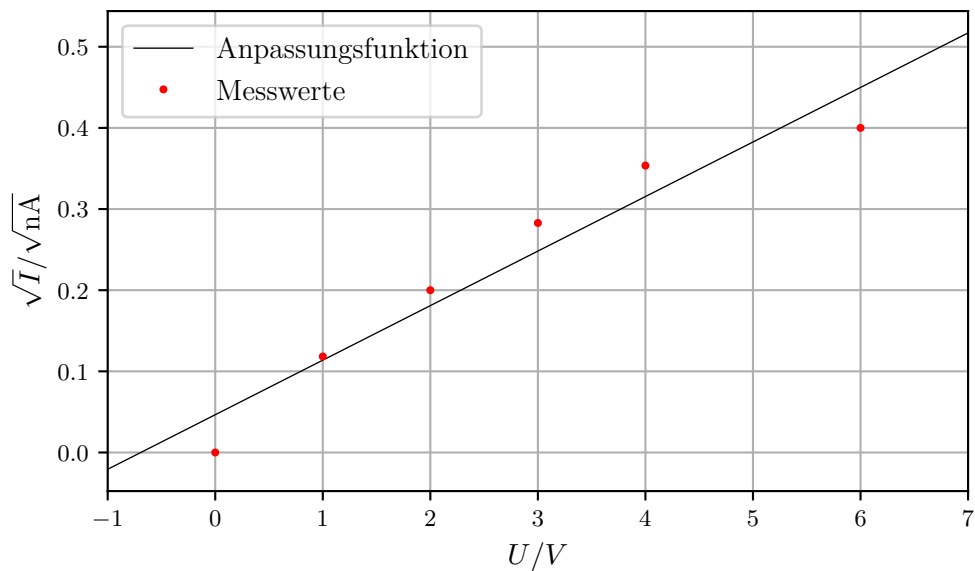


Abbildung 7: Lineare Regression der Messwerte für das rote Licht

Die Parameter betragen:

$$a_2 = (0,067 \pm 0,009) \sqrt{\text{nA}}/\text{V}$$

$$b_2 = (0,05 \pm 0,03) \sqrt{\text{nA}}$$

Daraus folgt für U_B :

$$U_B = (-0,7 \pm 0,5) \text{ V}$$

In Tabelle 3 wird die gemessene Stromstärke und die zugehörige Spannung für das violette Licht dargestellt.

Tabelle 3: Gemessene Stromstärke bei verschiedenen Spannungen für violettes Licht

U/V	I/nA
-0,9	0,016
-0,7	0,072
-0,5	0,141
-0,3	0,31
-0,1	0,50
0	0,60
0,2	0,89
0,4	1,00
0,6	1,30
0,8	1,60
1,0	2,20
1,5	3,60
2,0	4,80
3,0	7,40
4,0	8,50
6,0	12,0
8,0	14,0
10,0	15,0
15,0	16,0

Mit diesen Messwerten wird erneut eine lineare Regression durchgeführt, wobei die letzten fünf Messwerte aus den oben genannten Gründen vernachlässigt werden.

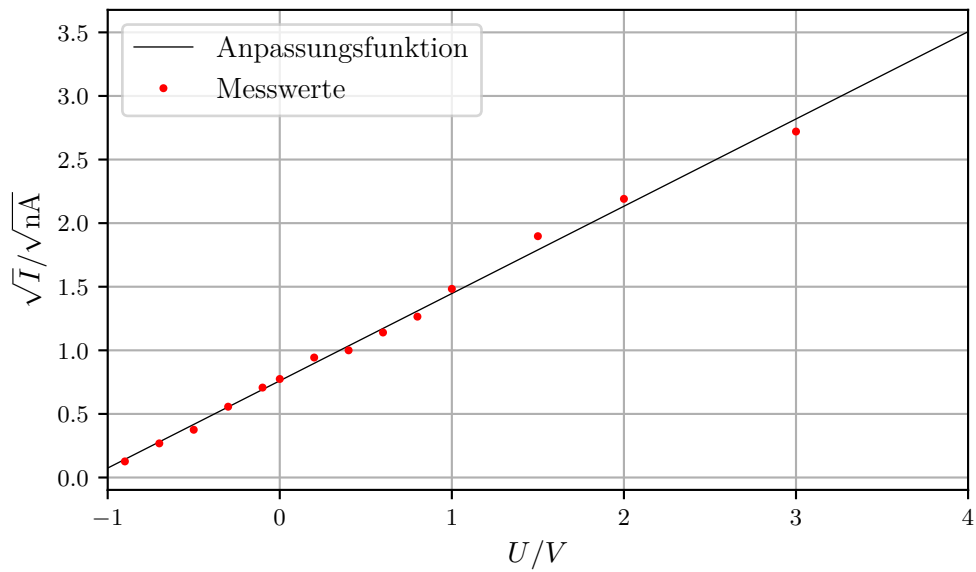


Abbildung 8: Lineare Regression der Messwerte für das violette Licht

Die Parameter betragen:

$$a_3 = (0,69 \pm 0,01) \sqrt{\text{nA}}/\text{V}$$

$$b_3 = (0,76 \pm 0,02) \sqrt{\text{nA}}$$

Daraus folgt für U_B :

$$U_B = (-1,10 \pm 0,03) \text{ V}$$

In Tabelle 4 wird die gemessene Stromstärke und die zugehörige Spannung für das ultra violette Licht dargestellt.

Tabelle 4: Gemessene Stromstärke bei verschiedenen Spannungen für ultraviolettes Licht

U/V	I/nA
-1,0	0,006
-0,8	0,02
-0,6	0,05
-0,3	0,10
0,0	0,17
0,5	0,34
1,0	0,53
2,0	1,00
4,0	2,20
5,0	2,90
10,0	3,60
15,0	4,0
20,0	4,0

Mit diesen Messwerten wird erneut eine lineare Regression durchgeführt, wobei die letzten drei Messwerte aus den oben genannten Gründen vernachlässigt werden.

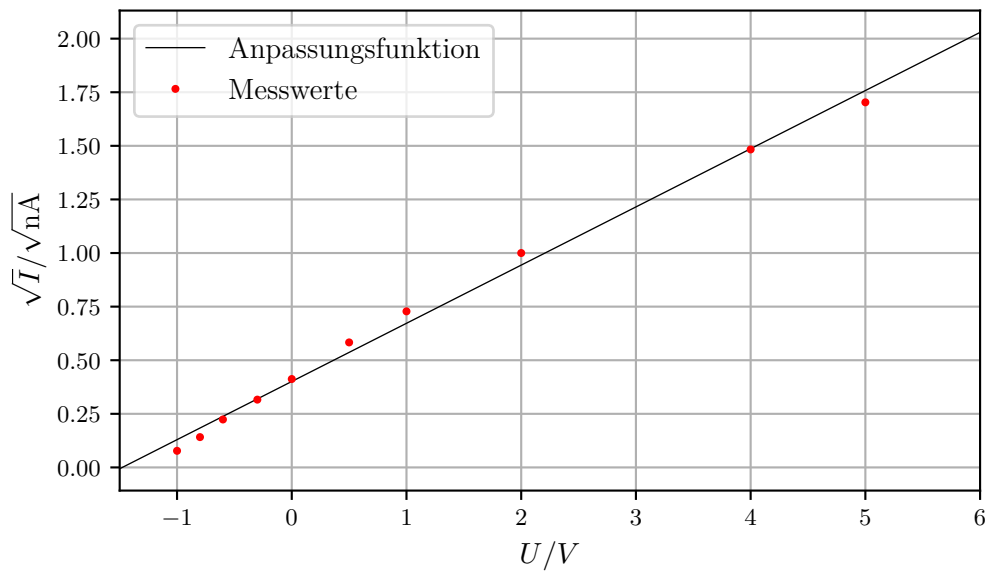


Abbildung 9: Lineare Regression der Messwerte für das ultraviolette Licht.

Die Parameter betragen:

$$a_3 = (0,27 \pm 0,01) \sqrt{\text{nA}}/\text{V}$$

$$b_3 = (0,4 \pm 0,2) \sqrt{\text{nA}}$$

Daraus folgt für U_B :

$$U_B = -1,57 \text{ V}$$

In Tabelle 5 wird die gemessene Stromstärke und die zugehörige Spannung für das orangene Licht dargestellt.

Tabelle 5: Gemessene Stromstärke bei verschiedenen Spannungen für ultraviolettes Licht

U/V	I/nA
-20,0	0,00
-16,0	0,00
-12,0	0,00
-8,0	0,00
-4,0	0,00
-0,1	0,015
0,0	0,05
0,5	0,17
1,0	0,28
2,0	1,40
4,0	4,00
6,0	5,00
8,0	5,50
10,0	5,70
15,0	6,00
20,0	6,20

Mit diesen Messwerten wird erneut eine lineare Regression durchgeführt, wobei die letzten und die ersten fünf Messwerte aus den oben genannten Gründen vernachlässigt werden.

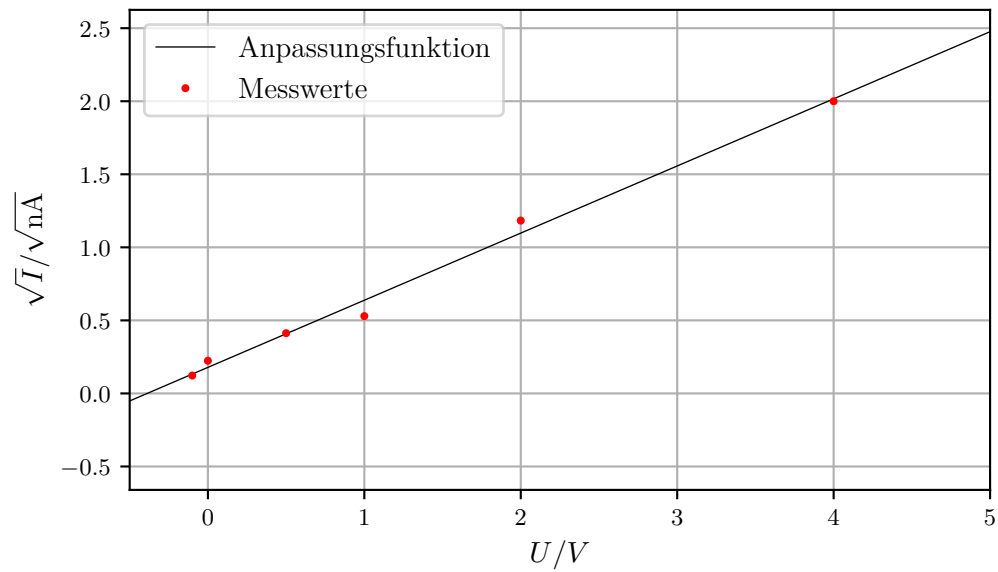


Abbildung 10: Lineare Regression der Messwerte für das orangene Licht.

Die Parameter betragen:

$$a_3 = (0,46 \pm 0,02) \cdot 10^{-5} \sqrt{nA}/V$$

$$b_3 = (0,18 \pm 0,04) \cdot 10^{-5} \sqrt{nA}$$

Daraus folgt für U_B :

$$U_B = (-0,39 \pm 0,09) V$$

Trägt man alle gemessenen Werte des orangenen Lichtes auf, so erhält man folgendes Diagramm.

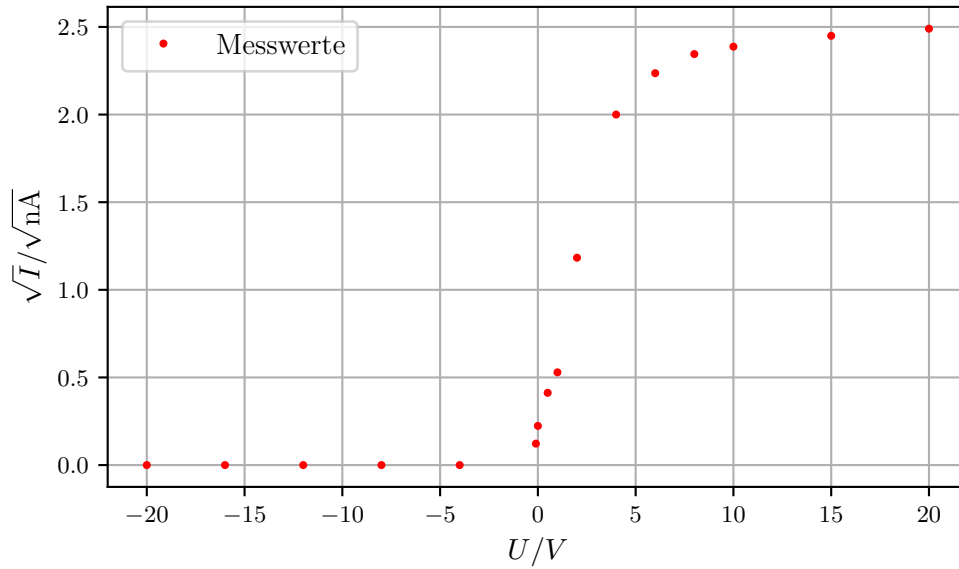


Abbildung 11: Diagramm der Messwerte für das orangene Licht.

Es ist zu erkennen, dass bei einer angelegten Gegenspannung praktisch kein Strom fließt. Legt man jedoch eine Beschleunigungsspannung an, so steigt die Stromstärke schnell an, bis sie dann asymptotisch gegen einen Sättigungswert läuft. Dies geschieht, da bei ausreichend hoher Beschleunigungsspannung nahezu alle ausgelösten Photoelektronen die Anode erreichen. Durch eine höhere Intensität des Lichtes werden mehr Elektronen ausgelöst. Daher sollte der Sättigungswert durch diese festgelegt werden. Je höher die Intensität ist, desto mehr Elektronen erreichen bei einer gewissen Beschleunigungsspannung auch die Anode. Aufgrund der geringen Oberfläche der Anode und da nicht alle Elektronen nach dem Austreten die gleiche Energie haben (Fermi-Dirac-Statistik), erreichen sie diese nicht alle bei dem gleichen Spannungsbetrag bzw. teilweise auch gar nicht. Somit wird der Sättigungswert nur asymptotisch erreicht. Damit der Sättigungswert schon bei endlichen Beschleunigungsspannungen erreicht werden kann, müsste gewährleistet werden, dass eben alle Elektronen auf die Anode treffen. Dies könnte z.B. durch eine sehr große Oberfläche dieser erreicht werden. Mit der obigen Erklärung lässt sich auch begründen, wieso die Stromstärke nicht bei einer Gegenspannung U_g abrupt auf Null abfällt, sondern sich langsam verringert. Da nicht alle Elektronen die gleiche Energie haben, erreichen manche auch schon bei geringerer Spannung nicht mehr die Anode. Die Stromstärke nimmt also ab. Teile der Photokathode verdampfen schon bei 20°C und lagern sich auf der Anode ab, wodurch ein negativer Strom zu messen ist. Somit werden Photoelektronen an der Anode ausgelöst, welche bei hinreichend großer Gegenspannung zur Kathode hin beschleunigt werden. Die Anzahl der so ausgelösten Elektronen ist wesentlich geringer

als die Anzahl an ausgelösten Elektronen an der Kathode, weshalb ein Sättigungswert schon bei wesentlich geringeren Spannungen zu messen ist.

Da negative Ströme schon bei Licht mit geringer Energie gemessen werden können, wird daraus geschlossen, dass die Austrittsarbeit des Anodenmaterial sehr gering sein muss.

4.2 Bestimmung der Austrittsarbeit und des Verhältnisses h/e_0

Die errechneten Grenzspannungen U werden gegen die Frequenz ν aufgetragen. Die Wellenlängen des Lichtes werden dabei der Anleitung entnommen. Für das rote Licht wurde eine Wellenlänge von 620nm genommen [2].

Tabelle 6: Frequenzen und Grenzspannungen der Spektrallinien

U/V	ν/Hz
546	-0.55
620	-0.7
435	-1.10
365	-1.57
585	-0.39

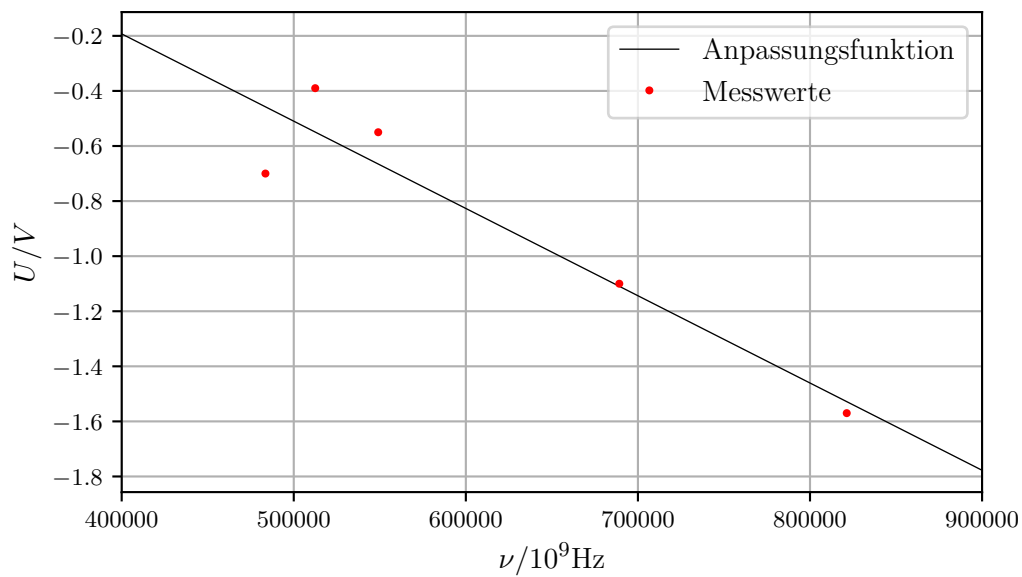


Abbildung 12: Grenzspannung aufgetragen gegen die Frequenz des Lichtes

Aus Gleichung (4) folgt, dass die Steigung das Verhältnis h/e_0 und der x-Achsenabschnitt die Austrittsarbeit A_k/e_0 ist. Die Parameter betragen:

$$|a| = \frac{h}{e_0} = (2,0 \pm 0,4) \cdot 10^4 \frac{\text{eV}}{\text{\AA}}$$
$$b = A_k = (1,1 \pm 0,4) \text{ eV}$$

5 Diskussion

Die einzelnen Anpassungsfunktionen beschreiben den Verlauf der Messwerte grundsätzlich ganz gut. Nur bei dem roten Licht gibt es größere Ungenauigkeiten, welche auf den letzten Messwert zurückzuführen sind. Für eine bessere Anpassungsfunktion wären mehr Messwerte im relevanten Bereich von Vorteil gewesen. Während des Versuches ist die rote Spektrallinie nur sehr schwach bis gar nicht erkennbar, wodurch weitere Fehler entstehen können. Auch die gelbe Spektrallinie konnte nicht gemessen werden, sondern lediglich eine orangene.

Das berechnete Verhältnis von $\frac{h}{e_0}$ liegt näherungsweise an dem Literaturwert von $\frac{h}{e_0} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ eV}$, jedoch immernoch außerhalb der Standardabweichung. Die Anpassungsfunktion in der Abbildung 12 weist eine deutliche Abweichung auf, welche auf den Messwert des roten Lichtes zurückgeführt werden kann. Die Abweichung des Messwertes kann durch die oben genannten Gründe erklärt werden. Die Anzeige des Stromstärkemessgeräts ist sehr empfindlich und schwankt merklich. Dies führt zusätzlich zu Ungenauigkeiten.

Literatur

- [1] TU Dortmund. *Versuchanleitung des Versuchs V500, Photoeffekt*. 2018.
- [2] HUG Technik und Sicherheit GmbH. Eingesehen am 19.04.2018. URL: <https://www.hug-technik.com/inhalt/ta/farben.html>.