

V500 - Der Photoeffekt

David Gutnikov
david.gutnikov@udo.edu

Lasse Sternemann
lasse.sternemann@udo.edu

Bearbeitet am 23.06.2020

Inhaltsverzeichnis

1	Zielsetzung	3
2	Theoretische Grundlagen	3
2.1	Physikalische Beschreibung des Lichts	3
2.2	Der Photoeffekt	3
2.3	Elektronen im homogenen E-Feld	4
2.4	Gegenfeldmethode	4
3	Aufbau und Durchführung	6
3.1	Beleuchtung mit monochromatischem Licht	6
3.2	Photozelle	6
3.3	Messungen des Photostroms	8
4	Auswertung	9
4.1	Gegenspannung bei gelbem Licht	9
4.2	Gegenspannung bei grünem Licht	10
4.3	Gegenspannung bei violettem Licht	11
4.4	Zusammenhang zwischen Spannung und Frequenz	11
4.5	Kurvenverlauf des Photostromes	13
5	Diskussion	14
6	Daten	15
7	Literaturverzeichnis	17

1 Zielsetzung

Mit diesen Versuchen soll die Abhängigkeit des Photostromes von Spannung und die Abhängigkeit der Grenzspannung von der Frequenz des einfallenden Lichtes in einer Photozelle untersucht werden.

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Physikalische Beschreibung des Lichts

Die physikalische Beschreibung des Lichts erfolgt entweder über das Korpuskelmodell, das das Licht als Teilchen ansieht oder das Wellenmodell, das gemäß seines Namens das Licht als Welle beschreibt. Während das eine Modell eine experimentelle Beobachtung gut beschreibt, kann es bei einer anderen experimentellen Beobachtung versagen. Daher werden beide Modelle als Grenzfälle der Quantenelektrodynamik eingeführt, sodass diese über Nutzung der Grenzfälle alle Phänomene beschreiben kann. Bei Wechselwirkungen von Licht mit Materie wird das korpuskulare Modell angewandt und bei Beschreibung von der Ausbreitung des Lichts oder Interferenzphänomenen das Wellenmodell angewendet.

2.2 Der Photoeffekt

Beim Photoeffekt kommt es zu einer Wechselwirkung zwischen einfallendem monochromatischem Licht und einer Metalloberfläche. Dementsprechend ist für die Beschreibung das korpuskulare Modell notwendig. Daher wird das Licht als Quant beschrieben, dessen Energie $E = h \cdot \nu$ proportional zur Frequenz des Lichts ist. Wenn nun ein Elektron, das durch eine Energie, die der Austrittsarbeit A_k entspricht, in einer Metalloberfläche gebunden ist, kann es durch einfallende Lichtquanten aus dem Metall gelöst werden, sofern die Photonenenergie größer gleich der Austrittsarbeit ist.

$$h \cdot \nu \geq A_k$$

Da $\lambda = c \cdot \nu$ gilt, hängt die Bedingung zur Auslösung eines Elektrons aus der Oberfläche also nur von der Frequenz ν bzw. Wellenlänge λ des Lichts ab. Wenn die Photonenenergie größer als die Austrittsarbeit ist, wird die restliche Energie als kinetische Energie an das Elektron übergeben und es ergibt sich folgende Energiegleichung. Dabei wird die kinetische Energie des Elektrons über dessen Masse m_e und Geschwindigkeit v ausgedrückt.

$$h \cdot \nu = A_k + E_{\text{Kin}} = A_k + \frac{1}{2} m_e v^2 \quad (1)$$

Jedoch ist die Energie der ausgelösten Elektronen nicht immer gleich, da sie von der Energie abhängt, die das Elektron vor dem Auslösen aus der Oberfläche bereits inne hat. Diese Energieverteilung wird in der Fermi-Dirac-Statistik beschrieben und hat zur Folge, dass die Elektronen schon in der Oberfläche deutlich verschiedene Energien inne haben. Diese Energieunterschiede haben zur Folge, dass bei der Messung des Photoeffekts

über die Gegenfeldmethode, der gemessene Photostrom proportional zu Quadrat der Gegenfeldspannung ist.

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

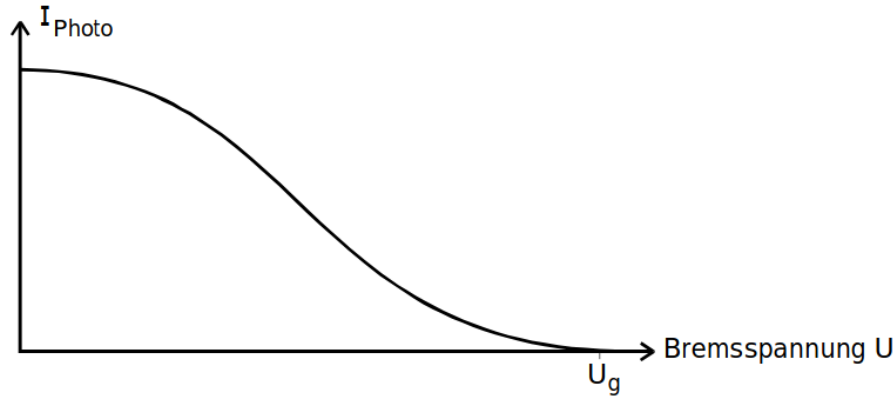


Abbildung 1: In der Abbildung ist der schematische Aufbau zur Erzeugung von Spektrallicht und anschließender Aufteilung dieses in einzelne monochromatische Strahlen zu sehen. Zudem ist ein Schwenkarm befestigt, der das Einstellen eines Schirms erlaubt, sodass immer nur ein monochromatischer Lichtstrahl durch die Schirmöffnung fällt. [1]

Über die beschriebene Theorie lässt sich folgern, dass es eine Grenzfrequenz geben muss, ab der das erste Mal Elektronen ausgelöst werden, dass die kinetische Energie der Elektronen proportional zur Frequenz ν des Lichts ist (1) und dass die Anzahl der losgelösten Elektronen proportional zur Intensität des Lichts ist, da diese die Anzahl der Photonen pro Zeit angibt und jedes Photon ein Elektron auslösen kann.

2.3 Elektronen im homogenen E-Feld

Freie Elektronen werden durch ein anliegendes, homogenes E-Feld beschleunigt und nehmen dabei eine elektrische Energie auf, die der kinetischen Energie des Elektrons nach der Beschleunigung im elektrischen Feld entspricht.

$$e \cdot U = \frac{1}{2} m_e v^2 \quad (2)$$

2.4 Gegenfeldmethode

Wenn die Photoelektronen aus einer Kathode ausgelöst werden, können sie auf eine aufgestellte Anode treffen und so einen Photostrom zwischen Kathode und Anode erzeugen. Dann wird zwischen Anode und Kathode eine regelbare Spannung gelegt, die die Elektronen entweder beschleunigt, "Beschleunigungsspannung", oder abbremst "Gegenfeldspannung". Mit steigender Gegenfeldspannung und so steigendem E-Feld

erreichen nur noch die energiereichsten Elektronen die Ringanode und bei noch weiterer Erhöhung über diese Grenzspannung U_G wird garkein Strom mehr gemessen. Durch Messung der Grenzspannung kann also bei Wissens der anderen Größen aus Gleichung 1 und Einsetzens von Gleichung 2 die Austrittsarbeit oder auch die Energie oder Frequenz des Lichts über folgende Formel (3) bestimmt werden.

$$h \cdot \nu = A_K + \frac{1}{2} m_e v_{\max}^2 \quad (3)$$

Ein mögliches Problem liegt auch in einer höheren Austrittsarbeit A_A der Anode. Wenn diese mit der Kathode verbunden wird, passen sich die Fermi Niveaus an und trotz genügender Energie zum Austreten aus der Phtokathode entsteht kein Photostrom, da die Photoelektronen ein "natürliches" Gegenfeld durchdringen müssten. In diesem Fall muss eine beschleunigende Spannung angelegt werden, damit überhaupt ein Photostrom gemessen wird und dann wird diese gesenkt bis der Photostrom wieder auf Null fällt. Dieses Problem mit passender Lösung durch eine Beschleunigungsspannung ist in Abbildung 2 zu sehen.

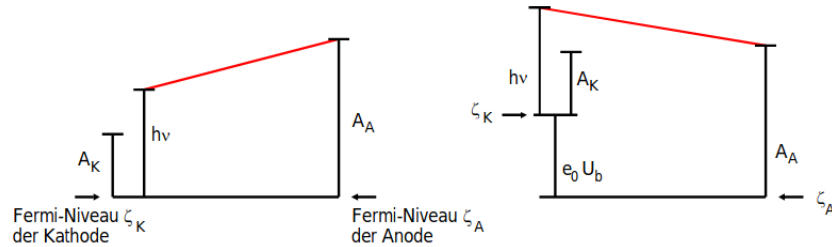


Abbildung 2: In der Abbildung ist die Energiedifferenz zwischen Photoelektronen an der Kathode und Anode zu sehen, die verdeutlicht warum trotz genügender Energie zum Photoeffekt kein Photostrom gemessen wird. Auf der rechten Seite ist die Erhöhung der Energie der Photoelektronen durch eine beschleunigende Spannung dargestellt. [1]

3 Aufbau und Durchführung

3.1 Beleuchtung mit monochromatischen Licht

Um die Bestrahlung mit Licht einer einzelnen Wellenlänge zu ermöglichen, wird der in Abbildung 3 zu sehende Aufbau verwendet. Die Spektrallampe emittiert dabei Licht, dessen Wellenlängen durch die Spektrallinien, des für die Lampe genutzten Materials begrenzt sind. Dieses Licht zunächst durch eine Abbildungslinse gebündelt wird und danach durch eine Spaltblende läuft, um einen möglichst exakten Lichtstrahl zu erhalten. Dieser Lichtstrahl wird dann auf ein Prisma abgebildet, der das Licht in die einzelnen bereits erwähnten Spektrallinien zerlegt. Hinter dem Prisma ist ein Schirm mit mittigem Eintrittsspalt an einem Schwenkarm montiert, sodass die einzelnen Farben der Spektrallinien auf dem Schirm zu sehen sind und dieser so verstellt werden kann, dass immer nur das Licht einer Spektrallinie und somit einer Frequenz durchgelassen wird.

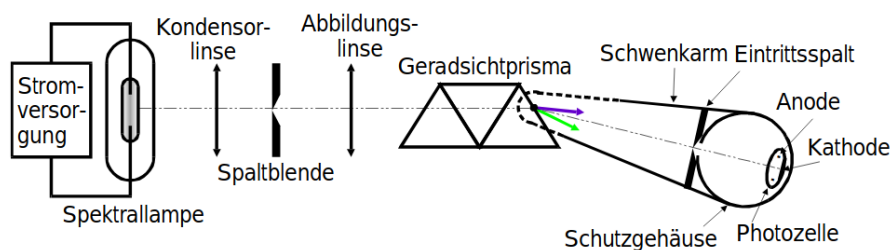


Abbildung 3: In der Abbildung ist der schematische Aufbau zur Erzeugung von Spektrallicht und anschließender Aufteilung dieses in einzelne monochromatische Strahlen zu sehen. Zudem ist ein Schwenkarm befestigt, der das Einstellen eines Schirms erlaubt, sodass immer nur ein monochromatischer Lichtstrahl durch die Schirmöffnung fällt. [1]

3.2 Photozelle

Der Photoeffekt wird letztendlich in einer Photozelle beobachtet. Diese ist in Abbildung 4 zu sehen und ist grundlegend ein evakuierter Glaskolben, zur Messung von Photoelektronen. In diesem Glaskolben ist eine sogenannte Photokathode angebracht. Dabei handelt es sich um einen Schirm, der mit einer Metalllegierung bedampft worden ist, sodass bei Lichteinfall Elektronen ausgelöst werden können. Wenige Zentimeter gegenüber der Photokathode befindet sich die zugehörige Ringanode.

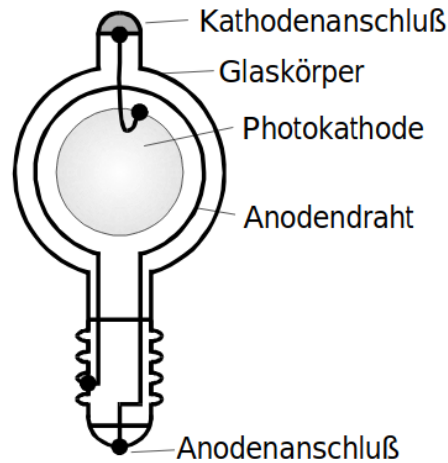


Abbildung 4: In der Abbildung ist der schematische Aufbau einer Photozelle zu sehen. [1]

Zwischen Ringanode und Photokathode wird ein Picoamperemeter geschaltet, welches in der Lage ist den Strom zwischen Photokathode und Ringanode zu messen. Dieser Strom entsteht durch die ausgelösten Photoelektronen, die durch ihre kinetische Energie zur Ringanode fliegen und dort als Ladung aufgenommen werden. Zwischen Ringanode und Photokathode wird zudem ein elektrisches Gegenfeld angelegt, um die Gegenfeldmethode durchführen zu können.

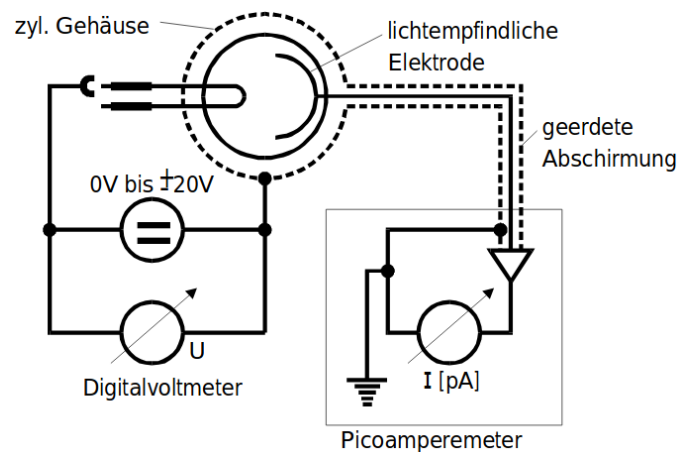


Abbildung 5: In der Abbildung ist der Schaltplan zur Erzeugung des Gegenfelds und Messung des Photostroms zwischen Photokathode und Ringanode zu sehen. [1]

3.3 Messungen des Photostroms

Mit Hilfe des beschriebenen Aufbaus wird zunächst für verschiedene Wellenlängen der Photostrom in Abhängigkeit von der angelegten Gegenspannung gemessen, um den in der Theorie beschriebenen Zusammenhang $I_{\text{Ph}} \propto U^2$ zu überprüfen. Dazu wird der Schwenkarm zuvor so bewegt, dass nur das Licht einer Wellenlänge auf die Photozelle trifft. Daraufhin wird über die Steuerungseinheit der Photozelle die Spannung in der Photozelle beginnend mit einer Beschleunigungsspannung heruntergeregelt bis keine Photostrom mehr auftritt. Ist dies bei einer Spannung von 0 V nicht der Fall, wird auf eine Gegenspannung umgepolt und diese erhöht, bis der Photstrom auf Null fällt. Zunächst wird diese Messung im Abstand von 1 V Schritten durchgeführt, wenn ein linearer Zusammenhang zwischen Photostrom und SPannung aufzutreten scheint wird auf eine genauere Spannungsänderung angepasst.

Daraufhin wird unter konstanter Lichtintensität, sowie konstanter Lichtwellenlänge von $\lambda = 578 \text{ nm}$ der Photostrom in Abhängigkeit von der angelgten Feldspannung gemessen. Ähnlich zur ersten Spannung wird nun wieder von einer beschleunigenden Spannung bis zu einer Gegenspannung variiert. Die Spannung startet mit einer Beschleunigenden Spannung von 20 V und wird bis auf Null hinuntergeregelt und daraufhin auf eine Gegenspannung umgepolt und die Spannung erhöht bis der Photostrom wieder auf Null fällt. Auch hier wird im linearen Bereich mit einer geringeren Spannungsänderung pro Messschritt gemessen.

4 Auswertung

4.1 Gegenspannung bei gelbem Licht

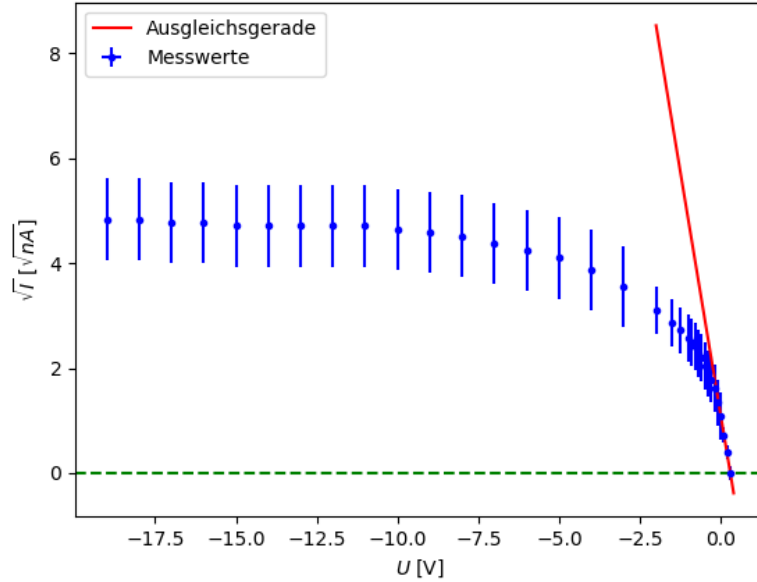


Abbildung 6: Hier ist der gewurzelte Photostrom gegen die angelegte Gegenspannung für gelbes Licht aufgetragen. Negatives U heißt, dass eine beschleunigende Spannung angelegt wird. Die Messwerte sind aus Tabelle 1 entnommen.

Wie im vorherigen Abschnitt beschrieben, wird die Wurzel des registrierten Photostromes \sqrt{I} gegen die Gegenspannung aufgetragen. Dadurch entsteht eine Kurve, die in der Nähe der Nullstelle bzw. U_G einen linearen Abschnitt besitzt. Durch die 5 Messwerte in diesem Abschnitt wird eine Ausgleichsgerade gezogen, deren Schnittpunkt mit der x-Achse U_G , die Spannung ist, ab der kein Photostrom mehr gemessen werden kann. Die lineare Regression hat die folgenden Parameter,

$$m_{\text{gelb}} = (-1,17 \pm 0,05) \cdot 10^{-4} \frac{\sqrt{\text{A}}}{\text{V}} \quad b_{\text{gelb}} = (1,10 \pm 0,03) \sqrt{\text{A}}$$

wobei m_{gelb} die Steigung und b_{gelb} der y-Achsenabschnitt ist. Mithilfe der Geradengleichung lässt sich jetzt bei bekannten Parametern die Nullstelle bestimmen:

$$mx_0 + b = 0 \quad \Rightarrow \quad x_0 = -\frac{b}{m} \quad (4)$$

Hier gilt für die Nullstelle:

$$U_{G,\text{gelb}} = (0,297 \pm 0,015) \text{V}$$

4.2 Gegenspannung bei grünem Licht

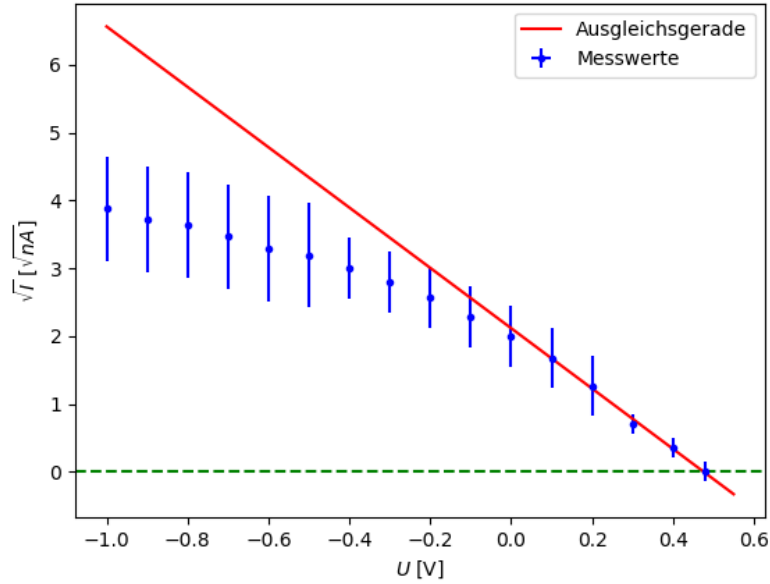


Abbildung 7: Hier ist der gewurzelte Photostrom gegen die angelegte Gegenspannung für grünes Licht aufgetragen. Negatives U heißt, dass eine beschleunigende Spannung angelegt wird. Die Messwerte sind aus Tabelle 2 entnommen.

Hier wird wie in Unterabschnitt 4.1 verfahren. Es wird eine lineare Regression mit den letzten 5 Messwerten durchgeführt und es ergeben sich die Parameter $m_{\text{grün}}$ für die Steigung und $b_{\text{grün}}$ für den y-Achsenabschnitt der Ausgleichsgerade:

$$m_{\text{grün}} = (-1,41 \pm 0,05) \cdot 10^{-4} \frac{\sqrt{\text{A}}}{\text{V}} \quad b_{\text{grün}} = (2,11 \pm 0,05) \sqrt{\text{A}}$$

Für die Grenzspannung $U_{\text{G,grün}}$ gilt dann:

$$U_{\text{G,grün}} = (0,476 \pm 0,021) \text{V}$$

4.3 Gegenspannung bei violettem Licht

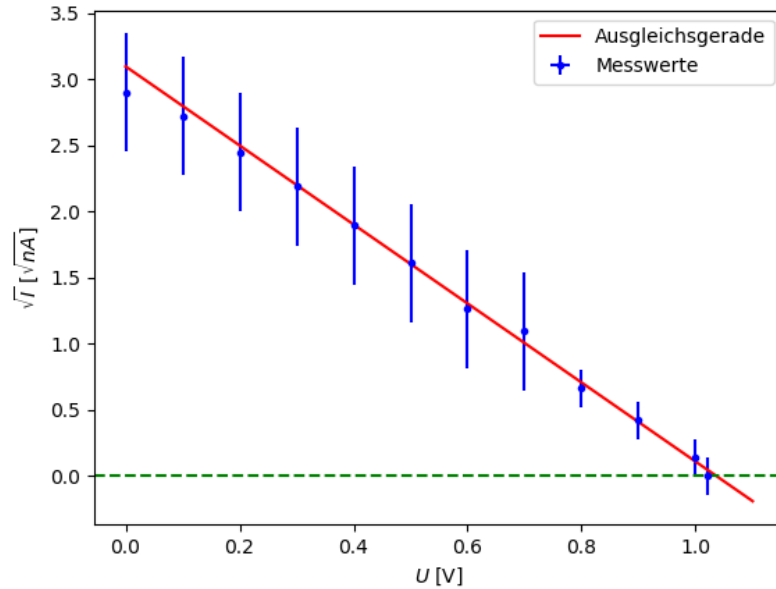


Abbildung 8: Hier ist der gewurzelte Photostrom gegen die angelegte Gegenspannung für violettes Licht aufgetragen. Die Messwerte sind aus Tabelle 3 entnommen.

Auch beim violetten Licht wird eine Ausgleichsgerade durch die letzten 9 Messwerte gelegt mit den folgenden sich ergebenden Parametern:

$$m_{\text{violett}} = (-9,45 \pm 0,20) \cdot 10^{-5} \frac{\sqrt{A}}{V} \quad b_{\text{violett}} = (3,10 \pm 0,05) \sqrt{A}$$

Die Grenzspannung für das violette Licht ist:

$$U_{G,\text{violett}} = (1,037 \pm 0,027) V$$

4.4 Zusammenhang zwischen Spannung und Frequenz

Hier wird der Zusammenhang zwischen angelegter Spannung und der Frequenz des einfallenden Lichtes betrachtet. Setzt man Gleichung 2 in Gleichung 3 ein, so ergibt sich folgende Gleichung:

$$h \cdot \nu = e \cdot U_G + A_k \quad \Rightarrow \quad U_G(\nu) = \frac{h}{e} \nu - \frac{A_k}{e} \quad (5)$$

Die Grenzspannungen werden aus den vorherigen Abschnitten entnommen und gegen die Frequenzen, die mit $\nu = \frac{c}{\lambda}$ aus der Lichtgeschwindigkeit c und den Wellenlängen λ berechnet werden, aufgetragen:

$$\nu_{\text{gelb}} = 691 \text{ THz}$$

$$U_{\text{G,gelb}} = (0,297 \pm 0,015) \text{ V}$$

$$\nu_{\text{grün}} = 549 \text{ THz}$$

$$U_{\text{G,grün}} = (0,476 \pm 0,021) \text{ V}$$

$$\nu_{\text{violett}} = 519 \text{ THz}$$

$$U_{\text{G,violett}} = (1,037 \pm 0,027) \text{ V}$$

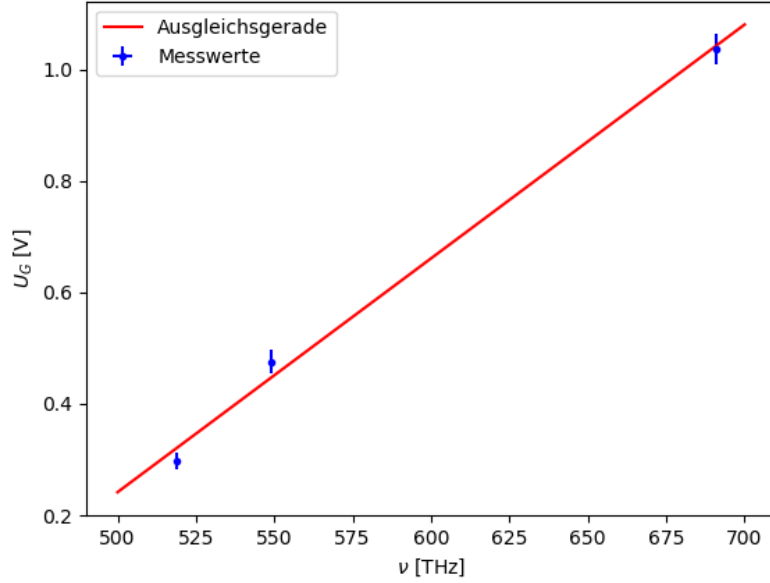


Abbildung 9: Hier ist die Grenzspannung gegen die Frequenz des einfallenden Lichtes aufgetragen.

Anhand von Gleichung 5 ist zu erkennen, dass $m = \frac{h}{e}$ und $b = -\frac{A_k}{e}$ für die Ausgleichsgerade in Abbildung 10 gilt. Dabei ist A_k die Austrittsenergie in eV. Dementsprechend gilt:

$$\frac{h}{e} = (4,19 \pm 0,28) \cdot 10^{-15} \text{ Vs} \quad A_k = (1,86 \pm 0,17) \text{ eV}$$

Es wird angenommen, dass die Photokathode mit Caesium beschichtet ist, da die gemessene Austrittsarbeit der von Caesium am nächsten kommt. Damit hätte die gemessene Austrittsarbeit eine Abweichung von ca. 13% vom Literaturwert $A_{k,\text{lit}} = 2,14 \text{ eV}$ [2]. Der gemessene Wert von $\frac{h}{e}$ weicht ca. 1% vom Theoriewert $4,135 \cdot 10^{-15} \text{ Vs}$ [3] ab.

4.5 Kurvenverlauf des Photostromes

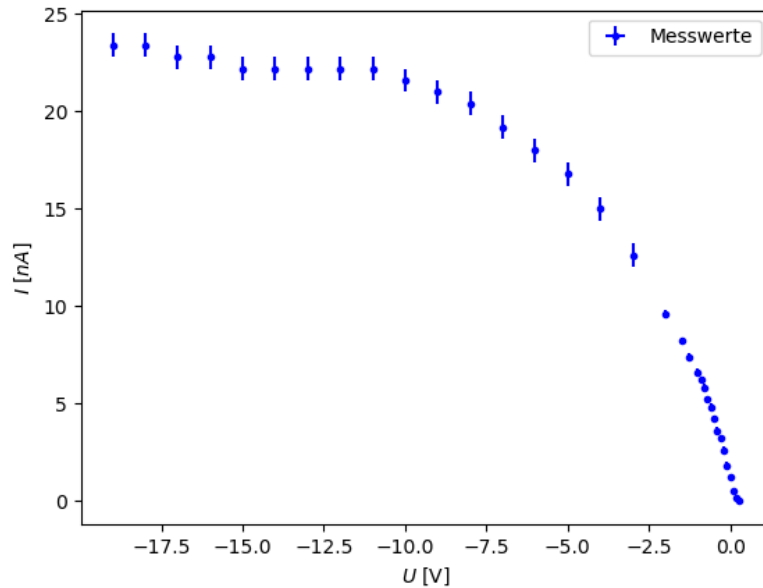


Abbildung 10: Hier ist der Photostrom gegen die angelegte Gegenspannung für gelbes Licht aufgetragen.

Die Kurve erreicht bei hohen beschleunigenden Spannungen einen Sättigungswert, da mit steigender beschleunigender Spannung immer mehr der Elektronen durch das elektrische Feld die Energie gewinnen, um die Potentialdifferenz zwischen Kathode und Anode zu überwinden. Ab einer bestimmten Spannung werden sogar die herausgelösten Elektronen mit $E_{\text{kin}} = 0$ an der Anode ankommen und der Photostrom könnte nicht mehr durch eine größere beschleunigende Spannung erhöht werden. Der Sättigungswert des Photostromes hängt nur von der Intensität des einfallenden Lichtes ab.

Die Kurve nähert sich dem Sättigungswert und U_G asymptotisch an, weil Energie der ausgelösten Elektronen normalverteilt ist. D.h. es gibt wenige Elektronen die eine niedrige Energie haben, weshalb die Kurve immer flacher wird. Das Gleiche gilt auch für die hochenergetischen Elektronen, weswegen die Kurve in der Nähe der Grenzspannung auch immer flacher wird. Um den Sättigungswert möglichst schnell zu erreichen, sollten Materialien für die Kathode und Anode mit kleiner Differenz in ihrer Austrittsarbeit verwendet werden, damit schon eine kleine beschleunigende Spannung fast alle Elektronen die Anode erreichen lässt.

Es kann ein dem Photostrom entgegengerichteter Strom auftreten, wenn die Gegenspannung so hoch ist, dass die ausgelösten Elektronen wieder zurück zur Kathode fliegen.

5 Diskussion

Das \sqrt{I} -Gesetz gilt für die drei überprüften Wellenlängen des Lichtes, da es bei allen drei Graphen einen linearen Abschnitt gab. Mit den durch die Ausgleichsgeraden bestimmten Werten für die Grenzspannung wird eine weitere Ausgleichrechnung durchgeführt. Trotz dieser Tatsache und dem überaus empfindlichen Picometer, welches manchmal Sprünge im Bereich einer Zehnerpotenz vollführt hat, sind die Abweichungen von den Theoriewerten klein.

6 Daten

Tabelle 1: Hier sind die Messwerte der Spannung U , des Photostromes I und seine Messunsicherheit I_u und die Wurzel des Photostromes \sqrt{I} für das gelbe Licht dargestellt.

U [V]	I [nA]	I_u [nA]	\sqrt{I} [$\sqrt{\text{nA}}$]	U [V]	I [nA]	I_u [nA]	\sqrt{I} [$\sqrt{\text{nA}}$]
-19.00	23.40	0.60	4.84	-2.00	9.60	0.20	3.10
-18.00	23.40	0.60	4.84	-1.50	8.20	0.20	2.86
-17.00	22.80	0.60	4.77	-1.25	7.40	0.20	2.72
-16.00	22.80	0.60	4.77	-1.00	6.60	0.20	2.57
-15.00	22.20	0.60	4.71	-0.90	6.20	0.20	2.49
-14.00	22.20	0.60	4.71	-0.80	5.80	0.20	2.41
-13.00	22.20	0.60	4.71	-0.70	5.20	0.20	2.28
-12.00	22.20	0.60	4.71	-0.60	4.80	0.20	2.19
-11.00	22.20	0.60	4.71	-0.50	4.20	0.20	2.05
-10.00	21.60	0.60	4.65	-0.40	3.60	0.20	1.90
-9.00	21.00	0.60	4.58	-0.30	3.20	0.20	1.79
-8.00	20.40	0.60	4.52	-0.20	2.60	0.20	1.61
-7.00	19.20	0.60	4.38	-0.10	1.80	0.20	1.34
-6.00	18.00	0.60	4.24	0.00	1.20	0.20	1.10
-5.00	16.80	0.60	4.10	0.10	0.52	0.02	0.72
-4.00	15.00	0.60	3.87	0.20	0.16	0.02	0.40
-3.00	12.60	0.60	3.55	0.29	0.00	0.02	0.00

Tabelle 2: Hier sind die Messwerte der Spannung U , des Photostromes I und seine Messunsicherheit I_u und die Wurzel des Photostromes \sqrt{I} für das grüne Licht dargestellt.

U [V]	I [nA]	I_u [nA]	\sqrt{I} [$\sqrt{\text{nA}}$]
-1.00	15.00	0.60	3.87
-0.90	13.80	0.60	3.71
-0.80	13.20	0.60	3.63
-0.70	12.00	0.60	3.46
-0.60	10.80	0.60	3.29
-0.50	10.20	0.60	3.19
-0.40	9.00	0.20	3.00
-0.30	7.80	0.20	2.79
-0.20	6.60	0.20	2.57
-0.10	5.20	0.20	2.28
0	4.00	0.20	2.00
0.10	2.80	0.20	1.67
0.20	1.60	0.20	1.26
0.30	0.50	0.02	0.71
0.40	0.12	0.02	0.35
0.48	0.00	0.02	0.00

Tabelle 3: Hier sind die Messwerte der Spannung U , des Photostromes I und seine Messunsicherheit I_u und die Wurzel des Photostromes \sqrt{I} für das violette Licht dargestellt.

U [V]	I [nA]	I_u [nA]	\sqrt{I} [$\sqrt{\text{nA}}$]
0	8.40	0.20	2.90
0.10	7.40	0.20	2.72
0.20	6.00	0.20	2.45
0.30	4.80	0.20	2.19
0.40	3.60	0.20	1.90
0.50	2.60	0.20	1.61
0.60	1.60	0.20	1.26
0.70	1.20	0.20	1.10
0.80	0.44	0.02	0.66
0.90	0.18	0.02	0.42
1.00	0.02	0.02	0.14
1.02	0.00	0.02	0.00

7 Literaturverzeichnis

- [1] *Versuchsanleitung V500 - Der Photoeffekt*. TU Dortmund, 2020
- [2] SciPy: *Open source scientific tools for Python*, from Eric Jones and Travis Oliphant and Pearu Peterson and others, 2020 <http://www.scipy.org/>
- [3] WIKIPEDIA: *Caesium* <https://de.wikipedia.org/wiki/Caesium>