

VERSUCH 500

Der Photoeffekt

Annika Bennemann
annika.bennemann@tu-dortmund.de

Paulin Vehling
paulin.vehling@tu-dortmund.de

Durchführung: 31.05.2022

Abgabe: 07.06.2022

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1 Zielsetzung	3
2 Theorie	3
2.1 Grundsätzliches Prinzip des Photoeffekts	3
2.2 Experimentelle Messung des Photoeffektes mit der Gegenfeldmethode . .	4
3 Durchführung	5
4 Auswertung	5
4.1 Bestimmung der Grenzfrequenz für verschiedenen Wellenlängen	5
4.2 Bestimmung von $\frac{h}{e}$ und der Austrittsarbeit	12
4.3 Nähere Betrachtung des Photostroms vom gelben Licht	13
5 Diskussion	14
6 Anhang	15
Literatur	16

1 Zielsetzung

Als Ziel dieses Versuchs sollen mithilfe des Photoeffekts die Zusammenhänge zwischen der Frequenz des Lichts und der Energie der Elektronen, sowie die Abhängigkeit des resultierenden Photostroms von der Stärke des angelegten Gegenfeldes untersucht werden.

2 Theorie

2.1 Grundsätzliches Prinzip des Photoeffekts

Licht hat zwei unterschiedliche Erscheinungsformen. Zum einen das Wellenmodell, welches Phänomene wie Interferenz und Beugung erklärt und zum anderen das Korpuskelmodell oder auch das Teilchenmodell, womit sich der Compton-Effekt, die Paarbildung und der Photoeffekt erklären lassen.

Für diesen Versuch wird das Korpuskelmodell benutzt, weil die Wechselwirkung von Photonen mit Materie untersucht wird. Der grundlegende Aufbau zur Messung des Photoeffektes ist in Abbildung 1 dargestellt.

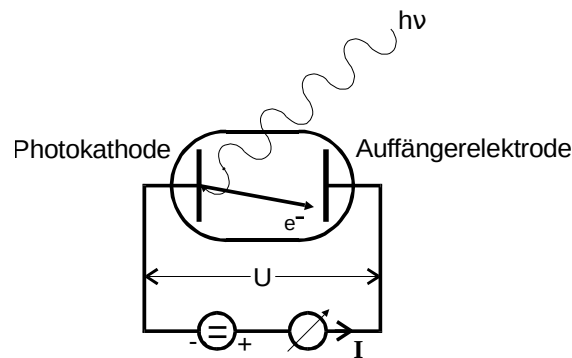


Abbildung 1: Grundlegender Aufbau zur Messung des Photoeffektes.[6]

Eine negativ geladene Photokathode wird im Vakuum mit monochromatischem Licht aus einer Quelle bestrahlt. Laut dem Teilchenmodell besteht Licht aus Photonen, auch Lichtquanten genannt, welche ein diskretes Energiespektrum besitzen. Wenn diese Energie E_{Ph} groß genug ist, können Photonen beim Auftreffen auf die Photokathode Elektronen aus dem Material der Photokathode herauslösen. Wenn die Energie größer als die Austrittsarbeit A_K des Elektrons ist, wird die restliche Energie übertragen und in kinetische Energie E_{kin} der Elektronen umgewandelt.

$$E_{Ph} = h\nu = A_K + E_{kin} \quad (1)$$

h ist das Plank'sche Wirkungsquantum und es gilt

$$\nu = \frac{c}{\lambda} \quad (2)$$

als Zusammenhang zwischen der Frequenz ν und der Wellenlänge λ .

Die Elektronen bewegen sich zu einer positiv geladenen Anode, an welcher der Strom der

herausgelösten Elektronen als Photonenstrom gemessen wird. Es existiert eine Grenzfrequenz, da keine Elektronen ausgelöst werden bei $E_{Ph} < A_K$. Außerdem ist die Lichtintensität proportional zur Anzahl der Photonen pro Zeit- und der Raumwinkel und pro Photon kann nur ein Elektron ausgelöst werden. Daraus folgt, dass die Anzahl der pro Zeit herausgelösten Elektronen proportional zur Lichtintensität ist. Aus Gleichung 1 folgt, dass die kinetische Enrgie der Elektronen abhängig von der Frequenz ν des Lichtes ist, mit der die Photokathode bestrahlt wird.

2.2 Experimentelle Messung des Photoeffektes mit der Gegenfeldmethode

Die Gegenfeldmethode wird dazu verwendet den Photoeffekt zu untersuchen. Dabei wird ein variables Potential U zwischen Photokathode und Anode angelegt. Dies führt dazu, dass der gemessene Photostrom kleiner wird, weil nur noch Elektronen die Anode erreichen, dessen Energie ausreicht um das Feld zu überwinden. Der Photostrom verschwindet, wenn

$$eU_g = \frac{1}{2}m_0v_{max}^2$$

gilt, also auch die Elektronen mit der größten Geschwindigkeit v_{max} bei einer Grenzgegenspannung U_g die Kathode nicht mehr erreichen. Die Elementarladung wird als e dargestellt und die Ruhemasse als m_0 . Mit dem Gegenfeld muss die Energiebilanz aus Gleichung 1 geändert werden. Die übertragene Energie teilt sich in Austrittsarbeit A_K und Arbeit des Gegenfeld $E_{kin} \geq eU_g$ auf.

$$E_{Ph} = h\nu = A_K + eU_g$$

Der Photonenstrom fällt bei steigender Gegenspannung U nicht sofort ab, was in Abbildung 2 dargestellt ist.

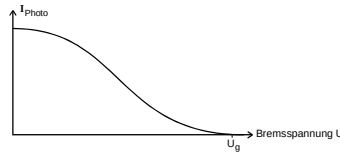


Abbildung 2: Verlauf des Photostroms bei steigender Gegenspannung.[6]

Der Grund für diese Kurve ist, dass die Elektronen im Material verschiedene Energieniveaus besitzen und daher verschiedenenergetisch sind, wenn sie aus der Photokathode herausgelöst werden.

Die Energieverteilung kann mit der Fermi-Dirac-Statistik erläutert werden, welche besagt, dass sich die Elektronen auf einem Intervall von 0 bis zu einer Fermi-Energie ζ beschreiben lässt. Die obere Grenze ζ ist dabei materialabhängig. Für den Photonenstrom ergibt sich der Zusammenhang

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

weil die herausgelösten Elektronen teilweise eine Energie haben, die größer als $h\nu - A_K$ ist. In Abbildung 2 ist die Wurzel des Photonenstroms gegen die Spannung aufgetragen, wobei die Nullstelle die Grenzfrequenz bildet. Bei kleinen Wellenlängen muss eine

Beschleunigungsspannung U_b angelegt werden, damit ein Photostrom entsteht und

$$h\nu + eU_b \geq A_A$$

gilt. Die Energie der Elektronen muss größer als die Austrittsarbeit A_A der Anode sein, damit die Elektronen auf die Anode treffen. Dabei setzt sich die Energie der Elektronen aus $E = h\nu$ und der elektrischen Energie eU_b zusammen.

3 Durchführung

Der Versuch wird gemäß Abbildung 3 aufgebaut.

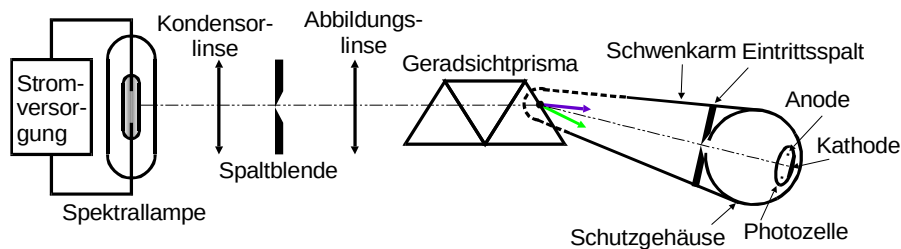


Abbildung 3: Aufbau zur Messung des Photoeffektes.[6]

Das Licht der Spekttrallampe fällt durch eine Kondensorlinse, einen Spalt und eine Abbildungslinse und wird somit gebündelt, bevor es das Prisma durchläuft. Im Prisma wird der Lichtstrahl in Spektrallinien verschiedener Frequenzen gebrochen, welche auf die verschiebbare Photozelle treffen.

Nacheinander werden nun 5 verschiedene Spektrallinien untersucht. Hierbei wird darauf geachtet, die jeweilige Spektrallinie mithilfe der Linsen möglichst scharf zu fokussieren und den Spalt der Photozelle darauf auszurichten. Für 5 verschiedene Linien wird der am Picoamperemeter gemessene Photostrom in Abhängigkeit von der angelegten Bremsspannung gemessen. Hierbei wird die Bremsspannung erhöht, bis kein Photostrom mehr festzustellen ist. Für die gelbe Linie wird zudem zusätzlich der Bereich bis ca. 20 V Beschleunigungsspannung gemessen. Die Werte werden tabellarisch aufgenommen. Zwischen den einzelnen Messungen muss das Bild eventuell erneut fokussiert werden.

4 Auswertung

Der Versuch wird wie in Abschnitt 3 beschrieben durchgeführt.

4.1 Bestimmung der Grenzfrequenz für verschiedenen Wellenlängen

Für das gelbe Licht werden die Werte in Tabelle 1 aufgenommen. Die Werte, die mit der Gegenfeldmethode aufgenommen werden, werden in Abbildung 4 dargestellt, wobei die Wurzel des Photonenstroms gegenüber der Spannung aufgetragen wird. Außerdem wird

mit den Pythonmodulen Matplotlib[2], Uncertainties[3] und Numpy[4] eine Ausgleichsgerade erstellt. Die Parameter der Ausgleichsgerade werden in Tabelle 6 eingefügt.

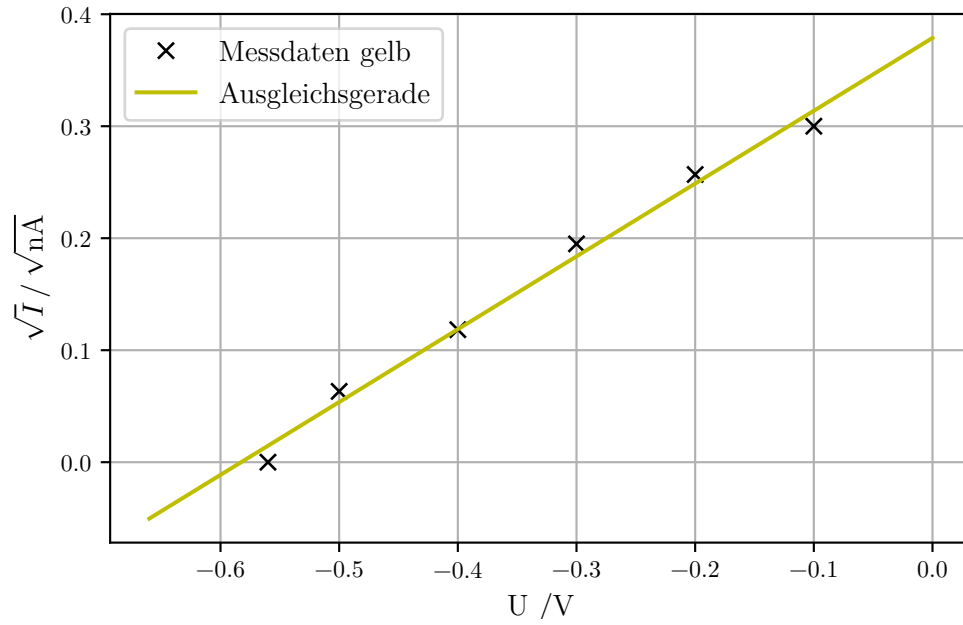


Abbildung 4: Messwerte der Gegenfeldmethode für das gelbes Licht mit der Ausgleichsgerade.

Tabelle 1: Messwerte für das gelbe Licht.

Spannung U/V	Stromstärke I/nA
−0,56	0
−0,50	0,004
−0,40	0,014
−0,30	0,038
−0,20	0,066
−0,10	0,090
−0,02	0,100
0,02	0,120
0,10	0,125
0,20	0,130
0,30	0,150
0,40	0,160
0,50	0,200
1,00	0,420
1,50	0,500
2,00	0,560
2,50	0,580
3,00	0,650
3,50	0,550
4,00	0,600
4,50	0,800
5,00	0,700
6,00	0,700
7,00	0,750
8,00	0,750
9,00	0,800
10,00	0,850
12,50	0,900
15,00	0,950
17,50	1,000
19,00	1,600

Die bestimmten Werte für das grüne Licht werde in Tabelle 2 eingetragen. In Abbildung 5 wird die Wurzel der Stromstärke gegenüber der der Spannung für grünes Licht dargestellt. Auch hier wird eine Ausgleichsgerade eingefügt und die Parameter werden in Tabelle 6 eingetragen.

Tabelle 2: Messwerte für das grüne Licht.

Spannung U/V	Stromstärke I/nA
−0,02	0,310
−0,10	0,280
−0,20	0,220
−0,30	0,200
−0,40	0,090
−0,45	0,050
−0,50	0,048
−0,55	0,020
−0,60	0,010
−0,65	0,004
−0,70	0

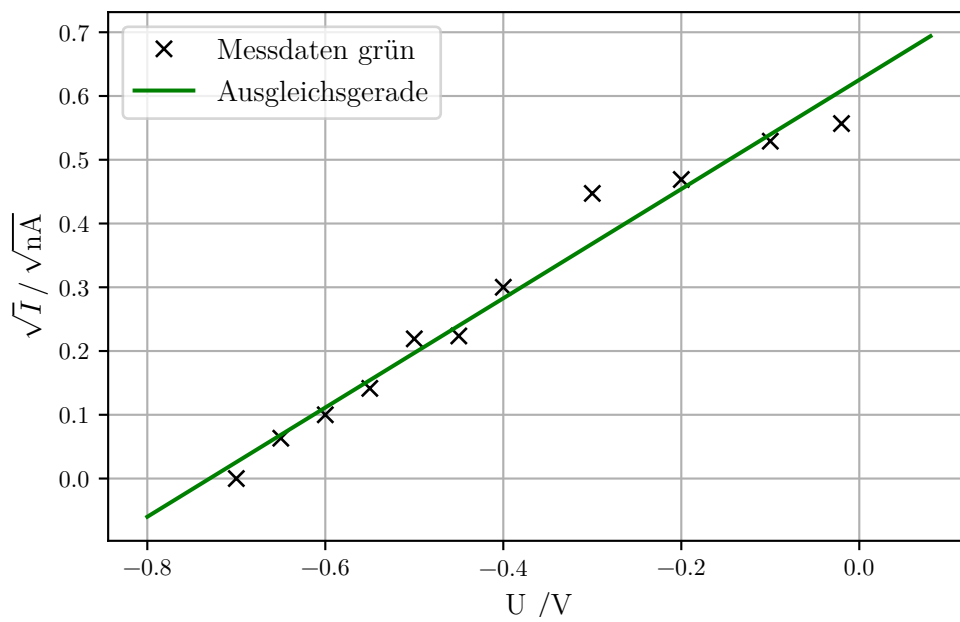


Abbildung 5: Messwerte der Gegenfeldmethode für das grüne Licht mit der Ausgleichsgerade.

In Tabelle 3 werden die Messwerte für das türkise Licht eingetragen und in Abbildung 6 dargestellt. Dabei wird die Wurzel der Stromstärke gegenüber der Spannung gestellt. Die Ausgleichsgerade wird auch eingetragen und die Parameter sind in Tabelle 6 eingefügt.

Tabelle 3: Messwerte für das türkise Licht.

Spannung U/V	Stromstärke I/nA
−0,02	0,030
−0,10	0,022
−0,20	0,020
−0,30	0,018
−0,40	0,016
−0,50	0,010
−0,60	0,008
−0,70	0,004
−0,80	0,001
−0,90	0

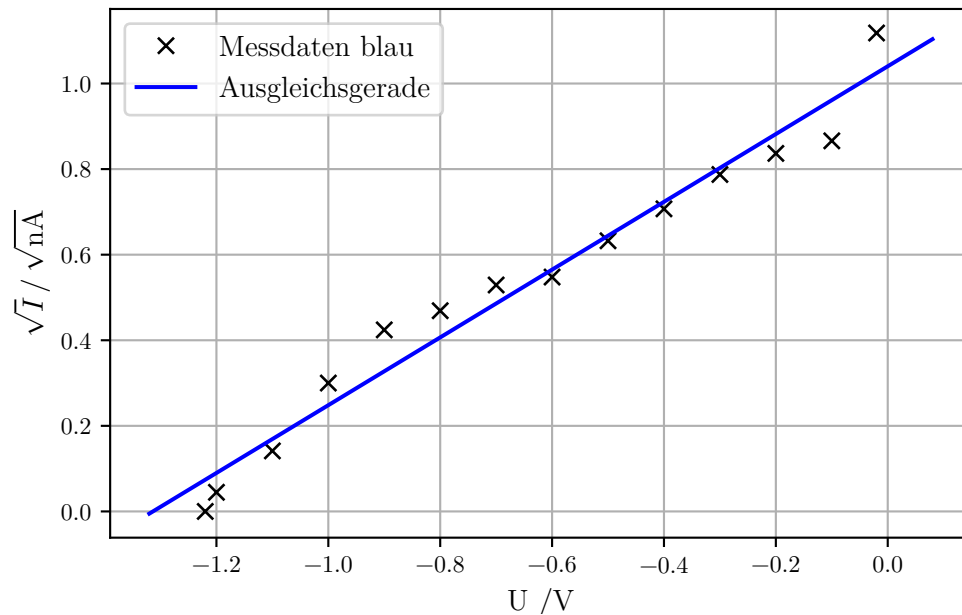


Abbildung 6: Messwerte für das türkise Licht mit der Ausgleichsgerade.

Die Werte der Messung für das blaue Licht sind in Tabelle 4 eingetragen und in Abbildung 7 dargestellt mit einer Ausgleichsgerade. Die Wurzel der Stromstärke wird dabei gegenüber der Spannung aufgetragen.

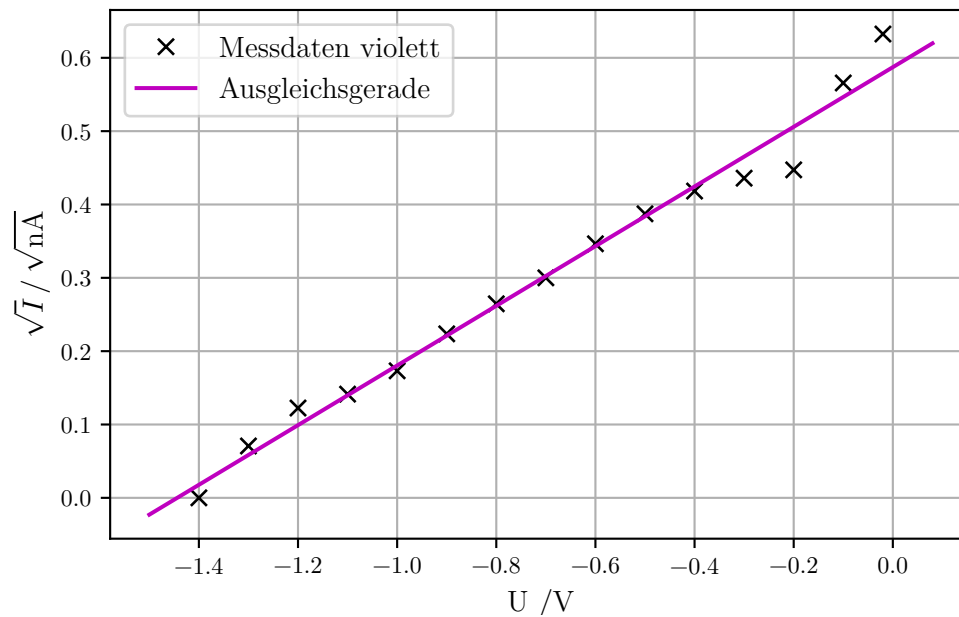


Abbildung 7: Messwerte für das blaue Licht mit der Ausgleichsgerade.

Tabelle 4: Messwerte für das blaue Licht.

Spannung U/V	Stromstärke I/nA
-0,02	1,250
-0,10	0,750
-0,20	0,700
-0,30	0,620
-0,40	0,500
-0,50	0,400
-0,60	0,300
-0,70	0,280
-0,80	0,220
-0,90	0,180
-1,00	0,090
-1,10	0,020
-1,20	0,002
-1,22	0

Das violette Licht wird gemessen und in Tabelle 5 eingetragen. Die Wurzel der Stromstärke wird gegenüber der Spannung in Abbildung 8 mit einer Ausgleichsgerade dargestellt. Die berechneten Parameter der Ausgleichsgerade werden in Tabelle 6 eingefügt.

Tabelle 5: Messwerte für das violette Licht.

Spannung U/V	Stromstärke I/nA
−0,02	0,400
−0,10	0,320
−0,20	0,200
−0,30	0,190
−0,40	0,175
−0,50	0,150
−0,60	0,120
−0,70	0,090
−0,80	0,070
−0,90	0,050
−1,00	0,030
−1,10	0,020
−1,20	0,015
−1,30	0,005
−1,40	0

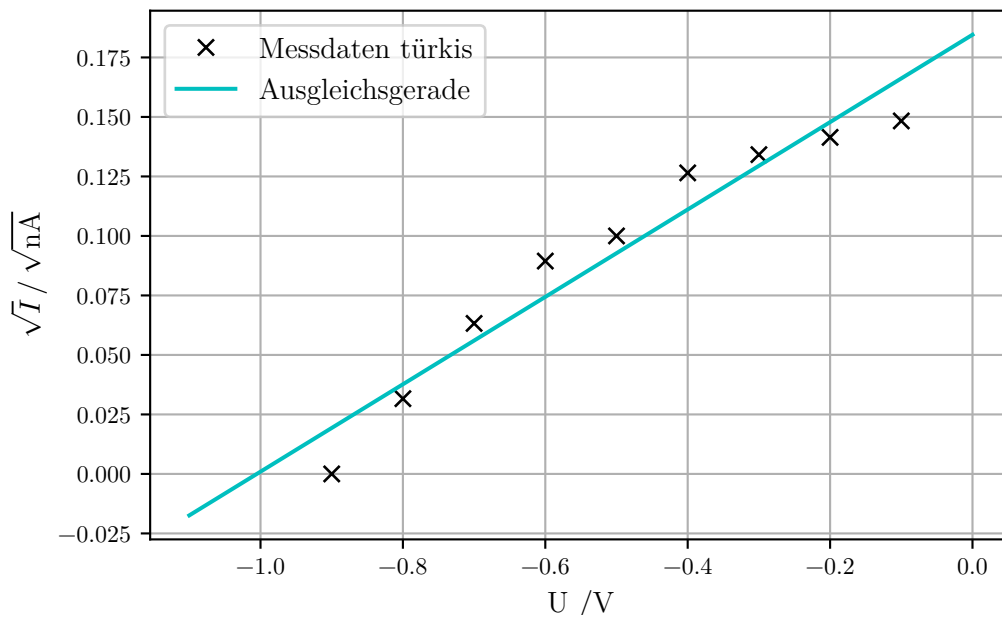


Abbildung 8: Messwerte für das violette Licht mit der Ausgleichsgerade.

4.2 Bestimmung von $\frac{h}{e}$ und der Austrittsarbeit

Aus den gegebenen Wellenlängen([6, S. 80]) werden die Frequenzen für verschiedene Farben mit Gleichung 2 berechnet und in Tabelle 6 eingetragen. Mithilfe der Parameter der Ausgleichsgeraden wird mit

$$U_g = -\frac{b}{a}$$

die Grenzspannung berechnet und auch in Tabelle 6 eingetragen.

Tabelle 6: Berechnete Frequenzen und Parameter der Ausgleichsgeraden für verschiedene Farben.

Farbe	λ/nm	ν/THz	$a/\sqrt{\text{nA}}/\text{V}$	$b/\sqrt{\text{nA}}$	U_g/V
gelb	578	518,67	$0,650 \pm 0,033$	$0,379 \pm 0,013$	$-0,583 \pm 0,035$
grün	546	549,07	$0,857 \pm 0,049$	$0,625 \pm 0,023$	$-0,730 \pm 0,050$
türkis	492	609,33	$0,184 \pm 0,018$	$0,185 \pm 0,010$	$-1,005 \pm 0,113$
blau	435	689,18	$0,792 \pm 0,043$	$1,040 \pm 0,032$	$-1,313 \pm 0,082$
violett	408	734,79	$0,407 \pm 0,155$	$0,587 \pm 0,013$	$-1,444 \pm 0,063$

Die ermittelten Werte der Grenzspannungen werden gegen die jeweilige Frequenz aufgetragen. Das Ergebnis ist in Abbildung 9 dargestellt. Außerdem wird eine Ausgleichsgerade erstellt.

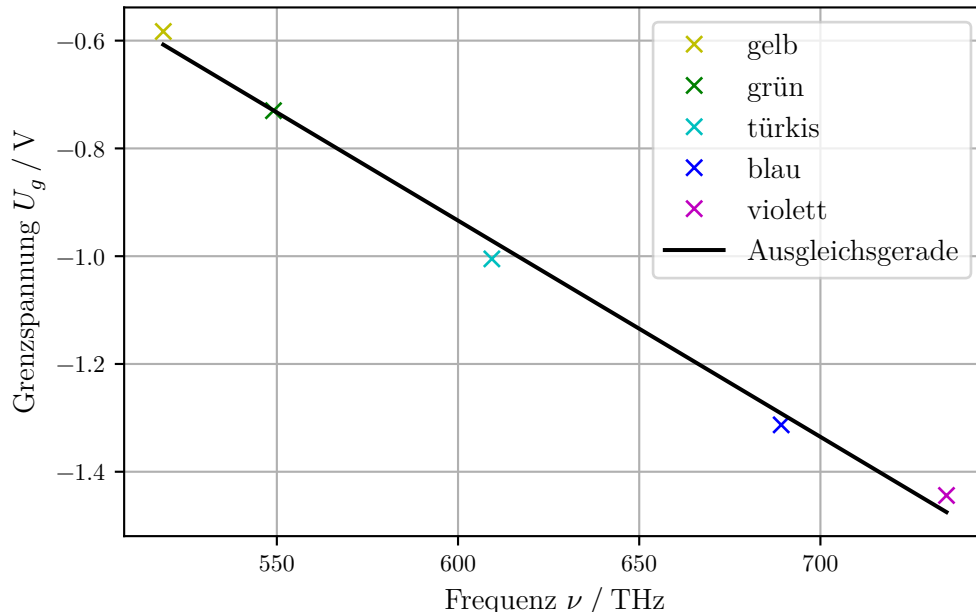


Abbildung 9: Grenzspannungen aufgetragen gegenüber der Frequenz.

Mithilfe der Parameter der Ausgleichsgerade

$$a = (-4.014 \pm 0.177)10^{-15} \text{Vs}$$

$$b = (1.474 \pm 0.111) \text{V}$$

wird das Verhältnis von h und e , sowie die Austrittsarbeit bestimmt zu

$$\frac{h}{e} = (4.014 \pm 0.177)10^{-15} \text{Vs}$$

$$A_K = (1.474 \pm 0.111) \text{eV}.$$

4.3 Nähere Betrachtung des Photostroms vom gelben Licht

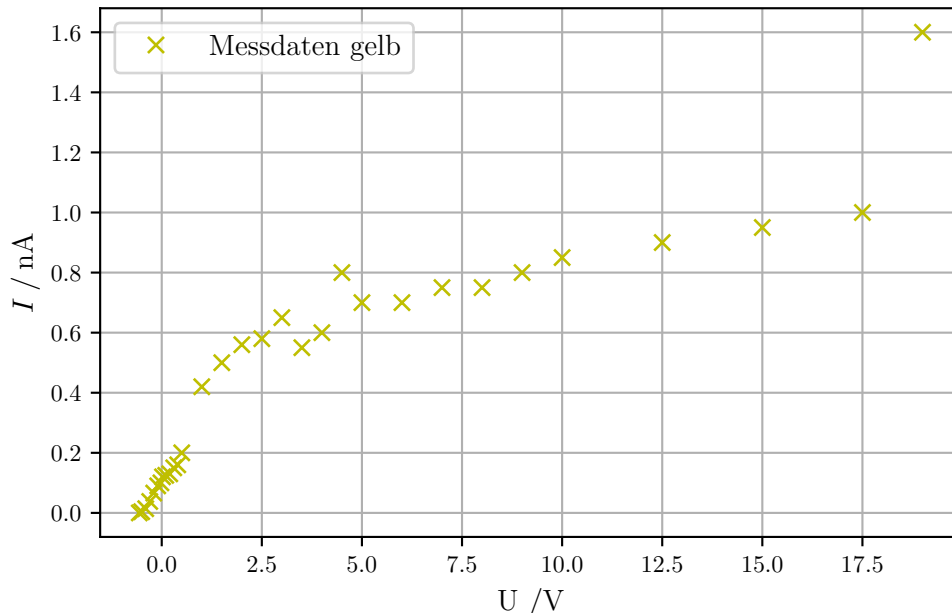


Abbildung 10: Photostrom für gelbes Licht aufgetragen gegen die Spannung.

Wie in Abbildung 10 zu sehen, erreicht die Kurve bei hohen Spannungen einen Sättigungswert, bzw. nähert sich asymptotisch einem Grenzwert an. Da die Anzahl der emittierten Elektronen von der endlichen Intensität der eingestrahnten Lichtstrahlung abhängig ist, nähert sie sich bei konstanter Lichtstrahlung einem endlichen Wert an. Die kinetische Energie der Elektronen ist ungleich verteilt, daher können manche Elektronen die Anode verfehlen, weil diese zusätzlich eine endliche Größe besitzt. Somit müsste die Anode vergrößert werden und der Glaszylinder muss perfekt evakuiert werden, um eine Photozelle zu konstruieren, wo der Sättigungswert nicht nur asymptotisch erreicht wird. Die Elektronen haben aufgrund der Fermi-Dirac-Verteilung in der Photokathode bereits

unterschiedliche Energien. Dies führt dazu, dass die benötigte Energie zum Herauslösen der Elektronen ebenfalls variiert. Daher gibt es Elektronen, deren Energie trotz $U > U_G$ nicht ausreicht um die Anode zu erreichen. Da das Kathodenmaterial schon bei Zimmertemperatur verdampft[6] und sich an der Anode absetzen kann, kann auch hier ein photoelektrischer Effekt auftreten, der dem gewünschten Photostrom entgegen gerichtet ist. Dieser Effekt ist recht gering gegenüber dem vorgesehenen Photoeffekt. Die Anode besitzt anscheinend, da schon energiearmes Licht einen Photostrom auslösen kann, eine geringe Austrittsarbeit.

5 Diskussion

Das aus Abbildung 9 bestimmte Verhältnis $\frac{h}{e}$ und die ebenso bestimmte Austrittsarbeit lauten

$$\begin{aligned}\frac{h}{e} &= (4.014 \pm 0.177)10^{-15} \text{Vs} \\ A_K &= (1.474 \pm 0.111) \text{eV}.\end{aligned}$$

Der Literaturwert des Verhältnisses von Planck'schem Wirkungsquantum[5] und Elementarladung[1] beträgt

$$\left(\frac{h}{e}\right)_{lit} = 4.136 \cdot 10^{-15} \text{Vs}.$$

Die Abweichung zum Literaturwert beläuft sich nach

$$a = \frac{|x - x_{lit}|}{x_{lit}} \cdot 100$$

auf 2,95 %. Es handelt sich somit nur um eine geringe Abweichung.

Trotz der geringen Abweichung gibt es einige Fehlerquellen, die berücksichtigt werden müssen. Die Verbindung der Photozelle mit dem Picoamperemeter stellt eine große Unsicherheit dar. So ist das Picoamperemeter sehr sensibel und selbst kleinste Bewegungen im Raum führten zu starken Schwankungen. Zudem war der Raum nicht komplett dunkel, was die Messwerte weiter verfälscht. Die Messwerte sind daher nicht sehr genau, da vielmals ein Mittelwert nach Augenmaß gebildet werden musste. Auch bei den Spektrallinien war es teilweise nicht möglich, sie exakt zu fokussieren. Dadurch ergibt sich eine nicht optimale Intensität an der Photokathode, was auch zu Abweichungen führen kann.

6 Anhang

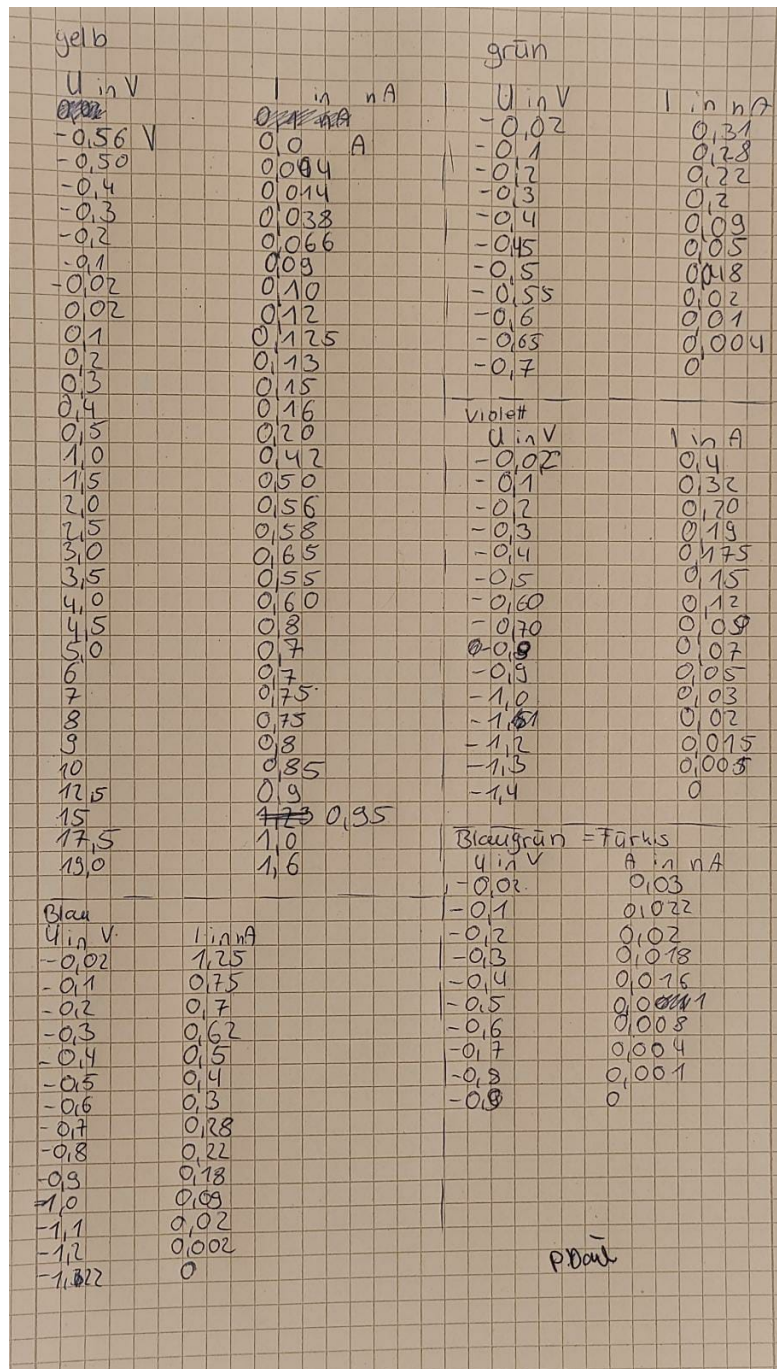


Abbildung 11: Messwerte zum Versuch.

Literatur

- [1] *Elementary charge*. NIST. 2018. URL: https://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?e%7Csearch_for=e (besucht am 02.06.2022).
- [2] 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/>.
- [3] Eric O. Lebigot. *Uncertainties: a Python package for calculations with uncertainties*. Version 2.4.6.1. URL: <http://pythonhosted.org/uncertainties/>.
- [4] 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/>.
- [5] *Planck constant*. NIST. 2018. URL: https://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?h%7Csearch_for=h (besucht am 02.06.2022).
- [6] *Versuchsanleitung zu Versuch Nr. 500 Der Photoeffekt*. TU Dortmund, Fakultät Physik. 2022.