

V500

Der Photoeffekt

Theodor Zies

theodor.zies@tu-dortmund.de

Tom Troska

tom.troska@tu-dortmund.de

Durchführung: 03.05.2022

Abgabe: 10.05.2022

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1. Zielsetzung	3
2. Theorie	3
2.1. Beschreibung von Licht	3
2.2. Photoeffekt nach der Korpuskeltheorie	4
3. Durchführung	5
3.1. Aufbau	5
3.2. Messung des Photostroms	6
4. Auswertung	7
4.1. Bestimmung der Grenzspannung	7
4.2. Plancksches Wirkungsquantum	9
4.3. Kurvenverlauf des Photostroms	9
5. Diskussion	12
Literatur	12
A. Anhang	13
A.1. Restliche Tabellen und Plots zur Bestimmung der Grenzspannung	13
A.2. Originaldaten	17

1. Zielsetzung

Ziel dieses Versuches ist es, den Photoeffekt zu untersuchen und den Zusammenhang zwischen Elektronenenergie und Wellenlänge mithilfe der Elektroquantendynamik zu erklären.

2. Theorie

Der Photoeffekt beschreibt die Auslösung von Elektronen aus einer Metalloberfläche, welche mit Licht bestrahlt wird. Dabei treten Effekte auf, die mit der klassischen Physik nicht zu erklären sind und quantenmechanisch erklärt werden müssen. Generell wird zur Beobachtung des Photoeffekts eine Photozelle wie in Abbildung 1 verwendet. Einfallende Photonen lösen aus der Oberfläche der Photokathode Elektronen aus. Zwischen der Photokathode und der Auffängerelektrode lässt sich eine Spannung U_B anlegen, mit der die ausgelösten Elektronen abgebremst werden können, sodass sich die Energie der Elektronen über die Gegenfeldmethode bestimmen lässt. Darüber hinaus wird der Photostrom I mithilfe eines Picoamperemeters gemessen.

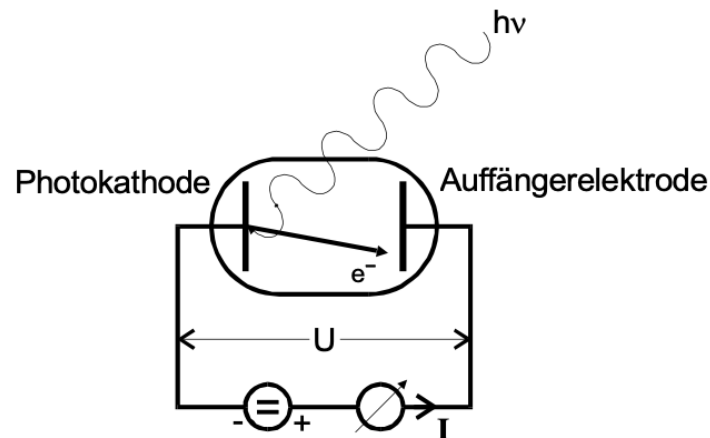


Abbildung 1: Schematische Darstellung einer Photozelle [2].

2.1. Beschreibung von Licht

In der Historie wurden vor allem zwei Theorien verwendet, um die Eigenschaften und Effekte von Licht zu beschreiben. Nach der **korpuskularen Theorie** wird Licht als sehr kleines Teilchen betrachtet, wohingegen Licht in dem **Wellenmodell** als Welle aufgefasst wird.

Die Auslösung von Photoelektronen nach dem Wellenmodell ließe sich so erklären, dass Elektronen durch konstruktive Interferenz Energie gewinnen und so die Bindungsenergie zum Atom überwinden. Da die Resonanzkatastrophe nicht unmittelbar eintreten kann, wird erwartet, dass der Photostrom verzögert einsetzt. Es wird jedoch beobachtet, dass Elektronen sofort ausgelöst werden. Außerdem wäre zu erwarten, dass die Energie der

Photoelektronen mit der Intensität des Lichtes zunimmt. Tatsächlich wird beobachtet, dass nicht die Energie, sondern die Anzahl der Photoelektronen (Photostrom I) mit der Intensität steigt. Das Wellenmodell lässt auch den Schluss zu, der Photostrom steige mit der Frequenz des Lichtes, da so mehr Elektronen gelöst würden. Beobachtet wird hingegen ein Anstieg der Energie der Elektronen.

Diese Erkenntnisse stehen folglich im direkten Widerspruch zu dem Wellenmodell. In anderen Experimenten, wie etwa dem Doppelspaltexperiment, wird wiederum widerlegt, dass Licht im klassischen Sinn aus Korpuskeln besteht.

Vereint werden die beiden Modelle in der **Quantenelektrodynamik**, wo sowohl das Wellenmodell, als auch die Korpuskeltheorie in Form von Grenzfällen enthalten sind. Welche der beiden Theorien die bessere Beschreibung ist hängt von dem jeweiligen Fall ab. Grundsätzlich lässt sich sagen, wenn über große Zahlen von Photonen gemittelt werden kann, ist das Wellenmodell die bessere Beschreibung. Im Fall von Interaktion von Photonen und Materie, etwa der Emission und Absorption, ist die Korpuskeltheorie die bessere Näherung.

Für den Photoeffekt ist demnach aufgrund der Absorption von Photonen in der Photokathode die Korpuskeltheorie das zu verwendende Modell.

2.2. Photoeffekt nach der Korpuskeltheorie

Nach der Korpuskeltheorie sind es keine Wellenphänomene, die für die Auslösung von Elektronen aus der Photokathode sorgen, sondern Photonen, die jeweils über die Energie $E = hf$ verfügen und sich geradlinig mit der Lichtgeschwindigkeit c bewegen. Trifft ein solches Photon nun auf ein Elektron der Photokathode, so wird die Energie gemäß

$$hf = E_{\text{kin}} + A_{\text{k}} \quad (1)$$

an das Elektron übertragen. Dabei bezeichnet A_{k} die Austrittsarbeit, die das Elektron benötigt, um sich von der Photokathode zu lösen. Daraus folgt direkt, dass es eine Grenzfrequenz gibt, ab der keine Photoelektronen aus dem Festkörper austreten. Dies passiert, wenn

$$hf < A_{\text{k}}. \quad (2)$$

Die Energie der ausgelösten Elektronen kann über die Gegenfeldmethode bestimmt werden. Mit (1) und der Energie im Kondensator folgt

$$hf = e_0 U_{\text{B}} + A_{\text{k}}. \quad (3)$$

Mithilfe dieses Versuches lässt sich somit das Verhältnis des Planckschen Wirkungsquantums h zur Elementarladung e_0 bestimmen. In Kombination mit einem Versuch zur Bestimmung der Elementarladung, zum Beispiel dem Millikan-Versuch, ist es daher möglich, das Plancksche Wirkungsquantum auf experimentelle Weise zu bestimmen.

Nach dieser Theorie müsste der Elektronenstrom beim Überschreiten einer Grenzspannung U_{G} schlagartig abfallen. Tatsächlich hat zeigt sich jedoch ein Verlauf wie in Abbildung 2 zu sehen ist. Dies lässt sich damit erklären, dass die Elektronen bereits vor dem Austritt aus der Photokathode eine Energieverteilung gemäß der Fermi-Dirac-Statistik haben. Für

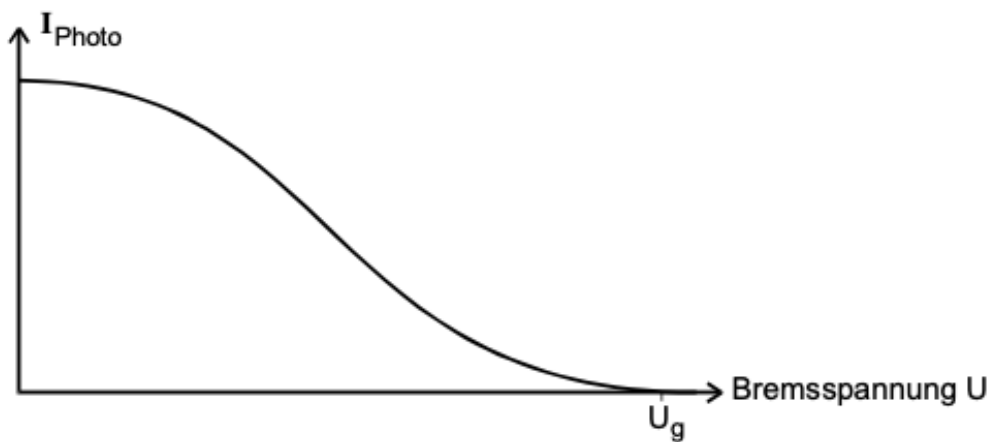


Abbildung 2: Photostrom I in Abhängigkeit von der Bremsspannung U_B [2].

diesen Versuch ergibt sich in guter Näherung ein quadratischer Zusammenhang zwischen dem Photostrom I und der Bremsspannung U_B gemäß

$$I \propto U_B^2.$$

3. Durchführung

3.1. Aufbau

Für diesen Versuch wird der in Abbildung 3 verwendete Aufbau genutzt. Mithilfe zweier

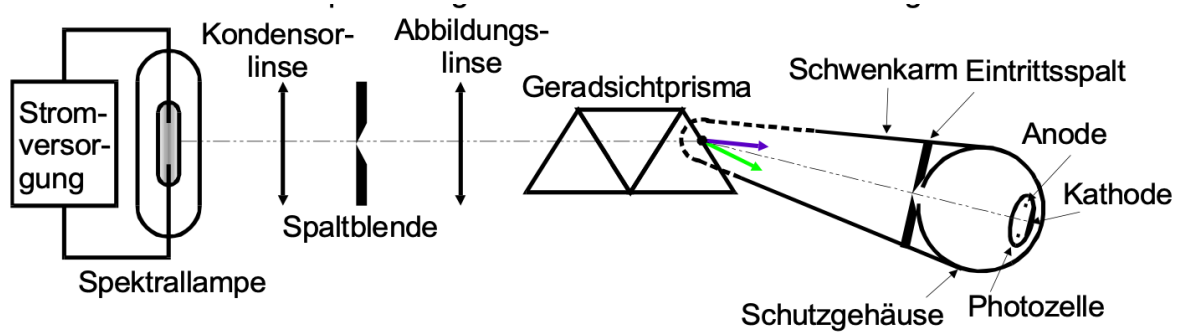


Abbildung 3: Skizze des Aufbaus [2].

Linsen und einer Spaltblende wird das Licht der Quecksilberdampf Lampe auf ein Prisma fokussiert, wo das Licht, aufgrund von Dispersion, wellenlängenabhängig gebrochen wird. In Folge dessen werden die Spektrallinien räumlich getrennt sichtbar. Über einen Schwenkarm lässt sich die Photozelle so ausrichten, dass genau das Licht einer Spektrallinie durch eine Spaltöffnung auf die Photokathode trifft. Die Photozelle hat, wie in Abbildung 4

zu sehen ist, eine ringförmige Anode, die in wenigen Millimetern Abstand parallel zu der Photokathode angeordnet ist.

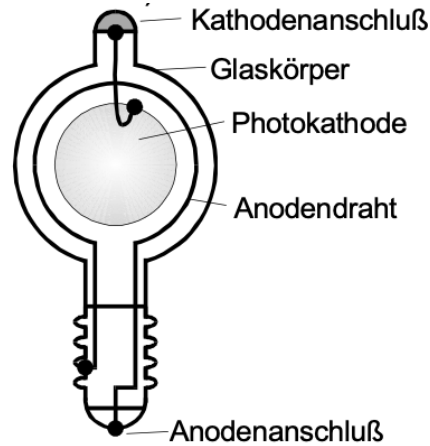


Abbildung 4: Skizze der verwendeten Photozelle [2].

Für die Messung des Photostroms und der Energie der Elektronen wird die Photokathode an eine regelbare Spannungsversorgung angeschlossen. Außerdem wird ein Picoamperemeter verwendet, um den Photostrom zu messen. Es ergibt sich ein Schaltbild wie in Abbildung 5 zu sehen ist.

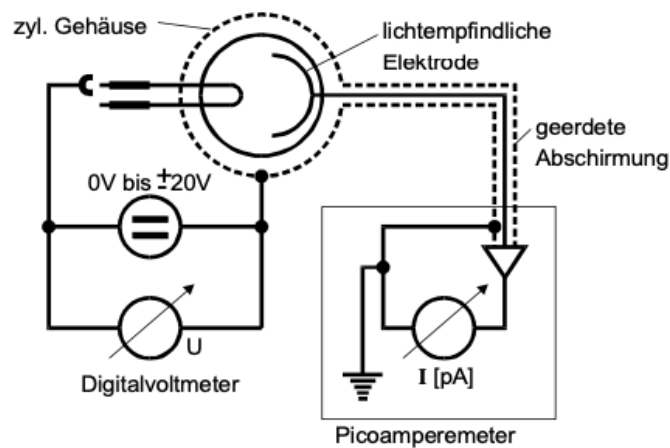


Abbildung 5: Elektrisches Schaltbild der Messapparatur [2].

3.2. Messung des Photostroms

Im Folgenden soll für 5 verschiedene Spektrallinien der Photostrom I abhängig von der angelegten Bremsspannung U_B gemessen werden. Dafür wird die Spannung in angemessenen Schritten soweit erhöht, bis der Photostrom zum Erliegen kommt. Für die rote Spektrallinie wird nicht bei einer Bremsspannung von $U_B = 0\text{ V}$ gestartet, sondern es wird

eine Beschleunigungsspannung angelegt, damit kein allzu kleiner Messbereich verwendet werden muss.

Außerdem wird für die gelbe Spektrallinie mit einer Wellenlänge von $\lambda = 578 \text{ nm}$ sowohl eine Beschleunigungsspannung, als auch eine Bremsspannung angelegt, sodass sich ein Messbereich von $-20 \text{ V} \leq U_B \leq 20 \text{ V}$ ergibt.

4. Auswertung

4.1. Bestimmung der Grenzspannung

Die Messergebnisse für die rote Spektrallinie finden sich in Tabelle 1. Die Daten werden ausgewertet, indem die Bremsspannung U_B gegen die Wurzel des Photostroms \sqrt{I} geplottet wird. Mithilfe der Python Erweiterung *scipy* [1] wird eine lineare Ausgleichsrechnung durchgeführt, die Geradengleichung ist dabei vom Typ

$$\sqrt{I} = m \cdot U_B + b. \quad (4)$$

Der Plot der Messwerte sowie der Regressionsgerade ist in Abbildung 6 zu sehen.

Tabelle 1: Messwerte für die rote Spektrallinie.

U_B/V	I/nA
-0,4	0,70
-0,3	0,56
-0,2	0,41
-0,1	0,29
0,0	0,20
0,1	0,12
0,2	0,06
0,3	0,04
0,4	0,02
0,5	0,01
0,7	0

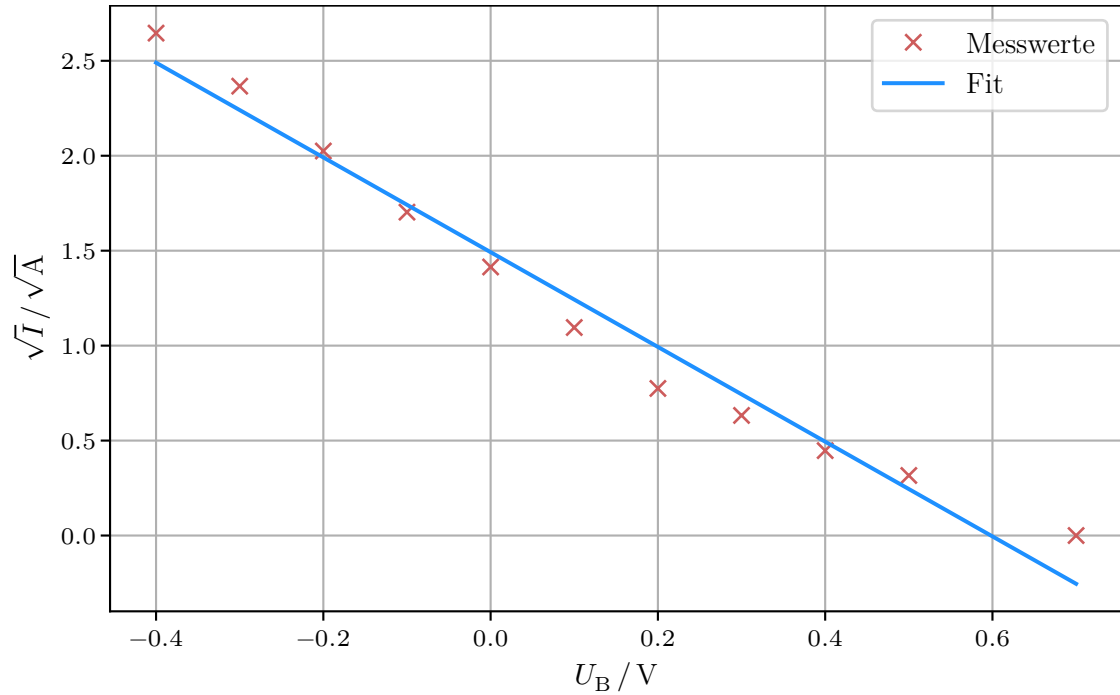


Abbildung 6: Plot der Bremsspannung U_B gegen die Wurzel des Photostroms I für die rote Spektrallinie.

Die gesuchte Grenzspannung U_G ist dabei die Nullstelle der Regressionsgerade und lässt sich durch Umstellen von Gleichung 4 bestimmen als

$$U_G = \frac{-b}{m}.$$

Diese Auswertungsschritte werden für die restlichen Spektrallinien analog durchgeführt, die zugehörigen Wertetabellen und Plots finden sich im Anhang A.1. Die Ergebnisse für sämtliche Spektrallinien sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Tabelle 2: Parameter der linearen Regression sowie berechneter Wert der Grenzspannung für alle Spektrallinien..

λ/nm	$m/(\frac{\text{nA}}{\text{V}})$	b/nA	U_G/V
646	$-2,49 \pm 0.14$	$1,49 \pm 0.05$	0,598
578	$-9,90 \pm 0.50$	$4,90 \pm 0.18$	0,491
546	$-5,80 \pm 0.50$	$3,30 \pm 0.17$	0,570
435	$-4,68 \pm 0.10$	$5,33 \pm 0.07$	0,749
405	$-2,70 \pm 0.06$	$3,51 \pm 0.05$	1,300

4.2. Planksches Wirkungsquantum

Nun werden die jeweiligen Wellenlängen der Spektrallinien in Frequenzen umgerechnet. Die Frequenzen werden dann gegen ihre zugehörigen Grenzspannungen geplottet, welche in Tabelle 2 berechnet wurden. Erneut wird eine lineare Regression ermittelt, zusammen mit den Daten ist sie in Abbildung 7 zu sehen.

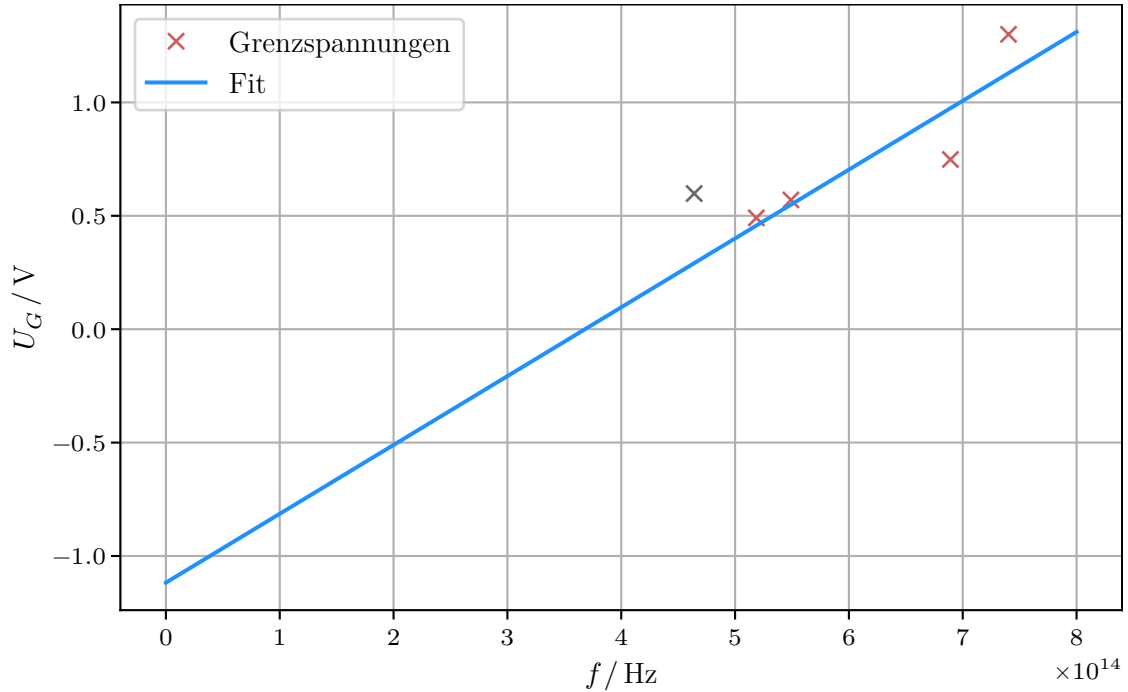


Abbildung 7: Plot der unterschiedlichen Lichtfrequenzen gegen die zugehörigen Bremsspannungen inklusive linearer Regression.

Die Geradengleichung der Regression entspricht dem theoretischen Zusammenhang in Gleichung 3. Stellt man die Gleichung nach U_B um, so erhält man

$$U_B = \frac{h}{e_0} f - \frac{A_k}{e_0}.$$

Das Verhältnis $\frac{h}{e_0}$ sowie die Austrittsarbeit A_k ergeben sich somit direkt aus den Parametern der linearen Regression, abschließend erhält man

$$\begin{aligned} \frac{h}{e_0} &= (3,0 \pm 1,1) \cdot 10^{-15} \text{ V s} \\ A_k &= (1,1 \pm 0,7) \text{ eV} \end{aligned}$$

4.3. Kurvenverlauf des Photostroms

Zuletzt wird der vollständige Verlauf des Photostroms der gelben Spektrallinie betrachtet, die dafür gemessenen Daten sind in Tabelle 3 festgehalten. Die Daten werden in

Abbildung 8 geplottet, der Verlauf wird anschließend qualitativ analysiert.

Tabelle 3: Messwerte für die gelbe Spektrallinie, hier über einen größeren Spannungsbereich.

U_B/V	I/nA
-19,0	101
-18,0	99
-17,0	98
-16,0	96
-15,0	96
-14,0	96
-13,0	95
-12,0	93
-11,0	91
-10,0	88
-9,0	86
-8,0	83
-7,0	80
-6,0	76
-5,0	70
-4,0	64
-3,0	55
-2,0	42
-1,0	28
0,0	4,4
0,1	2,4
0,2	0,8
0,3	0,2
0,4	0,0

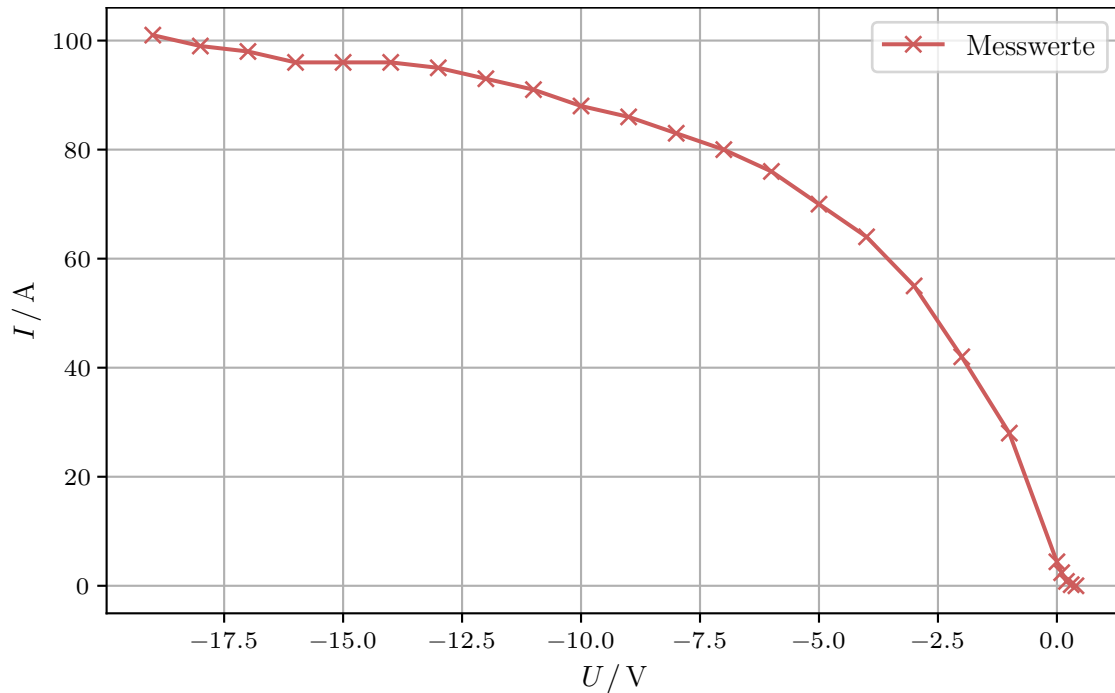


Abbildung 8: Photostrom in Abhängigkeit der Spannung für die gelbe Spektrallinie, mit einem größeren Messbereich für die Spannung.

Für hohe Beschleunigungsspannungen erreicht die Kurve einen Sättigungswert. Hierbei handelt es sich aber nicht um einen Widerspruch mit dem ohmschen Gesetz, da aufgrund der endlichen Lichtintensität nur eine begrenzte Menge an Elektronen gelöst werden können, somit ist auch der Photostrom auf ein Maximum beschränkt. Da niemals alle Elektronen die Elektrode erreichen, nähert sich die Spannung nur asymptotisch diesem Maximum an.

Nähert man sich der Grenzspannung, so fällt der Strom kontinuierlich auf Null ab, ein sprunghafter Abfall ist nicht zu beobachten. Dies liegt an der Energieverteilung der Elektronen im Leiter, die für eine nicht zu vernachlässigende Streuung der Energie der Elektronen nach dem Lösen aus der Photokathode verantwortlich ist.

Zusätzlich zum Photostrom kann außerdem ein diesem entgegengesetzter Strom auftreten. Dies liegt daran, dass die Photokathode aus einem Material besteht, dass bereits bei Zimmertemperatur verdampft. Somit können sich losgelöste Elektronen an der Kathode anlagern und anschließend zur Photokathode zurück beschleunigt werden. Da dieser Effekt im Vergleich zum Photostrom nur eine geringe Menge an Elektronen freisetzt, ist ein Sättigungswert schnell erreicht. Das frühe Auftreten dieses negativen Stroms im Experiment zeigt, dass die Photokathode eine recht kleine Austrittsarbeit aufweist.

5. Diskussion

Es fällt auf, dass die gemessene Grenzspannung der roten Spektrallinie größer ist, als jene der gelben und grünen. Dies kann physikalisch nicht möglich sein, somit ist dies auf einen Fehler der Messapparatur zurückzuführen.

Im Folgenden wurde dieses Resultat dann bei der Bestimmung von dem Verhältnis $\frac{h}{e_0}$ ausgelassen, um ein möglichst aussagekräftiges Ergebnis zu erhalten. Dennoch ist bei den Grenzspannungen kein guter linearer Zusammenhang gegeben, wie sich am Fit in Abbildung 7 leicht erkennen lässt. Abschließend soll das Endergebniss noch mit dem theoretischen Wert verglichen werden, hier lauten die genauen Werte

$$\begin{aligned}\left(\frac{h}{e_0}\right)_{\text{theo}} &= 4,135\,668 \cdot 10^{-15} \text{ V s} \\ \left(\frac{h}{e_0}\right)_{\text{exp}} &= (3,0 \pm 1,1) \cdot 10^{-15} \text{ V s}\end{aligned}$$

Selbst unter Berücksichtigung der großen Unsicherheit des experimentellen Ergebnisses sind die Werte nicht vereinbar. Bei der optischen Anordnung der Messapparatur scheint es zu viele Fehlerquellen gegeben zu haben, sodass trotz des Weglassen der Messergebnisse für die rote Spektrallinie zu große Unsicherheiten aufgetreten sind.

Unabhängig davon bestätigt vor allem Abbildung 8 qualitativ viele Eigenschaften des Photoeffekts, die hier trotz der Unsicherheiten beobachtet werden konnten.

Literatur

- [1] Eric Jones, Travis E. Oliphant, Pearu Peterson u. a. *SciPy: Open source scientific tools for Python*. Version 0.16.0. URL: <http://www.scipy.org/>.
- [2] *Versuch V500: Der Photoeffekt*. TU Dortmund, Fakultät Physik.

A. Anhang

A.1. Restliche Tabellen und Plots zur Bestimmung der Grenzspannung

Tabelle 4: Messwerte für die gelbe Spektrallinie.

U_B/V	I/nA
0,20	0,94
0,25	0,56
0,30	0,30
0,35	0,16
0,40	0,08
0,45	0,02
0,5	0

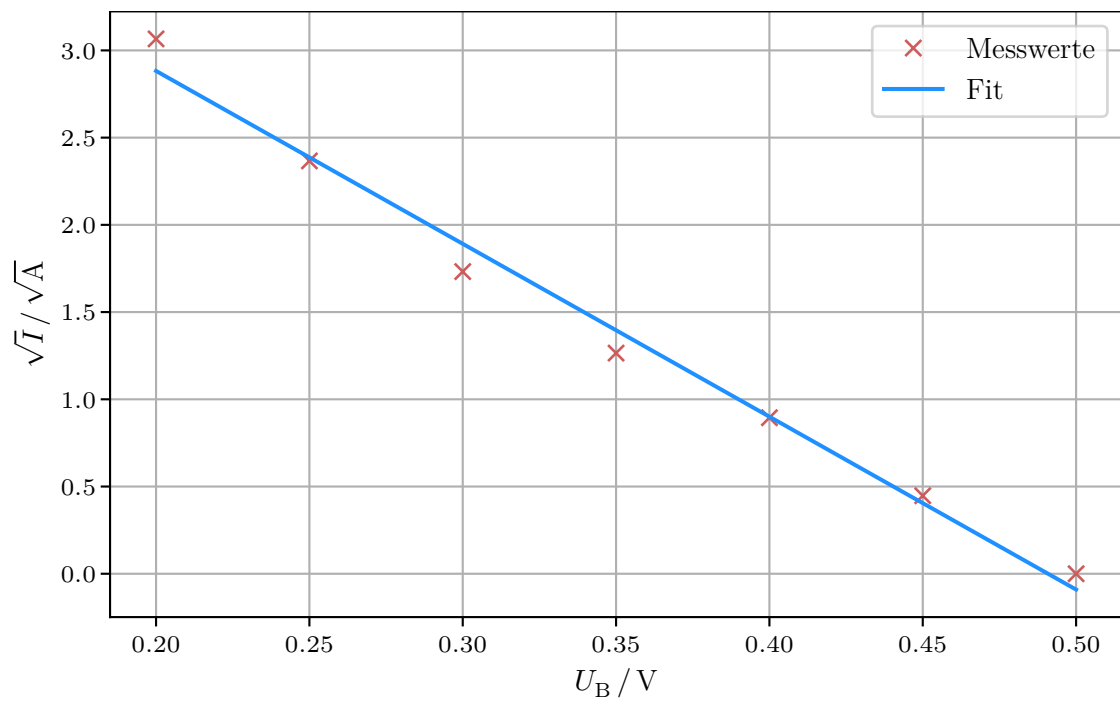


Abbildung 9: Plot der Bremsspannung U_B gegen die Wurzel des Photostroms I für die gelbe Spektrallinie.

Tabelle 5: Messwerte für die grüne Spektrallinie.

U_B/V	I/nA
0,1	8,6
0,2	4,7
0,3	1,9
0,4	0,6
0,5	0,2
0,6	0,0

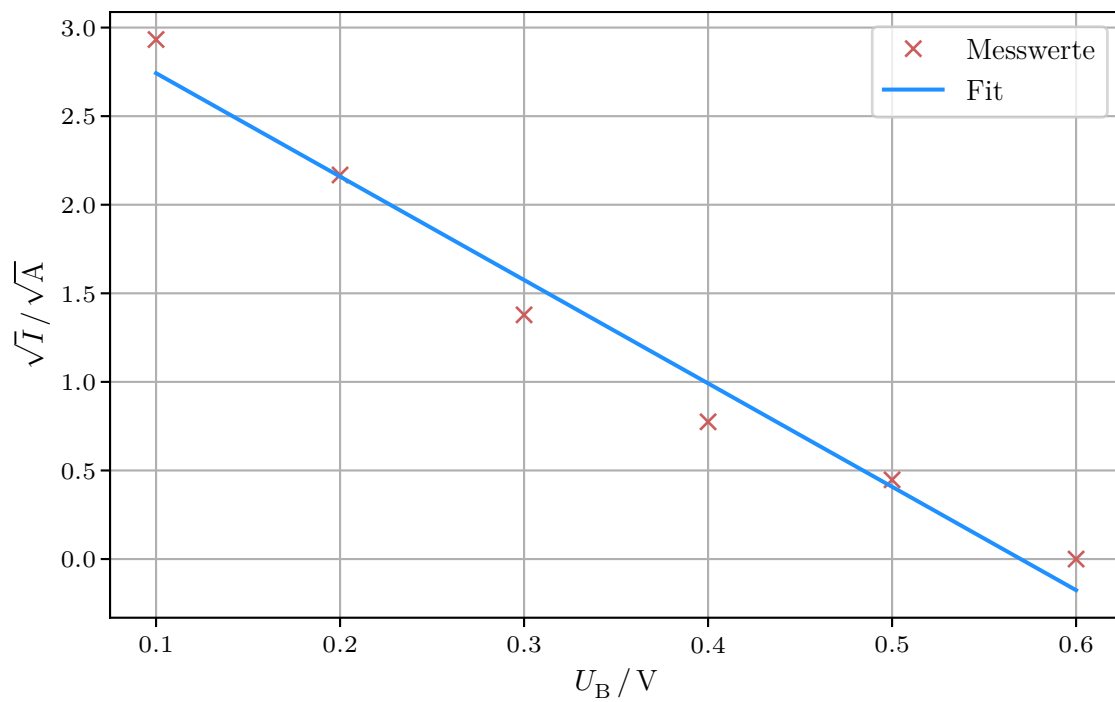


Abbildung 10: Plot der Bremsspannung U_B gegen die Wurzel des Photostroms I für die grüne Spektrallinie.

Tabelle 6: Messwerte für die erste violette Spektrallinie.

U_B/V	I/nA
0,0	29,0
0,1	24,0
0,2	20,0
0,3	16,0
0,4	12,0
0,5	8,8
0,6	5,8
0,7	3,5
0,8	2,0
0,9	1,0
1,0	0,4
1,1	0,05
1,2	0,00

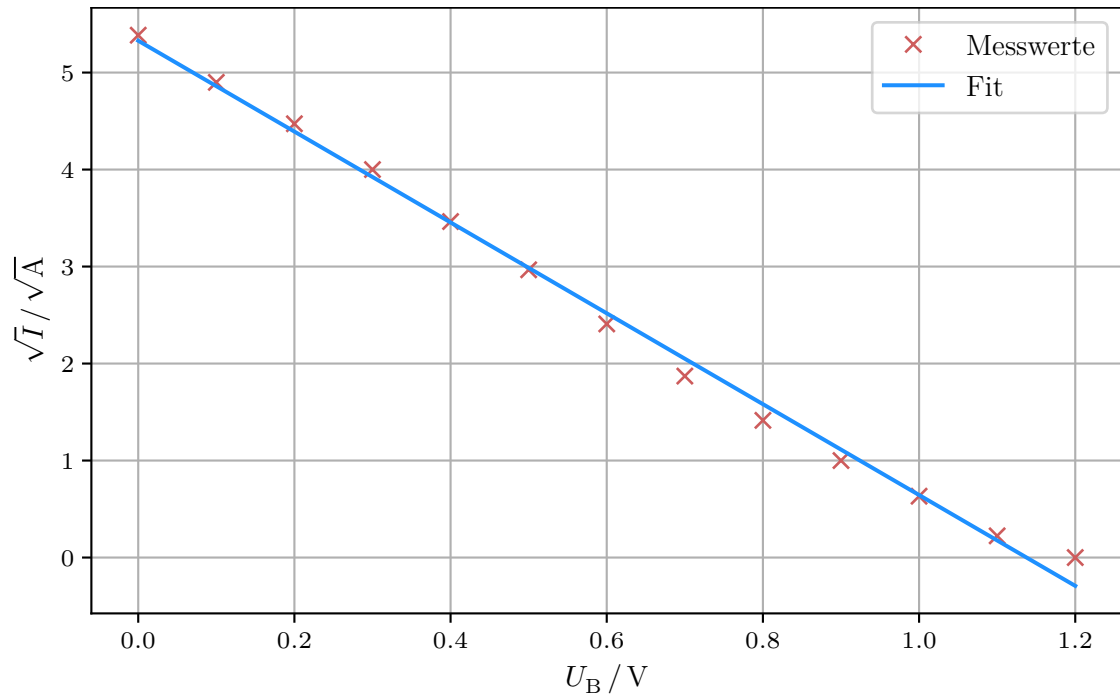


Abbildung 11: Plot der Bremsspannung U_B gegen die Wurzel des Photostroms I für die erste violette Spektrallinie.

Tabelle 7: Messwerte für die zweite violette Spektrallinie.

U_B/V	I/nA
0,0	11,0
0,1	10,0
0,2	9,6
0,3	7,8
0,4	6,4
0,5	5,0
0,6	3,6
0,7	2,6
0,8	1,7
0,9	1,0
1,0	0,6
1,1	0,25
1,2	0,10
1,3	0,00

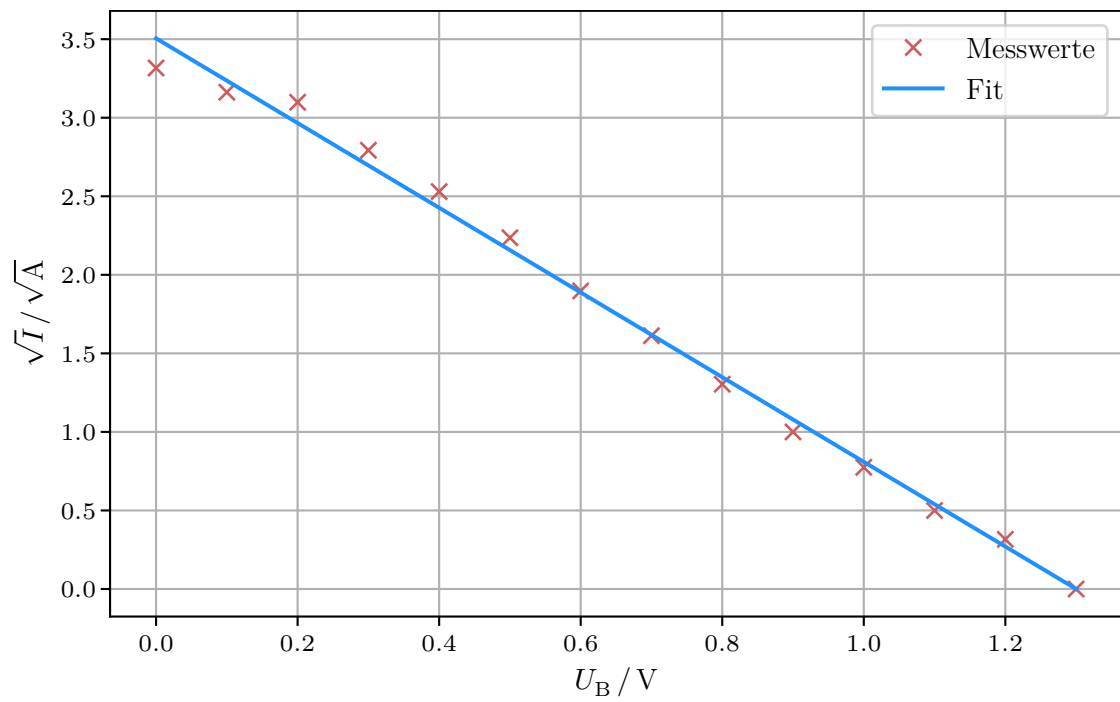


Abbildung 12: Plot der Bremsspannung U_B gegen die Wurzel des Photostroms I für die zweite violette Spektrallinie.

A.2. Originaldaten

V500-De Photocell

<u>Rot, $\lambda = 640 \text{ nm}$</u>		<u>grün, $\lambda = \begin{cases} 579,1 \\ 577,0 \end{cases} \text{ nm}$</u>	
<u>$U_B \text{ in V}$</u>	<u>$I \text{ in nA}$</u>	<u>$U_B \text{ in V}$</u>	<u>$I \text{ in nA}$</u>
<u>$U_B \text{ in V}$</u>	<u>$I \text{ in nA}$</u>		
-0,4	7,0	0,20	9,4
-0,3	5,6	0,25	5,6
-0,2	4,1	0,30	3,0
-0,1	2,9	0,35	1,6
0,0	2,0	0,40	0,8
0,1	1,2	0,45	0,2
0,2	0,6	0,50	0,0
0,3	0,4		
0,4	0,2	<u>Violett, $\lambda = \begin{cases} 407,8 \\ 404,7 \end{cases} \text{ nm}$</u>	
0,5	0,1	<u>$U_B \text{ in V}$</u>	<u>$I \text{ in nA}$</u>
0,8	0,0	0,0	29,0
		0,1	24,0
		0,2	20,0
		0,3	16,0
		0,4	12,0
		0,5	8,8
		0,6	5,8
		0,7	3,5
		0,8	2,0
		0,9	1,0
		1,0	0,4
		1,1	0,05
		1,2	0,00

<u>grün, $\lambda = 546 \text{ nm}$</u>	
<u>$U_B \text{ in V}$</u>	<u>$I \text{ in nA}$</u>
0,1	8,6
0,2	4,7
0,3	1,9
0,4	0,6
0,5	0,2
0,6	0,0

violett 2, $\lambda = 407,8$
 $\lambda = 404,7 \text{ nm}$

U_B in V	I in A
0,0	11,0
0,1	10,0
0,2	9,6
0,3	7,8
0,4	6,4
0,5	5,0
0,6	3,6
0,7	2,6
0,8	1,7
0,9	1,0
1,0	0,6
1,1	0,25
1,2	0,10
1,3	0,00

gelb, vollständige Spalten

U_B in V	I in A
-19,0	10,9
-18,0	9,9
-17,0	9,8
-16,0	9,6
-15,0	9,6
-14,0	9,6
-13,0	9,5
-12,0	9,3
-11,0	9,1
-10,0	8,8
-9,0	8,6
-8,0	8,3
-7,0	8,0
-6,0	7,6
-5,0	7,0
-4,0	6,4
-3,0	5,5
-2,0	4,2
-1,0	2,8
0,0	4,4
0,1	2,4
0,2	0,8
0,3	0,2
0,4	0,0