

**Versuch Nr.500**

# **Der Photoeffekt**

Niklas Düser  
niklas.dueser@tu-dortmund.de

Benedikt Sander  
benedikt.sander@tu-dortmund.de

Durchführung: 13.04.2021

Abgabe: 20.04.2021

TU Dortmund – Fakultät Physik

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Zielsetzung</b>	<b>3</b>
<b>2 Theoretische Grundlagen</b>	<b>3</b>
2.1 Die Photozelle . . . . .	4
2.2 Die Geschwindigkeitsverteilung . . . . .	5
<b>3 Durchführung und Versuchsaufbau</b>	<b>7</b>
3.1 Versuchsaufbau . . . . .	7
3.1.1 Optischer Aufbau . . . . .	7
3.1.2 Elektrischer Aufbau . . . . .	7
3.2 Durchführung . . . . .	8
<b>4 Auswertung</b>	<b>9</b>
4.1 a) . . . . .	9
4.2 b) . . . . .	12
4.3 c) . . . . .	13
<b>5 Diskussion</b>	<b>14</b>
<b>6 Anhang</b>	<b>15</b>
6.1 Versuchsaufbauten . . . . .	15
6.2 Daten . . . . .	16
<b>Literatur</b>	<b>22</b>

## 1 Zielsetzung

In diesem Versuch soll der Photoeffekt untersucht werden. Dabei soll insbesondere die Energie der aus einer Metallplatte ausgelösten Elektronen in Abhängigkeit von der dazu genutzten Photonenenergie untersucht werden.

## 2 Theoretische Grundlagen

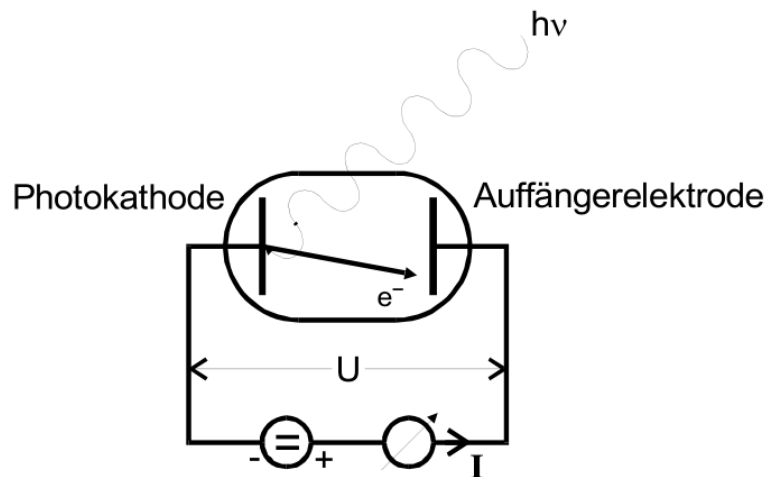
Die Natur des Lichts lässt sich nicht klar dem Korpuskel- oder dem Wellenmodell zuordnen. In der Quantenelektrodynamik allerdings sind diese beiden Fälle als Grenzfälle enthalten.

Im folgenden Versuch wird bei der Erklärung auf das Korpuskelmodell zurückgegriffen. Da sich dieser Versuch nicht mit Licht als Welle erklären lässt hat er einen wesentlichen Teil dazu beigetragen, dass der Wellen-Teilchen-Dualismus des Lichts akzeptiert wurde.

Bei diesem Versuch wird eine Metallplatte mit monochromatischem Licht bestrahlt. Dabei werden im besten Fall Elektronen aus der Platte gelöst. Um diese Elektronen messen zu können befindet sich gegenüber der einen eine weitere Platte, welche im Bezug zur ersten, ein positives Potential besitzt.

Auf Grund des Potentialunterschieds beschleunigen sich dann die Elektronen von der ersten Platte, genannt Photokathode, zu der anderen Platte, genannt Auffängerelektrode. Dort entsteht dann ein abfließender Strom, welcher mit einem Amperemeter gemessen werden kann.

Schematisch dargestellt findet sich dieser Aufbau in der folgenden Abbildung 6.



**Abbildung 1:** Der schematische Aufbau der zur Untersuchung des Photoeffekts dient[10].

Für diesen Versuch gilt, dass die Anzahl der herausgelösten Elektronen proportional zur Intensität des Lichts, die maximale kinetische Energie der Elektronen proportional zur Frequenz des Lichts und die Energie unabhängig von der Intensität ist.

Zusätzlich existiert noch eine Grenzfrequenz des Lichts unterhalb welcher kein Effekt messbar ist.

Dies sind alles Eigenschaften die sich nicht klassisch mit dem Wellenmodell erklären lassen. Wenn aber nun angenommen wird, dass sich die gesamte Energie in einem Teilchen mit praktisch verschwindender Ausdehnung konzentriert, lassen sich all diese Vorgänge erklären. Diese verschwindend kleinen Teilchen sind dann nach dem Korpuskelmodell die sogenannten Photonen.

Sie haben die Energie  $h \cdot \nu$  wobei  $h$  das Planck'sche Wirkungsquantum[7] ist.

Hier übertragen dann, beim Auftreffen auf die Platte, die Photonen ihre Energie auf die Elektronen. Wenn die Energie des Photons groß genug ist um die materialabhängige Austrittsarbeit  $A_K$  zu leisten verlässt das Elektron die Platte. Nun kann es mit der zuvor beschriebenen Methode detektiert werden.

Wenn das Photon mehr Energie besitzt als für das Herauslösen benötigt wird erhält das Elektronen die Energiedifferenz als kinetische Energie.

Es gilt also:

$$h \cdot \nu = E_{kin} + A_K$$

Außerdem folgt für die Grenzfrequenz, bei der  $E_{kin}$  verschwindet:

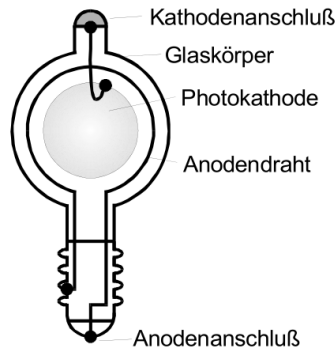
$$\nu = \frac{A_K}{h}$$

## 2.1 Die Photozelle

Der zuvor beschriebene Aufbau befindet sich in der Praxis in einem vakuumierten Glaskolben, welcher dann Photozelle genannt wird.

In der Photozelle wird die Photokathode allerdings so realisiert, dass auf der Innenseite des Kolbens eine Metallschicht aufgedampft wird. Die Anode ist dann ein dazu parallel verlaufender Draht, der sich in kleinem Abstand dazu befindet.

Dieser Aufbau ist in Abbildung 6 dargestellt.



**Abbildung 2:** Der schematische Aufbau einer Photozelle wie sie in der Praxis verwendet wird[10].

Anders als zuvor beschrieben wird hier an die Photzelle ein entgegengesetztes Feld angelegt. Dies ist die zur Untersuchung des Effektes genutzte, sogenannte Gegenfeldmethode. Die Elektronen werden weiterhin vom monochromatischen Licht herausgelöst müssen nun aber ein abbremsendes elektrisches Feld durchlaufen. Abhängig von der Anzahl der an der Anode gemessenen Elektronen und der angelegten Spannung lassen sich dann über die kinetische Energie Rückschlüsse über die Geschwindigkeitsverteilung der Elektronen schließen.

Es können nun nämlich nur noch Elektronen die Anode erreichen deren kinetische Energie größer ist als  $e_0 \cdot U$  mit  $e_0$  als Elementarladung[4].

Der Strom versiegt also bei

$$e_0 \cdot U = \frac{m_0 \cdot v_{max}}{2}$$

Wobei  $m_0$  die Ruhemasse des Elektrons [6] und  $v_{max}$  die Geschwindigkeit der schnellsten Elektronen ist.

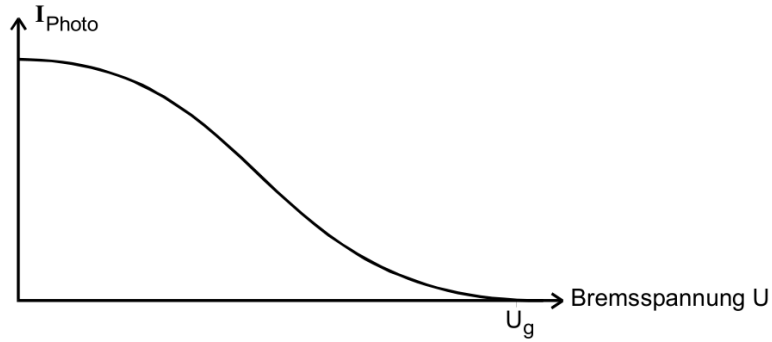
Daraus folgt wiederum für diese Elektronen:

$$h \cdot \nu = e_0 \cdot U + A_K \quad (1)$$

## 2.2 Die Geschwindigkeitsverteilung

Der in Gleichung 1 beschriebene Zusammenhang gilt aber nur für die schnellsten Elektronen. Dies sind die Elektronen, welche schon in der Kathode die meiste kinetische Energie besitzen. Dies führt dann für niedrigere Elektronen-Energien in der Kathode zu langsameren Photoelektronen.

Dies ist auch in der folgenden Grafik veranschaulicht, welche das mit steigender Bremsspannung kontinuierliche Abfallen der detektierten Photoelektronen zeigt.



**Abbildung 3:** Das Abfallen des Photostroms mit steigender Bremsspannung qualitativ veranschaulicht [10].

Die Energie der Elektronen in der Kathode lässt sich mit der Fermi-Dirac-Statistik beschreiben.

Da diese aber hier nur begrenzt Gültigkeit besitzt, da nicht davon ausgegangen werden kann dass alle Photoelektronen die flächenmässig kleine Anode erreichen. Deswegen lässt sich einfach die folgende, hier gültige, quadratische Abhängigkeit der des Photostroms von der Spannung nutzen:

$$I_{ph} \sim U^2 \quad (2)$$

Die Fermi-Niveaus  $\zeta$  von Metallen, die in der Fermi-Dirac-Statistik beschrieben sind aber trotzdem noch für diesen Versuch relevant.

Denn wenn zwei unterschiedliche Metalle aneinander angeschlossen werden gleichen sich ihre Fermi-Niveaus auf die gleiche Höhe an.

Dies kann dazu führen, dass wenn die Austrittsarbeit der Anode  $A_A$  größer ist als die Energie der Photonen ist, kein Photoeffekt auftritt. Dies gilt auch dann wenn die Energie größer ist als  $A_K$ . Um dann einen Photostrom zu messen muss ein beschleunigendes Potential  $U_b$  angelegt werden, so dass gilt:

$$h \cdot \nu + e_0 \cdot U_b \geq A_A$$

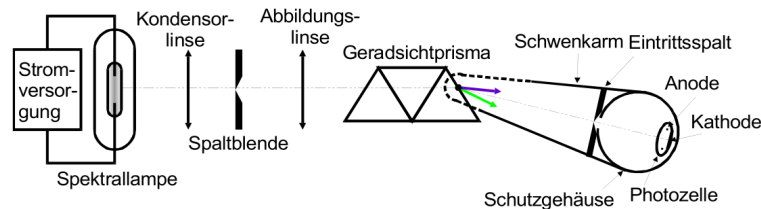
Auf Grund dieses Effekts lässt sich bei genügend großer Bremsspannung sogar ein entgegengesetzten Photostrom messen, welcher Messungen beeinträchtigen kann.

## 3 Durchführung und Versuchsaufbau

### 3.1 Versuchsaufbau

#### 3.1.1 Optischer Aufbau

Um zu gewährleisten, dass monochromatisches Licht genutzt wird, wird der in Abbildung 4 dargestellte Aufbau verwendet.



**Abbildung 4:** Der optische Aufbau, welcher das Licht einer Spektrallampe aufspaltet [10].

Die Spektrallampe erzeugt hierbei Licht, welches von der Kondensorlinse gebündelt und durch die Spaltblende läuft. Anschließend wird das Licht wieder von der Abbildungslinse auf den Geradsichtprisma gebündelt, welcher das Licht in seine einzelnen Wellenlängen aufspaltet. Der Schwenkarm kann nun genutzt werden um die gewünschte Frequenz des Lichts auf die Photozelle strahlen zu lassen.

Der reale Aufbau ist in Abbildung 12 zu finden. Die wichtigsten Emissionslinien und Farben einer Quecksilberlampe sind in der folgenden Tabelle zu finden.

$\lambda$ [nm]	Farbe	Intensität
577, 579	gelb	stark
546	grün	stark
492	blaugrün	gering
434, 435, 436	violett	stark
(408), 405	violett	(gering), stark
365, 366	ultraviolett	stark

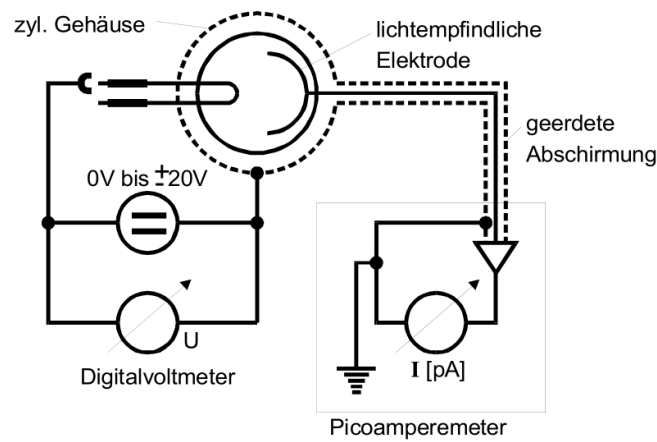
**Abbildung 5:** Die wichtigsten Linien einer Hg-Lampe[10].

#### 3.1.2 Elektrischer Aufbau

Um mit der Gegenfeldmethode den Fotoeffekt zu untersuchen wird sie an ein Digitalvoltmeter angeschlossen. Damit können dann unterschiedliche Potentiale angelegt. Zusätzlich wird an der Photozelle auch noch ein Picoamperemeter angeschlossen um die kleinen, von der Photozelle abfließenden Ströme messen zu können.

Da die Ströme so klein sind sollte das Kabel von der Zelle zum Amperemeter ein Koaxialkabel oder eine ander geerdete Abschirmung sein, so dass die Messung nicht durch

externe elektrische Felder beeinträchtigt werden kann.  
Zu sehen ist dieser Aufbau schematisch dargestellt in der folgenden Abbildung 6.



**Abbildung 6:** Eine Photozelle in einem Schaltkreis zur Untersuchung des Photoeffekts[10].

### 3.2 Durchführung

Zuallererst wird auf die Photozelle das monochromatische Licht der Frequenz 578nm gerichtet. Anschließend werden für diese Wellenlänge auf einem Spannungsintervall von  $-20\text{V}$  bis  $20\text{V}$  die Photoströme gemessen.

Zusätzlich werden für andere Spektrallinien die Abhängigkeit des Photostroms von der angelegten Gegenspannung gemessen.

Dabei soll bis zur Grenzspannung gemessen werden. Zusätzlich sollte beachtet werden, dass für niederenergetisches Licht, wie rot oder gelb, eventuell auch leichte beschleunigende Spannung angelegt werden müssen. Dies dient dazu um so viele Messwerte zu generieren, dass sie der Auswertung genügen.



## 4 Auswertung

### 4.1 a)

Bei den Messungen wurde der Photostrom gegen die Gegenspannung gemessen. Aufgrund der  $\sqrt{I} \propto U$  Relation wird  $\sqrt{I}$  gegen  $U$  aufgetragen.

Durch diese Werte lässt sich dann eine Ausgleichsgerade ziehen. Der Schnittpunkt dieser Gerade mit der x-Achse beschreibt dann die Grenzspannung  $U_g$  bei der gerade keine Elektronen mehr die Anode erreichen. Wenn die Ausgleichsgerade durch  $y = a \cdot x + b$  beschrieben wird, dann berechnet sich die Grenzspannung mittels:

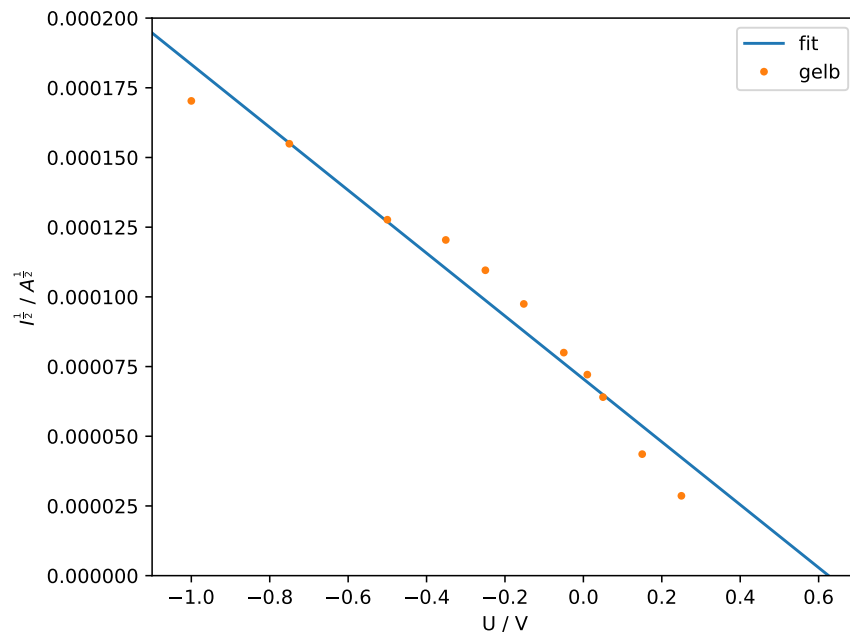
$$U_g = -\frac{a}{b}.$$

gelb:  $a = (-11,3 \pm 0,8) * 10^{-5} \text{A}^{\frac{1}{2}}/\text{V}$   
 $b = (1,06 \pm 0,34) * 10^{-5} \text{A}$   
 $\rightarrow U_g = (0,63 \pm 0,05) \text{V}$

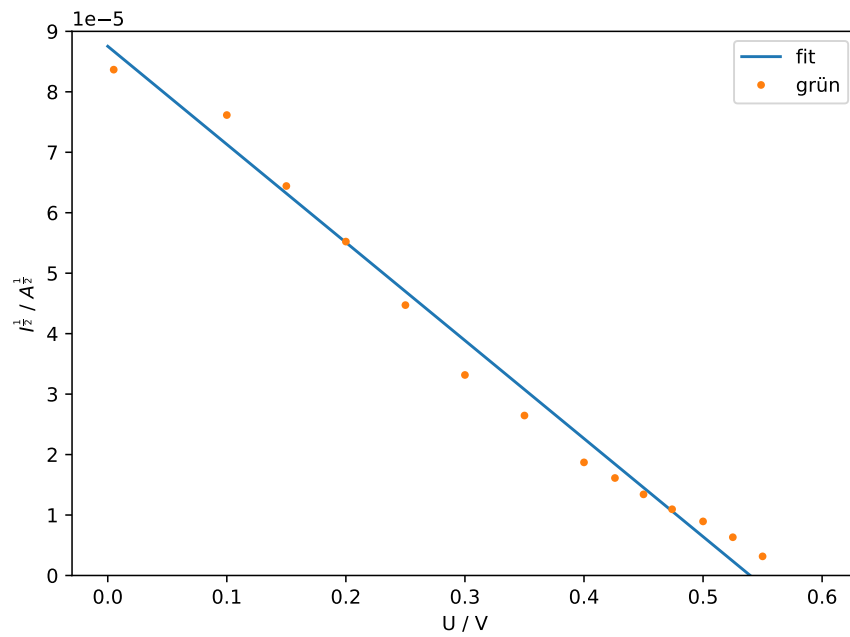
grün:  $a = (-16,2 \pm 0,5) * 10^{-5} \text{A}^{\frac{1}{2}}/\text{V}$   
 $b = (8,75 \pm 0,19) * 10^{-5} \text{A}$   
 $\rightarrow U_g = (0,540 \pm 0,021) \text{V}$

violett:  $a = (-11,63 \pm 0,2) * 10^{-5} \text{A}^{\frac{1}{2}}/\text{V}$   
 $b = (13,09 \pm 0,15) * 10^{-5} \text{A}$   
 $\rightarrow U_g = (1,126 \pm 0,023) \text{V}$

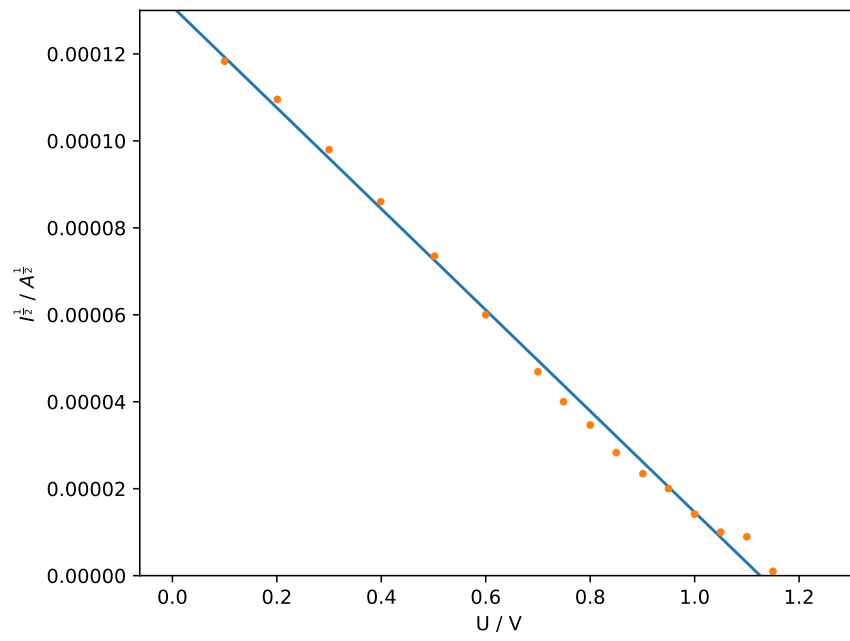
Werden die Daten 1,2,3 dann geplottet ergeben sich folgenede Plots:



**Abbildung 7:** Die Wurzel des Photostrom, gemessen für gelbes Licht, aufgetragen gegen die Spannung. Zusätzlich noch mit Ausgleichgerade.



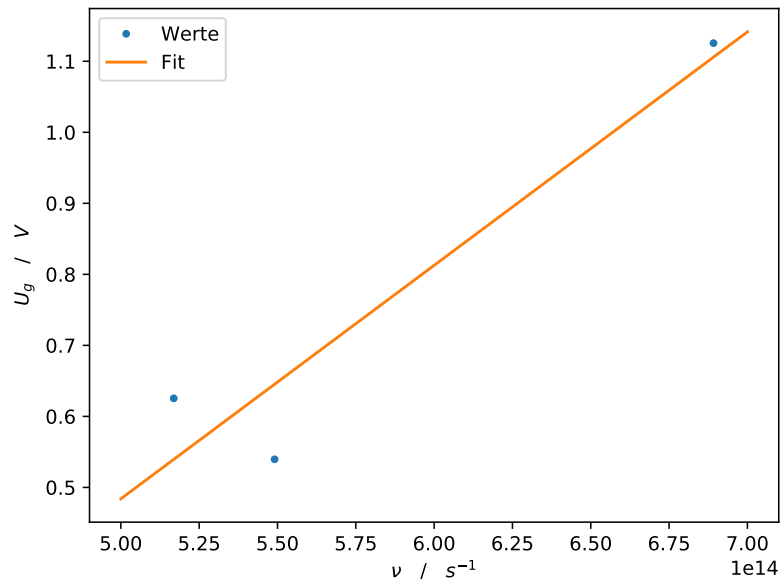
**Abbildung 8:** Die Wurzel des Photostrom, gemessen für grünes Licht, aufgetragen gegen die Spannung. Zusätzlich noch mit Ausgleichgerade.



**Abbildung 9:** Die Wurzel des Photostrom, gemessen für violettes Licht, aufgetragen gegen die Spannung. Zusätzlich noch mit Ausgleichgerade.

#### 4.2 b)

Werden die Daten der Grenzspannungen gegen ihre Frequenzen geplottet und eine Ausgleichsgerade angelegt, ergibt sich folgender Plot:

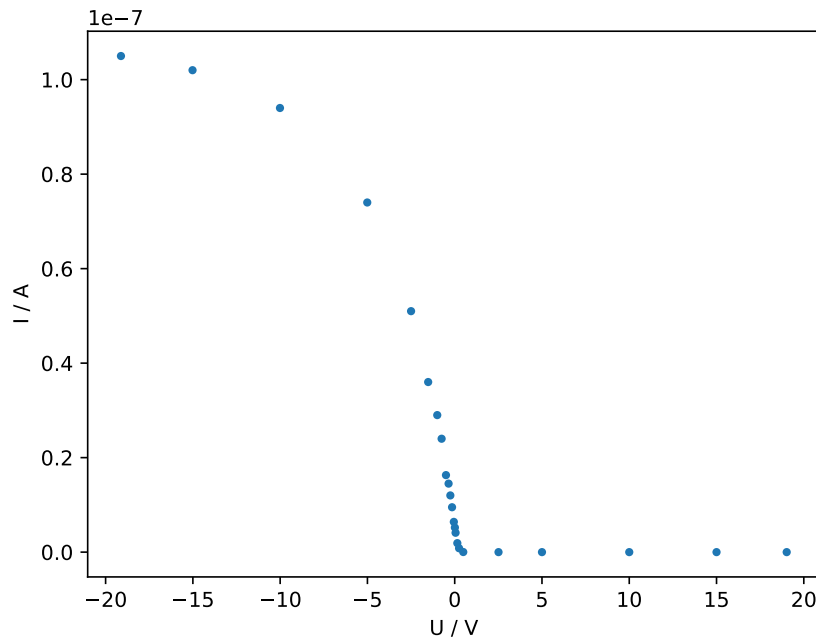


**Abbildung 10:** Die Grenzspannung gegen die Frequenz des jeweiligen Lichts aufgetragen

Die Ausgleichsgerade wird somit durch die Steigung  $a = (3,3 \pm 1,1) \cdot 10^{-15} \text{ V/A}$  und den y-Achsenabschnitt  $b = (-3,5 \pm 1,9) \cdot 10^8 \text{ V/C}$  beschrieben.

Nach Gleichung 1 berechnet sich das Verhältnis  $\frac{h}{e_0}$  somit zu  $(2,1 \pm 0,7) \cdot 10^4 \text{ eV}$  und die Austrittsarbeit zu  $(1,2 \pm 0,6) \text{ eV}$

### 4.3 c)



**Abbildung 11:** Die Messreihe für die gelbe Spektrallinie mit  $\lambda = 578\text{nm}$ .

Das Diagramm beschreibt wie sich bei hohen beschleunigenden Spannungen der Photostrom asymptotisch einem Grenzwert annähert, im mittleren Spannungsbereich annähernd linear abfällt und noch nicht vollständig bei der Grenzspannung  $U_g$  versiegt.

Der sich asymptotisch annähernde Photostrom ist dadurch zu erklären, dass nur begrenzt viele Elektronen bei konstanter Licht Intensität durch den Photoeffekt entstehen. Diese werden in alle möglichen Richtungen verstreut.

Um nun alle diese Elektronen einzufangen, auch die die sich von der Anode weg bewegen, wird ein sehr starkes Feld benötigt.

Es werden bei hohen Spannungen auch nur noch vereinzelt weitere Elektronen auf die Anode geleitet. Dies führt zu der asymptotischen Annäherung an den Grenzwert.

Somit wird der Grenzwert durch die Intensität des Lichts bestimmt. Um den Grenzwert bereits bei endlichen Spannungen zu erreichen müsste die Anode eine größere Fläche besitzen und die Kathode am besten kugelförmig umschließen.

Der Effekt, dass bei Erreichen der Grenzspannung kein Photostrom mehr zu sehen ist, liegt nicht vor, da die Elektronen in der Kathode bereits eine durch die Fermi-Dirac-Statistik beschriebene Energie aufweisen. Die Elektronen mit zusätzlicher Energie in Richtung der Anode können somit das Gegenfeld noch überwinden und einen Photostrom erzeugen. Da die Kathode und Anode elektrisch verbunden sind, gleichen sich ihre Fermi-Niveaus aus, das bedeutet, dass sich auch die Austrittsarbeit der Elektronen ausgleichen. Da bei 20

Grad Celsius bereits Material an der Kathode verdampft, werden somit auch Elektronen an der Anode frei und durch die Gegenspannung zur Kathode beschleunigt. Diese haben im Gegensatz zu den beim Photoeffekt frei werdenden Elektronen nur geringe kinetische Energien und erreichen bereits bei kleinen Gegenspannungen vollständig die Kathode.

## 5 Diskussion

In diesem Versuch lässt sich nur der Faktor  $\frac{h}{e_0}$  mit Theoriewerten vergleichen. Der berechnete Wert  $20\,525 \pm 6630$  weicht von dem Theoriewert  $25812,81$  um  $21 \pm 2 \%$  ab. Mit dieser Abweichung war zu rechnen da nur 3 Messungen der Grenzspannung gemacht worden sind und diese bereits sehr ungenau erschienen. Die Ausgleichsgerade beschreibt die Punkte auch nicht wirklich gut. Dies lässt sich aus der Ungenauigkeit von fast 30% in der Steigung der Geraden herauslesen.

Die Ungenauigkeit der Messung entstand wahrscheinlich dadurch, dass beim Vermessen kleine Änderungen an dem Versuchsaufbau gemacht wurden und somit auch die Relationen der Messreihen verunreinigt wurden.

Diese Änderungen wurden vorgenommen, da vorher keine vernünftigen Messungen möglich waren.

Der Wert der Austrittsarbeit von  $(1,2 \pm 0,6)$  eV hat aus den gleichen Gründen wie  $\frac{h}{e_0}$  einen sehr großen Fehler ist jedoch in der richtigen Größenordnung.

## 6 Anhang

### 6.1 Versuchsaufbauten

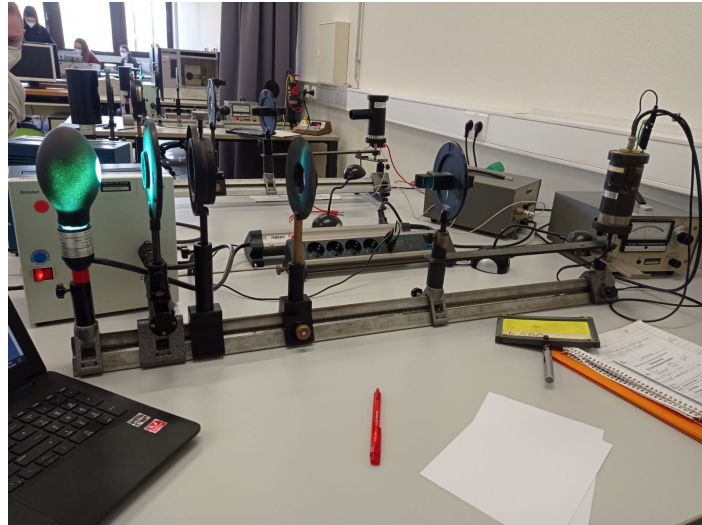


Abbildung 12: Ein Foto des Aufbaus um den Photoeffekt zu untersuchen.

## 6.2 Daten

Versuch 500

Farbe: gelb ( $\lambda \approx 580 \cdot 10^{-9} \text{ m}$ )

positive Spannung entspricht Gegenfeld

Spannung in Volt	Strom in $10^{-9} \text{ A}$
14,08	-0,28
15,00	-0,235
10	-0,215
7,5	-0,21
4,49	-0,21
2,50	-0,20
14,11	0
15,02	0
10,01	0
7,5	0
4,49	0
2,49	0
1,01	0
0,5	0
14,02	0
15	0
10	0
5	0
2,51	0
0,49	0,02
0,25	0,82
0,15	1,9

Falsch gewesen

wieder falsch

Abbildung 13: Ein Foto der Messdaten.



0,05	4,1
0,01	5,2
-0,05	6,4
-0,152	9,5
-0,25	12
-0,351	14,5
-0,5	18,3
-0,75	24
-1,0	29
-1,52	36
-2,5	51
-5,01	79
-10,01	94
-15,02	102
-20,12	105

FL

Abbildung 14: Ein Foto der Messdaten.

Farbe: Grün ( $\lambda = 546 \text{ nm}$ )

<u>Spannung in Volt</u>	<u>Strom in <math>10^{-9} \text{ A}</math></u>
0,58	0
0,55	0,01
0,525	0,04
0,5	0,08
0,474	0,12
0,45	0,18
0,426	0,26
0,400	0,35
0,35	0,7
0,3	1,1
0,25	2
0,2	3,05
0,15	4,15
0,1	5,8
0,05	7
0,001	8,5

Abbildung 15: Ein Foto der Messdaten.

Farbe: Violett (435 nm  $\approx$  1)

Spannung in Volt	Strom in 10 <sup>8</sup> A
1,15	0
1,1	0,008
1,05	0,01
1	0,02
0,95	0,04
0,907	0,055
0,85	0,08
0,800	0,12
0,7549	0,16
0,700	0,22
0,600	0,36
0,502	0,54
0,399	0,74
0,300	0,86
0,201	1,2
0,100	1,4
0,002	1,74
1,15	0,001

Abbildung 16: Ein Foto der Messdaten.

$U / \text{V}$	$I / \text{A}$
19,02	0,00
15,00	0,00
10,00	0,00
5,00	0,00
2,51	0,00
0,49	0,02
0,25	0,82
0,15	1,90
0,05	4,10
0,01	5,20
-0,05	6,40
-0,15	9,50
-0,25	12,00
-0,35	14,50
-0,50	16,30
-0,75	24,00
-1,00	29,00
-1,52	36,00
-2,50	51,00
-5,01	74,00
-10,01	94,00
-15,02	102,00
-19,12	105,00

**Tabelle 1:** Die Messwerte der Messreihe vom gelben Licht.

$U / \text{V}$	$I / \text{A}$
0,55	0,01
0,53	0,04
0,50	0,08
0,47	0,12
0,45	0,18
0,43	0,26
0,40	0,35
0,35	0,70
0,30	1,10
0,25	2,00
0,20	3,05
0,15	4,15
0,10	5,80
0,01	7,00
0,00	8,50

**Tabelle 2:** Die Messwerte der Messreihe vom grünen Licht

$U / \text{V}$	$I / \text{A}$
1,15	0,001
1,10	0,080
1,05	0,100
1,00	0,200
0,95	0,400
0,90	0,550
0,85	0,800
0,80	1,200
0,75	1,600
0,70	2,200
0,60	3,600
0,50	5,400
0,40	7,400
0,30	9,600
0,20	12,00
0,10	14,00
0,00	17,40

**Tabelle 3:** Die Messwerte der Messreihe vom grünen Licht

## Literatur

- [1] 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/>.
- [2] 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/>.
- [3] Eric O. Lebigot. *Uncertainties: a Python package for calculations with uncertainties*. Version 2.4.6.1. URL: <http://pythonhosted.org/uncertainties/>.
- [4] *Literaturwert für die Elementarladung*. 2020. URL: <https://www.chemie.de/lexikon/Elementarladung.html> (besucht am 05.12.2020).
- [5] *Literaturwert für die Lichtgeschwindigkeit c*. 2020. URL: <https://www.spektrum.de/lexikon/physik/lichtgeschwindigkeit/9012> (besucht am 05.12.2020).
- [6] *Literaturwert für die Ruhemasse eines Elektrons*. 2020. URL: <https://www.chemie.de/lexikon/Elektron.html> (besucht am 05.12.2020).
- [7] *Literaturwerte für das plancksche Wirkungsquantum*. 2020. URL: [https://www.chemie.de/lexikon/Plancksches\\_Wirkungsquantum.html](https://www.chemie.de/lexikon/Plancksches_Wirkungsquantum.html) (besucht am 05.12.2020).
- [8] *Literaturwerte für die Boltzmann-Konstante*. 2020. URL: <https://www.chemie-schule.de/KnowHow/Boltzmannkonstante> (besucht am 24.11.2020).
- [9] 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/>.
- [10] *Versuchsanleitung zu Versuch 500: Der Photoeffekt*. Fakultät Physik, TU Dortmund. 2021.