

V500

## Der Photoeffekt

Kalina Toben

kalina.toben@tu-dortmund.de

Daniel Wall

daniel.wall@tu-dortmund.de

Durchführung: 18.06.2019

Abgabe: 25.06.2019

TU Dortmund – Fakultät Physik

## **Inhaltsverzeichnis**

<b>1 Zielsetzung</b>	<b>3</b>
<b>2 Theorie</b>	<b>3</b>
<b>3 Durchführung</b>	<b>4</b>
<b>4 Auswertung</b>	<b>6</b>
<b>5 Diskussion</b>	<b>15</b>
<b>6 Anhang</b>	<b>15</b>
<b>Literatur</b>	<b>18</b>

## 1 Zielsetzung

In diesem Versuch wird der Photoeffekt untersucht, und die Energie der ausgelösten Elektronen durch die Gegenfeldmethode bestimmt.

## 2 Theorie

Der Photoeffekt beschreibt den Austritt von Elektronen aus einem Material, wenn es mit Licht bestrahlt wird. Um ihn zu erklären, muss das Korpuskelmodell von Licht verwendet werden, und nicht das Wellenmodell, welches gute Anwendung findet, sobald über eine große Anzahl von Photonen gemittelt wird. Da hier eine Wechselwirkung zwischen Licht mit Materie stattfindet, dient das Korpuskelmodell als bessere Näherung. Eine Oberfläche wird im Vakuum mit monochromatischem Licht bestrahlt. Die Photonen übertragen ihre gesamte Energie auf die Elektronen gemäß

$$h\nu = E_{kin} + A_k. \quad (1)$$

Die Photonen besitzen die Frequenz  $\nu$  und deren Energie setzt sich aus dieser und dem Planckschen Wirkungsquantum  $h$  zusammen. Die Energie teilt sich in die Austrittsarbeit  $A_k$  aus der Kathode und die kinetische Energie der Elektronen auf. Damit der Photoeffekt auftritt, muss die Austrittsarbeit also kleiner sein als die Energie der Photonen, wobei somit eine Grenzfrequenz existieren muss. An der Gleichung ist außerdem zu erkennen, dass die kinetische Energie proportional zu der Frequenz ist. Außerdem ist die Zahl der ausgelösten Elektronen pro Zeit- und Raumeinheit proportional zur Lichtintensität, da ein Photon höchstens mit einem Elektron wechselwirken kann.

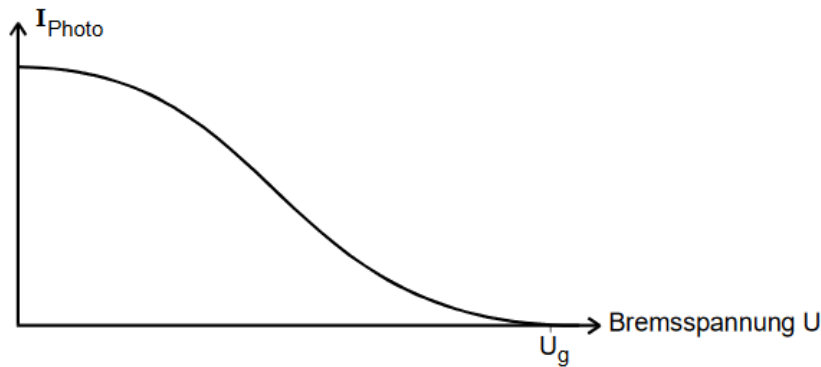
Um die Energie der ausgelösten Elektronen zu bestimmen, wird die Gegenfeldmethode angewandt. Eine Spannung erzeugt ein abbremssendes Feld für die Elektronen. Es erreichen also nur die Elektronen die Anode, deren Energie größer ist als  $e_0U$ . Gilt

$$e_0U_g = \frac{1}{2}m_0v_{max}^2 \quad (2)$$

so verschwindet theoretisch der Strom. Die Geschwindigkeit  $v_{max}$  ist die der schnellsten Elektronen. Für die Energie der schnellsten Elektronen gilt dann

$$h\nu = e_0U_g + A_k. \quad (3)$$

Allerdings sinkt der Strom bei der Grenzspannung  $U_g$  nicht direkt auf Null, sondern schon vorher. Dies ist in Abbildung (1) zu erkennen.



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

Erklären lässt es sich dadurch, dass die Elektronen im Festkörper laut der Fermi-Dirac-Statistik eine Energieverteilung von 0 bis zur Fermi-Energie  $\zeta$  besitzen. Somit sind die Elektronen nicht monoenergetisch, sondern können Energien bis höchstens  $h\nu - A_k$  besitzen. Unter bestimmten Voraussetzungen, beziehungsweise als Näherung für Abbildung (1) in der Nähe von dem Wert  $U_g$ , besteht der Zusammenhang

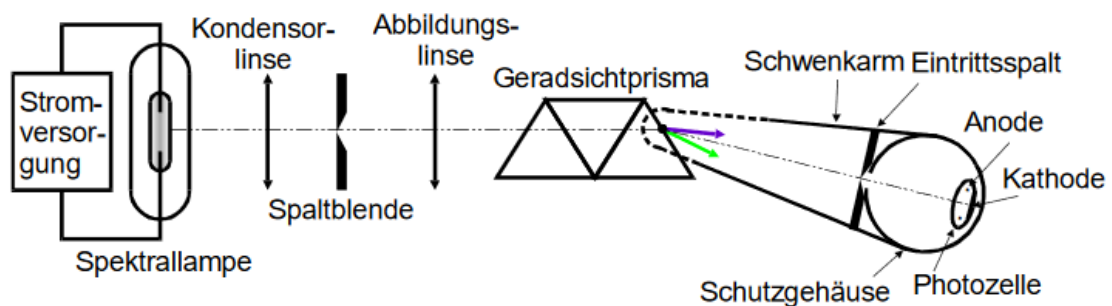
$$I_{Ph} \propto U^2$$

zwischen Photostrom und Bremsspannung. Desweiteren können Elektronen die Anode nicht erreichen, wenn die Austrittsarbeit  $A_A$  des Anodenmaterials zu hoch ist. Dies liegt daran, dass die Elektronen dann gegen ein Gegenfeld anlaufen müssen, um zur Anode zu gelangen. Wird dann ein beschleunigendes Potential  $U_b$  angelegt, können die Elektronen die Anode wieder erreichen und es fließt ein Photostrom, denn dann gilt

$$h\nu + e_0 U_b \geq A_k. \quad (4)$$

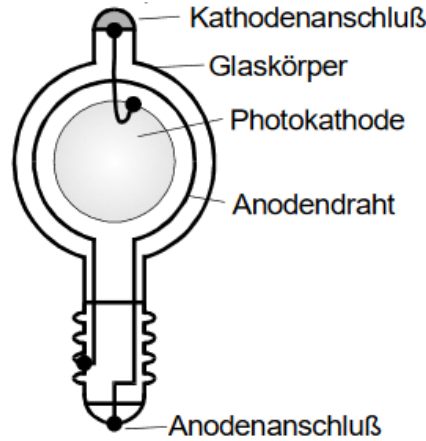
### 3 Durchführung

Der Versuchsaufbau ist in Abbildung (2) zu sehen.



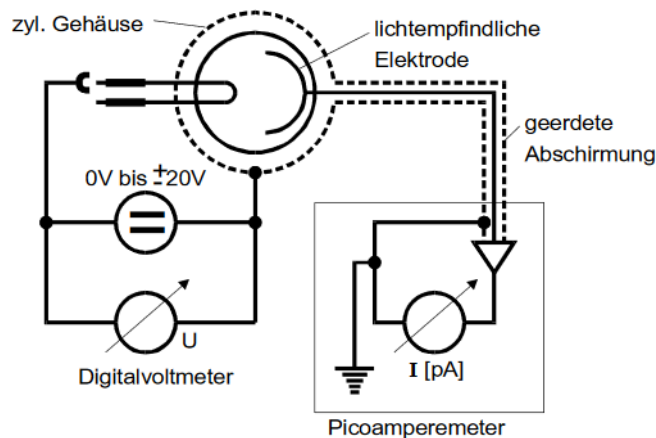
**Abbildung 2:** Versuchsaufbau zur Analyse des Photoeffekts. [1]

Das Licht einer Spektrallampe wird durch eine Kondensatorlinse gebündelt, durch eine Spaltblende und eine Linse geschickt, und fällt in ein Prisma, um die Spektrallinien des Lichts zu trennen. Die Photozelle(s. Abbildung (3)), aus der die Elektronen emittiert werden, besteht aus einem Glaskolben mit einer Photokathode und einem Anodendraht.



**Abbildung 3:** Darstellung einer Photozelle. [1]

An die Photozelle wird eine Spannung angelegt, durch die die Elektronen abgebremst werden, und welche mit einem Digitalvoltmeter eingestellt werden kann. Um den Strom zwischen Kathode und Anode zu messen wird ein Picoamperemeter angeschlossen(s. Abbildung (4)).



**Abbildung 4:** Schaltung zur Gegenfeldmethode. [1]

Die Elemente der Apparatur müssen richtig einjustiert werden, sodass die Linien der Farben deutlich erkennbar sind. Dann wird die Apparatur so ausgerichtet, dass erst gelbes, dann grünes, blaugrünes, und ein starkes und ein schwaches violett auf die Photozelle fallen. Dann wird die Spannung bis hin zum Wert, bei dem die Strömstärke Null ist, in

sinnvollen Schritten eingeregelt und die zugehörige Stromstärke gemessen. Dies wird für alle aufgelisteten Farben wiederholt. Zuletzt wird der Photostrom erneut für gelbes Licht gemessen; diesmal im Bereich von -20V - 20V. Somit muss das Voltmeter einmal umgepolt werden, damit nicht nur eine Gegenspannung, sondern auch eine Beschleunigungsspannung eingestellt werden kann.

## 4 Auswertung

Für die Auswertung der Messwerte wird im Folgenden der Mittelwert immer als

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (5)$$

berechnet und die Standardabweichung mit

$$\Delta\bar{x} = \frac{\sigma}{\sqrt{N}} = \sqrt{\frac{1}{N(N-1)} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}. \quad (6)$$

Für die Bestimmung der Grenzspannungen werden die Messwerte aus den Tabellen 1, 2, 3, 4 und 5 in den Abbildungen 5, 6, 7, 8 und 9 aufgetragen. Weiterhin wird eine lineare Regression der Form

$$\sqrt{I} = a \cdot U + b \quad (7)$$

vorgenommen. Die Grenzspannung  $U_G$  ist die Nullstelle dieser Geraden und berechnet sich nach

$$U_G = -\frac{b}{a}. \quad (8)$$

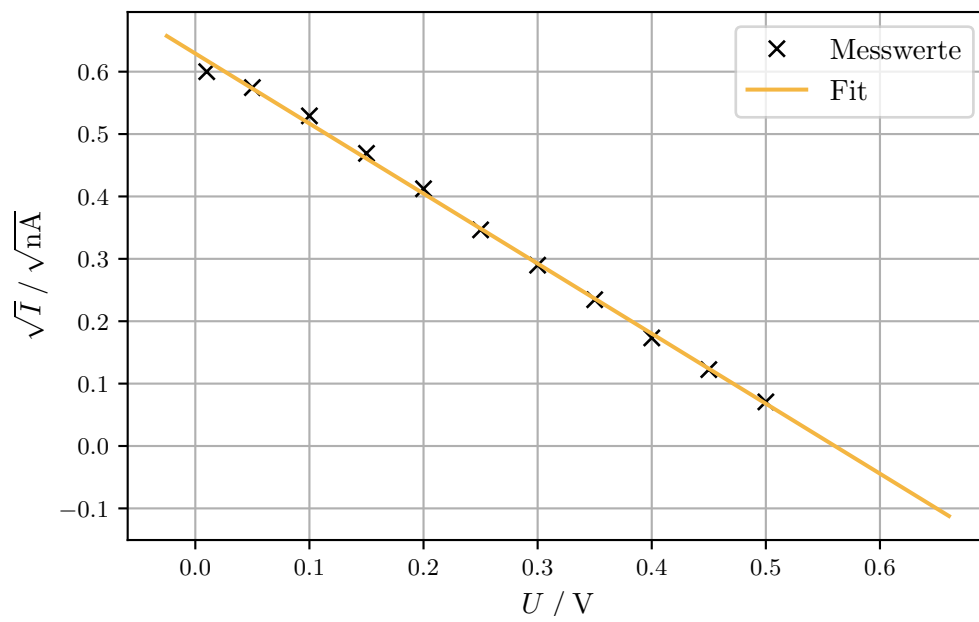
Der Fehler errechnet sich dabei mittels Gaußscher Fehlerfortpflanzung

$$\Delta U_G = \sqrt{\frac{(\Delta b)^2}{a^2} + \frac{b^2(\Delta a)^2}{a^4}}. \quad (9)$$

Die zu den einzelnen Wellenlängen gehörigen Regressionskoeffizienten sowie die Grenzspannungen werden in Tabelle 6 abgebildet.

**Tabelle 1:** Messwerte von  $U$  und  $I$  bei gelbem Licht mit Wellenlänge  $\lambda = 578,05 \text{ nm}$ .

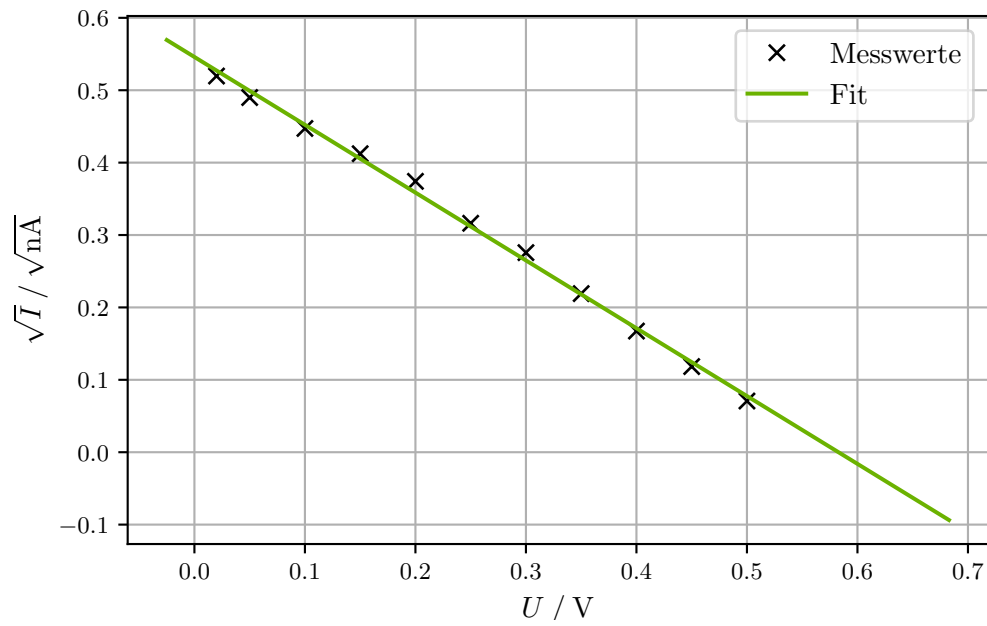
$U / \text{V}$	$I / \text{nA}$
0,01	0,360
0,05	0,330
0,10	0,280
0,15	0,220
0,20	0,170
0,25	0,120
0,30	0,084
0,35	0,055
0,40	0,030
0,45	0,015
0,50	0,005



**Abbildung 5:** Messwerte der gelben Spektrallinie mit  $\lambda = 578,05 \text{ nm}$  sowie die dazugehörige Regressionsgerade.

**Tabelle 2:** Messwerte von  $U$  und  $I$  bei grünem Licht mit Wellenlänge  $\lambda = 546 \text{ nm}$ .

$U / \text{V}$	$I / \text{nA}$
0,50	0,005
0,45	0,014
0,40	0,028
0,35	0,048
0,30	0,076
0,25	0,100
0,20	0,140
0,15	0,170
0,10	0,200
0,05	0,240
0,02	0,270

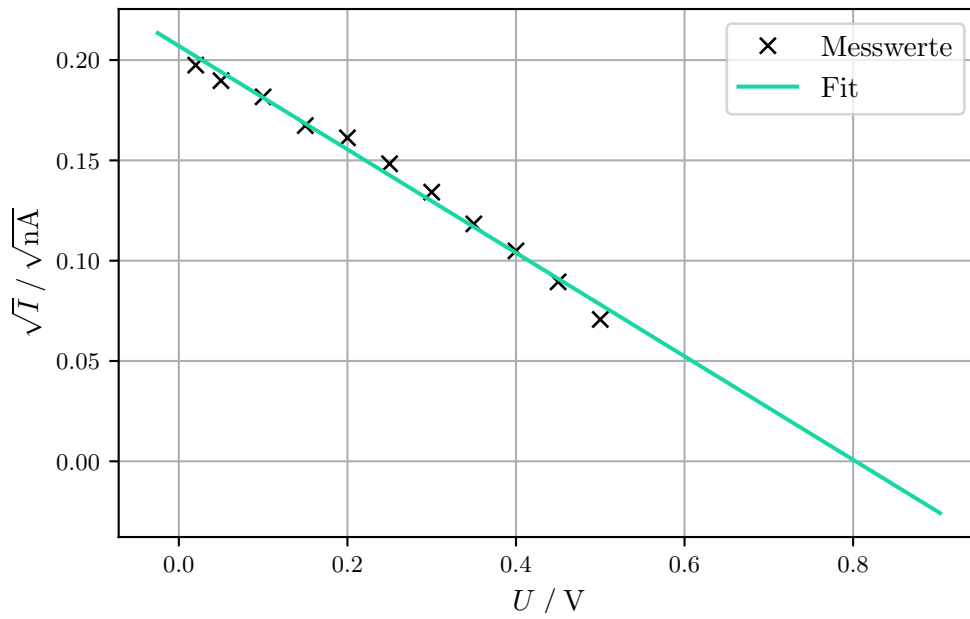


**Abbildung 6:** Messwerte der grünen Spektrallinie mit  $\lambda = 546 \text{ nm}$  sowie die dazugehörige Regressionsgerade.



**Tabelle 3:** Messwerte von  $U$  und  $I$  bei blaugrünem Licht mit Wellenlänge  $\lambda = 491,6 \text{ nm}$ .

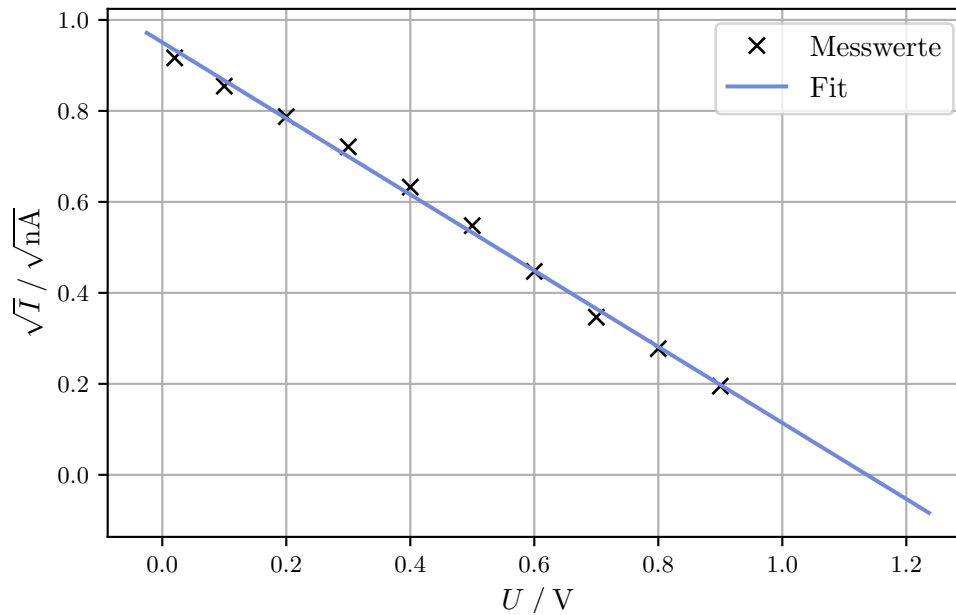
$U / \text{V}$	$I / \text{nA}$
0,50	0,005
0,45	0,008
0,40	0,011
0,35	0,014
0,30	0,018
0,25	0,022
0,20	0,026
0,15	0,028
0,10	0,033
0,05	0,036
0,02	0,039



**Abbildung 7:** Messwerte der blaugrünen Spektrallinie mit  $\lambda = 491,6 \text{ nm}$  sowie die dazugehörige Regressionsgerade.

**Tabelle 4:** Messwerte von  $U$  und  $I$  bei violettem Licht mit Wellenlänge  $\lambda = 435,25 \text{ nm}$ .

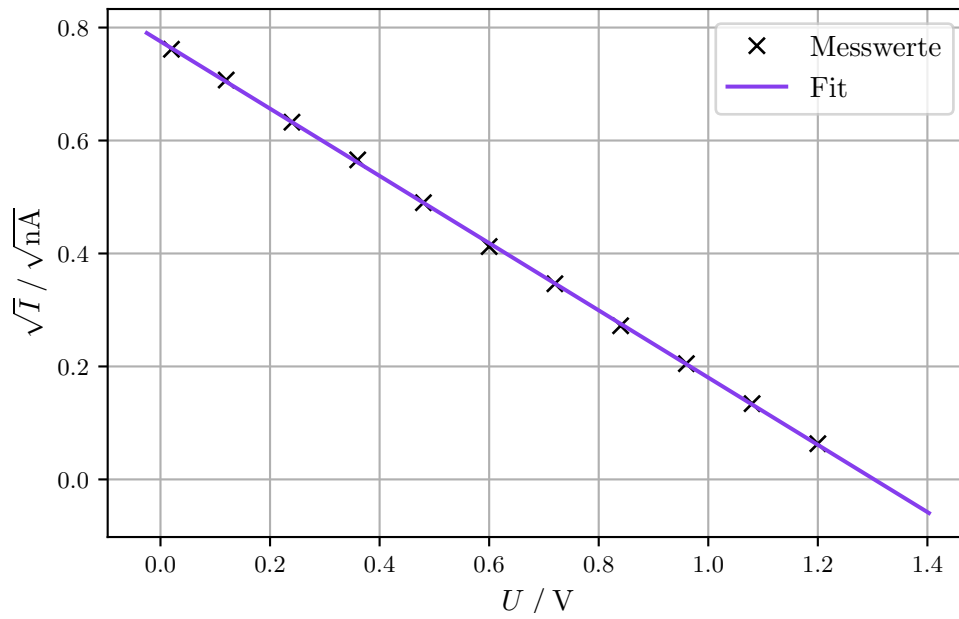
$U / \text{V}$	$I / \text{nA}$
0,90	0,038
0,80	0,077
0,70	0,120
0,60	0,200
0,50	0,300
0,40	0,400
0,30	0,520
0,20	0,620
0,10	0,730
0,02	0,840



**Abbildung 8:** Messwerte der ersten violetten Spektrallinie mit  $\lambda = 435,25 \text{ nm}$  sowie die dazugehörige Regressionsgerade.

**Tabelle 5:** Messwerte von  $U$  und  $I$  bei violettem Licht mit Wellenlänge  $\lambda = 406,25$  nm.

$U / \text{V}$	$I / \text{nA}$
0,02	0,580
0,12	0,500
0,24	0,400
0,36	0,320
0,48	0,240
0,60	0,170
0,72	0,120
0,84	0,074
0,96	0,042
1,08	0,018
1,20	0,004



**Abbildung 9:** Messwerte der zweiten violetten Spektrallinie mit  $\lambda = 406,25$  nm sowie die dazugehörige Regressionsgerade.

**Tabelle 6:** Den Spektrallinien zugehörigen Regressionskoeffizienten und damit berechneten Grenzspannungen aus den Abbildungen 5, 6, 7, 8 und 9.

Farbe	$\lambda / \text{nm}$	$a / \sqrt{A/V}$	$b / \sqrt{A}$	$U_G / \text{V}$
gelb	578,05	$-1,122 \pm 0,017$	$0,629 \pm 0,005$	$0,560 \pm 0,009$
grün	546,00	$-0,937 \pm 0,017$	$0,546 \pm 0,005$	$0,583 \pm 0,012$
blaugrün	491,60	$-0,258 \pm 0,009$	$0,207 \pm 0,003$	$0,803 \pm 0,029$
violett	435,25	$-0,836 \pm 0,017$	$0,951 \pm 0,009$	$1,137 \pm 0,025$
violett	406,25	$-0,595 \pm 0,003$	$0,775 \pm 0,002$	$1,303 \pm 0,006$

Die berechneten Grenzspannungen aus Tabelle 6 sind in Abhängigkeit der Frequenz  $\nu$  des zugehörigen Lichts in Abbildung 10 dargestellt. Die Frequenz ergibt sich zu

$$\nu = \frac{c}{\lambda}, \quad (10)$$

wobei  $c = 299\,792\,458 \text{ m/s}$  die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum [4] ist. Weiterhin wird eine lineare Regression der Form

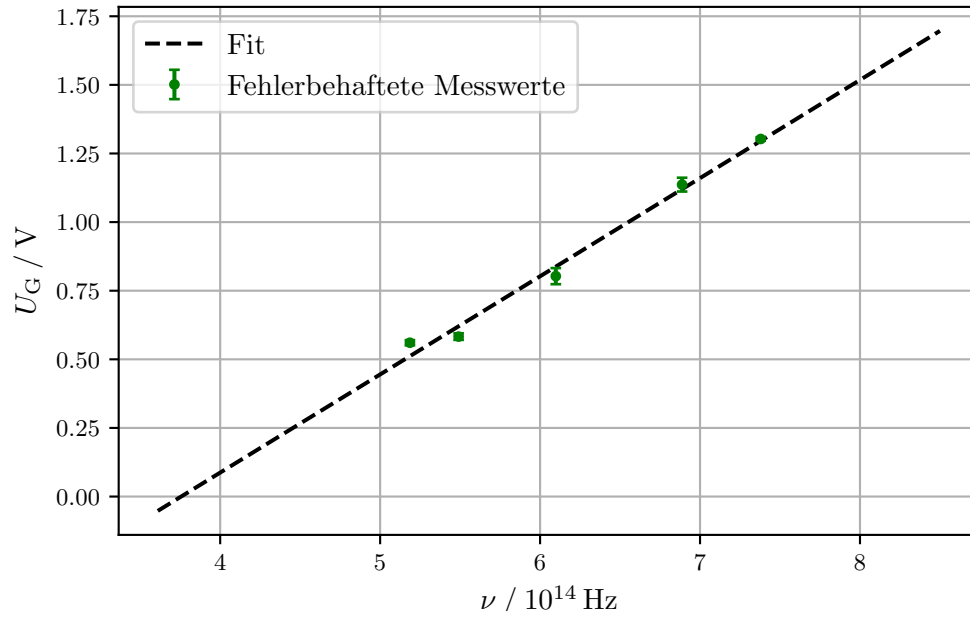
$$U_G = \alpha \cdot \nu + \beta \quad (11)$$

vorgenommen, aus welcher sich durch Vergleich mit Gleichung (3) die Koeffizienten zu

$$\alpha = \frac{h}{e_0} = (3,58 \pm 0,23) \cdot 10^{-15} \text{ V s},$$

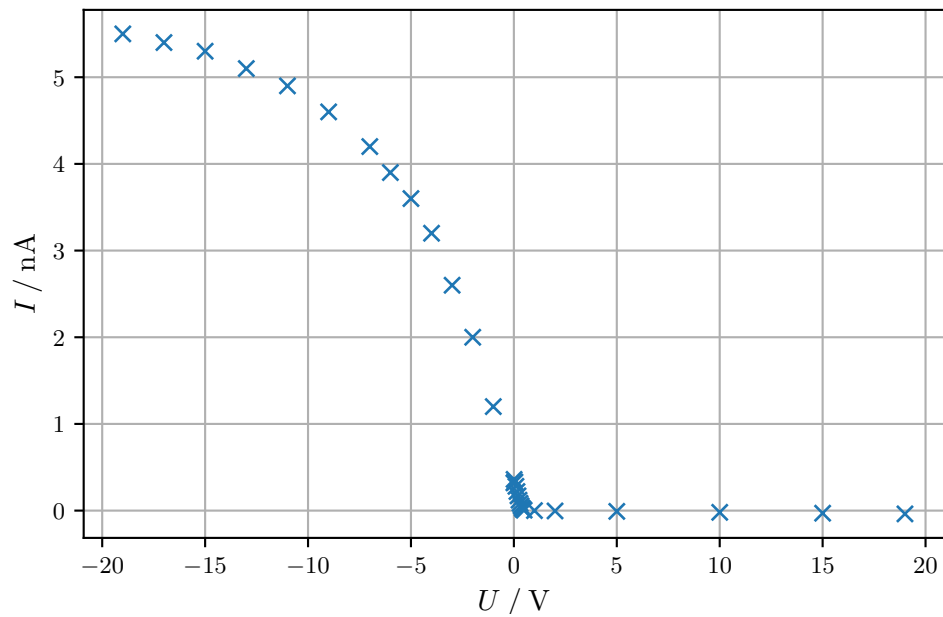
$$\beta = -\frac{A_k}{e_0} = (-1,34 \pm 0,14) \text{ V}$$

ergeben.



**Abbildung 10:** Die berechneten Grenzspannungen gegen die Frequenzen der Spektrallinien sowie die Regressionsgerade.

Zuletzt wird das Verhalten des Photostroms der gelben Spektrallinie in einem größeren Intervall der Brems- bzw. Beschleunigungsspannung (-20 bis 20 V) untersucht. Die zugehörigen Messwerte befinden sich in Tabelle 7 und sind in Abbildung 11 dargestellt.



**Abbildung 11:** Der Photostrom beim Anlegen einer Brems- bzw. Beschleunigungsspannung bei gelbem Licht ( $\lambda = 578,05 \text{ nm}$ ).

**Tabelle 7:** Messwerte des Photostroms bei gelbem Licht ( $\lambda = 578,05 \text{ nm}$ ) unter Anlegen einer Beschleunigungsspannung sowie einer Bremsspannung.

$U / \text{V}$	$I / \text{nA}$	$U / \text{V}$	$I / \text{nA}$
-19	5,5	0,10	0,280
-17	5,4	0,15	0,220
-15	5,3	0,20	0,170
-13	5,1	0,25	0,120
-11	4,9	0,30	0,084
-9	4,6	0,35	0,055
-7	4,2	0,40	0,030
-6	3,9	0,45	0,015
-5	3,6	0,50	0,005
-4	3,2	1	0,0
-3	2,6	2	-0,004
-2	2,0	5	-0,009
-1	1,2	10	-0,02
0	0,32	15	-0,03
0,01	0,360	19	-0,038
0,05	0,330		

## 5 Diskussion

Zunächst wird das experimentell bestimmte Verhältnis

$$\left(\frac{h}{e_0}\right)_{\text{exp}} = (3,58 \pm 0,23) \cdot 10^{-15} \text{ V s}$$

mit dem Literaturwert

$$\left(\frac{h}{e_0}\right)_{\text{Literatur}} = 4,14 \cdot 10^{-15} \text{ V s},$$

mit  $h = 6,626\,070\,040 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$  [3] und  $e_0 = 1,602\,176\,620\,8 \cdot 10^{-19} \text{ C}$  [2] verglichen. Hierbei ergibt sich eine relative Abweichung von 13,53%, welche verhältnismäßig klein ist. Diese lässt sich durch den empfindlichen Versuchsaufbau sowie einen zwischenzeitlich vorhandenen Wackelkontakt der Photozelle und andere Lichtquellen erklären.

Bei Betrachtung der Abbildung 11 fallen einige Besonderheiten auf. Die Kurve erreicht entsprechend der Theorie bei hoher Beschleunigungsspannung einen Sättigungswert, da alle ausgelösten Elektronen die Anode erreichen. Allerdings wird dieser Wert nur asymptotisch erreicht, da die Elektronen einer gewissen Streuung unterliegen können und deshalb nicht alle die Anode erreichen. Hierbei ist die Anzahl der ausgelösten Elektronen nicht mehr von der Beschleunigungsspannung, sondern ausschließlich von der Lichtintensität abhängig. Es ist weiter zu erkennen, dass der Photostrom bereits vor Erreichen der Grenzspannung  $U_G$  beginnt zu sinken, was sich durch die Fermi-Dirac-Verteilung erklären lässt. Nach dieser besitzen die Elektronen schon vor der Bestrahlung mit Licht unterschiedliche potentielle Energien im Atom, sodass viele schon vor der Grenzspannung nicht mehr die Anode erreichen können. Zusätzlich kann, da das Kathodenmaterial bei einer Temperatur von  $20^\circ\text{C}$  verdampft [1], ein entgegengesetzter Strom auftreten, der die thermische Elektronenemission begünstigt, die dem Photostrom entgegenwirkt, zu erkennen in Abbildung 11 sowie den Messwerten in Tabelle 7. Die Tatsache, dass bereits bei der Einstrahlung energiearmen Lichtes ein negativer Strom auftritt [1], deutet auf eine geringe Austrittsarbeit der Anode  $A_A$  hin.

## 6 Anhang

Im folgenden sind die Kopien der Messwerte aufgelistet.

V5000 U/V I/A

gelb: 0,01 0,36 0,3 0,018 ~~0,1,2~~ 0,004

0,05 0,33 0,25 0,022

0,1 0,28 0,2 0,026

0,15 0,22 0,15 0,028

0,2 0,17 0,1 0,033

0,25 0,12 0,05 0,036

0,3 0,084 0,02 0,039

0,35 0,055 0,9 0,038 vidett

0,4 0,03 0,8 0,077

0,45 0,015 0,7 0,12

0,5 0,005 0,6 0,2

0,5 0,3

grün 0,02 0,27

0,5 0,005 0,4 0,44

0,45 0,014 0,3 0,52

0,4 0,028 0,2 0,62

0,35 0,048 0,1 0,73

0,3 0,076 0,02 0,84

0,25 0,1 0,02 0,58 vidett 2

0,2 0,14 0,12 0,5

0,15 0,17 0,24 0,4

0,1 0,2 0,36 0,32

0,05 0,24 0,48 0,24

blau-grün ~~0,02~~ ~~0,704~~ 0,6 0,17

0,5 0,005 0,72 0,12

0,45 0,008 0,84 0,074

0,4 0,011 0,96 0,042

0,35 0,014 1,08 0,018



b)

	U/V	I/nA
gelb	-19	5,5
	-17	5,4
	-15	5,3
	-13	5,1
	-11	4,9
	-9	4,6
	-7	4,2
	-6	3,9
	-5	3,6
	-4	3,2
	-3	2,6
	-2	2,0
	-1	1,2
	0	0,32

~~■~~ [siehe übrige Messung für gelb; 0-0,5 Volt]

1	-0,0
2	-0,004
5	-0,009
10	-0,02
15	-0,03
19	-0,038

AK

## Literatur

- [1] TU Dortmund. *Anleitung zum Versuch 500, Der Photoeffekt*. 21. Juni 2019. URL: <http://129.217.224.2/HOMEPAGE/PHYSIKER/BACHELOR/AP/SKRIPT/V500.pdf>.
- [2] National Institute of Standards und Technology (NIST). *CODATA - elementary charge*. 21. Juni 2019. URL: <https://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?e>.
- [3] National Institute of Standards und Technology (NIST). *CODATA - Planck constant*. 21. Juni 2019. URL: <https://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?h>.
- [4] National Institute of Standards und Technology (NIST). *CODATA - speed of light in vacuum*. 21. Juni 2019. URL: <https://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?c>.