

V500

## **Der Photo-Effekt**

Patrick Schmidt    patrick7.schmidt@tu-dortmund.de

Michael Windau    michael.windau@tu-dortmund.de

Durchführung: 23.05.2017

Abgabe: 30.05.2017

# 1 Theorie

Im Folgenden wird der Photoeffekt (lichtelektrischer Effekt) betrachtet, bei dem die Elektronenenergie in Abhängigkeit der Wellenlänge des Lichtes untersucht wird.

## 1.1 Lichtelektrischer Effekt: Phänomen und Erklärung

Beim Photoeffekt geht es darum eine Festkörperoberfläche (Photokathode) mit negativem Potential mit monochromatischem Licht zu bestrahlen. Dabei befindet sich die Photokathode in einem Vakuum. Die dadurch ausgestoßenen Elektronen werden mit Hilfe einer Auffängerelektrode aufgefangen, welche ein positives Potential besitzt. Dieser Vorgang ist in Abbildung 1 veranschaulicht.

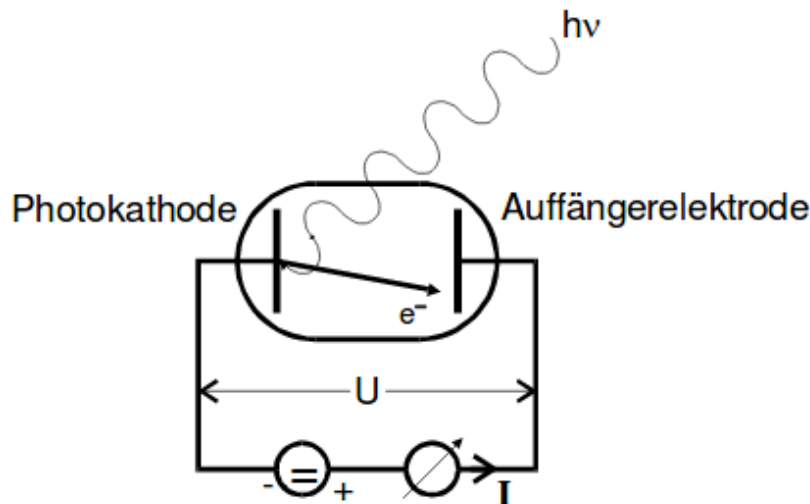


Abbildung 1: Aufbau zur Veranschaulichung des Photoeffekts.[1]

Aus diesem Vorgang lässt sich folgern, dass es eine Grenzfrequenz gibt, unter der keine Elektronen aus der Oberfläche austreten. Treten aber Elektronen aus der Oberfläche aus bzw. ist die Grenzfrequenz überschritten, so ist die Zahl der Elektronen pro Zeiteinheit proportional zur Lichtintensität.

Da sich diese Ergebnisse nicht durch das Wellenmodell erklären lassen, wird im Rahmen des Korpuskularmodells das Licht als Photonen oder Lichtquanten angenommen. Diese sind äquivalent mit den Plankschen Energiequanten. Diese beinhalten, dass monochromatisches Licht aus Photonen besteht, die sich mit Lichtgeschwindigkeit  $c$  bewegen und die Energie  $h\nu$  besitzen.  $\nu$  stellt hier die Frequenz dar. Im Rahmen des Photoeffektes übertragen die Photonen ihre Energie auf ein Elektron, welches dann genug Energie hat, um aus der Oberfläche auszutreten, daher wird diese Energie auch Austrittsenergie  $A_k$  genannt. Mit der Relation

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

ergibt sich die Gesetzmäßigkeit

$$h\nu < A_k$$

, was wieder das Auftreten einer Grenzfrequenz erklärt.

## 1.2 Untersuchung durch Gegenfeldmethode

Zur Erzeugung des monochromatischen Lichtes wird eine Hg-Dampflampe verwendet. Das von der Hg-Lampe ausgesendete Licht wird durch eine Kondensorlinse auf eine

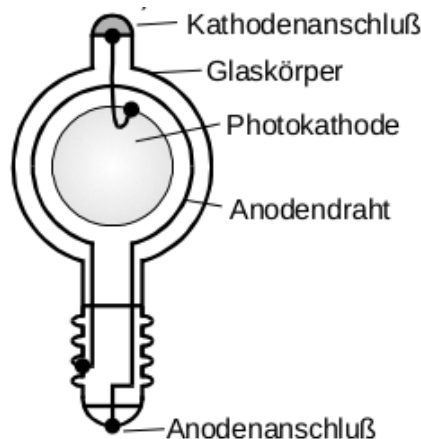


Abbildung 2: Darstellung des Aufbaus einer Photozelle.[1]

Spaltblende gerichtet und durch eine Abbildungslinse in ein Geradenrisma gelenkt, welches das monochromatische Licht in seine Spektralfarben zerlegt. Nun treffen die Lichtstrahlen auf einen Eintrittsspalt, welcher dafür verwendet wird einzelne Spektralfarben getrennt voneinander untersuchen zu können. Hinter dem Eintrittsspalt befindet sich eine durch ein Gehäuse geschützte Photozelle, dessen Aufbau in Abbildung 2 zu erkennen ist. Die Photozelle befindet sich zudem auf einem Schwenkarm, der dazu dient durch verändern des Winkels einzelne verschiedene Farben zu betrachten. Zu sehen ist dieser Aufbau in Abbildung 3.

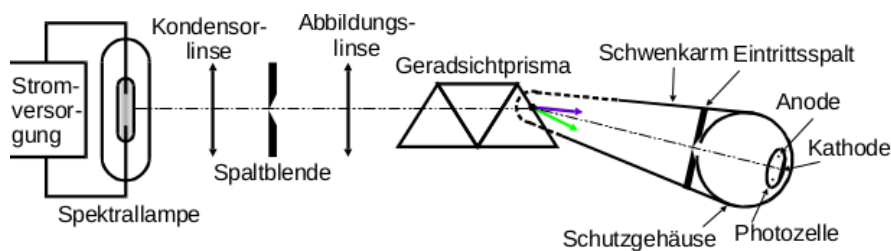


Abbildung 3: Aufbau des Optischen Aufbaus.[1]

Um die Energie der ausgelösten Elektronen messen zu können wird die Gegenfeldmethode (Abb. 4) verwendet, bei der auf die Kathoden-Anoden-Strecke eine variable Spannung

gegeben wird um die ankommenden Elektronen abzubremesen. Nur Elektronen, die eine Energie höher als  $e_0 U$  haben.

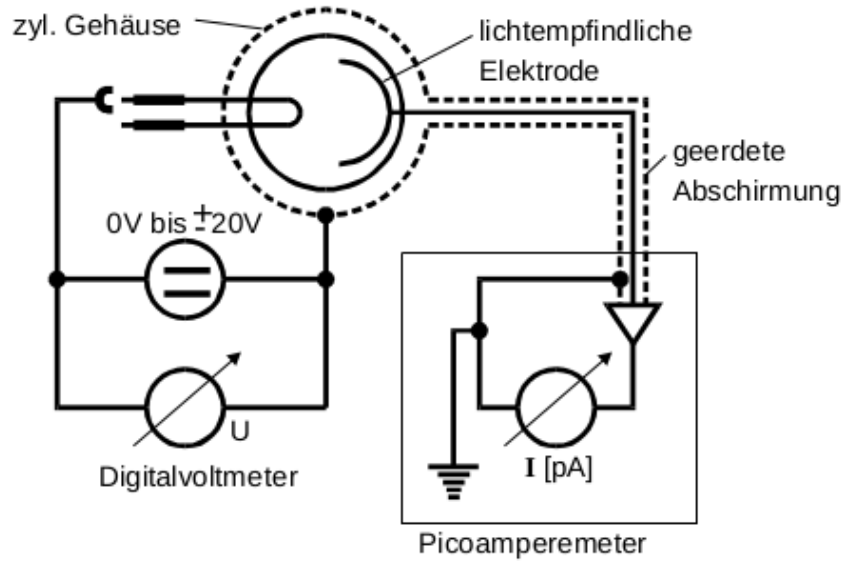


Abbildung 4: Schaltbild der Apparatur Gegenfeldmethode.[1]

Wenn  $v_{\max}$  die maximale Geschwindigkeit der Elektronen darstellt, kommt bei einer Gegenspannung von  $U_g$  keine Elektronen mehr an der Fotokathode an. Dadurch lässt sich

$$e_0 U_g = \frac{1}{2} v_{\max}^2 \quad (2)$$

formulieren. Hierbei ist  $m_0$  die Ruhemasse des Elektrons und  $e_0$  seine Elementarladung. Die Energie des Elektrons lässt sich berechnen durch

$$h\nu = e_0 U_g + A_k \quad (3)$$

berechnen.

In der Realität verschwindet der Photostrom jedoch nicht einfach. Das Verhalten der Energieverteilung der Elektronen lässt sich daher nach der Fermi-Dirac-Statistik beschreiben. Diese in Abbildung 5 zu sehende Statistik bedeutet, dass der Photonstrom nur langsam abnimmt, bis er bei einem gewissen  $U_g$  auf 0 abfällt. In diesem Versuch kann man den parabolischen Zusammenhang zwischen Photostrom und Bremsspannung

$$I_{\text{Ph}} \sim U^2 \quad (4)$$

darstellen.

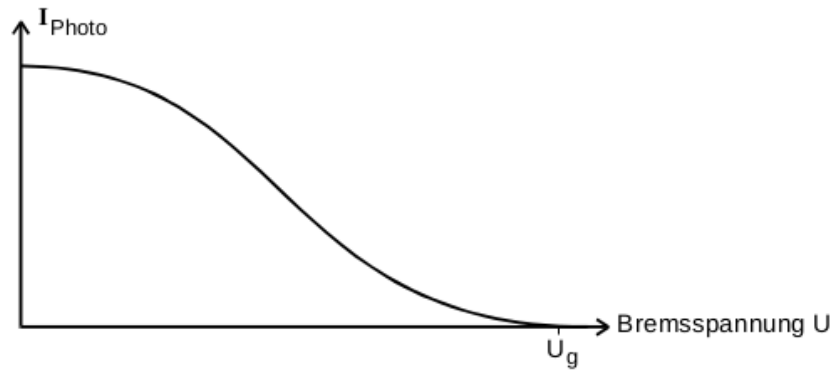


Abbildung 5: Photostrom in Abhängigkeit der Bremsspannung.[1]

## 2 Durchführung

Vor Beginn der Messuntersuchung wird durch Einstellen des Linsensystems sichergestellt, dass das monochromatische Licht durch das Prisma in seine Spektralfarben aufgespalten wird (Abb. 6). Dazu müssen die einzelnen Linsen passend ausgerichtet werden.

$\lambda$ [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 6: Wellenlängen der wichtigsten Farben von Hg.[1]

Als nächstes muss darauf geachtet werden, das Gehäuse der Photokathode gegen äußere Störfelder abzuschirmen. Dies wird durch ein Koaxialkabel und inen Mantel auf Erdpotential erreicht.

Nach Justierung der Apparatur wird zu jeder Sichtbaren Spektralfarbe die Bremsspannung erhöht und der dazugehörige Photonstrom abgelesen. Bei Betrachtung der gelben Spektalfarbe wird die Bremsspannung von 20V in 0.5V Schritten gesenkt, bis 0V erreicht ist. Bei allen anderen Farben wird eine Bremsspannung um 0V betrachtet. Durch Umpolung an der Photokathode können auch negative Bremsspannungen erreicht werden. Darum wird eine Bremsspannung von -0,5V bis 0,5V in 0.1V Schritten betrachtet.

### 3 Auswertung

Zunächst wird die Grenzspannung  $U_g$  der verschiedenen Spektrallinien bestimmt. Dafür wird eine lineare Regressionsgerade durch die Wurzel der gemessenen Stromstärken gelegt, welche in Abhängigkeit zur Spannung stehen. Mittels des Achsenabschnitts  $b$  und der Steigung  $a$  der Geraden, ergibt sich die Grenzspannung durch:

$$U_g = -\frac{b}{a} \quad (5)$$

In den Tabellen 1 bis 6 und den Abbildungen 7 bis 12 sind die verwendeten Messwerte, bzw. linearen Regressionen abgebildet.

Tabelle 1: Gemessene Werte für die gelbe Spektrallinie, sowie die gewurzelte Stromstärke.

$U / \text{V}$	$I / 10^{-9} \text{A}$	$\sqrt{I} / 10^{-5} \text{A}^{1/2}$
0,4	0,01	0,1
0,3	0,03	0,17
0,2	0,06	0,24
0,1	0,14	0,37
0	0,30	0,55

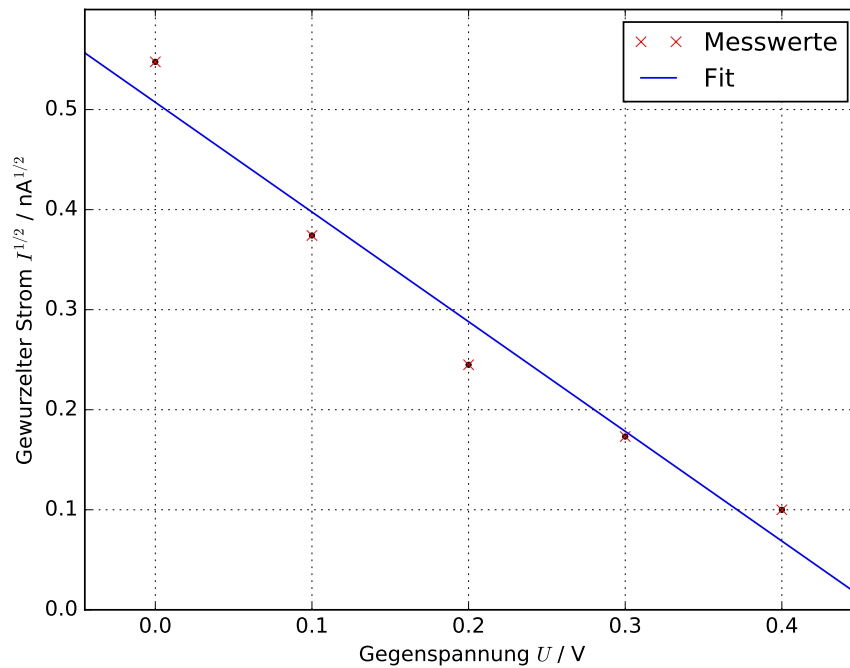


Abbildung 7: Lineare Ausgleichsgerade der gelben Spektrallinie.

Tabelle 2: Gemessene Werte für die grüne Spektrallinie, sowie die gewurzelte Stromstärke.

$U / \text{V}$	$I / 10^{-9} \text{A}$	$\sqrt{I} / 10^{-5} \text{A}^{1/2}$
0,5	0	0
0,4	0,02	0,14
0,3	0,13	0,36
0,2	0,32	0,56
0,1	0,59	0,77
0	0,90	0,95
-0,1	1,30	1,14
-0,2	1,50	1,22
-0,3	2,10	1,45
-0,4	2,60	1,61
-0,5	2,40	1,55

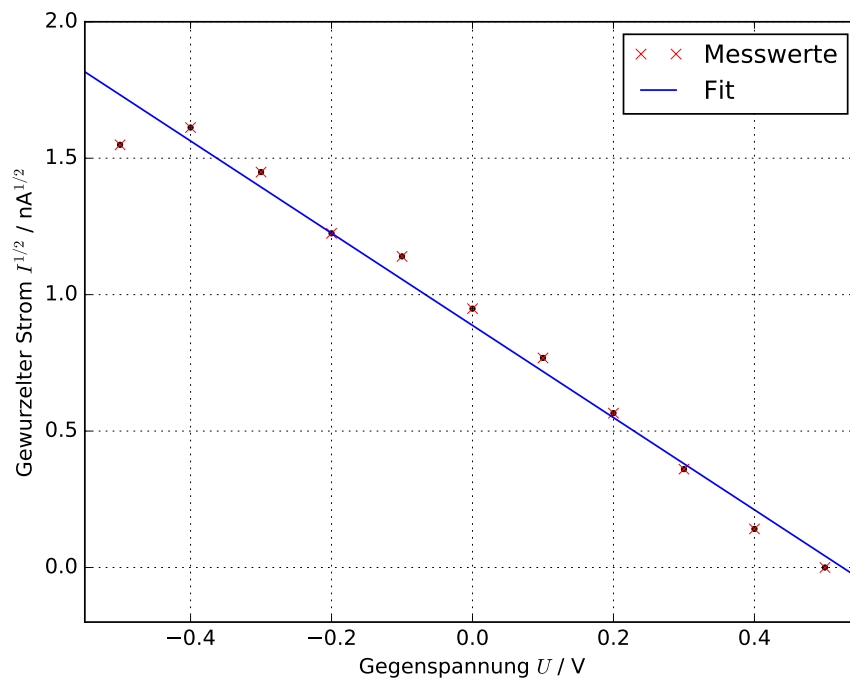


Abbildung 8: Lineare Ausgleichsgerade der grünen Spektrallinie.

Tabelle 3: Gemessene Werte für die türkise Spektrallinie, sowie die gewurzelte Stromstärke.

$U / \text{V}$	$I / 10^{-9} \text{A}$	$\sqrt{I} / 10^{-5} \text{A}^{1/2}$
0,5	0	0
0,4	0,01	0,14
0,3	0,01	0,17
0,2	0,02	0,20
0,1	0,05	0,22
0	0,12	0,26
-0,1	0,18	0,28
-0,2	0,30	0,32
-0,3	0,38	0,35
-0,4	0,48	0,37
-0,5	0,65	0,40

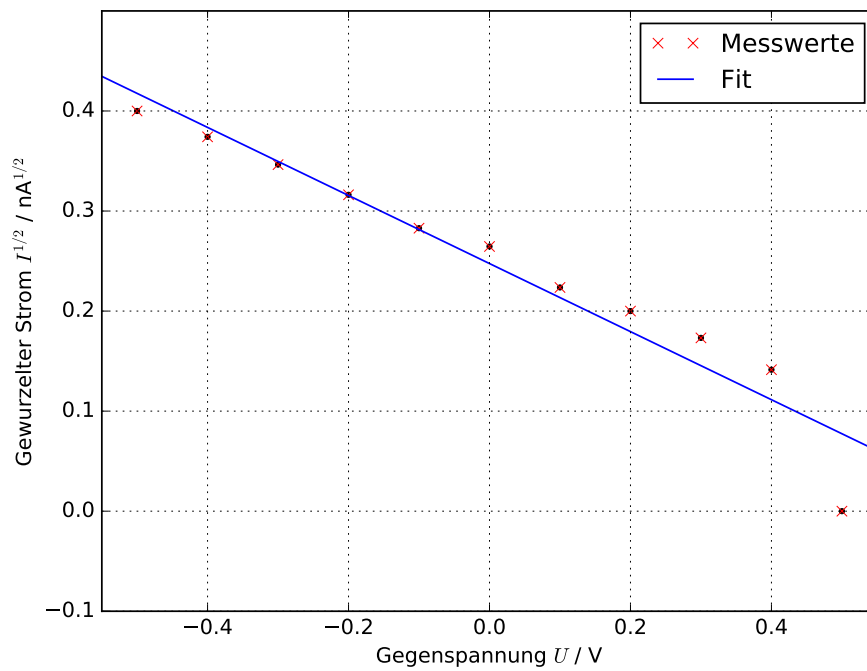


Abbildung 9: Lineare Ausgleichsgerade der türkisen Spektrallinie.



Tabelle 4: Gemessene Werte für die blaue Spektrallinie, sowie die gewurzelte Stromstärke.

$U / \text{V}$	$I / 10^{-9} \text{A}$	$\sqrt{I} / 10^{-5} \text{A}^{1/2}$
1,08	0	0
1,0	0,01	0,1
0,9	0,01	0,1
0,8	0,02	0,14
0,7	0,05	0,22
0,6	0,12	0,35
0,5	0,18	0,42
0,4	0,30	0,55
0,3	0,38	0,62
0,2	0,48	0,69
0,1	0,65	0,81
0	0,80	0,89

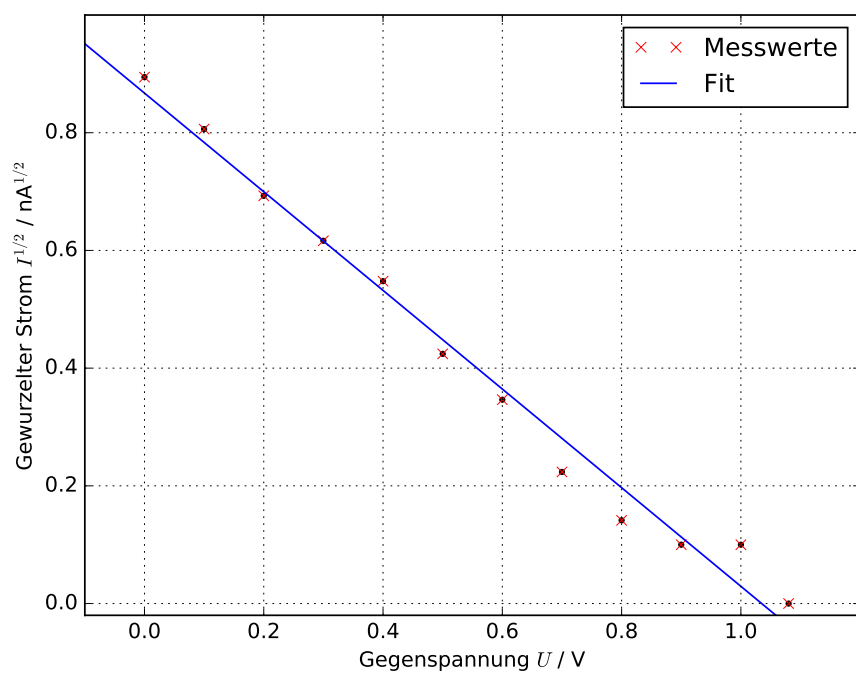


Abbildung 10: Lineare Ausgleichsgerade der blauen Spektrallinie.

Tabelle 5: Gemessene Werte für die erste violette Spektrallinie, sowie die gewurzelte Stromstärke.

$U / \text{V}$	$I / 10^{-9} \text{A}$	$\sqrt{I} / 10^{-5} \text{A}^{1/2}$
1,0	0	0
0,9	0,04	0,2
0,8	0,10	0,32
0,7	0,18	0,42
0,6	0,28	0,53
0,5	0,44	0,66
0,4	0,53	0,73
0,3	0,76	0,87
0,2	0,82	0,90
0,1	1,10	1,05
0	1,26	1,12

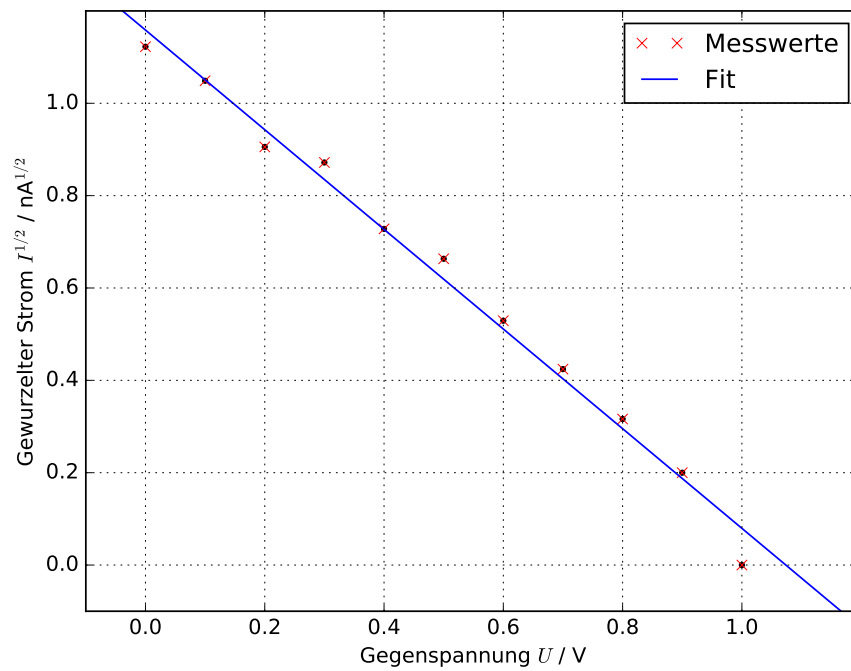


Abbildung 11: Lineare Ausgleichsgerade der ersten violetten Spektrallinie.

Tabelle 6: Gemessene Werte für die zweite violette Spektrallinie, sowie die gewurzelte Stromstärke.

$U / \text{V}$	$I / 10^{-9} \text{A}$	$\sqrt{I} / 10^{-5} \text{A}^{1/2}$
1,6	0	0
1,4	0,03	0,17
1,2	0,08	0,28
1,0	0,19	0,43
0,8	0,41	0,64
0,6	0,62	0,79
0,4	0,92	0,96
0,2	1,20	1,09
0	1,30	1,14

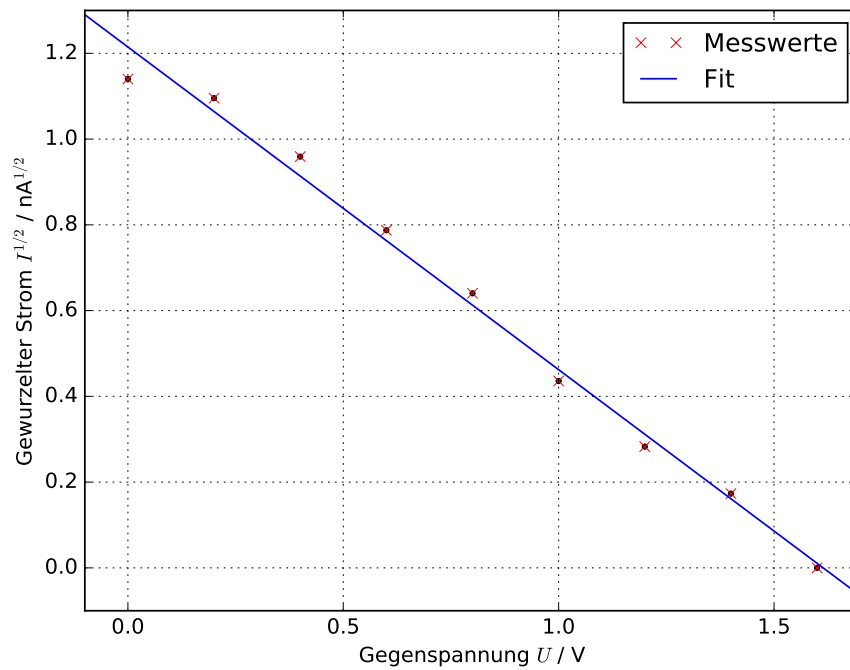


Abbildung 12: Lineare Ausgleichsgerade der zweiten violetten Spektrallinie.

Aus den Regressionen ergibt sich jeweils für die verschiedenen Farben die Steigung  $a$ , der Achsenabschnitt  $b$  und die Grenzspannung  $U_g$ :

$$\text{Gelb : } a = (-1,1 \pm 0,1) \cdot 10^{-5} \text{A}^{1/2}/\text{V}$$

$$b = (0,51 \pm 0,03) \cdot 10^{-5} \text{A}^{1/2}$$

$$U_g = (0,46 \pm 0,05) \text{V}$$

$$\begin{aligned}\text{Grün : } a &= (-1,69 \pm 0,08) \cdot 10^{-5} \text{A}^{1/2}/\text{V} \\ b &= (0,89 \pm 0,02) \cdot 10^{-5} \text{A}^{1/2} \\ U_g &= (0,53 \pm 0,03)\text{V}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Türkis : } a &= (-0,34 \pm 0,03) \cdot 10^{-5} \text{A}^{1/2}/\text{V} \\ b &= (0,247 \pm 0,009) \cdot 10^{-5} \text{A}^{1/2} \\ U_g &= (0,73 \pm 0,07)\text{V}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Blau : } a &= (-0,84 \pm 0,03) \cdot 10^{-5} \text{A}^{1/2}/\text{V} \\ b &= (0,87 \pm 0,02) \cdot 10^{-5} \text{A}^{1/2} \\ U_g &= (1,03 \pm 0,04)\text{V}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Violet 1 : } a &= (-1,08 \pm 0,04) \cdot 10^{-5} \text{A}^{1/2}/\text{V} \\ b &= (1,16 \pm 0,02) \cdot 10^{-5} \text{A}^{1/2} \\ U_g &= (1,07 \pm 0,04)\text{V}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Violet 2 : } a &= (-0,75 \pm 0,03) \cdot 10^{-5} \text{A}^{1/2}/\text{V} \\ b &= (1,21 \pm 0,02) \cdot 10^{-5} \text{A}^{1/2} \\ U_g &= (1,61 \pm 0,07)\text{V}\end{aligned}$$

Als nächstes wird das Verhältnis  $h/e_0$  und die Austrittsarbeit  $A_k$  ermittelt. Dafür wird die Gleichung

$$U_g = \frac{h}{e_0} \nu - \frac{A_k}{e_0} \quad (6)$$

verwendet. Die zuvor bestimmten  $U_g$  werden über die Frequenz  $\nu$  abgebildet, um durch eine lineare Regression die Steigung  $h/e_0$ , und den Achsenabschnitt  $A_k$  zu bestimmen. Die Frequenz  $\nu = c/\lambda$  ergibt sich dabei durch das Verhältnis zwischen der Lichtgeschwindigkeit  $c$  und der Wellenlänge  $\lambda$  der jeweiligen Farbe. Die für die Regression verwendeten Daten befinden sich in Tabelle 7, und werden in der Abbildung 13 verwendet.

Tabelle 7: Zuvor bestimmte Werte für die Gegenspannung  $U_g$ , sowie die Wellenlängen der verschiedenen Spektrallinien und die sich daraus ergebenden Frequenzen [1].

U / V	$\lambda / 10^{-9}\text{m}$	$\nu / 10^{12}\text{Hz}$
0,46±0,05	577	519
0,53±0,03	546	549
0,73±0,07	492	609
1,03±0,04	450	666
1,07±0,04	404	742
1,61±0,07	365	821

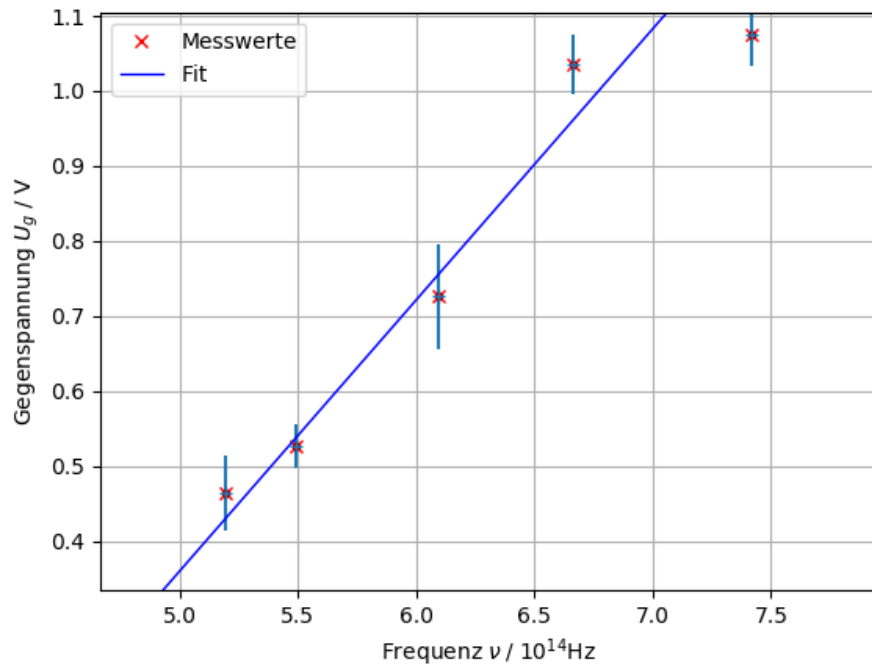


Abbildung 13: Lineare Ausgleichsgerade zur Bestimmung von  $h/e_0$  und der Austrittsarbeit  $A_k$ .

Aus der Regression ergibt sich:

$$h/e_0 = (3,6 \pm 0,4) \cdot 10^{-15} \text{eV}$$

$$A_k = (1,4 \pm 0,3) \text{eV}$$

Zuletzt wird erneut die Messung der gelben Spektrallinie in einem größeren Intervall betrachtet. Die dabei gemessenen Werte sind in Tabelle 8 dargestellt.

Tabelle 8: Gemessene Werte für die gelbe Spektrallinie.

U / V	I / $10^{-9}$ A	U / V	I / $10^{-9}$ A
-19,05	4,90	-8,0	4,20
-18,50	5,10	-7,5	3,90
-18,00	5,25	-7,0	4,00
-17,50	5,30	-6,5	3,70
-17,00	5,10	-6,0	3,70
-16,50	5,30	-5,5	3,50
-16,00	5,00	-5,0	3,20
-15,50	4,25	-4,5	3,20
-15,00	5,20	-4,0	3,10
-14,50	4,90	-3,5	2,80
-14,00	4,80	-3,0	2,50
-13,50	4,60	-2,5	2,30
-13,00	4,65	-2,0	1,90
-12,50	4,50	-1,5	1,60
-12,00	4,60	-1,0	1,20
-11,50	4,40	-0,5	0,90
-11,00	4,40	0	0,30
-10,50	4,40	0,1	0,14
-10,00	4,20	0,2	0,06
-9,50	4,30	0,3	0,03
-9,00	4,30	0,4	0,01
-8,50	4,10	0,5	0

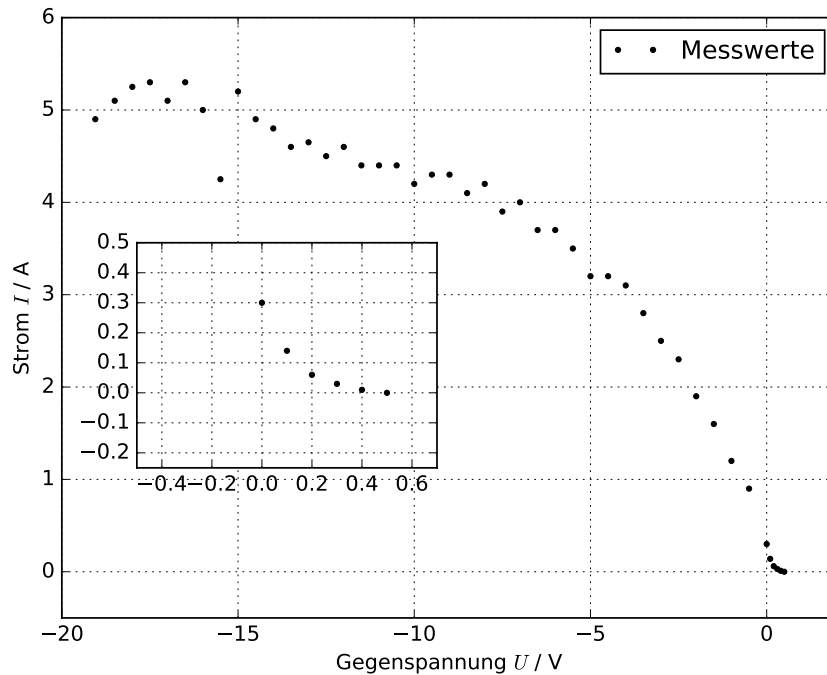


Abbildung 14: Gemessener Strom der gelben Spektrallinie in Abhängigkeit zur Spannung. Im Subplot ist der Nulldurchgang vergrößert.

Wie in Abb. 14 zu erkennen, geht die Stromstärke ab einer hoch genügen Gegenspannung nicht über einen festen Wert. Dies kommt daher, dass die Elektronen bei einer hohen Beschleunigung alle die Anode erreichen, die Anzahl der sich lösenden Elektronen jedoch von der Intensität abhängt, die bei konstanter Lichteinstrahlung fest ist. Weiter fällt, wie im Subplot zu erkennen ist, die Stromstärke beim Nulldurchgang nicht direkt auf Null ab. Eine Erklärung dafür liefert jedoch die Energieverteilung der Elektronen im Metall, da diese nicht alle die gleiche Energie besitzen.

## 4 Diskussion

Zuerst ist die Problematik des Ablesens anzumerken, da die Nadel des Amperemeters sich nicht auf einen bestimmten Wert einpendelte. Vielmehr wechselte sie immer von Bereichen, in denen sie sich für wenige Sekunden aufhielt. Dies wurde zum Teil extrem genug, dass sich Messwerte nur mit einer Messungenauigkeit von 50% ablesen ließen. Eine Erklärung für dieses Verhalten ist die schwankende Intensität der Quecksilberlampe, die keine konstante Lichteinstrahlung gewähren kann.

Weiter lässt sich ein Vergleich der Messwerte vom Verhältnis  $h/e_0$  mit Theoriewerten

[2] durchführen:

$$\text{Messung:} = \frac{h}{e_0} = (3,6 \pm 0,4) \cdot 10^{-15} \text{eV}$$

$$\text{Theorie:} = \frac{h}{e_0} = (4,136) \cdot 10^{-15} \text{eV}$$

Es ergibt sich eine prozentuale Abweichung von 14,8%. Diese Abweichung liegt in einem tolerierbaren Bereich und deutet auf eine genaue Messung hin.

## 5 Literatur

- [1] TU Dortmund. Versuchsanleitung zum Versuch V500, Der Photo-Effekt. 2017
- [2] Theoriewerte, <http://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?esh>. 28.05.17