

Versuch 500 - Der Photoeffekt

TU Dortmund, Fakultät Physik

Anfänger-Praktikum

Oliver Zietek

oliver.zietek@tu-dortmund.de

Fabian Lehmann

fabian.lehmann@tu-dortmund.de

10. Januar 2013

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	2
2	Theorie	2
2.1	Die Natur des Lichts	2
2.2	Der Photoeffekt	2
3	Durchführung	3
3.1	Versuchsaufbau	3
3.2	Justierung der Apparatur	5
3.3	Messvorgang	5
4	Auswertung	5
4.1	Bestimmung von U_g	5
4.2	Bestimmung der Austrittsarbeit und des Verhältnisses $\frac{h}{e_0}$	6
5	Diskussion	15
5.1	Deutung eines Kurvenverlaufs	15
5.2	Fehleranalyse und Literaturvergleich	16

1 Einleitung

In diesem Versuch werden die mit dem lichtelektrischen Effekt zusammenhängenden Erscheinungen quantitativ untersucht werden. Eine dieser Erscheinungen ist die Abhängigkeit der Elektronenenergie von der Wellenlänge des Lichts, welche in diesem Versuch bestätigt werden soll.

2 Theorie

2.1 Die Natur des Lichts

Es gibt zwei Vorstellungen zur Natur des Lichtes. Die eine ist die Wellentheorie, die andere die korpuskulare Theorie. Diese Beiden scheinen auf den ersten Blick unvereinbar in der mathematischen Beschreibung, welche einmal durch die Maxwellgleichungen (Wellentheorie) und ein anderes mal durch die newtonsche Punktmechanik(korpuskulare Theorie) beschrieben werden. Es ist auch nur in der Quantenmechanik möglich eine vollständig Beschreibung zu geben. Hier treten dann die beiden Modelle als Grenzfälle auf. Welches Modell nun zutrifft, hängt immer von dem Experiment ab. So wird die Wellentheorie bei Beugung am Spalt oder Interferenz benutzt und die Korpuskel beim lichtelektrischen Effekt oder Comptoneffekt. Es lässt sich also allgemein sagen, dass bei einer großen Anzahl an Photonen, die man über die räumliche Ausbreitung mittelt, die Wellentheorie nimmt und bei Wechselwirkungen mit Materie und Licht das Korpuskellmodell.

2.2 Der Photoeffekt

Es wird eine sich im Vakuum befindliche Festkörperoberfläche mit monochromatischem Licht bestrahlt. Dieser Körper wird Photokathode genannt. Es wird der gegenüber stehenden Elektrode ein höheres Potential zugeteilt, damit die Elektronen von der Photokathode zu dieser gelenkt werden. Es folgen die Ergebnisse:

Die Zahl der pro Zeiteinheit ausgelösten Elektronen ist proportional zur Lichtintensität.

Eine Grenzfrequenz, unter welcher der Photoeffekt nicht mehr auftritt, existiert.

Die Energie der Photoelektronen (gemessen über ihre Geschwindigkeit) ist proportional zur Lichtfrequenz.

Sämtliche Ergebnisse lassen sich nicht mit einem Wellenmodell erklären: Wenn man beispielsweise annimmt, dass die Elektronen an der Oberfläche eines Metalles durch das elektrische Feld des einfallenden Lichtes zu erzwungenen Schwingungen angeregt werden, dann müssten die Elektronen die Metalloberfläche verlassen können, sobald ihre Schwingungsamplitude so groß geworden ist, dass sie die elektrostatischen, rück-treibenden Kräfte überwinden. Das heißt, dass auch bei langwelligem Licht mit ausreichend hoher Intensität der Photo-Effekt möglich sein müsste. Es müsste bei einer bestimmten Frequenz Resonanzphänomene zu beobachten sein, wo der Photo-Effekt bevorzugt auftritt. Weiterhin müsste

die Energie der Photoelektronen mit der Lichtintensität anwachsen. All diese Forderungen stehen aber im Widerspruch zu den experimentellen Ergebnissen.

Mit dem korpuskel Modell kann man aber all diese Punkte erklären, denn ein Photon der Frequenz ν hat eine Energie von $h\nu$, wenn diese Energie gleich oder größer der Austrittsarbeit A_k eines Elektron ist, da das Photon diese übergibt, löst sich das Elektron aus dem Festkörper mit einer Geschwindigkeit, die aus E_{kin} herrührt. So kann man diese Gleichung aufstellen:

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

Dies erklärt große Teile der Ergebnisse. Es ist noch anzumerken, dass ein Photon nur ein Elektron lösen kann. Folglich sind die ausgelösten Elektronen proportional zur Lichtintensität.

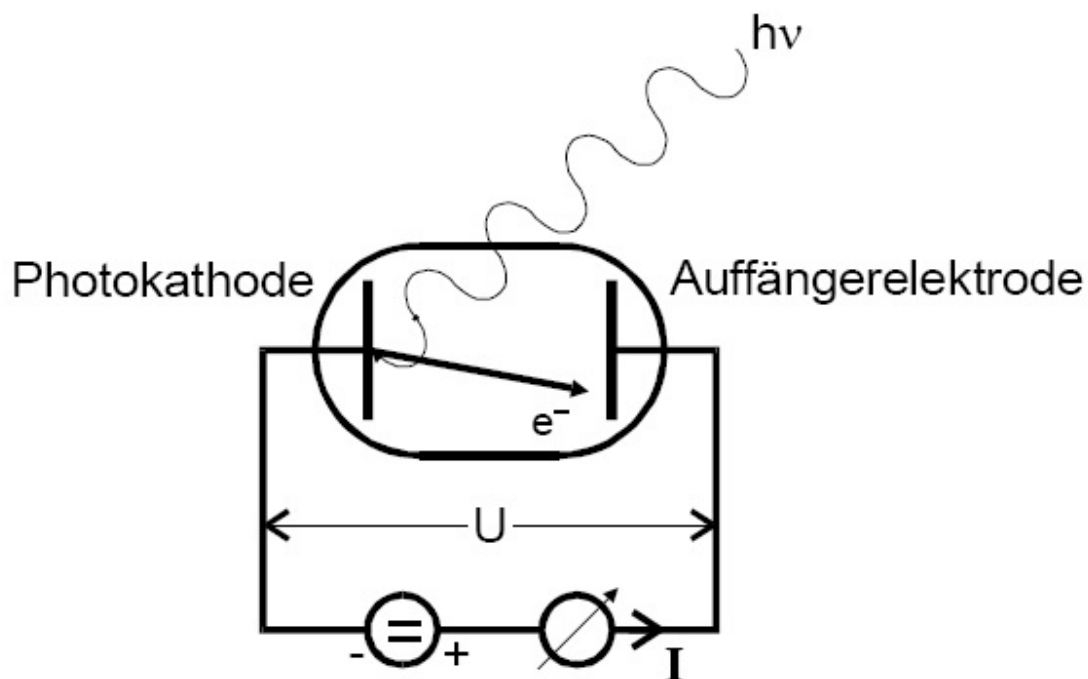


Abbildung 1: Prinzip des Photoeffekts

3 Durchführung

3.1 Versuchsaufbau

In der Photozelle (Abbildung 2) findet der zu untersuchende Photoeffekt statt. Die Photozelle wird dazu mit Licht einer bestimmten Wellenlänge und einer bestimmten Frequenz belichtet. In einem Abstand von wenigen Millimetern zur Kathode befindet sich die Anode die in der Photozelle als kreisförmiger Drahring darstellt.

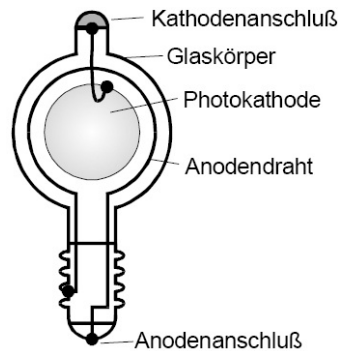


Abbildung 2: Die Photozelle

Anhand der sogenannten Gegenfeldmethode wird die Energie der Elektronen bestimmt. Dazu legt man eine Spannung U_B (Abbildung 1), zwischen Anode und Kathode an, die die emittierten Elektronen abbremst. Aus diesem Grund erreichen die Anode nur Elektronen, die die mindest Energie $E_{kin} < e_0 \cdot U$ erreichen. Für den fall, dass

$$\frac{1}{2}m_0v_2 = e_0U_G \quad (2)$$

gilt, verschwindet der Strom I . Mit der Austrittsarbeit gilt für die schnellsten Elektronen nun

$$h\nu = e_0U_G + A_k. \quad (3)$$

Mit diesen Formeln lässt sich die Grenzspannung U_G in abhängigigkeit von der Frequenz ν ermitteln. Das von der Lampe emittierte Licht wird durch eine Kondensorlinse gebündelt bevor es durch die Spaltblende fällt. Hinter dem Spalt befindet sich die Abbildungslinse, welche das Licht weiter gebündelt auf das Geradsichtprisma lenkt. Erst jetzt ist eine Untersuchung des Photoeffekts möglich, da das Prisma die verschiedenen Spektrallinien räumlich trennt und somit ist es möglich nur Licht einer bestimmten Frequenz auf die Kathode zu richten. (siehe Abbildung 3)

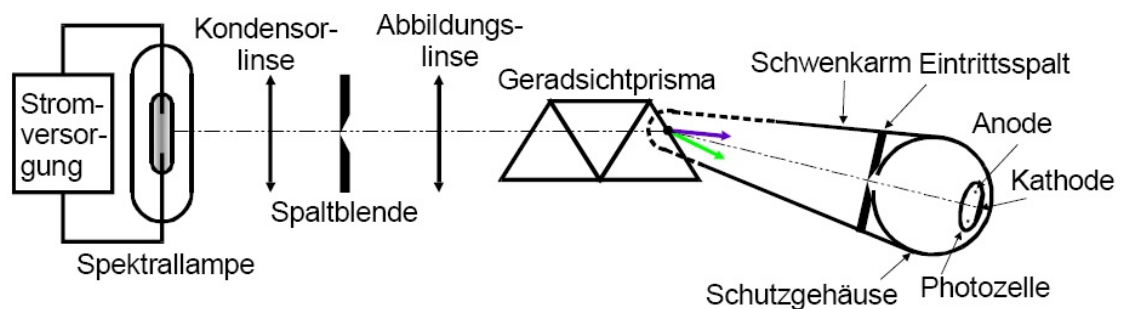


Abbildung 3: Versuchsaufbau

3.2 Justierung der Apparatur

Da die zu messenden Ströme in der Größenordnung pA liegen, sind die Zuleitungen zum Pi-coamperemeter und das Gehäuse der Photozelle sorgfältig gegen Störfelder abgeschirmt. Dies ist möglich durch Nutzung von Koaxialkabeln, deren Mantel auf Erdpotential liegen. Für brauchbare Messergebnisse muss man möglichst viel des von der Lampe emittierten Lichts auf die Photokathode konzentrieren. Da die Intensität des gesammelten Lichtes stark von der Anordnung der optischen Elemente des Versuchsaufbaus abhängt, wird im folgenden auf die Justierung der Apparatur eingegangen. Die optischen Bauelemente müssen so angeordnet sein, dass die Kondensorlinse ein möglichst scharfes Bild in die Spaltblende einwirft, dieses sollte die gleiche Breite wie der Spalt besitzen (ca 1- 2 mm). Zur Berechnung der Abstände können die Linsenformeln verwenden.

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{g} + \frac{1}{b} \quad (4)$$

$$\frac{G}{B} = \frac{g}{b} \quad (5)$$

(f = Brennweite der Linse, g = Gegenstandsweite, b= Bildweite, G = Gegenstandsgröße, B = Bildgröße)

Entsprechendes gilt für die Abbildung der Spaltblende auf die Eintrittsöffnung der Photozelle mittels der Abbildungslinse.

3.3 Messvorgang

Es werden für die Messung der beiden violetten Farbtöne, sowie für Grün und Blaugrün wird der Strom des eingestrahlte Lichts in abhängigkeit von der Gegenspannung gemessen. Wobei die Gegenspannung im bereich von -1 Volt bis 1 Volt in 0,2 Volt schritten erhöht wird und zwischen 1 Volt und 19 Volt in 4 Volt schritten. Dabei wird jeweils der Photostrom gemessen.

Beim Gelben Licht wird, wie bei den anderen Farben im bereich von -1 bis 19 Volt gemessen. Zusätzlich wir aber auch im Bereich von -19 Volt bis -1 Volt in 4 Volt schritten gemessen.

4 Auswertung

4.1 Bestimmung von U_g

Wird die Wurzel aus dem Photostrom gegen die Bremsspannung aufgetragen, so lässt sich für die verschiedenen Wellenlängen (vgl. Tab. 4.1) aus den Tabellen 4.2 und 4.3 Abbildung 4 erstellen. Wird nun für die linearen Abschnitte aus Abbildung 4 jeweils eine lineare Regression [2] durchgeführt (siehe Tab. 4.4),

$$\sqrt{I} = a \cdot U + b, \quad (6)$$

λ/nm	Farbe	$\nu \cdot 10^{(14)}/\frac{1}{\text{s}}$
405	Violett	7,40
435	Violett	6,89
492	Grün	6,09
546	Blaugrün	5,49
578	Gelb	5,19

Tabelle 4.1: Untersuchte Linien des Hg-Spektrums[1]

U/V	405nm: I/nA	435nm: I/nA	492nm: I/nA	546nm: I/nA
-1,0	0,027	0,000	0,000	-0,018
-0,8	0,097	0,094	0,000	-0,016
-0,6	0,225	0,280	0,003	-0,011
-0,4	0,400	0,720	0,012	0,011
-0,2	0,630	1,100	0,030	0,140
0,0	0,840	1,350	0,054	0,460
0,2	1,050	2,050	0,080	0,830
0,4	1,350	2,550	0,105	1,200
0,6	1,650	3,100	0,135	1,500
0,8	1,900	3,600	0,155	1,800
1,0	2,200	4,000	0,175	2,050
5,0	7,200	12,500	0,530	5,600
9,0	10,000	17,500	0,720	7,000
13,0	12,000	20,500	0,820	7,800
17,0	13,500	22,500	0,870	8,200
19,0	14,000	23,000	0,930	8,700

Tabelle 4.2: Photostrom verschiedener Wellenlängen in Abhängigkeit der Spannung

so lassen sich aus dem Schnittpunkt der Ausgleichsgeraden mit der Spannungs-Achse (Abb. 5 - 9) die Gegenspannungen U_g bestimmen.

$$U_g = \frac{-b}{a} \quad (7)$$

4.2 Bestimmung der Austrittsarbeit und des Verhältnisses $\frac{h}{e_0}$

Wird U_g (Tab. 4.5) gegen die Lichtfrequenz (Tab. 4.1) aufgetragen (Abb. 10) und dann eine lineare Regression [2] durchgeführt, so lassen sich Austrittsarbeit A_k und das Verhältnis

U_g/V	I/nA
-19,0	-0,010
-17,0	-0,012
-13,0	-0,011
-9,0	-0,009
-5,0	-0,009
-1,0	-0,008
-0,8	-0,006
-0,6	-0,004
-0,4	0,000
-0,2	0,018
0,0	0,120
0,2	0,290
0,4	0,460
0,6	0,610
0,8	0,720
1,0	0,880
5,0	1,800
9,0	2,200
13,0	2,350
17,0	3,800
19,0	4,000

Tabelle 4.3: Photostrom in Abhängigkeit der Spannung ($\lambda = 578 \text{ nm}$)

$\frac{h}{e_0}$ mit Gleichung (??) bestimmen.

$$\nu = \frac{e_0}{h} |U_g| + \frac{A_k}{h} \quad (8)$$

$$\frac{A_k}{h} = (3,8 \pm 0,2) \cdot 10^{14} \frac{1}{s} \quad (9)$$

$$\Rightarrow A_k = (1,58 \pm 0,07) \text{ eV} \quad (10)$$

$$\frac{h}{e_0} = ((2,6 \pm 0,2) \cdot 10^{14} \frac{\text{C}}{\text{J} \cdot \text{s}})^{-1} = (3,8 \pm 0,3) \cdot 10^{-15} \frac{\text{J} \cdot \text{s}}{\text{C}} \quad (11)$$

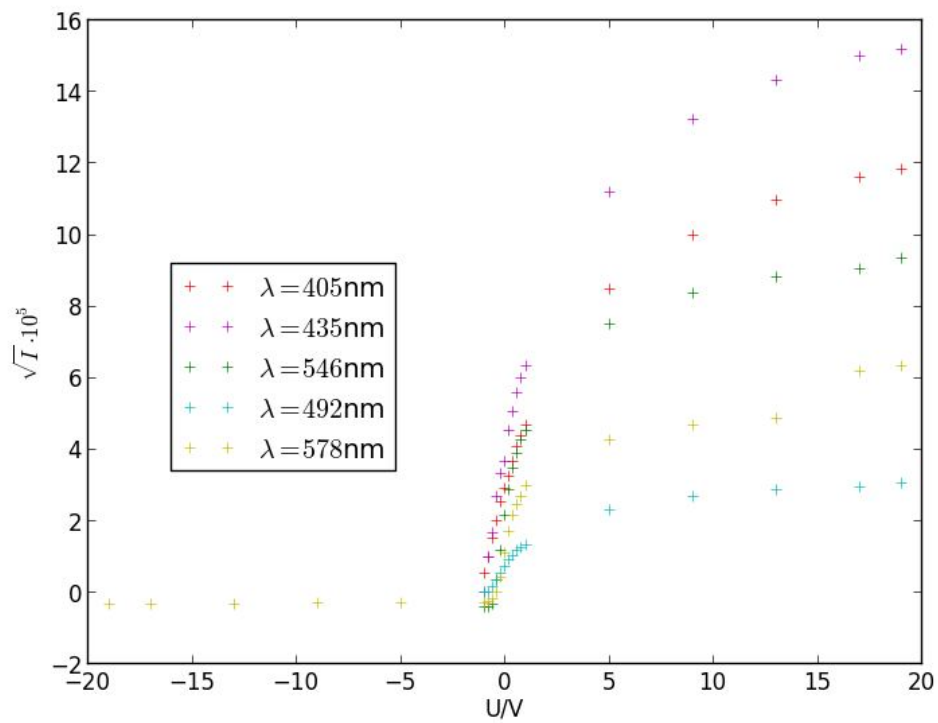


Abbildung 4: Photostrom in Abhängigkeit der angelegten Spannung

λ/nm	$a \cdot 10^{-5}$	$b \cdot 10^{-5}$
405	$2,10 \pm 0,06$	$2,77 \pm 0,04$
435	$3,15 \pm 0,14$	$3,62 \pm 0,09$
492	$0,74 \pm 0,03$	$0,68 \pm 0,02$
546	$3,00 \pm 0,25$	$1,93 \pm 0,14$
578	$2,18 \pm 0,16$	$1,03 \pm 0,09$

Tabelle 4.4: Ergebnisse der linearen Regression

U_g/V	λ/nm
-1,3202	405
-1,1471	435
-0,9163	492
-0,6430	546
-0,4733	578

Tabelle 4.5: U_g in Abhängigkeit der Wellenlänge

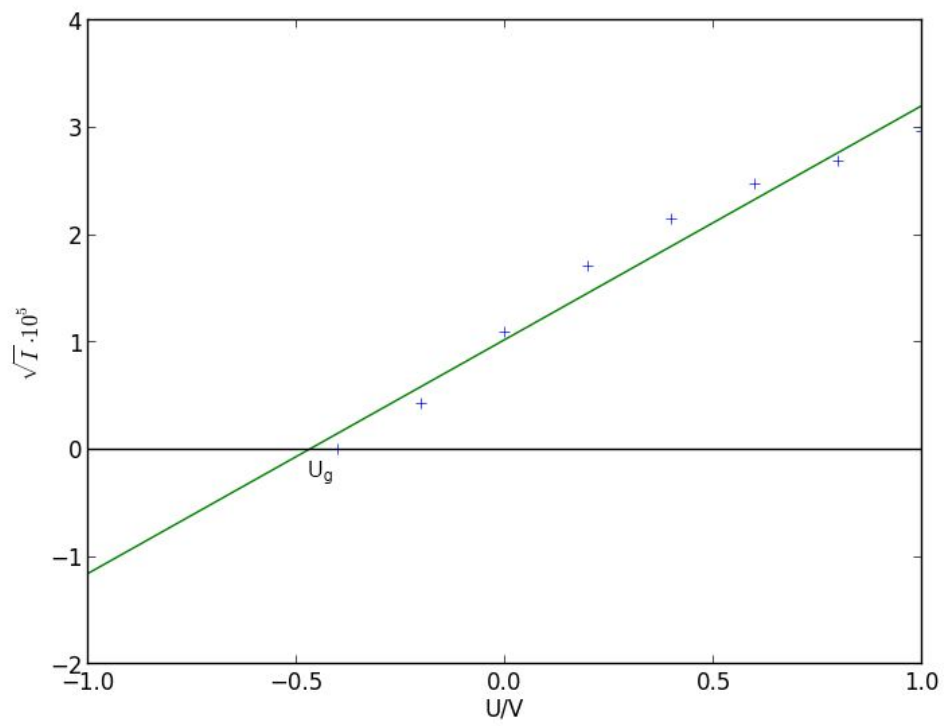


Abbildung 5: Lineare Regression des Photostroms ($\lambda = 578 \text{ nm}$)

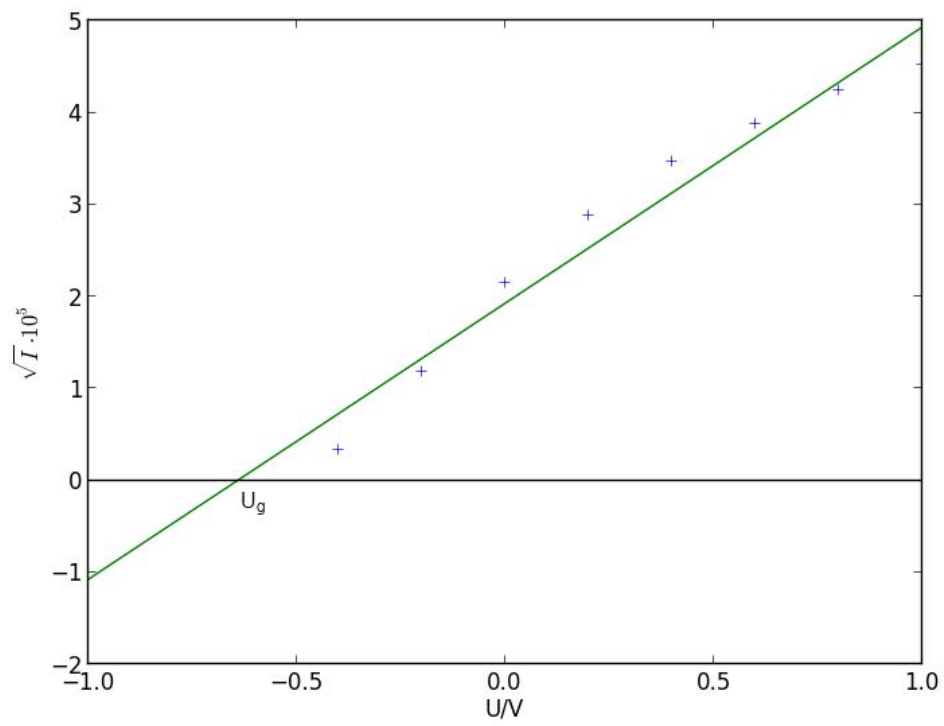


Abbildung 6: Lineare Regression des Photostroms ($\lambda = 546 \text{ nm}$)

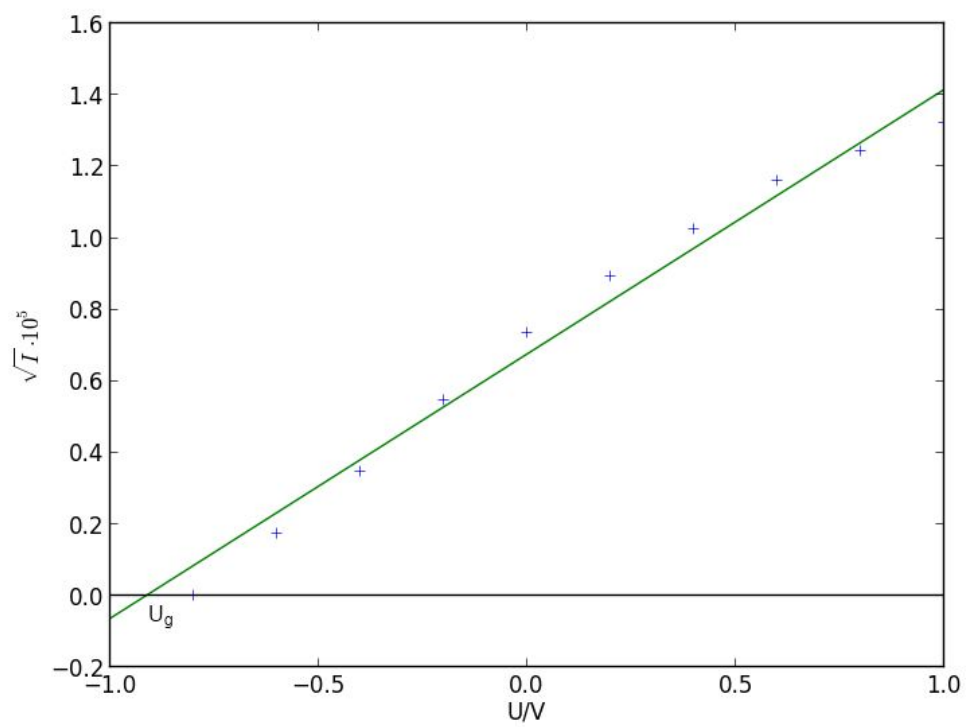


Abbildung 7: Lineare Regression des Photostroms ($\lambda = 492 \text{ nm}$)

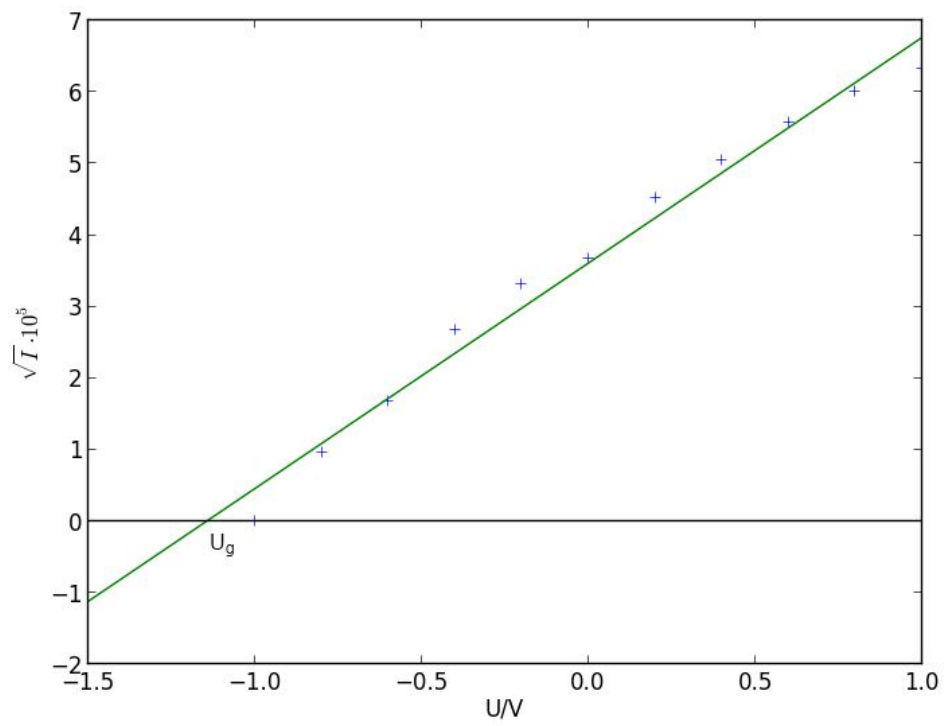


Abbildung 8: Lineare Regression des Photostroms ($\lambda = 435 \text{ nm}$)

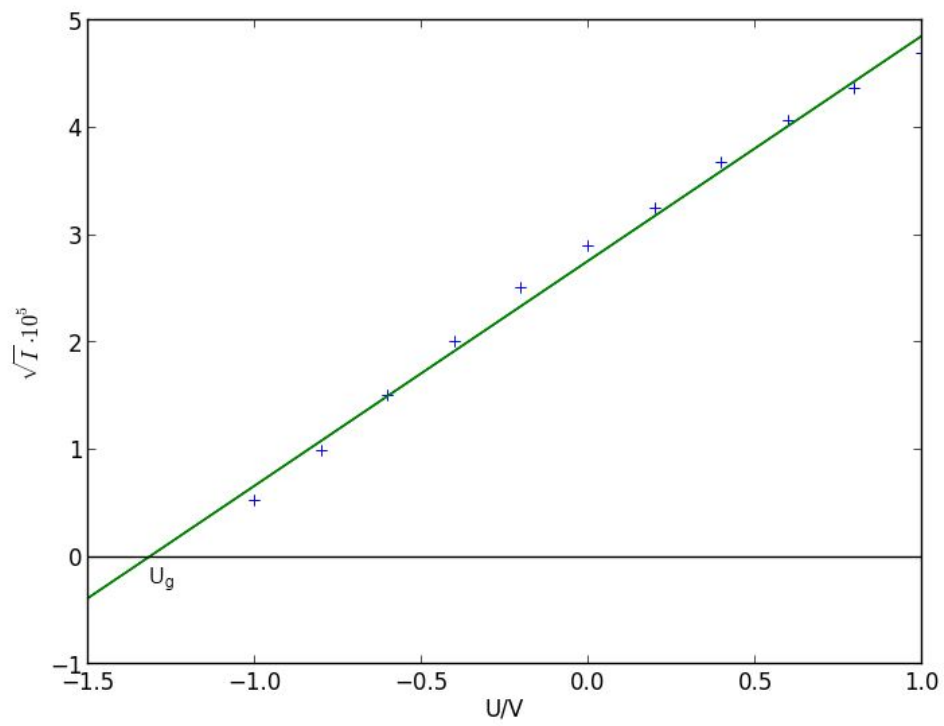


Abbildung 9: Lineare Regression des Photostroms ($\lambda = 405 \text{ nm}$)

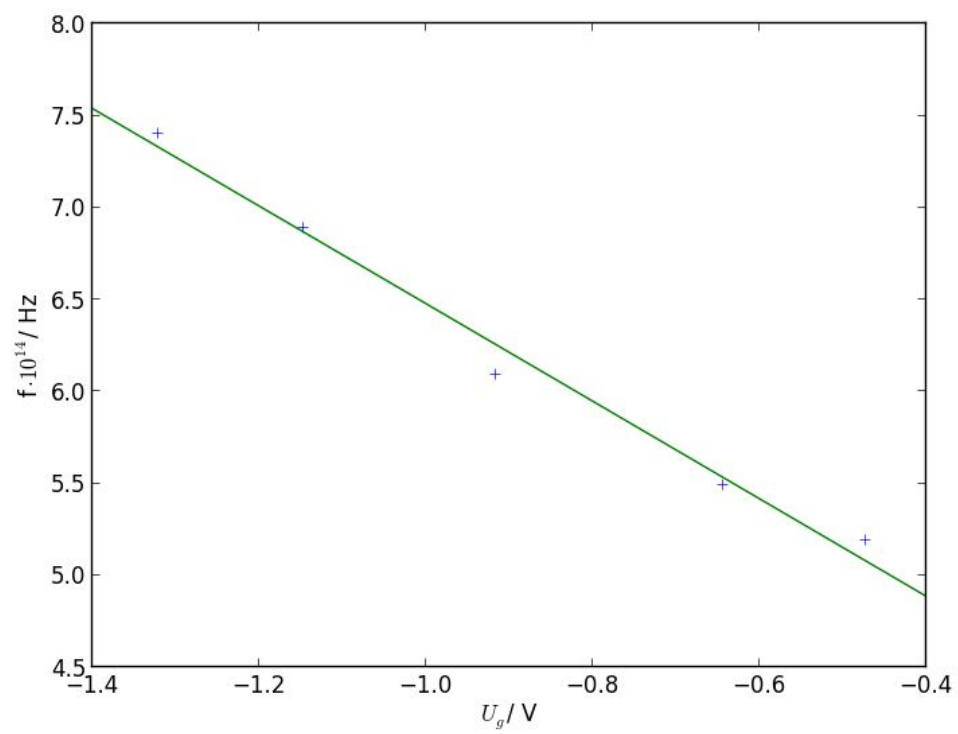


Abbildung 10: Lineare Regression von U_g bezogen auf die Lichtfrequenz

5 Diskussion

5.1 Deutung eines Kurvenverlaufs

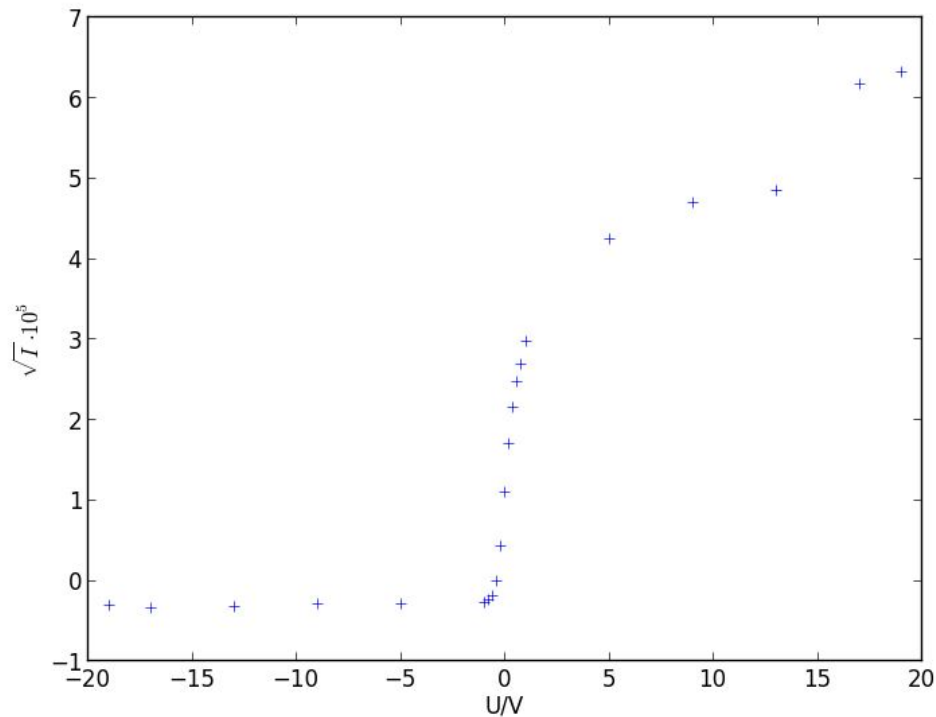


Abbildung 11: Photostrom in Abhängigkeit der angelegten Spannung ($\lambda = 492$ nm)

In Abbildung 11 ist für $\lambda = 578$ nm der Photostrom abhängig der angelegten Spannung aufgetragen. Es ist bei hohen beschleunigenden Spannungen ein Sättigungsverhalten zu erkennen, dem zu Grunde liegt die Eigenschaft, dass die Anzahl der ausgelösten Elektronen von der Intensität des Lichtes abhängt. Das Ohmsche Gesetz lässt sich in diesem Fall nicht anwenden, da die Elektronen zur Anode hin beschleunigt werden. Dieser Sättigungswert hängt neben der Intensität des Lichtes auch von der bestrahlten Fläche und den Materialeigenschaften ab. Dabei liegt die Asymptotik an dem Unvermögen der Versuchsanordnung alle Elektronen zu registrieren. Damit wirklich alle Elektronen die Anode erreichen, müsste der Abstand zwischen Anode und Kathode gegen Null streben, was natürlich ein solches Experiment nicht möglich machen würde.

Der Photostrom nähert sich bereits bei $U > U_g$ an 0 V an, da die Elektronen nach der Fermi-Dirac Statistik verteilt sind und es so auch Elektronen gibt, die bei $U > U_g$ gar nicht erst genug Energie besitzen die Anode zu erreichen. Der entgegengerichtete Photostrom von ungefähr -0,01 nA kommt durch den an der Anode stattfindenden Photoeffekt

zustande. Da die bestrahlte Oberfläche der Anode wesentlich kleiner ist, wird schon bei relativ kleinen Spannungsbeträgen eine Sättigung erreicht. Die Austrittsarbeit der Anode ist gering, denn schon bei Einstrahlung energiearmen Lichtes ($\lambda \approx 650 \text{ nm}$)[1] tritt bereits ein negativer Photostrom auf.

5.2 Fehleranalyse und Literaturvergleich

Das experimentell bestimmte Verhältnis von $h/e_0 = (3,8 \pm 0,3) \cdot 10^{-15} \frac{\text{J}\cdot\text{s}}{\text{C}}$ passt zu dem Literaturwert [3] von $h/e_0 = 4,1 \cdot 10^{-15} \frac{\text{J}\cdot\text{s}}{\text{C}}$. Ebenso passt der experimentell bestimmte Wert für die Austrittsarbeit von $A_k = (1,58 \pm 0,07) \text{ eV}$ grundsätzlich zu der erwarteten Größenordnung für die Austrittsarbeiten von Metallen. Die auftretenden Abweichungen können viele Ursachen haben: Zum einen war der Schwenkarm der Anordnung leicht versehentlich zu verschieben, zum anderen war die Versuchsanordnung unzureichend von störenden Lichteinflüssen, wie Schreibleuchten, geschützt. Vor allem jedoch hatte das Messgerät des Photostroms die Eigenschaft einen stark schwankenden Wert anzuzeigen. Das alles wirkt sich natürlich deutlich auf das Versuchsergebnis aus, wodurch Abweichungen zu erklären wären.

Literatur

- [1] Versuch Nr. 500 – Der Photoeffekt. http://129.217.224.2/HOMEPAGE/Anleitung_AP.html (13.01.13).
- [2] John R. Taylor. *An introduction to error analysis*. University Science Books, 2 edition, 1997.
- [3] Dr. Rolf Winter. *Das große Tafelwerk*. Cornelsen, 2009.

500

Violet 2
(rechts)

Gegenspannung / V

I / ~~mA~~ mA

-1

0,027

-0,8

~~0,097~~ 0,097

-0,6

0,225

-0,4

0,4

-0,2

0,63

0

0,84

0,2

1,05

0,4

1,35

0,6

1,65

0,8

1,9

1

2,12

5

7,2

9

10

13

12

17

~~13,5~~ 13,5

~~20~~ 19

14

14

Violett 1 (links)		Grün		Gelb		Blaugrün	
U_g/V	I/nA	I/nA		I/nA		I/nA	
	0	-0,018		-0,008		0	
	0,094	-0,016		-0,006		0	
	0,28	-0,011		-0,004		0,003	
	0,72	0,011		0		0,012	
analog	1,1	0,14	analog	0,018		0,03	
	1,35	0,46		0,12		0,054	
	2,05	0,83		0,29		0,08	
	2,55	1,2		0,46		0,115	
	3,1	1,5		0,61		0,135	
	3,6	1,8		0,72		0,155	
	4,0	2,05		0,85 0,88		0,175	
	12,5	5,6		1,38 1,8		0,53	
	17,5	7		2,2		0,72	
	20,5	7,8		2,35		0,82	
	22,5	8,2		3,8		0,87	
	23	8,7		4		0,93	
				-5	-0,009		
				-9	-0,009		
				-13	-0,011		
				-17	-0,012		
				-19	-0,01		

Kit