

Anfängerpraktikum V500

Der Photo-Effekt

Helena Nawrath
helena.nawrath@tu-dortmund.de

Carl Arne Thomann
arnethomann@me.com

Durchführung: 21. April 2015

Abgabe: 28. April 2015

TU Dortmund – Fakultät Physik

Ziel

In diesem Versuch soll mit Hilfe des Photoeffekts die maximale kinetische Energie der Elektronen in Abhängigkeit der Lichtfrequenz untersucht werden. Dabei gilt es wichtige Größen wie die Austrittsarbeit W_K , sowie den Quotienten h/e_0 mit der Elementarladung e_0 zu bestimmen. Realisiert wird dies, in dem die Abhängigkeit des auftretenden Photostroms I von der verwendeten Gegenspannung U_G gemessen wird.

1 Theorie

Im Laufe der Jahrhunderte entwickelte sich die Vorstellung des Lichtes und dazugehörige Theorien basierend auf durchgeführten Versuchen. Beispielsweise ließen sich mit der Wellentheorie des Lichtes auftretende Interferenz- und Beugungserscheinungen erklären. Schwachstellen dieser Theorie wurden durch die Entdeckung des Photoeffekts aufgezeigt, dessen Aufbau in Abbildung 1 schematisch dargestellt ist.

Betrachtet werden zwei sich im Vakuum befindliche Elektroden. Die Oberfläche der Photokathode ist mit einer Metallegierung bedampft. Die Anode besitzt relativ zur Kathode ein positives Potential. Wird die Kathode mit Licht der Frequenz ν bestrahlt lässt sich über ein angeschlossenes Amperemeter ein geringer Strom I messen. Dieser sogenannte Photostrom wird durch Elektronen hervorgerufen. Diese werden durch das Licht aus der Photokathode herausgelöst und von der Anode aufgenommen.

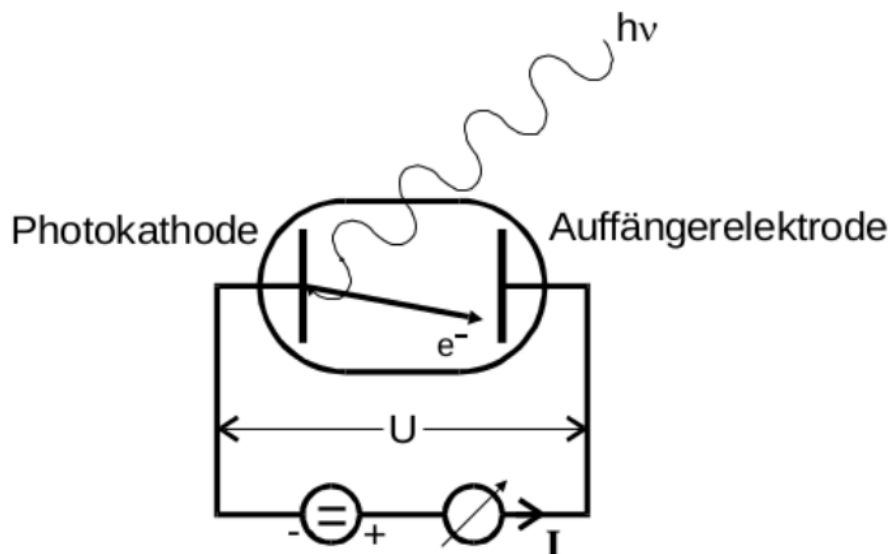


Abbildung 1: Schematischer Aufbau der Apparatur zur Untersuchung der Photoeffekts.

Die wichtigen experimentellen Ergebnisse lassen sich in drei Punkten zusammenfassen.

- Die kinetische Energie E_{kin} der Elektronen welche die Anode erreichen ist unabhängig von der Lichtintensität, wird aber durch die Frequenz des Lichtes stark beeinflusst.
- Die Anzahl der herausgelösten Elektronen ist proportional zur Lichtintensität.
- Unterhalb einer kathodenmaterialabhängigen Grenzfrequenz ν_{Grenz} werden keine Elektronen aus der Photokathode herausgeschlagen.

Die Entdeckung des Photoeffekts ließ sich damals jedoch nicht mit der bereits vorhandenen Theorie vereinbaren. Grund dafür war die Annahme, dass die Energie der Strahlung gleichmäßig über die Wellenfläche verteilt ist. Die daraufhin erdachte Korpuskulartheorie des Lichtes liefert einen Ansatz, der bis heute eine Erklärung des Effekts darstellt. Korpuskular- und Wellenmodell werden verbunden durch die Quantenelektrodynamik, welche beide Theorien als Grenzfälle mit einschließt. Die Korpuskulartheorie postuliert, dass die Energie des Lichtes quantisiert ist und durch Photonen – nahezu masselose Teilchen – transportiert wird. Nach EINSTEIN, der 1905 die Erklärung des Photoeffekts aufstellte, sind diese Photonen gleich dem PLANCKschen Wirkungsquantum h . Mit dieser Annahme lassen sich die vorherig genannten Resultate erklären.

- Die Photonen bewegen sich mit der Lichtgeschwindigkeit c und tragen die Energie $E = h\nu$.
- Jedes auf die Kathode treffende Photon kann höchstens ein Elektron aus der Oberfläche herauslösen. Je größer die Intensität, d.h. die Anzahl der Photonen ist, desto mehr Elektronen werden herausgelöst.
- Trifft ein Photon bestimmter Energie auf die Kathode teilt sich die Energie auf in die Austrittsarbeit W_K und die kinetische Energie E_{kin} der Elektronen. W_K muss von den Elektronen geleistet werden um das Kathodenmaterial überhaupt verlassen zu können. Ist die Energie des Photons aufgrund einer niedrigen Frequenz zu gering um den Elektronen das Verlassen der Anode zu ermöglichen treffen keine Elektronen auf die Anode. Dies hat zur Folge, dass für den Photostrom $I = 0 \text{ V}$ gilt.

Die kinetische Energie E_{kin} der schnellsten Elektronen wird über die Gegenfeldmethode bestimmt. Dazu wird die Gegenspannung U_G so lange variiert, bis der gemessene Photostrom I gegen Null geht. Spätestens, wenn die Beziehung

$$e_0 U_G = \frac{1}{2} m v_{\text{max}}^2 \quad (1)$$

erfüllt ist verschwindet der Stromfluss. Die Energie der Elektronen setzt sich zusammen aus

$$h\nu = e_0 U_G + W_K. \quad (2)$$

In der Realität tritt jedoch kein unvermittelter Stromabfall bei $U = U_G$ auf. Schon für $U < U_G$ fällt der Strom ab. Grund dafür ist, dass die sich in der Metalloberfläche befindlichen Elektronen nicht alle die gleiche Energie besitzen. Laut der FERMI-DIRAC-Statistik erstreckt sich die Energie der Leitungs- und Valenzelektronen in Feststoffen von Null bis zur FERMI-Energie ζ , die durchaus in der Größenordnung einiger eV liegen kann. Bei höheren Temperaturen gilt sogar $E_e > \zeta$.

2 Durchführung

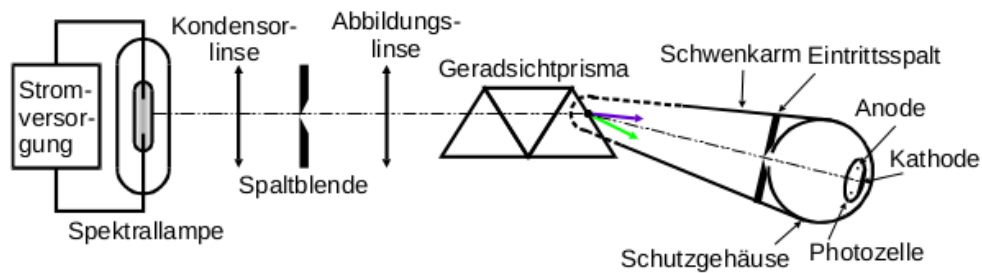


Abbildung 2: Anordnung der optischen Elemente zur Untersuchung des Photoeffekts.

In Abbildung 2 ist der gesamte Versuchsaufbau dargestellt. Es werden optische Elemente genutzt um die Intensität des auf die Photozelle fallenden Lichtes zu maximieren. Durch geringe Variation der verschiedenen Abstände kann die Anordnung so verändert werden, dass dies gut gelingt. Verwendet wird eine Hg-Spektrallampe. Ihr Licht wird durch eine Kondensorlinse gebündelt und auf einen schmalen Spalt geworfen. Bestenfalls befindet sich dieser im Brennpunkt des durch die Linse gebeugten Lichts. Anschließend passiert das Licht Abbildungslinse und Geradsichtprisma. Das Prisma bricht das Licht in einzelne Spektrallinien auf. Auf einem Schwenkarm sitzt die Photozelle, deren Aufbau in Abbildung 3 zu sehen ist. Innerhalb der Photozelle befindet sich in einem evakuierten

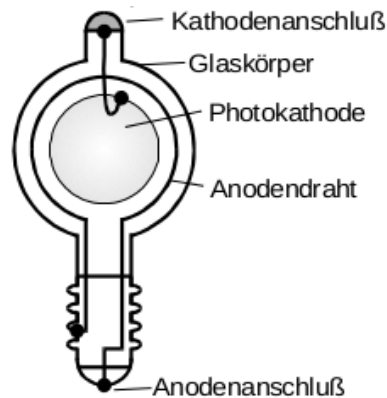


Abbildung 3: Anordnung der optischen Elemente zur Untersuchung des Photoeffekts.

Glasgefäß die im Versuch mit Licht bestrahlte Photokathode. In wenigen Millimetern Abstand parallel zur Kathode verweilt die Anode, realisiert durch einen Draht ring welcher die Kathode umgibt. Der Photosrom I wird über ein empfindliches Picoamperemeter gemessen; die Spannung U_G kann über ein Digitalvoltmeter variiert werden. Das Schaltbild entspricht Abbildung 4.

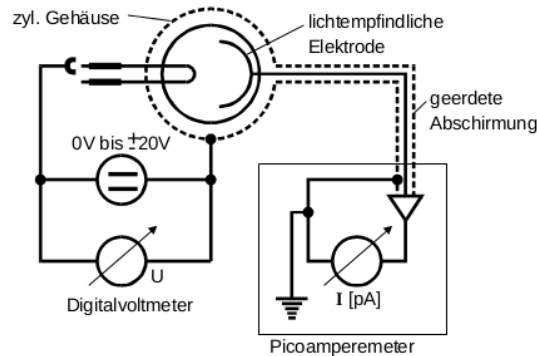


Abbildung 4: Anordnung der optischen Elemente zur Untersuchung des Photoeffekts.

Es werden für fünf verschiedene Spektrallinien mindestens 15 Wertepaare (U_G, I) aufgenommen, indem die Gegenspannung in regelmäßigen Abständen vergrößert und I abgelesen wird. Vor dem eigentlichen Messbeginn wird bei ausgeschalteter Gegenspannung die Photozelle so ausgerichtet, dass die Intensität des Lichts der gewählten Spektrallinie möglichst groß ist. Danach wird U_G grob so bestimmt, dass $I = 0$ V gilt. Alsdann kann mit der eigentlichen Messung begonnen werden. In einer weiteren Messung wird für die gelbe Spektrallinie der Photostrom über einen Bereich von $-19 \text{ V} \leq U_G \leq 19 \text{ V}$ ausgemessen.

3 Auswertung

3.1 Bestimmung des Planckschen Wirkungsquantum

Die Messwerte sind in Tabelle 2 aufgetragen. In Abbildungen 6 bis 10 sind die gemessenen Bremsspannungen U_B gegen die Wurzel des Photostroms I_0 aufgetragen. Die Parameter für die Ausgleichsgeraden werden nach den Formeln (3) bestimmt.

Es ergeben sich die Fitparameter

Weiter werden die y-Achsenabschnitte der Fits gegen die Lichtfrequenz ν in Abbildung 5 aufgetragen. Für die Umrechnung von Wellenlänge λ und ν gilt

$$c_0 = \lambda \cdot \nu. \quad (4)$$

$$\Delta = N \sum x^2 - \left(\sum x \right)^2, \quad (3a)$$

$$a_{\text{Reg}} = \frac{N \sum x \cdot y - \sum x \cdot \sum y}{\Delta}, \quad (3b)$$

$$b_{\text{Reg}} = \frac{\sum x^2 \cdot \sum y - \sum x \cdot \sum x \cdot y}{\Delta}, \quad (3c)$$

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{\sum (y - a_{\text{Reg}} \cdot x - b_{\text{Reg}})^2}{N - 2}}, \quad (3d)$$

$$\sigma_a = \sigma_y \sqrt{\frac{N}{\Delta}}, \quad (3e)$$

$$\sigma_b = \sigma_y \sqrt{\frac{\sum x^2}{\Delta}} \quad (3f)$$

Lichtspektrallinie		Fitparameter	
Farbe	Wellenlänge/ nm	Steigung/ V/nm	Abschnitt/ V
rot	640	−0,25	0,77
gelb	578	−0,04	0,34
grün	546	−0,03	0,44
violett	435,8	−0,04	0,91
ultraviolett	366	−0,08	1,47

Tabelle 1: Fitparameter der Abbildungen 6 bis 10

Gemäß der EINSTEINSchen Formel (??)

$$\underbrace{U}_{y_{\text{lin}}} = \underbrace{\frac{h}{e}}_{a_{\text{lin}}} \cdot \underbrace{\nu}_{x_{\text{lin}}} - \underbrace{\frac{W_A}{e}}_{b_{\text{lin}}} \quad (5)$$

$$(6)$$

werden aus den Fitparametern das Plancksche Wirkungsquantum und die Austrittsarbeit bestimmt.

Es folgt

$$\frac{h}{e} = (3,38 \pm 0,64) \cdot 10^{-15} \text{ Wb} \quad \text{und} \quad \frac{W_A}{e} = (-1,41 \pm 0,36) \text{ V}. \quad (7)$$

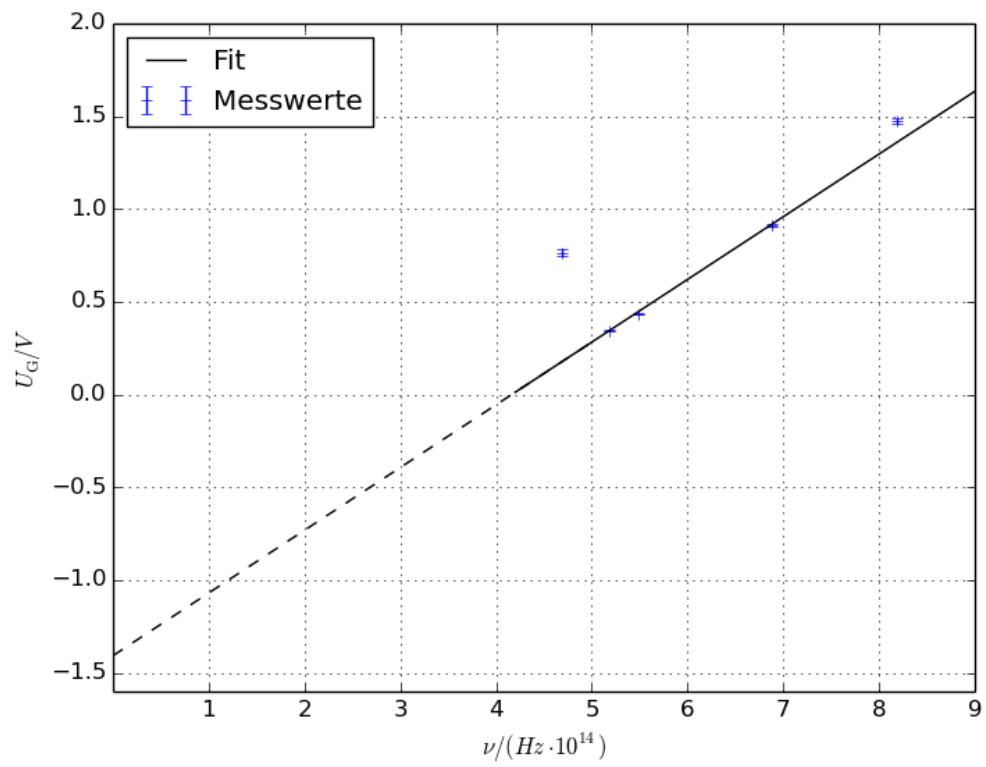


Abbildung 5: Maximale Bremsspannung gegen die Lichtfrequenz.

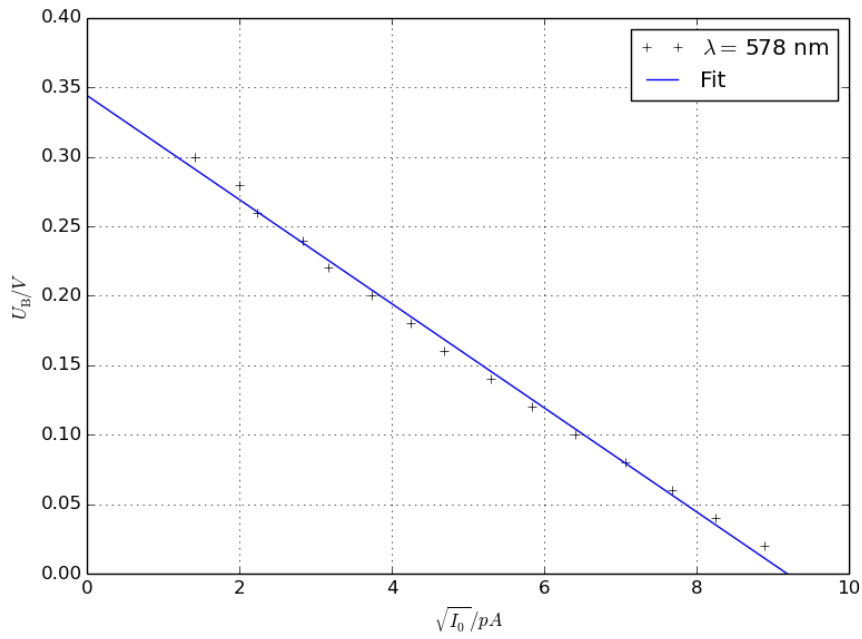


Abbildung 6: Gemessene Photostromstärken in Abhängigkeit von den Bremsspannungen, Messung bei gelber Spektrallinie.

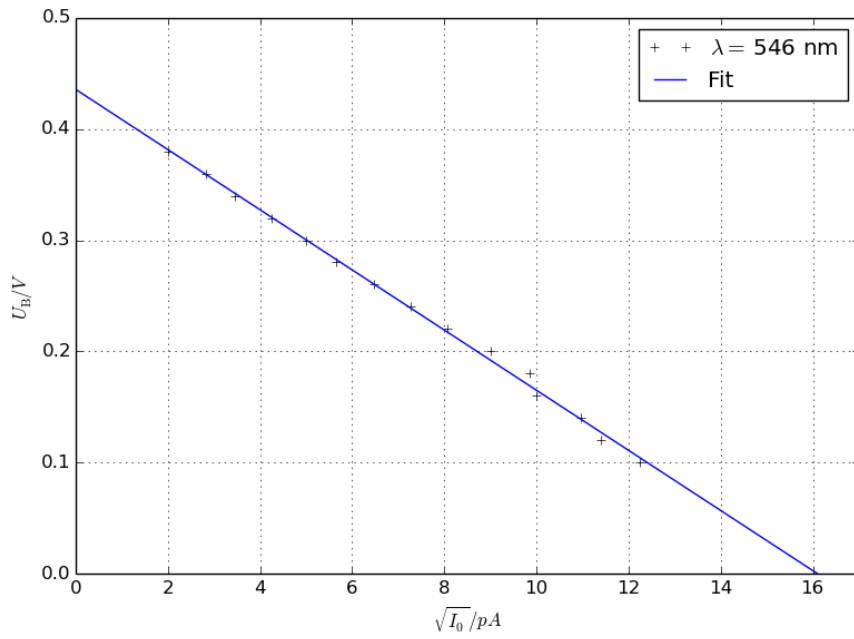


Abbildung 7: Gemessene Photostromstärken in Abhängigkeit von den Bremsspannungen, Messung bei grüner Spektrallinie.

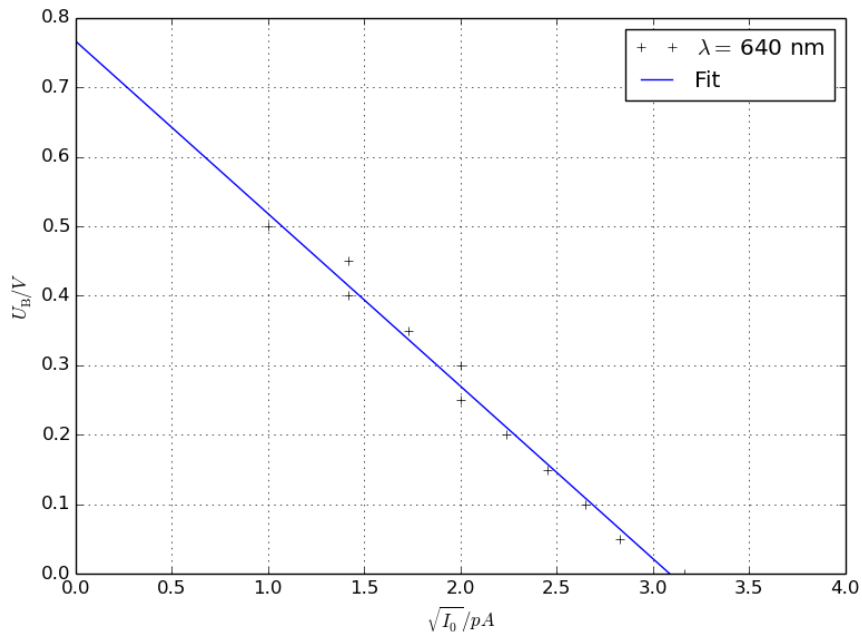


Abbildung 8: Gemessene Photostromstärken in Abhängigkeit von den Bremsspannungen, Messung bei roter Spektrallinie.

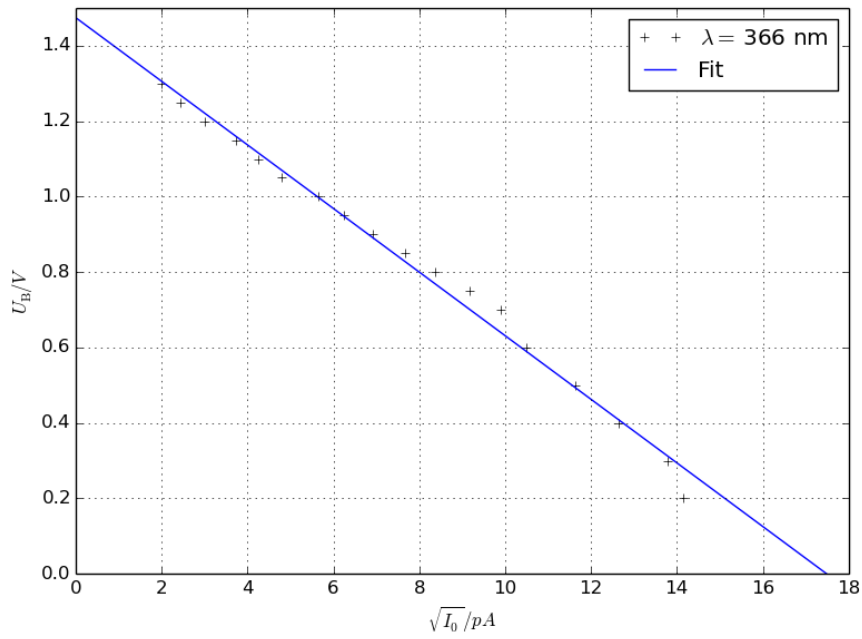


Abbildung 9: Gemessene Photostromstärken in Abhängigkeit von den Bremsspannungen, Messung bei UV-Spektrallinie.

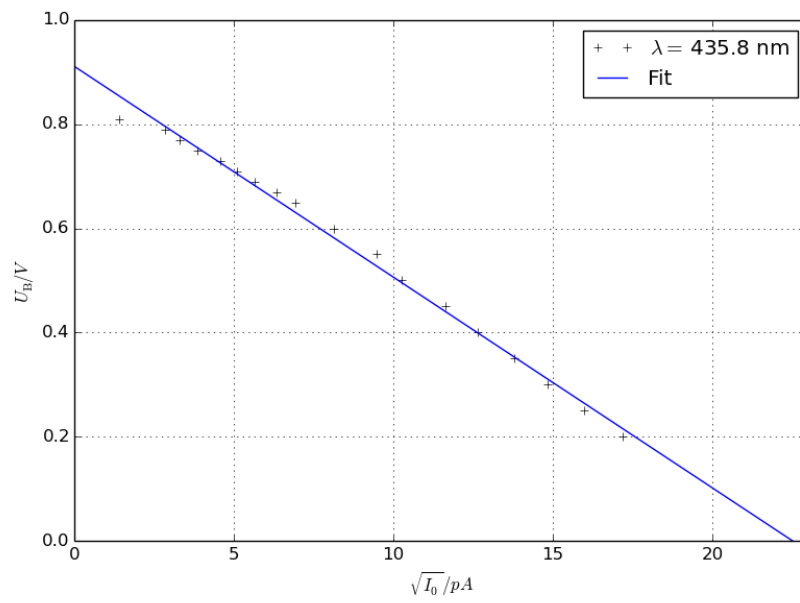


Abbildung 10: Gemessene Photostromstärken in Abhängigkeit von den Bremsspannungen, Messung bei violetter Spektrallinie.

UV-Spektrallinie $\lambda = 266,3 \text{ nm}$		Violette Spektrallinie $\lambda = 435,8 \text{ nm}$		Grüne Spektrallinie $\lambda = 546 \text{ nm}$		Gelbe Spektrallinie $\lambda = 578 \text{ nm}$		Rote Spektrallinie $\lambda = 640 \text{ nm}$	
U_B / V	I_0 / pA	U_B / V	I_0 / pA	U_B / V	I_0 / pA	U_B / V	I_0 / pA	U_B / V	I_0 / pA
0,20	200	0,20	295	0,10	150	0,02	79	0,00	10
0,30	190	0,25	255	0,12	130	0,04	68	0,05	8
0,40	160	0,30	220	0,14	120	0,06	59	0,10	7
0,50	135	0,35	190	0,16	100	0,08	50	0,15	6
0,60	110	0,40	160	0,18	97	0,10	41	0,20	5
0,70	98	0,45	135	0,20	81	0,12	34	0,25	4
0,75	84	0,50	105	0,22	65	0,14	28	0,30	4
0,80	70	0,55	90	0,24	53	0,16	22	0,35	3
0,85	59	0,60	66	0,26	42	0,18	18	0,40	2
0,90	48	0,65	48	0,28	32	0,20	14	0,45	2
0,95	39	0,67	40	0,30	25	0,22	10	0,50	1
1,00	32	0,69	32	0,32	18	0,24	8	0,506	0
1,05	23	0,71	26	0,34	12	0,26	5		
1,10	18	0,73	21	0,36	8	0,28	4		
1,15	14	0,75	15	0,38	4	0,30	2		
1,20	9	0,77	11	0,397	0	0,32	0		
1,25	6	0,79	8						
1,30	4	0,81	2						
1,345	0	0,83	0						

Tabelle 2: Die gemessenen Bremsspannungen U_B und Photoströme I_0 in Abhängigkeit von der Wellenlänge λ des Lichtes.

3.2 Messung des Photostromes bei hohen Spannungen

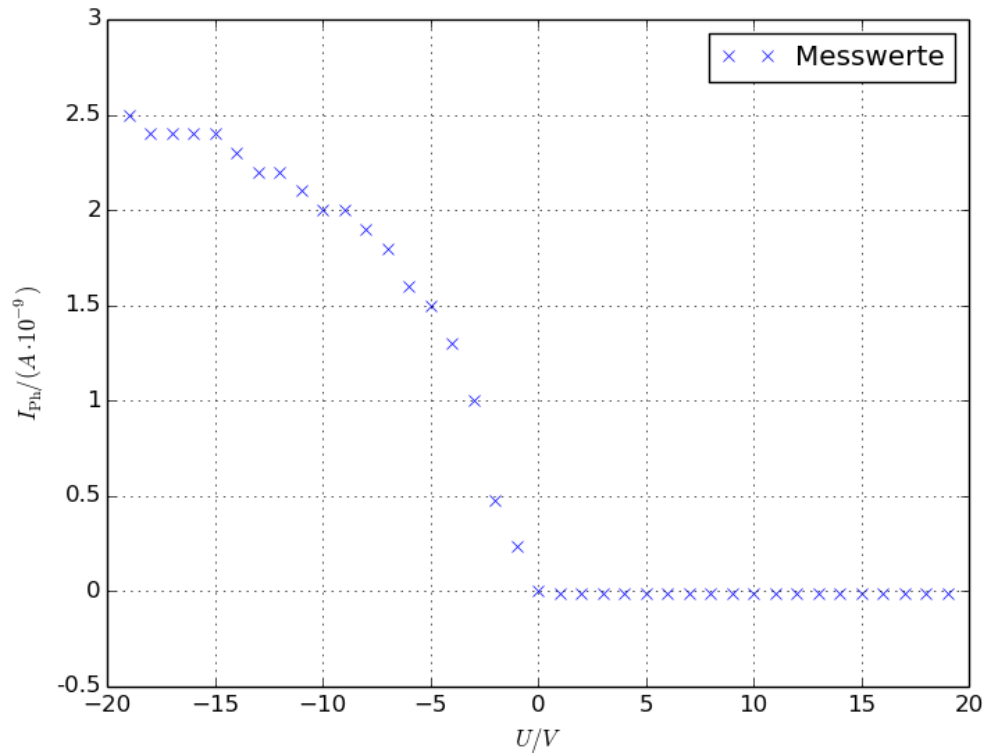


Abbildung 11: Gemessener Photostrom in Abhängigkeit von der angelegten Spannung.

Wird keine Spannung angelegt, so beträgt der Photostrom 80 pA. In der vorhergegangenen Messung wurde festgestellt, dass eine Bremsspannung von etwa 0,34 V ausreichend ist, um den Photostrom vollständig zu unterdrücken. Wird die Bremsspannung weit über diese Grenze angelegt, so stellt sich ein geringer, negativer Photostrom ein. Dieser Strom nimmt bereits für geringe Spannungen den Grenzwert $I_0 = -0,01 \text{ nA}$ an und reagiert nicht auf weitere Erhöhung der Spannung.

Wird eine negative Spannung angelegt, sodass die Photokathode negativ und die Anode positiv geladen ist, werden Photoelektronen beschleunigt. Wird diese beschleunigende Spannung erhöht, so wächst der Photostrom an. Das Wachstum des Stromes ist für Spannungen bis etwa 5 V linear und geht für höhere Spannungen gegen einen Grenzwert von etwa 2,5 nA.

4 Diskussion

4.1 Fehleranalyse

Als optisches Experiment wird vorzugsweise dunkle Umgebung gefordert. Weiter sind wegen der geringen Stromstärken empfindliche Messgeräte erforderlich, deren Kabel von Störfeldern befreit sein müssen.

Da ein Experimentieren unter Ausschluss sämtlicher Fremdlichtquellen nicht möglich ist, konnte der dadurch entstandene Fehler gering gehalten werden, indem Fremdlicht konstant gehalten wird. Der Einfluss von Störfeldern wurden durch die Wahl von Koaxialkabeln verringert.

4.2 Bestimmung des Planckschen Wirkungsquantums

Die zu bestimmende Größe, h/e , wurde in Abschnitt ?? zu

$$\frac{h}{e} = (3,38 \pm 0,64) \cdot 10^{-15} \text{ Wb} \quad (8)$$

bestimmt. Der Mittelwert weicht von der Literaturangabe dieses Wertes, $h/e = 4,13 \cdot 10^{-15} \text{ Wb}$ [2],[3], um 18.3 % ab. Der Literaturwert liegt in der Nähe der Standardabweichung des Messwertes. Das Ergebnis zeigt die Präzision des Experimentes an.

4.3 Erklärung des Stromverlaufes bei Abbremsung

In Abschnitt 3.2 wird das Verhalten der Photodiode bei hohen Spannungen aufgezeigt. Werden stark-bremsende Spannungen angelegt, so stagniert der Photostrom bei einem festen, geringen Wert. Dies wird durch positive Spannungen bis etwa 20 V realisiert. Der Stromfluss ist der Richtung des unbeeinflussten Photostroms entgegengesetzt.

Zur Erklärung wird die Photokathode herangenommen. Sie besteht aus einer dünnen, metallischen Schicht, welche bei Betriebstemperatur zum Teil verdampft. Im evakuierten Glaskörper der Photodiode befindet sich daher ein Aerosol aus Kathodenmaterial, das imstande ist, geringe Ströme zu übertragen. Diese Ströme sind auf die hohe Spannung zwischen Kathode und Anode zurückzuführen, deren Ausgleich über das Gas geschieht. Dass der negative Strom bereits für kleine Spannungen erreicht wird, zeigt, dass die Anode nur ein schwaches Gegenfeld aufbaut. Die Austrittsarbeit der Anode scheint gering. Für Spannungen größer als 20 V wird die Zerstörung der Photodiode durch Funkenschlag erwartet.

4.4 Erklärung des Stromverlaufes bei Beschleunigung

Wird die Polung der Spannung gedreht, sodass die Photokathode negativ und die Anode positiv geladen ist, werden Photoelektronen beschleunigt. In Abschnitt 3.2 wird beschrieben, dass der Photostrom mit steigender Spannung wächst und einen Grenzwert erreicht. Zur Erklärung des Grenzwertes wird der Einfluss von Intensität auf den Photostrom beschrieben.

Der Betrag des Photostromes ist abhängig von der Intensität des Lichtes; je höher die Lichtintensität ist, desto größer ist der Photostrom. In Abwesenheit von Photonen werden nur geringe Mengen von Elektronen aus der Kathode gelöst (vgl. EDISON-RICHARDSON-Effekt), der Photostrom wird trotz der beschleunigenden Spannung im Wesentlichen von den Photonen ausgelöst. Da die Intensität des Lichtes ein Maß für die Anzahl der Photonen ist, ist mit fester Intensität des einstrahlenden Lichtes ein Grenzwert für den Photostrom gegeben. Die Lichtfrequenz hat keinen Einfluss auf den Sättigungswert.

Der Sättigungswert wird asymptotisch erreicht, da die von Photonen ausgelösten Elektronen – anders als bei stimulierter Emission – keine vorgegebene Richtung haben. Die gesamte kinetische Energie eines ausgelösten Elektrons besteht aus der Energie E_{kin} , die nach Abzug der Austrittsarbeit von der Photoenergie $h\nu$ den Elektronen zur Verfügung steht, und der Energie, die das Elektron nach der FERMI-DIRAC-Statistik besitzt. Die kinetische Energie der Elektronen ist unregelmäßig verteilt. Dieser Sachverhalt erklärt ebenfalls das nicht-abrupte Abbrechen des Photostromes in der Nähe von U_G .

Um den Sättigungswert bei geringen Spannungen zu erreichen, kann der Aufbau der Photodiode angepasst werden. Hierzu muss die bestrahlte Fläche der Kathode optimal sein und die Absorption des Lichtes von dem Glaskörper klein gehalten werden. Der Sättigungswert der in diesem Experiment verwendeten Photodiode zeigt, dass die Intensität des Lichtes hoch und die Photokathode optimal beleuchtet wurde.

Literatur

- [1] TU Dortmund. *Versuch V500: Der Photoeffekt*. URL: <http://129.217.224.2/HOME PAGE/PHYSIKER/BACHELOR/AP/SKRIPT/V500.pdf> (besucht am 20.04.2015).
- [2] NIST: National Institute of Standards und Technology. *e: elementary charge*. URL: <http://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?e> (besucht am 25.04.2015).
- [3] NIST: National Institute of Standards und Technology. *h: Planck constant*. URL: <http://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?h> (besucht am 25.04.2015).