

Physikalisches Anfängerpraktikum - P2

Photoeffekt

P2-65

Auswertung von
Tobias Renz und **Raphael Schmager**

Gruppe: **Do-28**

Durchgeführt am 3. Mai 2012



Versuch P2-63,64,65:

Photoeffekt

Raum F1-8

Mit diesem Versuch wird unter Verwendung einer Alkali-Vakuumphotозelle das Phänomen Photoeffekt näher untersucht und das Verhältnis der Naturkonstanten h und e (Plancksches Wirkungsquantum und Elementarladung) bestimmt. Wegen der sehr kleinen Photoströme (Messungen im nA-Bereich), und weil sich die Photozelle weder wie eine ideale Spannungsquelle noch wie eine ideale Stromquelle verhält, funktionieren die Messungen nicht mit einem gewöhnlichen Multimeter. Stattdessen muß ein empfindlicher Meßverstärker mit sehr hohem Eingangswiderstand für Spannungsmessungen (hier um $10^{14} \Omega$) benutzt werden. Für ein solches Gerät ist die Bezeichnung Elektrometer üblich, ein Name, der ursprünglich nur für das elektrostatische Elektrometer verwendet wurde, welches hier in der ersten Aufgabe ebenfalls zum Einsatz kommt.

- Hinweise:**
- 1) Spannungen über 50V können lebensgefährlich sein;
 - 2) Die Quecksilber-Lampe (Hg-Lampe) emittiert auch im UV-Bereich;
 - 3) Schalten Sie die Lampe und das Elektrometer frühzeitig ein, damit die Geräte stabil laufen. Die Lampe muß nach dem Ausschalten einige Zeit abkühlen, bevor sie wieder eingeschaltet werden kann. Also nicht ausschalten!
 - 4) Beim Messen stören Bewegungen, insbesondere das Reiben der Füße auf dem Boden. Aber auch die winzigen Umladeströme bei Veränderung der Kapazitäten durch Lageveränderung von Personen und Gegenständen bewirken Ausschläge am Elektrometer. Textilien können sich elektrostatisch aufladen.
 - 5) Interferenzfilter sollen von der Spiegelseite zur Farbglasseite hin durchstrahlt werden.

Aufgaben:

1 Demonstrieren Sie den Hallwachs-Effekt mit klassischen Mitteln: Auf den isolierten Anschluß eines elektrostatischen Elektrometers wird eine frisch geschmirgelte (warum?) Zinkplatte gesteckt. Das Elektrometergehäuse wird mit dem Masseanschluß eines Hochspannungsgerätes verbunden, die Zn-Platte kurzzeitig mit dem Minus-Anschluß (ca. 2kV für Vollausschlag). Der Ausschlag ändert sich nur extrem langsam. Dann beleuchten Sie die Zn-Platte mit der Quecksilberdampf Lampe. Der Ausschlag geht etwas rascher, aber immer noch sehr langsam zurück. Wiederholen Sie das Experiment, nachdem Sie in der Nähe der beleuchteten Zn-Platte eine positiv geladene Metallelektrode (an den Plus-Anschluß des Hochspannungsgerätes angeschlossen) aufgestellt haben. Jetzt entlädt sich das Elektrometer samt beleuchteter Zn-Platte rasch. - Erklären Sie die beobachteten Effekte.

2 Elektrometereigenschaften: Erläutern Sie zunächst die Begriffe: Ideale Spannungs-/Strom-Quelle sowie Volt-/Amperemeter. Wie passt die Vakuum-Photozelle in diese Begriffswelt? Bestimmen Sie den Innenwiderstand des Elektrometers (Spannungsmessung, Verstärkungsfaktor=1) durch Anlegen einer definierten Spannung (z.B. 5V), zunächst direkt, dann über einen großen Vorwiderstand (0.1 / 1 / 10 G Ω).

3 Photoeffekt und h/e-Bestimmung

Überprüfen Sie den Aufbau des optischen Systems zwischen Hg-Dampf Lampe und Photozelle: Die 65 mm-Linse steht dicht vor der Lichtaustrittsöffnung der Hg-Lampe; das momentane Interferenzfilter befindet sich unmittelbar vor dem Lichtschutzkollimator der Photozelle, um Einstreuung von Umgebungslicht zu minimieren; die Irisblenden dienen der Schonung der Photokathode und befinden sich je nach Bauart entweder unmittelbar am Kollimator oder mitten im Strahlengang. Ein Graufilter kann mittels eines Klemmenhalters leicht in den Strahlengang eingebracht werden.

Warum wird eine Hg-Lampe verwendet? Würde der Versuch auch mit einer wohnzimmertauglichen Halogen-Lampe gelingen?

Hinweis: Den Einfluss des Umgebungslichts - insbesondere bei den großen Wellenlängen - müssen Sie unbedingt durch Variation der Verdunklung überprüfen.

Bevor Sie mit dem Elektrometer messen können, müssen Sie einen Nullabgleich durchführen. Dies geschieht durch festhalten des entsprechenden Knopfes und Regelung mit den beiden Potentiometern grob/fein.

Am besten gleichen Sie das Gerät beim Verstärkungsfaktor $V=10^2$ ab, dann ist es auch für die weniger empfindlichen Faktoren bereit.

3.1 Messen Sie bei maximaler Lichtintensität für die Wellenlängen $\lambda = 360, 400, 440, 490, 540$ und 590 nm die Klemmenspannungen der Photozelle. Die Filter befinden sich in dieser Reihenfolge in den Slots #1-#6 des Filtrerrads. Messen Sie mindestens dreimal für jede Wellenlänge indem Sie das Filtrerrad von Slot-#6 einfach weiter auf Slot-#1 drehen. So erhalten Sie ein Gefühl für die Reproduzierbarkeit der Messung. Prüfen Sie (qualitativ z.B. mit Irisblende), ob diese Spannungen intensitätsunabhängig sind. Was beobachten Sie bei abgeschotteter Beleuchtung?

Berechnen Sie die Parameter der Ausgleichsgeraden $U = a \cdot \lambda^{-1} + b$ und daraus das Verhältnis h/e . Welche Bedeutung hat der Parameter b in dieser Gleichung?

3.2 Messen Sie für dieselben Wellenlängen λ und wieder bei maximaler Lichtintensität die Gegenspannungen $U_{U_k=0}$, die Sie anlegen müssen, damit die Klemmenspannung auf Null sinkt. (Spannungskompensation). Schliessen Sie hierzu die Spannungsquelle (Batterie) gegenpolig in den Stromkreis (wie in Schaltung 2, aber noch ohne Vorwiderstand). Bestimmen Sie wie in der vorigen Aufgabe das Verhältnis h/e .

3.3 Messen Sie für die Wellenlänge 400 nm den Photostrom in Abhängigkeit von der angelegten Spannung. Schließen Sie hierzu den $100 \text{ M}\Omega$ Arbeitswiderstand parallel zum Meßeingang des Elektrometers (Schaltung 2; Hinweis: die 4mm-Massebuchse und der BNC-Aussenleiter liegen auf gleichem Potential). Der Strom berechnet sich dann aus der Meßspannung zu $I = U_{\text{mess}}/RV$; wobei V der eingestellte Verstärkungsfaktor ist.

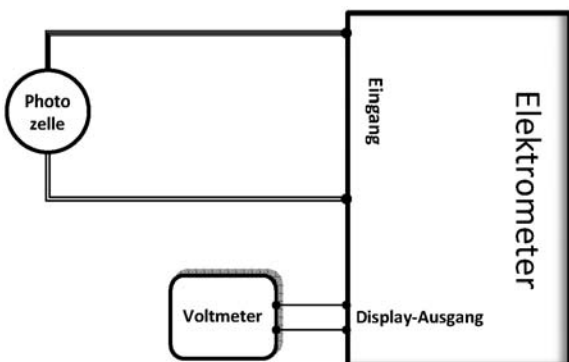
Zweckmäßige Spannungsintervalle: -3 V bis $-0,5 \text{ V}$: $\Delta U = 0,1 \text{ V}$; $-0,5 \text{ V}$ bis 3 V : $\Delta U = 0,5 \text{ V}$; 3 V bis 9 V : $\Delta U = 1 \text{ V}$. Messen Sie bei maximaler Lichtintensität. Untersuchen Sie auch hier den Einfluss von Streulicht auf den gemessenen Photostrom. Messen und berücksichtigen Sie nötigenfalls den 'Dunkelstrom'.

Zeichnen Sie den Bereich $-2,5 \text{ V}$ bis 0 V zusätzlich in ein zweites Diagramm mit gedehnten Maßstäben.

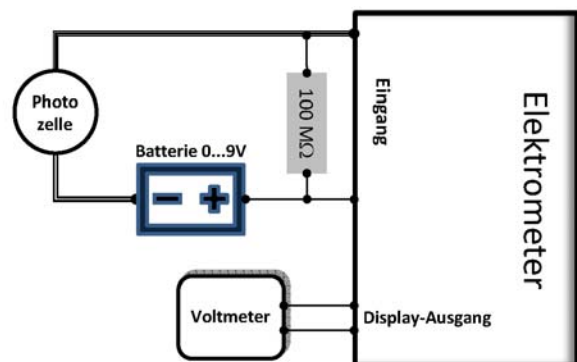
Diskutieren Sie qualitativ die Ursachen (z.B. Geometrie der Photozelle, Kathodenmaterial, Anodenmaterial, Lichtintensität, Energien und Anzahlen der austretenden Photoelektronen, Raumladung, Elektronenemission von der K-kontaminierten Anode durch Streulicht) für die beobachtete Strom-Spannungs-Abhängigkeit des Photostroms.

3.4 Wiederholen Sie die 360-nm Messung der vorherigen Aufgabe, wobei Sie diesmal das Ihrer Versuchsanordnung zugeordnete Graufilter verwenden. Bestimmen Sie anhand der Intensitätsmaxima den Abschwächfaktor des Graufilters. Zeichnen Sie die Messwerte in diesselben Diagramme von Aufg. 3.3 dazu. Vergleichen Sie die Stromnulldurchgänge beider Messungen.

3.5 Bestimmen Sie nun analog zu Aufgabe 3.2 für alle Wellenlängen die Gegenspannungen $U_{I=0}$, die Sie anlegen müssen, damit der resultierende Photostrom gerade den Wert Null hat. Bestimmen Sie wieder das Verhältnis h/e . Worin besteht der Unterschied dieser Messung zu 3.2?



Schaltung 1: Spannungsmessung



Schaltung 2: Strommessung bei geregelter Gegenspannung mit Batterie.

Zubehör:

Statisches Elektrometer;
Zn-Platte und Schmirgelpapier;
Metallstabelektrode mit Tonnenfuß;
Hochspannungsgerät (symmetrischer Ausgang, 0 bis 3,5 kV sowohl positiv als auch negativ gegen Masse, hoher Innenwiderstand, Berührung der Anschlüsse ungefährlich);
Hochdruck-Quecksilberdampfampe mit Vorschaltdrossel;
drei Sammellinsen zur optischen Abbildung - $f = 65 / 100 / 200$ mm, $d = 32$ mm;
Halter für sechs Interferenzfilter;
sechs Interferenzfilter vom Perot-Fabry-Typ $\lambda = (360 / 400 / 440 / 490 / 540 / 590)$ nm, Halbwertsbreite jeweils 10 nm, Durchlässigkeit im Maximum jeweils 45%;
Zero-Aperture-Irisblende (unterschiedlich bei den drei Versuchsaufbauten: entweder manuell, oder als Photoverschluß mit Drahtauslöser oder elektrisch zu betätigen);
Vakuumphotozelle mit vollflächig aufgedampfter Kaliumkathode und ringförmiger Platin-Rhodium-Drahtanode, Kathodenanschluß über Koaxialkabel mit BNC-Stecker, Anodenanschluß über Doppelleitung mit Bananensteckern;
Universal-Meßverstärker (Phywe) in Elektrometerfunktion;
Standard-Multimeter zur Spannungsanzeige am Elektrometerausgang (0-10V);
BNC-T-Stück und 100 M Ω Arbeitswiderstand zur Strommessung;
potentialfreie Gleichspannungsquelle (Batterie) 0 bis 9 V, $R_i < 500 \Omega$, Einstellgenauigkeit 0,01 V;
Kästchen mit Widerständen, ca.100 M Ω , ca.1 G Ω , ca. 10G Ω ;
Zeiss-Schiene mit Reitern;
Verbindungskabel

Stichworte: Plancksches Wirkungsquantum, Innerer/Äusserer Lichtelektrischer Effekt, Photozelle, Quecksilberspektrum, Bandpassfilter, Elektrometer

Literatur:

Bergmann, Schäfer: *Experimentalphysik*, Band III

Walcher: *Praktikum der Physik*

Hecht, Zajac oder Hecht: *Optics* oder *Optik*

Version: Feb. 12

Physikalisches Anfängerpraktikum - P2

Photoeffekt

P2-65

Versuchsvorbereitung von
Tobias Renz und **Raphael Schmager**

Gruppe: **Do-28**

Durchgeführt am 3. Mai 2012

0 Grundlagen

0.1 Der Photoeffekt

Durch seinen Versuch machte W.Hallwachs einen großen Fortschritt zur Klärung des sogenannten äußeren lichtelektrischen Effekt. Er entdeckte bei der Belichtung einer Metallplatte mit kurzwelligem Licht, dass die Metallplatte negative Ladungen abgibt und sich positiv auflädt. Die Platte wurde aber nur solange aufgeladen, bis die Anziehungskraft der Platte auf die negativen Ladungen groß genug war um diese zurückzuhalten. Die Platte kann sich also nur bis zu einem "Haltepotential" V_M aufladen. Später wurde dann bewiesen, dass es sich bei den negativen Ladungen um Elektronen handelt, die beim lichtelektrischen Effekt aus dem Metall gelöst werden.

0.2 Haltepotential

Um die Größe des Haltepotentials zu bestimmen, betrachtet man zwei Platten K und A. Die Platte A soll stets geerdet sein und das Potential V' von K kann variabel geändert werden. Die Kontaktpotentialdifferenz V_{KA} (Potentialdifferenz zwischen verschiedenen Materialien) kann nicht vernachlässigt werden, deshalb ergibt sich das Potential V zu:

$$V = V' + V_{KA} \quad (1)$$

Die Platte K wird nun geeignet belichtet und durch V' kann ein positives Potential angelegt werden, so dass nur die Elektronen deren kinetische Energie größer als die potentielle Energie eV ist, die Platte A erreichen. Die Ladungen die zur Platte A gelangen werden mit einem Galvanometer gemessen und man misst somit einen lichtelektrischen Strom.

Fängt man mit einem positiven Potential V an fließt zunächst kein Strom, erst wenn das Haltepotential ($V = V_M$) erreicht wird, setzt der Strom ein.

Durch dieses Experiment wird auch deutlich, dass Elektronen beim auslösen aus der Platte bereits eine von null verschiedene Geschwindigkeit besitzen. Wäre dies nicht der Fall, so könnten sie kein positives Potential überwinden.

Das Haltepotential ist abhängig vom Kathodenmaterial und von der Wellenlänge des Lichtes, aber unabhängig von der Strahlungsintensität.

0.3 Versagen der Wellentheorie

Die Resultate der aufgeführten Experimente lassen sich mit der Wellennatur des Lichtes nicht erklären.

Würde man annehmen, dass die Elektronen durch das elektrische Feld des Lichtes angeregt und zum Mitschwingen gebracht werden, würden sie bei genügend großer Amplitude aus dem Metall herausgelöst. Wäre dies der Fall wäre die kinetische Energie der Elektronen von der Intensität abhängig. Außerdem würde man dann erwarten, dass eine bestimmte Zeit vergeht, bis die Elektronen genügend Energie aufgenommen haben und sie ausgelöst werden. Dies wurde aber experimentell nicht gefunden.

Man benötigt nun eine Theorie um diese Experimente erklären zu können.

0.4 Plancksches Wirkungsquantum

Bevor Einsteins Theorie erläutert werden kann muss Plancks Postulat bekannt sein. Er kam zu der Entdeckung, dass Strahlung nicht kontinuierlich sein kann sondern aus Energiequanten besteht.

Planck postulierte dann, dass die Energie dieser Quanten proportional zur Frequenz des Lichtes ist:

$$E = h \cdot \nu \quad (2)$$

Die Konstante h (Plancksches Wirkungsquantum) beträgt:

$$h = 6,62606957 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} \quad (3)$$

0.5 Einsteins korpuskulare Theorie des Lichtes

Einstein machte 1905 folgende Annahmen:

- Monochromatisches Licht mit Frequenz ν besteht aus Lichtquanten (Photonen), die sich mit Lichtgeschwindigkeit bewegen und eine Energie $h\nu$ besitzen.
- Das Photon überträgt seine Energie an das Elektron in Form von Austrittsarbeit (P) und kinetische Energie des Elektrons.

Nach Einstein ergibt sich für den Photoeffekt folgende Energiebilanz:

$$h \cdot \nu = \frac{m_e v_m^2}{2} + P \quad (4)$$

schreibt man $P = e \cdot \Phi$ folgt:

$$h \cdot \nu = e \cdot V_m + e \cdot \Phi \quad (5)$$

Das Haltepotential ist somit eine lineare Funktion der Frequenz ν

$$V_m = \frac{h}{e} \cdot \nu - \Phi \quad (6)$$

Für $V_m = 0$ ergibt sich die sogenannte Grenzfrequenz ν_0 :

$$\nu_0 = \frac{e}{h} \cdot \Phi = \frac{P}{h} \quad (7)$$

Bei der Grenzfrequenz ist die Geschwindigkeit der Elektronen null. Unterhalb dieser Grenzfrequenz findet kein photoelektrischer Effekt statt.

0.6 Photozelle

Die Photozelle ist eine der wichtigsten Anwendungen des lichtelektrischen Effekts.

Die Empfindlichkeit γ wird als Verhältnis vom ausgelöstem Photostrom I zur eingestrahlt Leistung definiert:

$$\gamma = \frac{I}{P} \quad (8)$$

Auch wenn die Frequenz größer ist als die Grenzfrequenz löst nicht jedes Photon ein Elektron aus. Die Quantenausbeute μ wird deshalb als Verhältnis der ausgelösten Elektronen n_e zur Anzahl der eingestrahnten Photonen n_p definiert:

$$\mu = \frac{n_e}{n_p} \quad (9)$$

Die Photozelle besteht aus einer lichtempfindlichen Schicht (Photokathode) und einer Anode. Zwischen Anode und Kathode liegt eine Spannung so vor, dass die Photoelektronen zur Anode hin beschleunigt werden. Die Spannung muss so sein, dass alle Elektronen zur Anode gelangen und so der Sättigungsstrom I_s fließt. Denn nur dann besteht ein linearer Zusammenhang zwischen einfallendem Lichtstrom und Sättigungsstrom.

Mit einer Photozelle kann also die Intensität von Licht gemessen werden.

0.7 Innerer lichtelektrische Effekt

Der innere lichtelektrische Effekt tritt meistens bei Halbleitern auf. Im Gegensatz zum äußeren lichtelektrischen Effekt, wirkt dass Licht nicht auf freie Elektronen, sondern auf gebundene Elektronen. Die Elektronen werden dann aus ihrer festen Bindung freigesetzt, treten aber nicht aus der Oberfläche heraus, sondern erhöhen die Leitfähigkeit des Materials.

Diesen Effekt kann man für sogenannte Photowiderstände nutzen, die je nach Lichteinstrahlung ihren Widerstand verändern.

1 Aufgaben

1.1 Demonstration des Hallwachs-Effektes

Zu Beginn wird der Hallwachs-Effekt mit klassischen Mitteln durchgeführt. Dazu wird auf den isolierten Anschluss eines Elektrometers eine frisch geschmirgelte Zinkplatte gesteckt. Die Platte muss geschmirgelt werden um das vorhandene Zinkoxid auf der Platte zu entfernen. Das Zinkoxid hat keine freien Elektronen und verringert somit den Photoeffekt.

Nun wird das Elektrometer vollständig negativ geladen und der Rückgang des Zeigerausschlages beobachtet. Der Zeiger geht sehr langsam zurück, da die Luft durch die Luftfeuchtigkeit leicht leitend ist.

Nun wird die Zinkplatte mit einer Quecksilberdampf Lampe beleuchtet. Die höchste Frequenz des Quecksilberspektrums liegt im UV-Bereich und löst somit Elektronen aus der Zinkplatte heraus. Der Zeigerausschlag müsste deshalb schneller zurückgehen.

Plaziert man nun eine positiv geladene Metallelektrode, werden die Elektronen in Richtung dieser Platte beschleunigt und verlassen die Umgebung der Metallplatte sehr schnell. Der Zeigerausschlag müsste sehr schnell zurückgehen.

1.2 Elektrometereigenschaften

Eine **ideale Spannungsquelle** liefert unabhängig vom Ausgangsstrom eine konstante Spannung. Sie verringert sich nicht, wenn der Ausgangsstrom steigt.

Bei einer **realen Spannungsquelle** nimmt die Ausgangsspannung mit steigendem Laststrom ab. Eine reale Spannungsquelle besitzt einen Innenwiderstand R_i . Eine reale Spannungsquelle kann man durch eine mit einem in Reihe geschalteten Widerstand beschreiben.

Eine **ideale Stromquelle** liefert unabhängig von der an ihr abfallenden Spannung immer den gleichen Strom. Eine ideale Stromquelle besitzt einen unendlich hohen Innenwiderstand. Um eine **reale Stromquelle** zu beschreiben, schaltet man einer idealen Stromquelle einen Widerstand parallel.

Ein Volt-/Amperemeter dient zur Spannungs-/Strommessung und besitzt im ideal Fall einen Innenwiderstand der unendlich groß/null ist.

Eine Photozelle ist eine Art Stromquelle, da bei Lichteinfall ein Photostrom fließt.?!

Nun soll der Innenwiderstand des Elektrometers bestimmt werden, indem man eine definierte Spannung U_0 anlegt.

Zuerst legt man diese Spannung nur an das Messgerät an, die gesamte Spannung fällt nun am Innenwiderstand R_i des Elektrometers ab und man misst die angelegte Spannung ($U = U_0$). Nun schaltet man verschiedene Vorwiderstände R_x vor und misst liest die Spannung am Elektrometer ab. Da es sich um eine Reihenschaltung handelt teilt sich die Spannung auf die Widerstände auf.

Am Vorwiderstand R_x fällt nun die Differenz von U_0 und der gemessenen Spannung U am Elektrometer ab und man kann den Strom I durch die Reihenschaltung berechnen:

$$I = \frac{U_0 - U}{R_x} \quad (10)$$

Da in einer Reihenschaltung überall der gleiche Strom anliegt kann man nun R_i wie folgt berechnen:

$$R_i = \frac{U}{I} = R_x \cdot \frac{U}{U_0 - U} \quad (11)$$

1.3 Photoeffekt und h/e-Bestimmung

Zunächst muss der Aufbau wie auf dem Aufgabenblatt beschrieben überprüft werden. Man verwendet eine Hg-Lampe, weil die Lampe Licht mit Frequenz im UV-Bereich emittiert. Da die Energie der Photonen proportional zur Frequenz ist, reicht eine gewöhnliche Wohnzimmerlampe vermutlich nicht aus, da die Frequenz dieses Lichtes vermutlich unterhalb der Grenzfrequenz liegt und die Energie damit nicht ausreicht um die Austrittsarbeit aufzubringen.

Dann muss noch der Einfluss des Umgebungslichtes durch Variation der Verdunkelung überprüft werden.

Bevor nun das Experiment gestartet werden kann muss noch ein Nullabgleich durchgeführt werden.

1.3.1 Klemmenspannung der Photozelle für verschiedene Wellenlängen

Es soll für verschiedene Wellenlängen die Klemmspannung der Photozelle gemessen werden. Durch die Photonen werden Elektronen aus der Photokathode gelöst und gelangen zur Anode. Dadurch baut sich eine Spannung auf, die den Elektronen entgegen wirkt. Die Spannung steigt, bis sie so groß ist, dass die kinetische Energie nicht mehr ausreicht um dieses Feld zu überwinden. Nun gilt für die kinetische Energie der Elektronen folgender Zusammenhang.

$$E_{kin} = e \cdot U_0 \quad (12)$$

Nach Gleichung 4 gilt:

$$h \cdot \nu = E_{kin} + P \quad (13)$$

Wobei P die Austrittsarbeit ist. Ersetzt man nun E_{kin} mit $e \cdot U_0$ und formt nach U_0 um, erhält man folgende Beziehung:

$$U_0 = \frac{h}{e} \cdot \frac{c}{\lambda} - \frac{P}{e} \quad (14)$$

Nun trägt man die Spannung über die Wellenlänge auf und bestimmt die Parameter a und b der Ausgleichsgeraden:

$$U = \frac{a}{\lambda} + b \quad (15)$$

Wobei $a = -\frac{h \cdot c}{e}$ und $b = -\frac{P}{e}$

1.3.2 Bestimmung von h/e durch Anlegen einer Gegenspannung

Es wird nun eine Gegenspannung an die Photozelle angelegt und so eingestellt, dass die Klemmspannung für die verschiedenen Wellenlängen auf null sinkt. Diese Gegenspannung $U_{UK=0}$ ist dann so groß, dass keine Elektronen mehr zur Anode gelangen.

Die kinetische Energie der Elektronen ist dann:

$$E_{kin} = e \cdot U_{UK=0} \quad (16)$$

Es wird dann analog zur vorherigen Aufgabe vorgegangen und die Parameter a und b der Ausgleichsgeraden bestimmt.

1.3.3 Photostrom in Abhängigkeit der angelegten Spannung

Es soll für die Wellenlänge 400nm der Photostrom in Abhängigkeit der angelegten Spannung gemessen werden. Dazu wird der 100MΩ Widerstand parallel zum Messeingang des Elektrometers geschaltet. Der Strom berechnet sich dann folgendermaßen:

$$I = \frac{U_{mess}}{R \cdot V} \quad (17)$$

wobei V der eingestellte Verstärkungsfaktor ist.

Die Messung soll bei maximaler Lichtintensität durchgeführt werden und es soll der Einfluss des Streulichtes untersucht werden.

Auch wenn kein Licht auf die Photokathode trifft können trotzdem einige Elektronen ausgelöst

werden. Dies geschieht durch thermische Effekte. Dieser sogenannte Dunkelstrom soll auch gemessen werden und gegebenenfalls berücksichtigt werden.

Anschließend sollen noch qualitativ die beobachtete Strom-Spannungs-Abhängigkeit des Photostroms diskutiert werden.

Bei der Grenzspannung fließt kein Photostrom, da die Spannung gerade so groß wie die maximale kinetische Energie der Elektronen. Erhöht man nun die Spannung, so werden die austretenden Elektronen, die in alle Richtungen emittiert werden, zur Anode hin beschleunigt und der Photostrom steigt. Dieser steigt so lange, bis der Sättigungsstrom erreicht ist. Alle herausgelösten Elektronen gelangen nun zur Anode. Möchte man einen größeren Photostrom, so müsste man die Lichtintensität steigern.

Ist man unterhalb der Grenzspannung erwartet man trotzdem einen kleinen Strom, da durch Streulicht oder andere Effekte einige Elektronen aus der Anode herausgelöst werden und zur Kathode gelangen. Diese Effekte sind aber vom Anodenmaterial abhängig.

1.3.4 Photostrom mit Graufilter

Es soll die Messung der vorherigen Aufgabe wiederholt werden, mit dem Unterschied, dass dieses mal ein Graufilter verwendet werden soll. Der Graufilter dient zur gleichmäßige Abdunklung, also einer Intensitätsschwächung. Es sollen dann die Stromnulldurchgänge beider Messungen verglichen werden.

1.3.5 Messung von h/e über den Photostrom

Es soll nun analog zu Aufgabe 1.3.2 die Gegenspannung gemessen werden, bei welcher der Photostrom gerade den Wert null hat. Ist der Photostrom null gelangt gerade kein Elektron mehr zur Anode und das Verhältnis von h/e kann analog zu Aufgabe 1.3.2 aus der Ausgleichsgeraden bestimmt werden.

Der Unterschied zu 1.3.2 ist, dass die Gegenspannung so eingestellt wird, dass der Photostrom gerade null ist. Und ein Wert der null sein soll kann vermutlich genauer eingestellt und somit die Gegenspannung genauer bestimmt werden.

Quellen

- Vorbereitungsmappe zum Versuch

Physikalisches Anfängerpraktikum - P2

Photoeffekt

P2-65

Auswertung von
Tobias Renz und **Raphael Schmager**

Gruppe: **Do-28**

Durchgeführt am 3. Mai 2012

1 Demonstrationsversuch

Im ersten Versuch haben wir den Hallwachs-Effekt durchgeführt. Dazu haben wir eine zuvor abgeschmirgelte Zinkplatte negativ geladen.

Dann haben wir drei verschiedenen Experimente durchgeführt und jeweils den Rückgang des Zeigers beobachtet. Je schneller der Zeiger zurückgeht, desto mehr Elektronen werden von der Platte entfernt.

Zuerst haben wir die Platte ruhig stehen gelassen und den Zeiger beobachtet. Der Zeiger ging überhaupt nicht zurück. Wir hätten erwartet, dass auf Grund der Luftfeuchtigkeit einige Elektronen die Platte verlassen. Da aber die Luft trocken war, konnte dieser Effekt nicht gesehen werden.

Als zweites haben wir die Platte nun mit einer Quecksilberdampflampe (also mit UV-Licht) die Platte bestrahlt. Der Zeiger ging relativ schnell auf null zurück. Die Photonen im UV-Bereich lösen die Elektronen aus der Zinkplatte heraus (Photoeffekt). Erwartet hätten wir, dass der Zeiger bis auf einen bestimmten Wert zurückgeht und dann fast stehen bleibt. Es sollte sich dann eine Elektronenwolke um die Platte bilden, die die weiteren Elektronen daran hindern die Platte zu verlassen.

Überprüfen wir diese Überlegung rechnerisch. Zink hat eine Auslösearbeit von $4,34 \text{ eV}$ ¹ und die niedrigste Wellenlängen im Quecksilberspektrum liegt bei ca. 200 nm . Die Photonen besitzen also eine Energie von ca. $6,1 \text{ eV}$. Den Elektronen wird also eine kinetische Energie von ca. $1,8 \text{ eV}$ übertragen. Rechnet man relativistisch erhält man für die schnellsten Elektronen eine Geschwindigkeit von ca. $750000 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Da es natürlich auch Elektronen mit geringerer Geschwindigkeit gibt, kann es sein, dass sich durch diese langsamen Elektronen eine Elektronenwolke bildet. Diese wird aber dann vermutlich durch die schnellen Elektronen so weit "zerstört", dass sie keinen großen Einfluss hat.

Wir vermuten, dass sie einen geringen Einfluss hat, was man beim nächsten Experiment gesehen hat. Dort haben wir die Platte wieder negativ geladen und mit der Quecksilberdampflampe bestrahlt. Zusätzlich haben wir eine Anode in die Nähe der Platte gebracht. Die Anode dient dazu, die herausgelösten Elektronen sofort "abzusaugen". Es kann somit keine Elektronenwolke entstehen. Der Zeiger bewegte sich etwas schneller zurück als ohne Anode aber nicht so viel schneller wie wir davor erwartet hätten.

2 Innenwiderstand des Elektrometers

In dieser Aufgabe soll der Innenwiderstand (R_i) des Elektrometers bestimmt werden. Dazu legen wir eine Spannung von $5,0 \text{ V}$ ($= U_0$) an das Elektrometer angeschlossen und dann verschiedenen Vorwiderstände (R_x) vorgeschaltet und die Spannung U gemessen.

Der Innenwiderstand berechnet sich dann wie in der Vorbereitung gezeigt zu:

¹<http://de.wikipedia.org/wiki/Austrittsarbeit>

$$R_i = R_x \cdot \frac{U}{U_0 - U} \quad (1)$$

Es war sehr schwer die Spannung zu messen, da diese fast immer schwankte. Schon bei der kleinsten Bewegung änderte sich der Wert. Dies zeigt auch, da dieses Messgerät sehr empfindlich ist. Um in diesen Messbereichen genau zu messen würde man ein besseres (oder somit auch teureres) Messgerät.

Für unsere Messwerte ergeben sich folgende Werte:

$R_x/G\Omega$	U/V
0,1	4,996
1	4,991
10	4,93

Tabelle 1: Elektrometereigenschaften

Wie schon zu erwarten war sind unsere Werte nicht wirklich aussagekräftig. Man sieht nur, dass der Innenwiderstand sehr groß ist. Laut unserem Betreuer sollte der Innenwiderstand bei ca. 25 G Ω liegen. Unsere Werte sind also um den Faktor 5 bis 30 größer als der eigentliche Wert. Bei dieser Aufgabe wurde deutlich, wie empfindlich dieses Messgerät ist.

3 Photoeffekt und h/e-Bestimmung

Bevor die folgenden Messungen durchgeführt werden können, musste ein Nullabgleich durchgeführt werden. Dazu haben wir den Verstärkungsfaktor am Gerät auf 10² eingestellt und den entsprechenden Knopf gedrückt gehalten. Nun haben wir über die beiden Regler (grob/fein) diesen Wert auf Null eingestellt.

3.1 Klemmspannung bei verschiedenen Wellenlängen

Bei maximaler Lichtintensität haben wir bei verschiedenen Wellenlängen die Klemmspannung gemessen.

Es sollte auch überprüft werden ob das Umgebungslicht einen Einfluss hat und ob die Messwerte reproduzierbar sind.

Um den Einfluss des Umgebungslichtes zu überprüfen, haben wir die Klemmspannung bei jeder Wellenlänge zunächst einmal im hellen Raum und einmal im abgedunkelten Raum und ausgeschaltetem Licht gemessen. Unsere Messwerte sind in nachfolgender Tabelle aufgeführt. Man sieht an den Messwerte, dass das Umgebungslicht einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Klemmspannung hat.

Um die Reproduzierbarkeit zu überprüfen haben wir die Spannung bei jeder Wellenlänge dreimal gemessen. Man sieht auch hier, dass die Werte nicht sonderlich voneinander abweichen.

Für die Ausgleichsgerade haben wir dann den Mittelwert der drei Spannungen benutzt.

Slot	λ/nm	λ^{-1}/nm^{-1}	U_{K1}/V	U_{K2}/V	U_{K3}/V	U_{mittel}/V	Umgebung
1	360	2,78E-03	1,991	2,028	2,014	2,006	hell
			1,991				dunkel
2	400	2,50E-03	1,666	1,705	1,687	1,681	hell
			1,666				dunkel
3	440	2,27E-03	1,431	1,465	1,437	1,441	hell
			1,431				dunkel
4	490	2,04E-03	1,181	1,211	1,206	1,194	hell
			1,176				dunkel
5	540	1,85E-03	1,005	1,037	1,027	1,017	hell
			1,000				dunkel
6	590	1,69E-03	0,737	0,742	0,744	0,740	hell
			0,735				dunkel

Tabelle 2: Klemmspannung bei Variabler Wellenlänge

Es sollte noch untersucht werden, was bei abgeschotteter Beleuchtung, also geschlossener Blende passiert. Man hat gesehen, dass die Spannung sehr langsam auf null abfällt. Dies liegt daran, dass die Spannung, die z.B durch thermische Effekte entsteht zu klein ist um mit unserem Messgerät gemessen werden zu können.

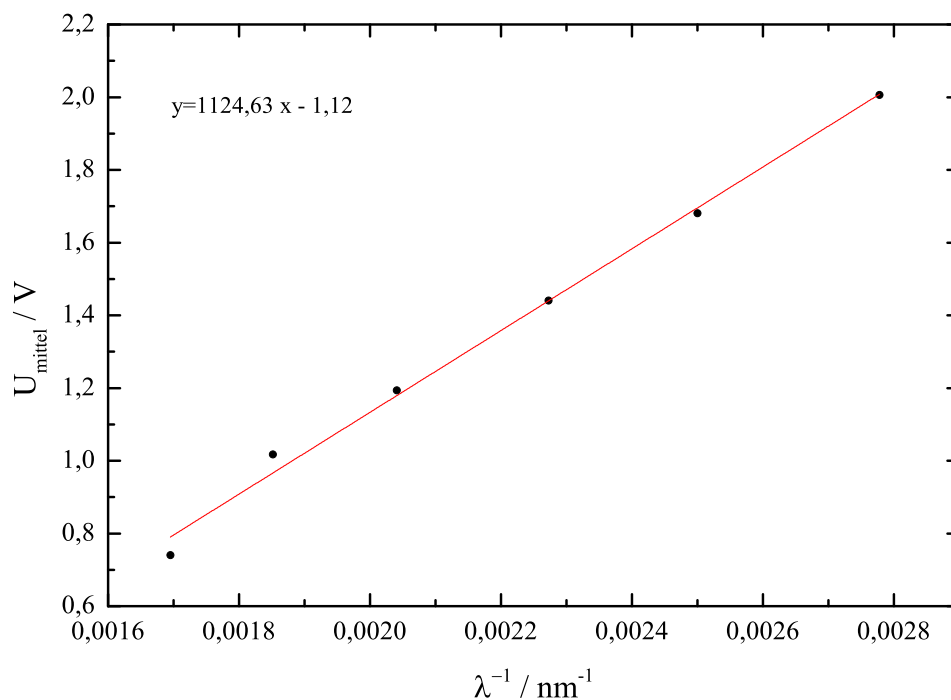


Abbildung 1: Klemmspannung über $1/\lambda$

Die Intensitätsabhängigkeit der Spannung sollte noch untersucht werden. Eigentlich dürfen diese Spannungen nicht von der Intensität abhängen wir haben aber bei einer Wellenlänge die Intensität untersucht und eine leichte Abhängigkeit festgestellt. Woher diese unerwartete Abhängigkeit kommt ist uns nicht klar. Sie könnte mit dem Messgerät zu tun haben, dass dieses bei zu geringer Intensität die Spannung nicht genau misst.

Aus den Messwerten sollte nun noch h/e bestimmt werden.

Dazu haben wir die Spannung U über $\frac{1}{\lambda}$ aufgetragen und die Parameter a und b folgender Ausgleichsgeraden bestimmt:

$$U = \frac{a}{\lambda} + b \quad (2)$$

Die Parameter a und b wurden in der Vorbereitung bestimmt zu:

$$a = \frac{h \cdot c}{e} \quad b = -\frac{P}{e} \quad (3)$$

Aus der Ausgleichsgeraden werden die Parameter $a = 1124,63 \text{ Vnm}$ und $b = -1,12 \text{ V}$ bestimmt. Nun kann h/e bestimmt werden:

$$\frac{h}{e} = \frac{a}{c} = \frac{1124,63 \text{ Vnm}}{2,998 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 3,75 \cdot 10^{-15} \frac{\text{Js}}{\text{C}} \quad (4)$$

Vergleicht man unseren Wert mit dem Literaturwert $h/e = 4,14 \cdot 10^{-15} \frac{\text{Js}}{\text{C}}$ sieht man, dass unser Wert gut mit dem Literaturwert übereinstimmt.

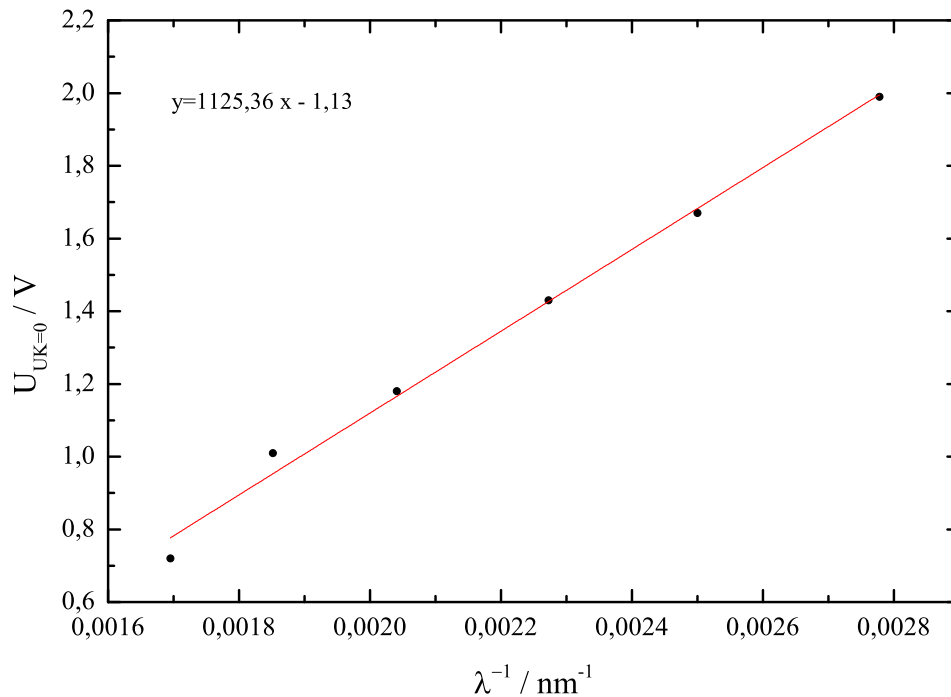
3.2 Anlegen einer Gegenspannung

Nun wurde eine Spannungsquelle, in unserem Fall eine Batterie, gegenpolig in den Stromkreis eingebaut. Es wurde die Spannung am Voltmeter durch Einstellen der Gegenspannung bei jeder Wellenlänge auf 0V gebracht. Die benötigten Gegenspannungen sind in folgender Tabelle eingetragen.

Slot	Wellenlänge λ/nm	Gegenspannung U_G/V
1	360	1,99
2	400	1,67
3	440	1,43
4	490	1,18
5	540	1,01
6	590	0,72

Tabelle 3: Gegenspannung

Nun wurden, wie schon in Aufgabe 3.1, die Parameter a und b aus der Ausgleichsgerade bestimmt. Man erhält folgendes Schaubild.

Abbildung 2: Gegenspannung über $1/\lambda$

Die Steigung beträgt nun 1125,36 Vnm. Der Achsenabschnitt $b = -1,13\text{V}$. Nun kann wieder h/e ausgerechnet werden.

$$\frac{h}{e} = \frac{a}{c} = \frac{1125,36 \text{ Vnm}}{2,998 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 3,75 \cdot 10^{-15} \frac{\text{Js}}{\text{C}} \quad (5)$$

Man erkennt, dass diese Methode den gleichen Wert für h/e liefert. Die Abweichung zum Literaturwert kann durch einen systematischen Fehler in unserer Messapparatur erklärt werden.

3.3 Photostrom in Abhängigkeit von der angelegten Spannung

Für die Wellenlänge von 400nm haben wir den Photostrom in Abhängigkeit von der angelegten Spannung (U_A) gemessen. Es wird ein Arbeitswiderstand von $100\text{M}\Omega$ (R_A) parallel zum Messingang des Elektrometers geschaltet. Die angelegte Spannung können wir über eine regelbare Batterie, die nach Schaltskizze 2 des Aufgabenblatts angeschlossen wird, verstellen.

Gemessen wird eine Spannung (U_{mess}) wobei der Strom sich dann folgendermaßen berechnet:

$$I = \frac{U_{mess}}{R_A} \quad (6)$$

Die Messung haben wir zunächst bei maximaler Lichtintensität (Aufgabe 3.3) und dann mit eingebautem Graufilter (Aufgabe 3.4) durchgeführt. Der von uns verwendete Graufilter hat einen Transmissionskoeffizienten von $T = 0,708$.

Den Dunkelstrom haben wir auch gemessen, dieser unterscheidet sich aber so gut wie nicht von null und ist deshalb vernachlässigbar.

Folgende Messwerte haben wir aufgenommen:

U_A/V	ohne		mit Graufilter		$T_{gemessen}/1$
	U_{mess-1}/V	I_{mess-1}/A	U_{mess-2}/V	I_{mess-2}/A	
-3,00	-0,022	-2,2E-10	-0,014	-1,4E-10	0,64
-2,90	-0,022	-2,2E-10	-0,014	-1,4E-10	0,64
-2,80	-0,022	-2,2E-10	-0,014	-1,4E-10	0,64
-2,70	-0,022	-2,2E-10	-0,014	-1,4E-10	0,64
-2,60	-0,022	-2,2E-10	-0,014	-1,4E-10	0,64
-2,50	-0,021	-2,1E-10	-0,014	-1,4E-10	0,67
-2,40	-0,021	-2,1E-10	-0,013	-1,3E-10	0,62
-2,30	-0,021	-2,1E-10	-0,013	-1,3E-10	0,62
-2,20	-0,02	-2,0E-10	-0,012	-1,2E-10	0,60
-2,10	-0,018	-1,8E-10	-0,011	-1,1E-10	0,61
-2,00	-0,015	-1,5E-10	-0,009	-9,0E-11	0,60
-1,90	-0,011	-1,1E-10	-0,007	-7,0E-11	0,64
-1,80	-0,005	-5,0E-11	-0,004	-4,0E-11	0,80
-1,70	0,000	0,0E+00	0,000	0,0E+00	-
-1,60	0,007	7,0E-11	0,005	5,0E-11	0,71
-1,50	0,021	2,1E-10	0,016	1,6E-10	0,76
-1,40	0,048	4,8E-10	0,037	3,7E-10	0,77
-1,30	0,088	8,8E-10	0,073	7,3E-10	0,83
-1,20	0,142	1,4E-09	0,12	1,2E-09	0,85
-1,10	0,199	2,0E-09	0,175	1,8E-09	0,88
-1,00	0,264	2,6E-09	0,234	2,3E-09	0,89
-0,90	0,334	3,3E-09	0,301	3,0E-09	0,90
-0,80	0,408	4,1E-09	0,367	3,7E-09	0,90
-0,70	0,486	4,9E-09	0,433	4,3E-09	0,89
-0,60	0,563	5,6E-09	0,516	5,2E-09	0,92
-0,50	0,64	6,4E-09	0,597	6,0E-09	0,93
0,00	1,054	1,1E-08	0,994	9,9E-09	0,94
0,50	1,491	1,5E-08	1,396	1,4E-08	0,94
1,00	1,922	1,9E-08	1,811	1,8E-08	0,94
1,50	2,358	2,4E-08	2,24	2,2E-08	0,95
2,00	2,798	2,8E-08	2,673	2,7E-08	0,96
2,50	3,244	3,2E-08	3,095	3,1E-08	0,95
3,00	3,691	3,7E-08	3,541	3,5E-08	0,96
4,00	4,591	4,6E-08	4,423	4,4E-08	0,96
5,00	5,5	5,5E-08	5,311	5,3E-08	0,97
6,00	6,4	6,4E-08	6,217	6,2E-08	0,97
7,00	7,339	7,3E-08	7,115	7,1E-08	0,97
8,00	8,261	8,3E-08	8,032	8,0E-08	0,97
8,85	9,049	9,0E-08	8,801	8,8E-08	0,97

Tabelle 4: Photostrom in Abhängigkeit der Spannung

Zum Transmissionskoeffizienten T lässt sich sagen, dass dieser bei Gegenspannung (-3V bis -1,2V) ganz gut mit dem angegebenen Wert von 0,708 übereinstimmt. Bei höheren Spannungen geht T aber annähernd gegen 1. Beim Intensitätsmaxima liegt dieser Wert bei $T = 0,97$. Eigentlich sollte man bei hohen Spannungen T gut bestimmen können, da dort fast alle Elektronen zur Anode gelangen und der Photostrom somit eigentlich nur noch von der Intensität abhängt.

Tragen wir den Photostrom über der angelegten Spannung auf, so ergibt sich folgendes Schaubild:

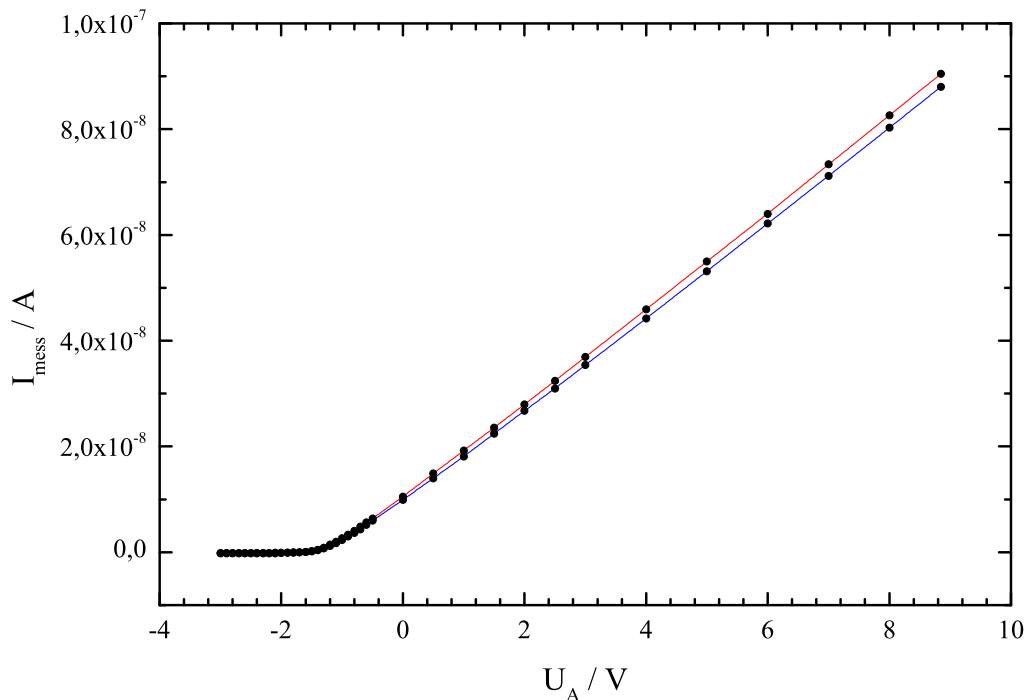


Abbildung 3: blaue Kurve = mit Graufilter ; rote = ohne

An dem Schaubild sieht man, dass bei einer bestimmten Spannung der sogenannten Grenzspannung kein Strom fließt. An diesem Punkt reicht die kinetische Energie der Elektronen nicht mehr aus um die Grenzspannung zu überwinden. Kein Elektron erreicht mehr die Anode.

Wird die Gegenspannung nun weiter verringert (bzw. vergrößert aber im negativen Bereich = Gegenspannung) sieht man, dass wieder ein geringer Strom fließt. Dies liegt daran, dass nun aus der Anode durch Streulicht oder thermische Bewegung Elektronen austreten und zur Kathode hin beschleunigt werden. Da die Elektronen nun von der Anode zur Kathode fließen misst man einen negativen Strom.

Legt man nun eine positive Spannung an, so werden die Elektronen von der Kathode zur Anode hin beschleunigt. Sie werden also "abgesaugt". Da nun mehr Elektronen zur Anode gelangen steigt der Photostrom. In unserem Fall sogar proportional. Dies sieht man, da es eine Gerade ist.

Für sehr hohe Spannungen erwartet man, dass der Photostrom konstant ist. Dies ist der sogenannte Sättigungsstrom. Alle ausgelösten Elektronen gelangen in diesem Fall zur Anode und somit zum Photostrom bei.

Bei der Geometrie der Photozelle ist darauf zu achten, dass kein Licht auf die Anode fällt. Wäre dies der Fall, so würden auch an der Anode Elektronen ausgelöst. Bei einer Spannung unterhalb der Grenzspannung würde man dann einen größeren Photostrom messen, da zusätzlich zum geringen Effekt der thermischen Bewegung Elektronen ausgelöst werden.

Bei unserer Photozelle ist dies wahrscheinlich nicht der Fall, da der Photostrom in diesem Bereich sehr gering ist.

Dies kann man dadurch erreichen, dass man zum Beispiel eine ringförmige Anode benutzt. Dieser Aufbau ist in folgender Graphik schön dargestellt:

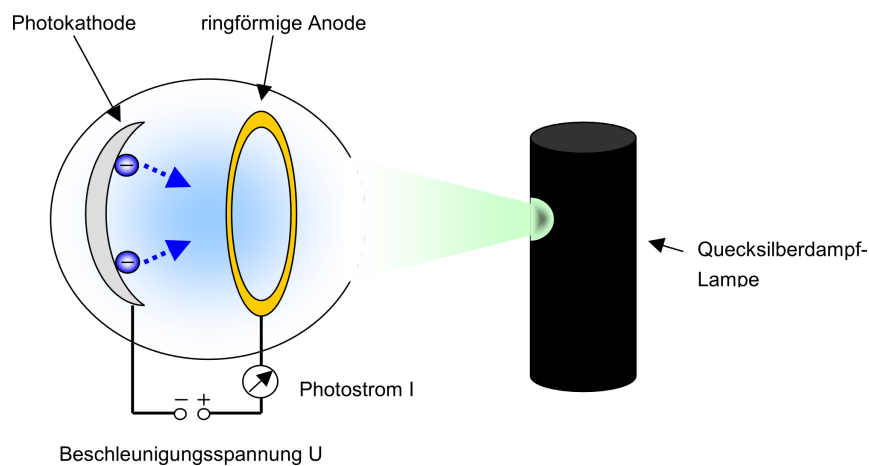


Abbildung 4: Aufbau einer Vakuumphotozelle

Nun sollte noch der Bereich von $-2,5\text{V}$ bis 0V in ein Schaubild mit gedehnten Maßstäben gezeichnet werden. Zur besseren Anschaulichkeit haben wir den Bereich nur von $-2,5\text{ V}$ bis $-0,5\text{ V}$ gezeichnet.

Die Stromnulldurchgänge bei beiden Messungen liegen genau bei der gleichen Spannung von $-1,7\text{ V}$. Dieser Wert entspricht genau der Grenzspannung bei 400nm , die wir in den vorherigen Aufgaben berechnet haben. Dies zeigt auch, dass die Grenzspannung Intensitätsunabhängig ist.

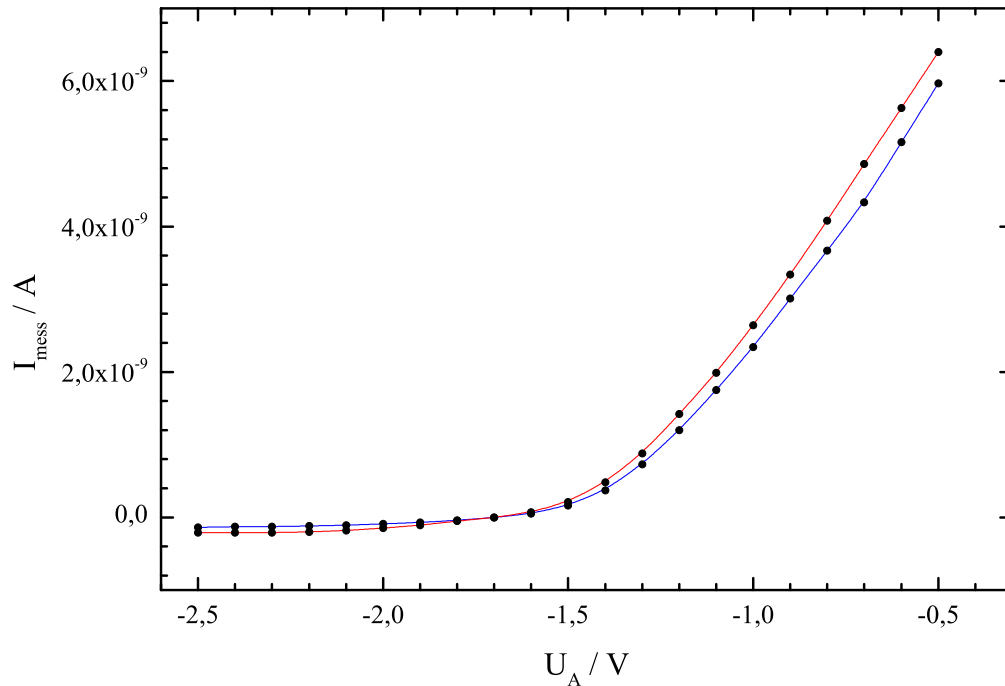


Abbildung 5: blaue Kurve = mit Graufilter ; rote = ohne

3.4 Anlegen einer Gegenspannung (mit $I=0$)

Wir belassen den Vorwiderstand von $R = 100M\Omega$ in der Schaltung und führen den gleichen Versuch wie in Aufgabe 3.2 durch. Nun stellen wir wieder die Spannung an der Batterie so ein, dass der Photostrom gerade wieder auf 0V sinkt. Wir erhalten folgende Werte.

Slot	Wellenlänge λ/nm	$U_{I=0}/V$
1	360	2,01
2	400	1,63
3	440	1,41
4	490	1,14
5	540	0,97
6	590	0,70

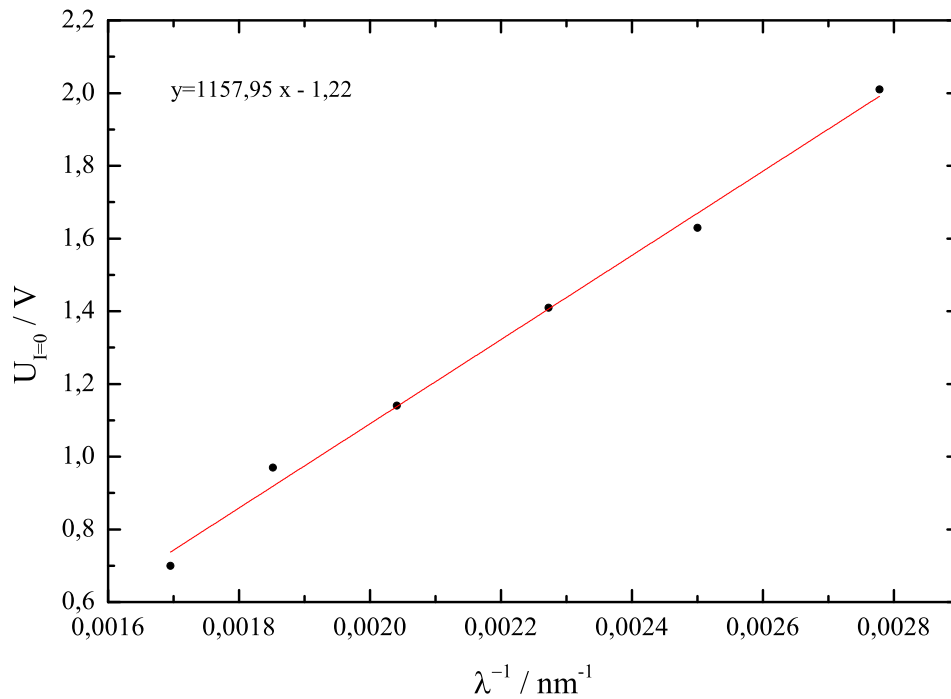
Tabelle 5: Gegenspannung mit $I=0$

Graphisch aufgetragen ergibt sich wieder eine Gerade mit der Steigung von $a = 1157,95Vnm$ und dem Achsenabschnitt $b = -1,22$.

Das Verhältnis h/e ist nun:

$$\frac{h}{e} = \frac{a}{c} = \frac{1157,95 \text{ Vnm}}{2,998 \cdot 10^8 \frac{m}{s}} = 3,86 \cdot 10^{-15} \frac{Js}{C} \quad (7)$$

Dieser Wert liegt etwas näher am Literaturwert von $4,14 \cdot 10^{-15} \frac{Js}{C}$.

Abbildung 6: Gegenspannung über $1/\lambda$ mit Vorwiderstand

Der Unterschied zur Messung in 3.2 ist lediglich der Vorwiderstand. Wir können uns jedoch nicht erklären inwieweit dies zu einer (zufällig) besseren Messung geführt hat.

4 Quellen

- Abbildung 4 - <https://project-physicsteaching.web.cern.ch/project-physicsteaching/german/experimente/photoeffekt.pdf> 16:20Uhr, 03.05.2012