



SS/WS 20.12./.....

Praktikum: (~~P1~~/P2) (Mo/Di/Mi/Do) Gruppe-Nr: 2

Name: Koppenhöfer Vorname: Martin

Name: Eisenhardt Vorname: Sebastian

Versuch: Photoeffekt (mit/ohne) Fehlerrechnung

Betreuer: Stefan Heitz Durchgeführt am: 25.6.2012

Abgabe am: 27.12

Rückgabe am: .....

Begründung:

2. Abgabe am: .....

Ergebnis: (+/0/-)

Fehlerrechnung: ja/nein

Datum: 27.12

Handzeichen: SH

Bemerkungen:

sehr gut!



**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 $\Omega$ ).

**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  $\lambda$  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.

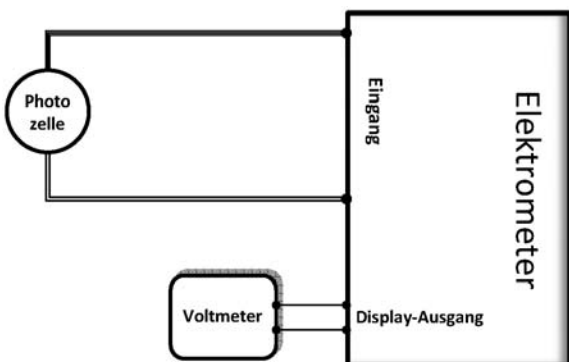
Zweckmäßige Spannungsintervalle:  $-3 \text{ V}$  bis  $-0,5 \text{ V}$ :  $\Delta U = 0,1 \text{ V}$ ;  $-0,5 \text{ V}$  bis  $3 \text{ V}$ :  $\Delta U = 0,5 \text{ V}$ ;  $3 \text{ V}$  bis  $9 \text{ V}$ :  $\Delta U = 1 \text{ V}$ . Messen Sie bei maximaler Lichtintensität. Untersuchen Sie auch 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  $0 \text{ V}$  zusätzlich in ein zweites Diagramm mit gedehnten Maßstäben.

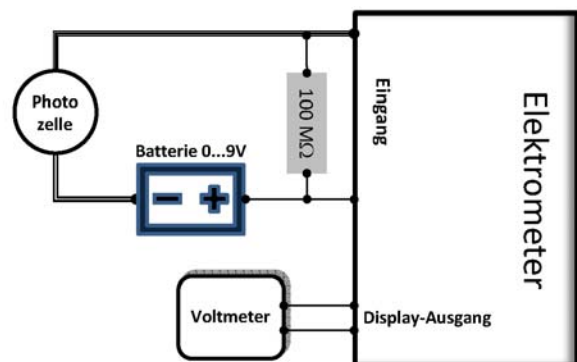
Diskutieren Sie qualitativ die Ursachen (z.B. Geometrie der Photozelle, Kathodenmaterial, Anodenmaterial, Lichtintensität, Energien und Anzahlen der austretenden Photoelektronen, Raumladung, Elektronenemission von der K-kontaminierten Anode durch Streulicht) für die beobachtete Strom-Spannungs-Abhängigkeit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

**3.4 Wiederholen Sie die Messung der vorherigen Aufgabe, wobei Sie diesmal das Ihrer Versuchsanlage 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);  
**Vakuumphotозelle 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 $\Omega$  Arbeitswiderstand zur Strommessung;  
potentialfreie Gleichspannungsquelle (Batterie) 0 bis 9 V,  $R_i < 500 \Omega$ , Einstellgenauigkeit 0,01 V;  
Kästchen mit Widerständen, ca.100 M $\Omega$ , ca.1 G $\Omega$ , ca. 10G $\Omega$ ;  
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: Apr. 12

Physikalisches Praktikum P2  
Vorbereitung zum Versuch  
**Photoeffekt**  
(P2-63)

Sebastian Eisenhardt, Martin Koppenhöfer  
(Montag-02)

25. Juni 2012

## Inhaltsverzeichnis

|          |   |          |
|----------|---|----------|
| <b>0</b> | <b>Vorbemerkungen</b>   | <b>2</b> |
| 0.1      | Hallwachs-Effekt . . . . .                                      | 2        |
| 0.2      | Messung mit Gegenspannung an der Photozelle . . . . .           | 2        |
| 0.3      | Erklärung des Photoeffektes . . . . .                           | 2        |
| <b>1</b> | <b>Hallwachs-Effekt</b>   | <b>3</b> |
| <b>2</b> | <b>Elektrometereigenschaften</b>                                | <b>3</b> |
| <b>3</b> | <b>Photoeffekt und <math>h/e</math>-Bestimmung</b>              | <b>4</b> |
| 3.1      | Photospannung in Abhängigkeit der Wellenlänge . . . . .         | 4        |
| 3.2      | Messung der Photospannung durch Spannungskompensation . . . . . | 4        |
| 3.3      | Photostrom in Abhängigkeit der Spannung . . . . .               | 5        |
| 3.4      | Photostrom mit Graufilter . . . . .                             | 5        |
| 3.5      | Gegenspannungsmethode . . . . .                                 | 5        |

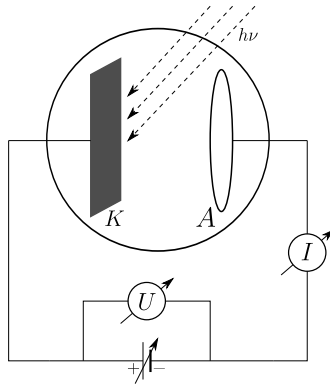


Abbildung 1: Schema einer Vakuumphotozelle mit ringförmiger Anode

## 0 Vorbemerkungen

### 0.1 Hallwachs-Effekt

Der sogenannte *äußere lichtelektrische Effekt* wurde 1897 von HALLWACHS entdeckt. Er untersuchte die Wirkung ultravioletter Strahlung auf eine isoliert aufgestellte Metallplatte, die mit einem statischen Elektrometer verbunden ist. Durch die Bestrahlung mit Licht oberhalb einer Grenzfrequenz  $\nu_{\text{Grenz}}$  werden Ladungen aus der Platte herausgeschlagen, sodass sich die Platte bis zu einer gewissen Grenzspannung  $U_{\text{Grenz}}$  positiv auflädt. Jenseits dieser Grenzspannung werden die freigesetzten Ladungen sofort wieder von der Platte angezogen und können sie daher nicht mehr verlassen. LENARD zeigte, dass es sich bei den Ladungen um Elektronen handelt.

Der *innere lichtelektrische Effekt* tritt bei Halbleitern auf und beschreibt die Änderung der Leitfähigkeit eines Halbleiters bei Bestrahlung mit Licht: Einfallende Photonen erzeugen im Halbleiter neue Elektron-Loch-Paare, wodurch die Leitfähigkeit des Halbleiters steigt und der Widerstand absinkt. Dieser Effekt wird beispielsweise in Photodioden und Phototransistoren genutzt.

### 0.2 Messung mit Gegenspannung an der Photozelle

Wir betrachten nun eine Photozelle (vgl. Abb. 1): Sie besteht aus zwei Metallplatten  $K$  und  $A$ , wobei ihre Potentialdifferenz  $U$  mit einer Gleichspannungsquelle verändert werden und der Strom  $I$  zwischen den Platten gemessen werden kann. Beleuchtet man  $K$  bei  $U = 0$  mit einer passenden Wellenlänge, so werden dort Elektronen freigesetzt. Sie fliegen u.a. zu  $A$  und verursachen dadurch einen Photostrom  $I$ . Wird  $A$  negativ geladen, so müssen die Elektronen gegen ein elektrisches Feld anfliegen. Je stärker das Feld ist, desto weniger Elektronen erreichen  $A$ ,  $I$  wird immer schwächer und verschwindet ab einer Grenzspannung  $U = U_{\text{Grenz}}$ . Lädt man  $A$  positiv auf, so werden alle an der Kathode erzeugten Elektronen vom elektrischen Feld zur Anode gezogen und  $I$  erreicht irgendwann einen konstanten Wert, der nur von der Intensität des Lichtes (nicht von der Frequenz!) abhängt, mit dem  $K$  beleuchtet wird.

### 0.3 Erklärung des Photoeffektes

Der Photoeffekt steht im Widerspruch zum Wellenmodell der klassischen Physik. EINSTEIN fand 1905 folgende quantenmechanische Erklärung: Licht ist keine elektromagnetische Welle mit kontinuierlicher Energieverteilung, sondern besteht aus einzelnen Photonen mit der Energieportion  $E_\gamma = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$ . Dabei ist  $h$  das PLANCKSche Wirkungsquantum. Trifft ein Photon auf ein Metall, so gibt es seine Energie an ein Elektron ab. Sofern diese höher ist, als die Austrittsarbeit  $W_{\text{Aus,K}}$  des Metalls der Kathode, kann das Elektron das Metall verlassen und besitzt anschließend die kinetische Energie  $W_{\text{kin}}$ :

$$h\nu = W_{\text{Aus,K}} + W_{\text{kin}} \quad (1)$$

Unterhalb einer Grenzfrequenz  $\nu_{\text{Grenz}}$  kann das Photon die Austrittsarbeit nicht mehr erbringen und es gibt keinen Photoeffekt. Je höher die Intensität des Lichtes ist, desto mehr Photonen schlagen gleichzeitig Elektronen aus dem Metall. Daher ist der maximal mögliche Photostrom proportional zur Intensität. Durch die Spannung  $U$  kann das Potential der Anode relativ zur Kathode verändert werden und damit der Elektronenfluss gesteuert werden. Damit das Elektron die Anode erreichen kann, muss gelten<sup>1</sup>:

$$h\nu \geq W_{\text{Aus,A}} + e \cdot U \quad (2)$$

Setzt man (1) und (2) gleich und eliminiert damit  $W_{\text{kin}}$  aus (1), so ergibt sich zusammen mit der Definition der Kontaktspannung  $U_{\text{Kontakt}} = (W_{\text{Aus,A}} - W_{\text{Aus,K}})/e$  zwischen Kathode und Anode:

$$\begin{aligned} h\nu &= e \cdot U + W_{\text{Aus,K}} + e \cdot U_{\text{Kontakt}} \\ &= e \cdot U + W_{\text{eff}} \end{aligned} \quad (3)$$

## 1 Hallwachs-Effekt

Der HALLWACHS-Effekt soll nun demonstriert werden: Als Metallplatte verwenden wir eine Zinkplatte. Sie muss vor dem Versuch frisch geschmirgelt werden, um die an der Luft entstehende störende Oxidschicht zu entfernen. Die Platte wird auf  $-2\text{ kV}$  gegenüber der Erdung des angeschlossenen statischen Elektrometers aufgeladen. Es werden nun drei Versuche durchgeführt:

- Wir lassen die Zinkplatte einfach stehen. Durch natürliche UV-Strahlung werden immer wieder Elektronen freigesetzt, sodass der Ausschlag am Elektrometer langsam zurückgeht.
- Nun beleuchten wir die Platte mit einer Quecksilberdampflampe, die u.a. UV-Licht aussendet. Der Ausschlag geht nun schneller zurück, da sich die Rate der einfallenden Photonen erhöht hat. Durch die positive Restladung der Platte werden einige Elektronen wieder angezogen und fallen auf die Platte zurück.
- Platzieren wir eine positiv geladene Metallelektrode (am Pluspol der Hochspannungsquelle angeschlossen) neben der Metallplatte, so werden alle freigesetzten Elektronen in dem entstehenden elektrischen Feld zur Metallelektrode hin beschleunigt. Es fallen keine Elektronen mehr auf die Platte zurück, daher wird das Elektrometer nun besonders schnell entladen.

## 2 Elektrometereigenschaften

Eine ideale Spannungsquelle besitzt keinen Innenwiderstand ( $R_i = 0$ ) und liefert unabhängig von der angehängten Last eine konstante Ausgangsspannung  $U_0$ . Fließt ein Strom  $I$  durch Spannungsquelle und Lastwiderstand  $R_L$ , so liegt  $U_0$  komplett an  $R_L$  an, denn am Innenwiderstand beträgt der Spannungsabfall  $U_i = R_i \cdot I = 0\text{ V}$ .

Analog dazu wird eine ideale Stromquelle dadurch charakterisiert, dass sie unabhängig vom angehängten Verbraucher einen konstanten Strom  $I_0$  liefert. Dazu benötigt sie einen unendlich hohen Innenwiderstand  $R_i$ , welcher den Gesamtwiderstand des Stromkreises dominiert.

Eine Vakuumphotozelle besitzt einen unendlich hohen Innenwiderstand, da Kathode und Anode durch das Vakuum getrennt sind. Dies entspräche einer idealen Stromquelle. Beleuchtet man die Photozelle, so stellt sich eine von der Wellenlänge abhängige konstante Grenzspannung ein, was wiederum für eine ideale Spannungsquelle charakteristisch wäre. Schließt man nun einen Widerstand an die Photozelle an, so fließt ein Strom und die Spannung bricht rasch ein. Die Photozelle kann einen konstanten Strom liefern, dieser hängt allerdings neben der Lichtintensität von der zwischen Kathode und Anode anliegenden Spannung ab. Insgesamt verhält sich die Vakuumphotozelle daher weder wie eine ideale Strom-, noch wie eine ideale Spannungsquelle.

Voltmeter werden zur Spannungsmessung verwendet. Sie werden parallel zu dem Bauteil geschaltet, an dem der Spannungsabfall gemessen werden soll. Um die Messung nicht zu beeinflussen,

---

<sup>1</sup>vgl. [1], S. 47 f.

sollte der Innenwiderstand eines Voltmeters unendlich hoch sein. Andernfalls fließt ein Teil des Stromes durch die Parallelschaltung über das Voltmeter ab und verringert somit den Spannungsabfall am Bauteil.

Amperemeter werden zur Strommessung verwendet und in Reihe mit dem zu messenden Bauteil geschaltet. Daher sollten sie einen möglichst kleinen Innenwiderstand haben.

Um die geringen Spannungen und Ströme beim Photoeffekt messen zu können, verwenden wir kein statisches Elektrometer, sondern einen Messverstärker zur Spannungsmessung. Zunächst soll dessen Innenwiderstand  $R_i$  bestimmt werden. Dazu legen wir am Eingang eine fest definierte Spannung  $U_0 (= 5 \text{ V})$  an. Bei einer Spannungsverstärkung von 1 sollte das Elektrometer die Spannung  $U_e = U_0$  messen. Anschließend fügen wir einen Vorwiderstand  $R_v (= 0,1 / 1 / 10 \text{ G}\Omega)$  zwischen Spannungsquelle und Elektrometer ein. Ein Teil von  $U_0$  fällt am Vorwiderstand ab, sodass das Elektrometer eine geringere Spannung  $U_e$  anzeigt. Es gilt:

$$U_e = \frac{R_i}{R_v + R_i} \cdot U_0$$

Trägt man die Messwerte in folgender Form auf, so lässt sich aus der Steigung der Regressionsgeraden der Innenwiderstand  $R_i$  bestimmen:

$$\frac{1}{U_e} = \frac{1}{U_0 \cdot R_i} \cdot R_v + \frac{1}{U_0}$$

### 3 Photoeffekt und $h/e$ -Bestimmung

Als Strahlungsquelle verwenden wir eine Quecksilber-Dampflampe. Sie besitzt ein Linienspektrum, d.h. sie erzeugt Licht verschiedener diskreter Wellenlängen, von denen einige (im Gegensatz zu handelsüblichen Halogenlampen) im Ultraviolett liegen. Über eine Linse wird sie auf die Photozelle abgebildet. Zwischen Linse und Photozelle befinden sich eine Irisblende (zur Variation der einfallenden Intensität) und direkt vor der Photozelle ein Bandpassfilter. Dabei handelt es sich um ein Fabry-Pérot-Interferometer, das jeweils nur bestimmte Wellenlängen passieren lässt, sodass einzelne Wellenlängen des Quecksilber-Spektrums herausgefiltert werden können.

#### 3.1 Photospannung in Abhängigkeit der Wellenlänge

Zunächst messen wir für verschiedene Wellenlängen  $\lambda$  jeweils mindestens drei Mal die Spannung, die an der Photozelle anliegt. Einige der aus der Kathode herausgeschlagenen Elektronen treffen auf die Anode, sodass sich ein elektrisches Gegenfeld aufbaut. Mit der Irisblende kann die Unabhängigkeit der sich einstellenden Grenzspannung von der Intensität überprüft werden. Nach Gleichung (3) gilt:

$$U = \frac{hc}{e} \cdot \frac{1}{\lambda} - \frac{W_{\text{eff}}}{e}$$

Aus der Steigung der Regressionsgeraden erhält man das Verhältnis  $h/e$ . Der Ordinatenabschnitt führt auf die Austrittsarbeit der Kathode, sofern die Kontaktspannung  $U_{\text{Kontakt}}$  der beiden Metalle bekannt ist. Andernfalls kann man damit nur die Austrittsarbeit der Anode bestimmen. Haben sich auf der Anode Atome des Kathodenmaterials abgelagert, so werden die Elektronen hauptsächlich über diese Atome in das Material eindringen und der Effekt wird verfälscht. Folglich wird die Wirkung von  $U_{\text{Kontakt}}$  abgeschwächt und man misst effektiv die Austrittsarbeit der Atome des Kathodenmaterials.

#### 3.2 Messung der Photospannung durch Spannungskompensation

Die Photospannung  $U$  soll nun auf eine zweite Weise bestimmt werden: Dazu wird eine regelbare Spannungsquelle gegenpolig an die Photozelle angeschlossen, beispielsweise mit dem Pluspol an die positiv geladene Kathode. Die Spannungsquelle wird nun so geregelt, dass die Spannung zwischen negativ geladener Anode und Minuspol exakt 0 V beträgt. Die Auswertung erfolgt ansonsten analog zur Aufgabe 3.1.



### 3.3 Photostrom in Abhängigkeit der Spannung

Nun wird die im Abschnitt 0.2 beschriebene Gegenspannungsmethode untersucht. Dazu schließen wir die regelbare Spannungsquelle und einen  $R = 100 \text{ M}\Omega$  Widerstand mit der Photozelle in Reihe. Mit dem Elektrometer wird der Spannungsabfall an  $R$  gemessen und so der Photostrom  $I$  bestimmt:

$$I = \frac{U_{\text{mess}}}{R \cdot V}$$

wobei  $V$  der Verstärkungsfaktor des Elektrometers ist. Die Messung soll bei  $\lambda = 400 \text{ nm}$  und maximaler Intensität durchgeführt werden. Falls Streulicht eindringt und den Photostrom verfälscht, muss dies korrigiert werden. Dazu wird der „Dunkelstrom“ gemessen, indem die Lampe ausgeblendet wird und der dann noch fließende Strom bestimmt wird.

Wir erwarten, dass bei negativ geladener Anode der Photostrom immer weiter abnimmt, je größer die Spannung wird, da die Elektronen gegen ein immer größeres elektrisches Feld anlaufen müssen. Wird die Spannungsquelle umgepolt, sodass die Anode positiv geladen ist und die Elektronen anzieht, so wird sich ab einer gewissen Spannung  $U$  ein konstanter Photostrom  $I_{\text{max}}$  einstellen. Dann werden alle aus der Kathode herausgeschlagenen Elektronen sofort zur Anode abgesaugt. Fällt Streulicht auf die Anode, so kann es dort ebenfalls zum Photoeffekt kommen. Falls die Anode mit Kathodenmaterial verunreinigt ist, wird dieser anodenseitige Photoeffekt durch dieselben Frequenzen hervorgerufen, wie derjenige an der Kathode. Beide Effekte überlagern sich dann bei der Messung.

### 3.4 Photostrom mit Graufilter

Die Messung aus Aufgabe 3.3 wird nun mit  $\lambda = 400 \text{ nm}$  wiederholt. Die Intensität der Lampe wird dabei durch einen Graufilter abgeschwächt. Auch hier sollte sich der Photoeffekt einstellen. Da das Licht durch den Graufilter eine geringere Intensität besitzt, sollte bei negativ geladener Anode der Photostrom einen niedrigeren Maximalwert  $I_{\text{max}}$  besitzen.

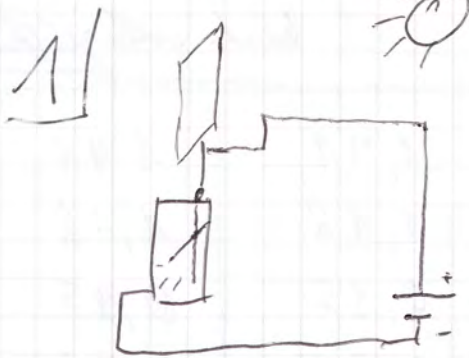
### 3.5 Gegenspannungsmethode

Abschließend soll für alle Wellenlängen die Gegenspannung  $U$  bestimmt werden, bei der der Photostrom den Wert  $I = 0 \text{ A}$  hat. Die Auswertung erfolgt analog zu Aufgabe 3.2, es liegt nun jedoch ein geschlossener Stromkreis vor, d.h. es kann ein Photostrom  $I$  fließen. Oben waren die Anschlüsse von Photozelle und Batterie direkt mit dem Elektrometer (Innenwiderstand unendlich groß) verbunden, sodass kein Stromfluss möglich war. Die Spannung, die sich in 3.2 einstellte, wurde durch die von der Kathode ausgesandten Elektronen verursacht, die auf die Anode trafen und dabei das elektrische Feld aufbauten, welches einen weiteren Elektronenzufluss bremste. Hier wird die Spannung zwischen Anode und Kathode durch die externe Spannungsquelle angelegt und bestimmt.

## Literatur

- [1] Baltz, Herrmann, Pohlig: *Altlasten der Physik: Der photoelektrische Effekt*, PdN-PhiS 6/58. Jg. 2009, S. 47-49.
- [2] Bergmann, Schaefer: *Band 3, Optik*, Kapitel 7, Quantenoptik, 6. Auflage.
- [3] Hering, Martin, Stohrer: *Physik für Ingenieure*, 10. Auflage, 2007.
- [4] Firma Phywe: *Datenblatt Messverstärker universal*, 13626.93.

Es wurden die auf der Website zum Praktikum zur Verfügung gestellten Kopien dieser Werke verwendet (<http://cms-ka.fzk.de/praktikum-restricted/Physiker-Literatur/P2/Literatur-Photoeffekt.htm>). Grafiken ohne expliziten Quellenverweis wurden von den Autoren selbst erstellt.



- An halt keine Entladung
- Zügiger Rückgang des Zeigers (ca. 5s)
- Ebenfalls schneller Rückgang des Zeigers (ca. 4s)

2) Kalibrierung der Messgeräte:

Voltmeter : 5,0 V ( $U_e$ )

Batterie : 4,97 V ( $U_0$ )

$$U_e = \frac{R_i}{R_0 + R_i} \cdot U_0$$

$R = 100 \text{ M}\Omega$

~~Batterie~~  $U_0 = 4,97 \text{ V}$  ;  $U_e = 4,95 \text{ V}$

$R = 1 \text{ G}\Omega$

$U_0 = 4,97 \text{ V}$  ;  $U_e = 4,56 \text{ V}$

$R = 10 \text{ G}\Omega$

$U_0 = 4,97 \text{ V}$  ;  $U_e = 2,81 \text{ V}$

- 3)
- Dunkelstrommessung: Die Spannung sinkt kontinuierlich
  - Nullabgleich durchgeführt

~~3.4~~

3.1

Filter Nr.

U (in V)

Blende voll geöffnet

|    |      |      |      |
|----|------|------|------|
| 1. | 1,39 | 1,41 | 1,41 |
| 2. | 1,15 | 1,18 | 1,18 |
| 3. | 0,90 | 0,95 | 0,95 |
| 4. | 0,76 | 0,79 | 0,78 |
| 5. | 0,61 | 0,63 | 0,61 |
| 6. | 0,49 | 0,48 | 0,48 |

Bei etwa halb geöffneten Blende (Filter 6) :  $U = 0,55 V$

(Filter 1) :  $U = 1,68 V$

(Filter 2) :  $U = 1,39 V$

" 3 :  $U = 1,17 V$

" 4 :  $U = 0,95 V$

5 :  $U = 0,78 V$

Unstimmig,  
vermutlich  
Messgerät!

6

3.2

$U_{\text{Batterie}}$   
 $U_{\text{Vollmeter}}$

Blende voll geöffnet

| Filter Nr.                          | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    |
|-------------------------------------|------|------|------|------|------|------|
| $U_{\text{Batterie}}$<br>(V)        | 1,25 | 1,06 | 0,85 | 0,73 | 0,58 | 0,46 |
| $U_{\text{Vollmeter}} = 0V$<br>jeu. |      |      |      |      |      |      |

~~3.3~~

25.6.11  
ST



3.3)

Batterie umgepolt für negativen Spannungsbereich

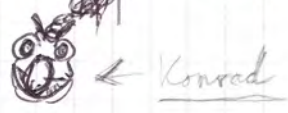
Folie 2

| $U_{\text{Batterie}} (V)$ | $U_{\text{Voltmeter (ohne Graufilter)}}$ | mit Graufilter |
|---------------------------|--|----------------|
| - 3,0                     | 3,46                                     | 3,04           |
| - 2,9                     | 3,33                                     | 2,96           |
| - 2,8                     | 3,24                                     | 2,88           |
| - 2,7                     | 3,15                                     | 2,80           |
| - 2,6                     | 3,05                                     | 2,72           |
| - 2,5                     | 3,01                                     | 2,64           |
| - 2,4                     | 2,93                                     | 2,56           |
| - 2,3                     | 2,82                                     | 2,48           |
| - 2,2                     | 2,73                                     | 2,40           |
| - 2,1                     | 2,63                                     | 2,33           |
| - 2,0                     | 2,56                                     | 2,24           |
| - 1,9                     | 2,47                                     | 2,17           |
| - 1,8                     | 2,38                                     | 2,09           |
| - 1,7                     | 2,29                                     | 2,01           |
| - 1,6                     | 2,21                                     | 1,93           |
| - 1,5                     | 2,12                                     | 1,85           |
| - 1,4                     | 2,03                                     | 1,77           |
| - 1,3                     | 1,95                                     | 1,69           |
| - 1,2                     | 1,85                                     | 1,62           |
| - 1,1                     | 1,77                                     | 1,54           |
| - 1,0                     | 1,68                                     | 1,46           |
| - 0,9                     | 1,60                                     | 1,39           |
| - 0,8                     | 1,51                                     | 1,31           |
| - 0,7                     | 1,43                                     | 1,23           |
| - 0,6                     | 1,34                                     | 1,16           |
| - 0,5                     | 1,26                                     | 1,08           |
| 0                         | 0,84                                     | 0,71           |
| 0,5                       | 0,43                                     | 0,35           |
| 1,0                       | 0,05                                     | 0,04           |
| 1,5                       | - 0,25                                   | - 0,14         |
| 2,0                       | - 0,35                                   | - 0,16         |
| 2,5                       | - 0,35                                   | - 0,16         |
| 3,0                       | - 0,35                                   | - 0,16         |
| 4,0                       | - 0,36                                   | - 0,17         |
| 5,0                       | - 0,36                                   | - 0,17         |
| 6,0                       | - 0,36                                   | - 0,17         |
| 7,0                       | - 0,36                                   | - 0,17         |
| 8,0                       | - 0,36                                   | - 0,17         |
| 8,84                      | - 0,36                                   | - 0,17         |

(umgekehrt)

↓  
⊖ an  $\pm$  Photoz.  
⊕ an bevl.

Durchstrom



Durchstrom bei  $U_{\text{gegen}} = U_{\text{Batt}} = 0V$ :  
 $0V$  |  $0V$

3.5 |  $U_{\text{Vollkreis}} = 0$ , kein Granitblei

| Flur # | $U_{\text{Batt.}}$ | Umgepolt:<br>Erde Photodiode an $\ominus$<br>Messverstärker an $\oplus$ |
|--------|--------------------|---|
| 1      | + 1,27             |   |
| 2      | + 1,07             |   |
| 3      | 0,86               |   |
| 4      | 0,73               |   |
| 5      | 0,59               |   |
| 6      | 0,47               |   |

25.6.12  
SJA

Physikalisches Praktikum P2  
Auswertung zum Versuch  
**Photoeffekt**  
(P2-63)

Sebastian Eisenhardt, Martin Koppenhöfer  
(Montag-02)

25. Juni 2012

## 1 Hallwachs-Effekt

Zunächst demonstrierten wir den Hallwachs-Effekt: Dazu schlossen wir eine frisch geschmirgelte Zinkplatte an ein Elektroskop an und luden sie negativ auf. Anschließend beleuchteten wir sie mit unterschiedlichen Lichtquellen. Bei Raumlicht blieb der Ausschlag des Elektroskops im Beobachtungszeitraum konstant, d.h. die Platte wurde nicht merklich entladen. Dies ist nicht verwunderlich, da wir in einer abgeschlossenen Versuchskabine bei Kunstlicht arbeiteten und somit keine UV-Strahlung des Sonnenlichts zu uns gelangen konnte. Als nächstes verwendeten wir eine Quecksilber-Dampflampe, die in ihrem Spektrum auch UV-Strahlung enthält. Der Zeigerausschlag ging innerhalb von ca. 5 s vom Vollausschlag auf Null zurück. Brachten wir nun zusätzlich die positive Zuleitung des Spannungsgenerators in die Nähe der geladenen Platte, so entlud sie sich geringfügig schneller (ca. 4 s). Bei Zink werden somit Elektronen durch Bestrahlung mit UV-Licht freigesetzt.

## 2 Elektrometereigenschaften

### 2.1 Kalibration der Messgeräte

Wir schlossen eine regelbare Batterie an den Eingang des Elektrometers und verglichen die Anzeigen von Batterie und Elektrometerausgang. Es ergab sich:

$$\begin{array}{ll} U_e \text{ am Elektrometer} & 5,0 \text{ V} \\ U_0 \text{ der Batterie} & 4,97 \text{ V} \end{array}$$

Bei der folgenden Bestimmung des Innenwiderstandes ließen wir  $U_0$  unverändert.

### 2.2 Innenwiderstand des Elektrometers

Nun schalteten wir verschiedene Widerstände in Reihe zur Batterie. Wie in der Vorbereitung beschrieben gilt:

$$U_e = \frac{R_i}{R_v + R_i} U_0 \qquad R_i = \frac{R_v U_e}{U_0 - U_e}$$

Wir erhielten:

| $R_v$ (G $\Omega$ ) | $U_e$ (V) | $R_i$ (G $\Omega$ ) |
|---------------------|-----------|---------------------|
| 0,1                 | 4,95      | 24,75               |
| 1                   | 4,56      | 11,12               |
| 10                  | 2,81      | 13,01               |

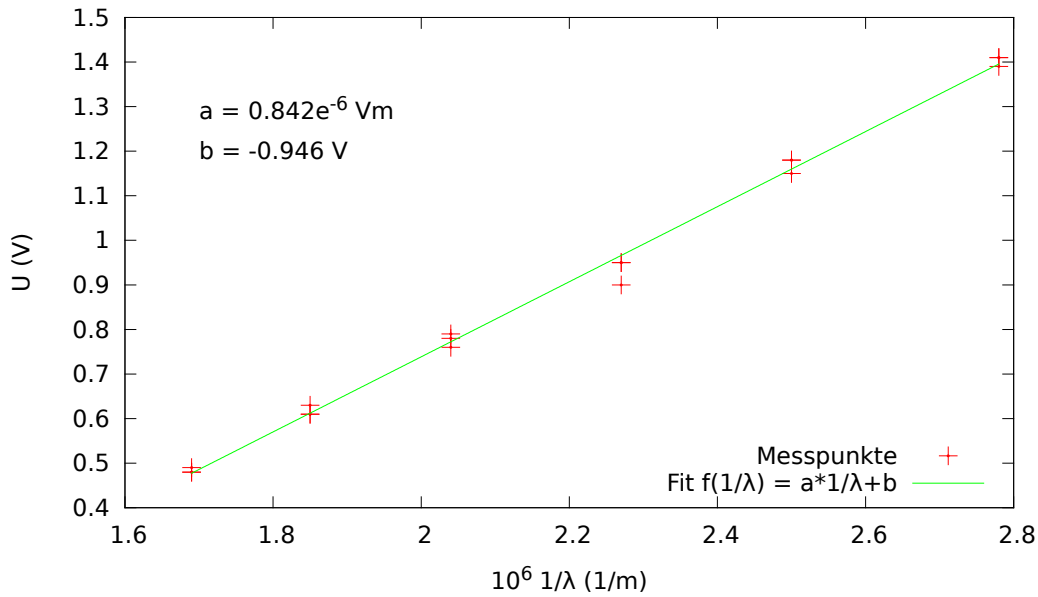


Abbildung 1: Aufgabe 3.1: Klemmenspannung  $U$  direkt gemessen.

Vor allem der erste Messwert für  $R_i$  weicht stark von den übrigen ab. Dies liegt daran, dass sich in diesem Fall  $U_e$  nur unwesentlich im Vergleich zu  $U_0$  verändert hat. Dadurch sind die relativen Messungenauigkeiten sehr viel größer als bei höheren Vorwiderständen. Zusätzlich steht  $U_0 - U_e$  im Nenner der Formel, wodurch der Wert für  $R_i$  sehr schnell sehr groß wird.

Die beiden Messwerte für 1 bzw.  $10 \text{ G}\Omega$  passen gut zueinander und repräsentieren vermutlich den wahren Wert des Innenwiderstandes. Man erkennt, dass das Elektrometer einen sehr hohen Innenwiderstand (Größenordnung  $10^{10} \Omega$ ) hat, was zu zeigen war.

### 3 Photoeffekt und $h/e$ -Bestimmung

Als vorbereitende Maßnahmen führten wir einen Nullabgleich des Elektrometers durch. Zudem versuchten wir, den Dunkelstrom der Photozelle zu messen. Dies gelang uns aber nicht, da das Elektrometer in diesem Bereich nicht mehr zuverlässig arbeitet und kontinuierlich sinkende Ausgangsspannungen lieferte.

#### 3.1 Klemmenspannung $U$ in Abhängigkeit der Wellenlänge

Wir bestimmten die Klemmenspannung  $U$  der Photozelle durch direkte Messung mit dem Spannungsmessverstärker für sechs verschiedene Wellenlängen  $\lambda$ . Unsere Messergebnisse zeigt Abbildung 1. Anschließend führten wir mit *gnuplot* eine lineare Regression durch. Aus der Steigung  $a$  ergibt sich das Verhältnis  $h/e$ , wobei wir mit  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$  rechneten:

$$U = \frac{hc}{e} \cdot \frac{1}{\lambda} - \frac{W_{\text{eff}}}{e}$$

Es ergab sich  $a = 8,42 \cdot 10^{-7}$  und somit:

$$\frac{h}{e} = 2,81 \cdot 10^{-15} \frac{\text{Js}}{\text{C}}$$

Wie in der Vorbereitung beschrieben, ist der Achsenabschnitt  $b$  proportional zur effektiven Austrittsarbeit  $W_{\text{eff}}$  der Kathode.

Unsere mehrfach aufgenommenen Messwerte für  $U$  wichen bei gleicher Wellenlänge teilweise um  $0,02 \text{ V}$  voneinander ab. Diese Schwankungen lassen sich vermutlich auf die Empfindlichkeit des

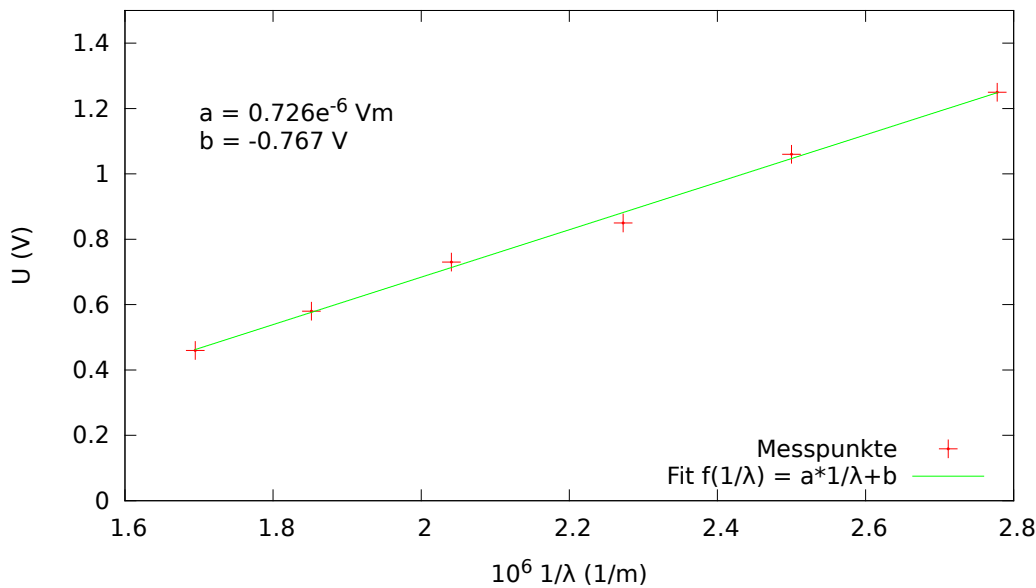


Abbildung 2: Aufgabe 3.2:  $U$  durch Spannungskompensation bestimmt.

Elektrometers zurückführen: Die Ausgangsspannung des Messverstärkers pendelte sich erst nach einer gewissen Zeit auf einen Wert ein und schwankte auch dann noch um ca. 10 mV. Ein Messwert weicht um 0,05 V ab, vermutlich haben wir hier zu früh gemessen.

Anschließend untersuchten wir die (Un)Abhängigkeit der Photospannung von der Intensität des einfallenden Lichtes, indem wir eine zweite Messreihe bei halb geöffneter Blende aufnahmen. Die Werte lagen jeweils um ca. 0,3 V höher, als bei voll geöffneter Blende, was im Widerspruch zur Theorie steht. Außerdem brauchte der Messverstärker in dieser Versuchsreihe jeweils sehr lange, bis er sich auf einen Messwert eingependelt hatte. Möglicherweise war die von uns gewählte Zeitauflösung zu gering für derart geringe Photoströme und der Messverstärker konnte nicht mehr korrekt messen.

### 3.2 Messung von $U$ durch Spannungskompensation

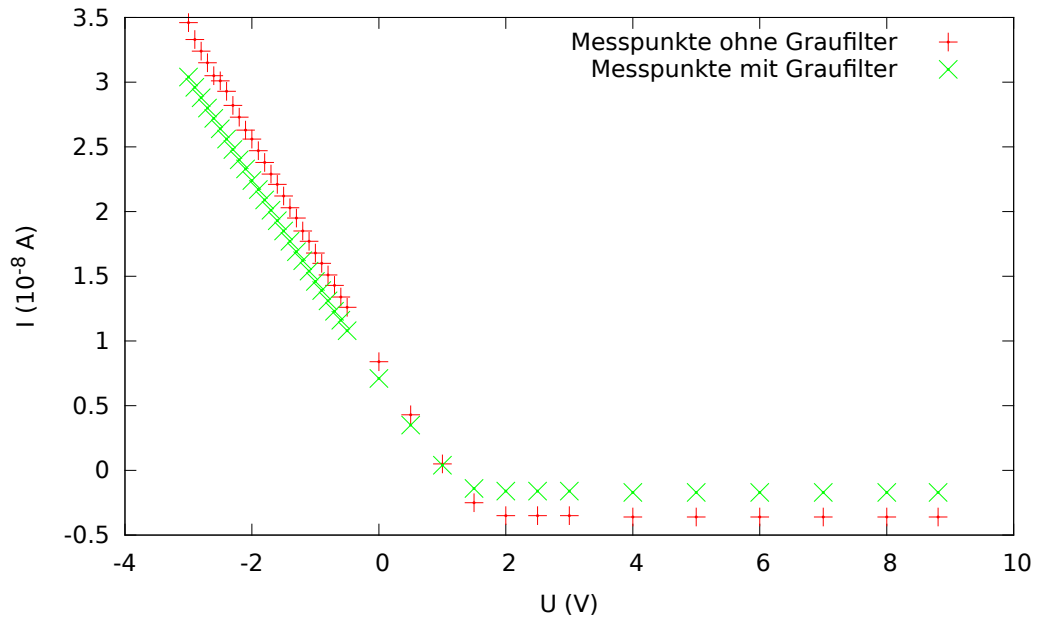
Analog zu Aufgabe 3.1 führten wir wieder eine Messung mit allen verfügbaren Filtern durch. Die Photospannung bestimmten wir nun durch Spannungskompensation mit einer gegenpolig in Reihe geschalteten Batterie. Unsere Messwerte zeigt Abbildung 2. Die Auswertung erfolgte analog zu Aufgabe 3.1. Es ergab sich:

$$\frac{h}{e} = 2,42 \cdot 10^{-15} \frac{\text{Js}}{\text{C}}$$

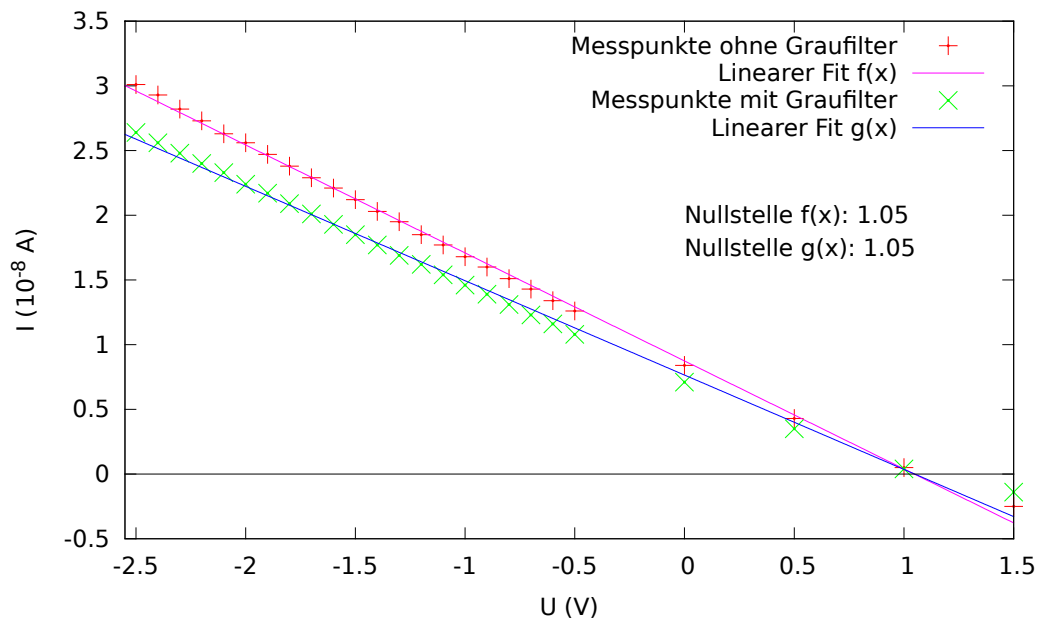
### 3.3 Photostrom in Abhängigkeit der Klemmenspannung $U$

Zur Ermittlung des Photostroms schalteten wir einen Arbeitswiderstand  $R = 100 \text{ M}\Omega$  parallel zum Messeingang des Elektrometers. Darüber bestimmten wir den Photostrom  $I$  in Abhängigkeit der über die Batterie angelegten Spannung  $U$  zwischen Anode und Kathode der Photozelle. Anschließend wiederholten wir die Messung mit einem Graufilter. Unsere Messergebnisse zeigt Abbildung 3. Durch den Photoeffekt werden aus der Kathode Elektronen gelöst, die eine bestimmte kinetische Energie besitzen. Beträgt die Gegenspannung  $U = 0 \text{ V}$ , so erreichen einige Elektronen (die zufällig in die richtige Richtung fliegen) die Anode und man misst einen Photostrom. Legt man eine negative Gegenspannung an, so ist die Anode positiv geladen und zieht die Elektronen an. Der Photostrom steigt daher für negatives  $U$  linear an. Für positive Gegenspannungen müssen die Elektronen gegen ein elektrisches Feld anlaufen (die Anode ist negativ geladen), sodass nur noch Elektronen





(a) Gesamte Messreihe



(b) Ausschnitt

Abbildung 3: Aufgabe 3.3: Photostrom in Abhängigkeit der Klemmenspannung  $U$

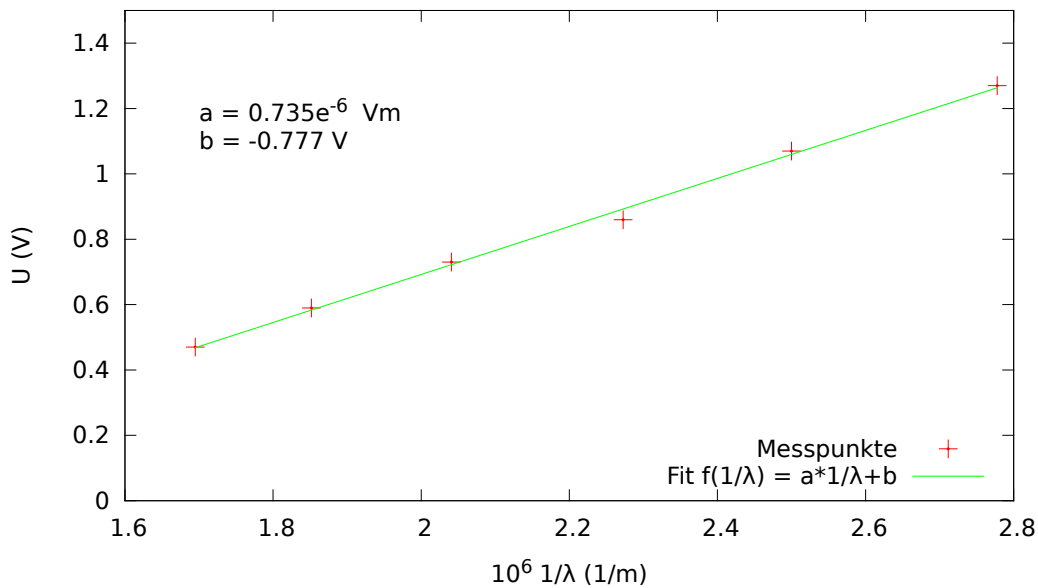


Abbildung 4: Aufgabe 3.5: Gegenspannung  $U$  bei Photostrom  $I = 0 \text{ A}$ .

mit hoher Energie zur Anode gelangen und der Photostrom abnimmt. Ab ca.  $1 \text{ V}$  können keine Elektronen mehr zur Anode gelangen.

Gleichzeitig werden durch Streulicht von der Kathode auch Elektronen aus der Anode gelöst. Da sehr wenig Streulicht auf die Anode fällt, ist ihre Zahl sehr klein. Für höhere Gegenspannungen (ab ca.  $U = 1,5 \text{ V}$ ) werden diese Anoden-Elektronen zur Kathode hin beschleunigt und man misst daher einen konstanten negativen Photostrom.

Durch einen Graufilter setzten wir die Intensität des einfallenden Lichtes herab. Dadurch werden weniger Elektronen pro Sekunde freigesetzt, da in diesem Zeitraum weniger Photonen auf die Kathode fallen. Der Photostrom mit Graufilter ist daher stets kleiner, als ohne Graufilter. Da die Grenze, bei der der Photostrom verschwindet, nur von der Frequenz des Lichtes (kinetische Energie der Elektronen) abhängt, sind die Nulldurchgänge beider Kurven identisch. Dies kann man an den Regressionsgeraden nachvollziehen.

Den Abschwächungsfaktor  $\zeta$  des Graufilters erhält man aus dem Verhältnis der Intensitäten. Diese sind proportional zu den gemessenen Spannungen mit und ohne Graufilter. Aus den Messwerten für  $U = -3 \text{ V}$  erhält man:

$$\zeta = 1 - \frac{U_{\text{mit Filter}}}{U_{\text{ohne Filter}}} = 1 - \frac{3,04 \text{ V}}{3,46 \text{ V}} = 1 - 0,88 = 12\%$$

### 3.5 Messung der Gegenspannung $U$

In diesem Versuchsteil war weiterhin der Arbeitswiderstand  $R = 100 \text{ M}\Omega$  parallel zum Eingang des Messverstärkers geschaltet, sodass dieser den Photostrom maß. Wir bestimmten nun die Gegenspannung  $U$ , die angelegt werden musste, damit der Photostrom  $I = 0 \text{ A}$  betrug. Unsere Messwerte zeigt Abbildung 4. Analog zu den übrigen Auswertungen erhielten wir folgenden Wert für  $h/e$ :

$$\frac{h}{e} = 2,45 \cdot 10^{-15} \frac{\text{Js}}{\text{C}}$$

### 3.6 Vergleich der Resultate

Zum Abschluss vergleichen wir die Werte für  $h/e$  aus den vorangegangenen Aufgaben:

| Aufgabe | Methode               | $h/e$ ( $10^{-15}$ Js/C) |
|---------|-----------------------|--------------------------|
| 3.1     | $U$ direkt gemessen   | 2,81                     |
| 3.2     | Spannungskompensation | 2,42                     |
| 3.5     | Gegenspannungsmethode | 2,45                     |
|         | Literaturwert         | 4,14                     |

Man erkennt, dass unsere Messergebnisse zwar größenordnungsmäßig mit dem Literaturwert<sup>1</sup> übereinstimmen, allerdings um einen Faktor  $\approx 2$  abweichen. Man erkennt ferner, dass die Messungen mit Spannungskompensation und Gegenspannung recht ähnliche Werte liefern. Dies ist nicht verwunderlich, da das prinzipielle Messverfahren in beiden Fällen identisch ist. Im ersten Fall wurde die resultierende Spannung gemessen, im zweiten Fall ihre Wirkung als elektrischer Strom durch den Arbeitswiderstand.

Mögliche Fehlerquellen im Aufbau sind:

- Der exakte Wert der verwendeten Wellenlängen und die Transmissionscharakteristik der Filter.
- Die oben angesprochenen Probleme des Messverstärkers.
- Die Genauigkeit der Batteriespannung (Anzeige nur auf zwei Dezimalen genau, Abweichung zur Anzeige des Elektrometers)

Insgesamt ist eine Abweichung von ca. 50% bei einem Größenordnungsbereich von  $10^{-15}$  daher akzeptabel.

---

<sup>1</sup>aus: **Haken, Wolf**: Atom- und Quantenphysik