



~~SS/WS~~ 20.13./.....

Praktikum: (~~P1~~/P2) (~~Mo~~/Di/~~Mi~~/Do) Gruppe-Nr: 05..

Name: Linsten ..... Vorname: Matthias .....

Name: Scheider ..... Vorname: Dominic .....

Versuch: Photoeffekt ..... (~~Mi~~ohne) Fehlerrechnung

Betreuer: Johann Rauser ..... Durchgeführt am: 25.04.2013

Abgabe am: 02.05.13 .....

Rückgabe am: 25.13 .....

Begründung:

2. Abgabe am: 16. MAI 2013 .....

Ergebnis: (+) / 0 / -

Fehlerrechnung: ja / nein

Datum: 23.05.13 .....

Handzeichen: Pause .....

Bemerkungen:

Sehr gutes Protokoll &  
Musterprotokoll ?!?



**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 ( $0.1 / 1 / 10 \text{ G}\Omega$ ).

**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  $590 \text{ nm}$  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  $400 \text{ nm}$  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.

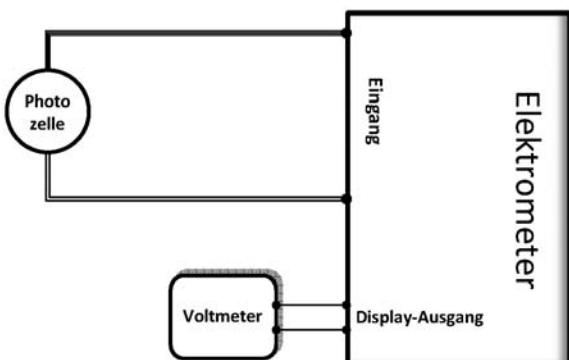
Zweckmäßige Spannungsintervalle:  $-3 \text{ V}$  bis  $-0,5 \text{ V}$ :  $\Delta U = 0,1 \text{ V}$ ;  $-0,5 \text{ V}$  bis  $3 \text{ V}$ :  $\Delta U = 0,5 \text{ V}$ ;  $3 \text{ V}$  bis  $9 \text{ V}$ :  $\Delta U = 1 \text{ V}$ . Messen Sie bei maximaler Lichtintensität. Untersuchen Sie auch 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.

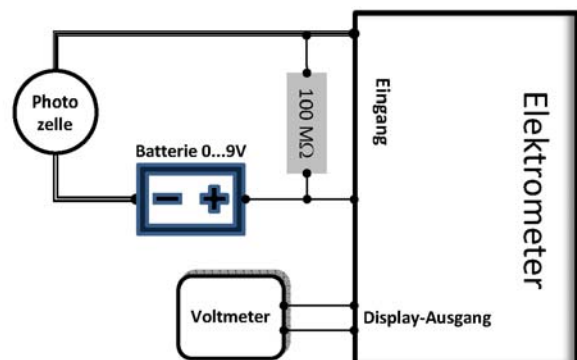
Diskutieren Sie qualitativ die Ursachen (z.B. Geometrie der Photozelle, Kathodenmaterial, Anodenmaterial, Lichtintensität, Energien und Anzahlen der austretenden Photoelektronen, Raumladung, Elektronenemission von der K-kontaminierten Anode durch Streulicht) für die beobachtete Strom-Spannungs-Abhängigkeit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

# Vorbereitung

## Photoeffekt

Versuch P2-63,64,65

Matthias Linster

Dominic Scheider

(Gruppe DO-05)

25.04.2013

### Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Grundlagen</b>	<b>2</b>
2.1	Der Photoeffekt . . . . .	2
2.2	Die Vakuum-Photozelle . . . . .	3
2.3	Ideale Spannungs-/Stromquelle . . . . .	4
<b>3</b>	<b>Versuch 1 - Demonstration des Hallwachs-Effekts</b>	<b>5</b>
<b>4</b>	<b>Versuch 2 - Elektronmetereigenschaften</b>	<b>6</b>
<b>5</b>	<b>Versuch 3 - Photoeffekt und <math>\frac{h}{e}</math>-Bestimmung</b>	<b>6</b>
5.1	Versuch 3.1 - Messung der Klemmspannung der Photozelle . . . . .	7
5.2	Versuch 3.2 - Messung der Gegenspannung . . . . .	7
5.3	Versuch 3.3 - Messung des Photostroms in Abhängigkeit von der angelegten Spannung . . . . .	8
5.4	Versuch 3.4 - Bestimmung des Abschwächfaktors eines Graufilters . . . . .	8
5.5	Versuch 3.5 - Messung der Gegenspannung für das Verschwinden des Photostroms . . . . .	9
<b>6</b>	<b>Quellen</b>	<b>9</b>

# 1 Einleitung

Der Photo- oder Hallwachs-Effekt wurde erstmals 1888 von HALLWACHS beobachtet und ist einer der Effekte, die im Rahmen der klassischen Physik nicht verstanden werden konnten. In der 1905 von EINSTEIN veröffentlichten Lichtquantenhypothese wurde das Phänomen über die Quantelung des Lichts erklärt. Heutzutage findet der Photoeffekt vielfache Anwendung, etwa in den Chips von Digitalkameras.

Daher soll der Effekt in diesem Versuch näher untersucht werden und dabei insbesondere das Verhältnis von Planckschen Wirkungsquantum  $h$  zur Elementarladung  $e$  bestimmt werden.

## 2 Grundlagen

### 2.1 Der Photoeffekt

Der Photoeffekt lässt sich in zwei verschiedene physikalische Phänomene unterteilen, den sogenannten inneren sowie den äußeren lichtelektrischen Effekt, die im Folgenden kurz dargestellt werden sollen.

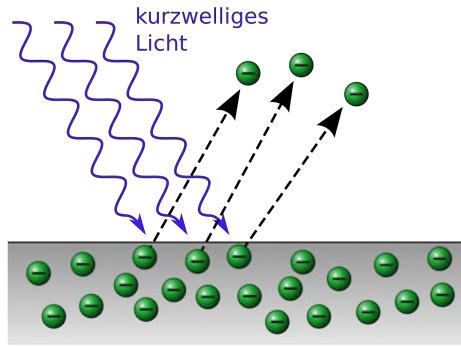
#### **Der innere lichtelektrische Effekt**

Der innere lichtelektrische Effekt bildet die Grundlage von etwa Photodioden. Trifft Licht ausreichender Energie auf einen Halbleiter, so können normalerweise gebundene Ladungsträger in das Leitungsband gelangen und somit zum Stromfluss beitragen. Der Halbleiter hat folglich unter Lichteinstrahlung eine höhere Leitfähigkeit.

#### **Der äußere lichtelektrische Effekt**

Der äußere lichtelektrische Effekt bezeichnet die Freisetzung von Elektronen aus einem Material bei der Bestrahlung mit Licht genügend hoher Energie. Er wurde von HALLWACHS beobachtet, indem er ein negativ geladenes Elektrometer mit UV-Licht bestrahlte. Er beobachtete dabei, dass der Ausschlag so schneller zurückging, als ohne UV-Licht. Ein positiv geladenes Elektrometer hingegen entlud sich nicht.

Die Erklärung lieferte schließlich EINSTEIN. Er griff die von PLANCK entdeckte Quantelung des Lichts auf und erkannte, dass auch die elektromagnetische Strahlung Teilcheneigenschaften besitzt, die im Zusammenhang der Wechselwirkung von Licht mit Materie zum Tragen kommt. Bestrahlt man ein Material mit Licht, so treffen die Lichtteilchen, die sogenannten Photonen, auf Elektronen in diesem Material. Diese absorbieren nun das Photon und besitzen nun eine höhere Energie. Ist diese höher als die Austrittsarbeit, so kann das Elektron das Material verlassen.



**Abbildung 1:** Schematische Darstellung des äußeren Photoeffekts [1]

Mathematisch ergibt sich:

Trifft ein Photon der Energie  $E_\gamma = h\nu$ , wobei  $h \approx 6,626 \cdot 10^{-34} \text{Js}$  das Plancksche Wirkungsquantum sowie  $\nu$  die Frequenz des einfallenden Lichts bezeichnet, auf ein Elektron, so absorbiert dieses die gesamte Energie des Photons. Ist diese höher als die Austrittsarbeit  $W_A$  des Materials, so kann das Elektron das Material verlassen und erhält zusätzlich die Differenz aus  $E_\gamma$  und  $W_A$  als kinetische Energie  $E_{\text{kin}}$ :

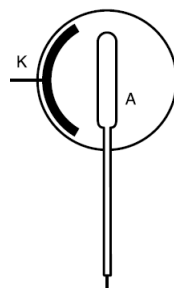
$$E_\gamma = h\nu = W_A + E_{\text{kin}}$$

Insbesondere ist an obiger Formel erkennbar, dass die kinetische Energie eines Elektrons linear in der Frequenz  $\nu$  des einfallenden Lichts ist. Ferner existiert eine Grenzfrequenz, unterhalb derer keine Elektronen mehr freigesetzt werden. Dies ist der Fall, wenn die Energie der einfallenden Photonen kleiner als die Austrittsarbeit ist.

Eine Erhöhung der Intensität des Lichts hat dabei keineswegs eine Erhöhung der Energie der Photonen und damit der kinetischen Energie der Elektronen zur Folge. Vielmehr bedeutet eine höhere Intensität eine höhere Anzahl an Photonen, sodass nun mehr Elektronen freigesetzt werden.

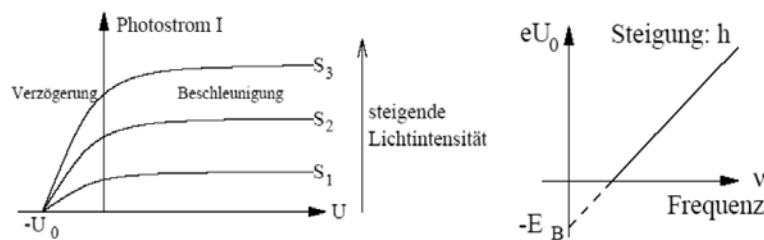
## 2.2 Die Vakuum-Photozelle

Die Vakuum-Photozelle besteht aus einer Kathode sowie Anode, die sich im Vakuum befinden.



**Abbildung 2:** Schematischer Aufbau der Vakuum-Photozelle [4]

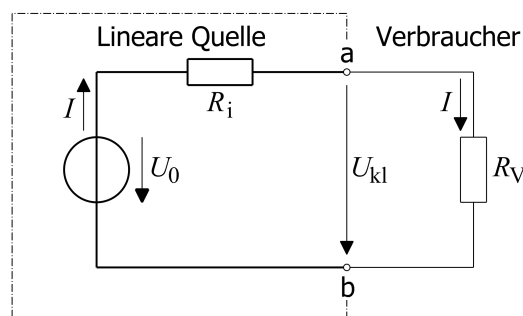
Bestrahlt man die Kathode mit Licht, so lässt sich bei entsprechend hoher Energie der Strahlung der Photoeffekt beobachtet werden. An die Anode und Kathode kann dabei eine Spannung gelegt werden. Legt man etwa eine Gegenspannung an, so verrichten die Elektronen Arbeit und verlieren einen Teil der kinetischen Energie, der Photostrom sinkt folglich, da die Elektronen nun langsamer sind und weniger Elektronen pro Zeiteinheit auf die Anode treffen. Insbesondere existiert eine Grenzspannung  $U_{\text{Grenz}}$ , nämlich wenn die von den Elektronen im elektrischen Feld verrichtete Arbeit gleich der kinetischen Energie ist ( $eU_{\text{Grenz}} = E_{\text{kin}} = h\nu - W_A$ ), unterhalb derer kein Photostrom mehr gemessen werden kann. Ist die Spannung  $U$  jedoch umgekehrt, so nehmen die Elektronen beim Durchlaufen des elektrischen Feldes die zusätzliche Energie  $eU$  auf, der Photostrom steigt folglich bis zu einem von der Lichtintensität abhängigen konstanten Wert, bei dem alle freigesetzten Elektronen auf die Anode treffen.



**Abbildung 3:** Abhängigkeit der Photostromstärke von der an der Photozelle angelegten Spannung sowie Lichtintensität des eingestrahlt Lichts (links); Auftragung der kinetischen Energie der Elektronen gegenüber der Frequenz des einfallenden Lichts,  $E_B$  bezeichnet hier die Austrittsarbeit  $W_A$  (rechts) [5]

### 2.3 Ideale Spannungs- /Stromquelle

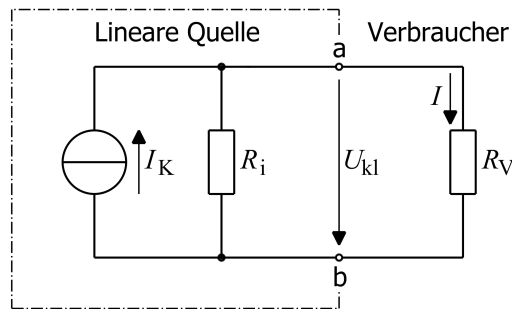
Eine Spannungsquelle heißt ideal, wenn sie stets dieselbe Ausgangsspannung unabhängig von der angehängten Last erbringt. Dies kann nur erreicht werden, wenn der Innenwiderstand der Quelle  $R_i = 0\Omega$  ist. Dies kann jedoch in der Realität nicht erreicht werden. Es ergibt sich daher folgendes Ersatzschaltbild:





**Abbildung 4:** Ersatzschaltbild der realen Spannungsquelle mit Innenwiderstand  $R_i$  und angehängtem Lastwiderstand  $R_V$ . Die von der Quelle erzeugte Spannung  $U_0$  wird zur Klemmspannung  $U_{kl}$  verändert. [2]

Analog heißt eine Stromquelle ideal, wenn sie stets dieselbe Ausgangsstromstärke liefert und somit abhängig von der angehängten Last eine genügend hohe Klemmspannung. Hierfür muss der Innenwiderstand  $R_i = \infty$  betragen. Dies ist jedoch ebenfalls in der Praxis nicht erreichbar, wodurch sich folgendes Ersatzschaltbild ergibt:



**Abbildung 5:** Ersatzschaltbild der realen Stromquelle. Die erzeugte Stromstärke  $I_K$  entspricht aufgrund des endlichen Innenwiderstands  $R_i$  nicht der nutzbaren Stromstärke  $I$  [3]

Ein Voltmeter ist ein Messgerät zur Spannungsmessung. Die Messung erfolgt dabei durch Parallelschaltung des Voltmeters zum Teil des Stromkreises, an dem der Spannungsabfall bestimmt werden soll. Dabei sollte kein Strom durch das Messgerät fließen, was durch einen unendlichen Innenwiderstand erreicht werden kann. Dies ist jedoch praktisch nicht möglich, sodass reale Spannungsmessgeräte stets mit einem Fehler behaftet sind.

Ein Amperemeter hingegen dient der Messung der Stromstärke. Im Gegensatz zum Voltmeter wird dieses in Reihe geschaltet und es sollte keine Spannung am Amperemeter abfallen. Dazu darf das Messgerät keinen Innenwiderstand besitzen. Dies ist jedoch praktisch nicht möglich.

Die Vakuum-Photozelle kann bei Bestrahlung mit Licht und geeigneter Spannung einen konstanten Photostrom liefern. Dies entspräche einer idealen Stromquelle. Umgekehrt stellt sich ohne angelegte Spannung bei der Bestrahlung mit Licht eine charakteristische Grenzspannung ein, was für eine ideale Spannungsquelle spräche. Dennoch brechen Stromstärke bzw. Spannung bei angehängter Last ein, wodurch sich die Photozelle weder wie eine ideale Spannungs- noch wie eine ideale Stromquelle verhält.

### 3 Versuch 1 - Demonstration des Hallwachs-Effekts

In diesem Versuch soll der Hallwachs-Effekt demonstriert mit einer Zinkplatte demonstriert werden. Die Zinkplatte wird dabei auf ein elektrostatisches Elektrometer gesteckt

und kurzzeitig mit Hilfe einer Hochspannungsquelle aufgeladen. Es ist dabei zu beachten, dass vorher die dem Photoeffekt hinderliche Zink-Oxid-Schicht, die an der Luft entsteht, durch Schmirgeln entfernt wurde. Es sollen nun drei Versuche mit obiger Anordnung durchgeführt werden.

Zunächst soll der Ausschlag des Elektrometers ohne weitere Einflüsse beobachtet werden. Es ist zu erwarten, dass dieser sehr langsam zurückgeht.

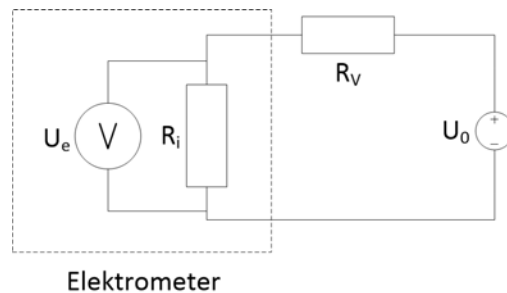
In einem zweiten Versuch soll die Zink-Platte mit einer Quecksilberdampf Lampe, die unter anderem UV-Licht aussendet, beleuchtet werden. Gemäß den Ausführungen in den Grundlagen sollte hier der Photoeffekt beobachtet werden können, da Elektronen durch die UV-Strahlung freigesetzt werden. Insbesondere sollte hier also der Elektrometerauschlag schneller zurückgehen als im vorherigen Versuch.

In einem dritten und letzten Versuch soll noch eine positiv geladene Metallelektrode in die Nähe der Zinkplatte positioniert werden. Da hierbei die freigesetzten Elektronen zu dieser Anode hin beschleunigt werden und nicht etwa wieder zum Elektrometer zurückfallen, sollte der Ausschlag nun schneller zurückgehen als in den vorherigen Versuchen.

## 4 Versuch 2 - Elektronmetereigenschaften

Es soll der Innenwiderstand  $R_i$  des Elektrometers, das aus einem Messverstärker besteht, bestimmt werden. Dazu soll zunächst eine fest definierte Spannung von  $U_0 = 5V$  bei einer Verstärkung von 1 an das Elektrometer angelegt werden. Als Spannung sollte das Elektrometer diese Spannung auch anzeigen.

In einem zweiten Versuch sollen nun verschiedene Vorwiderstände ( $R_V = 0,1/1/10G\Omega$ ) zum Einsatz kommen, die in Reihe mit der Spannungsquelle geschaltet werden sollen. Das Elektrometer sollte nun eine geringere Spannung  $U_e$  anzeigen, da ein Teil der Spannung am Vorwiderstand abfällt.



**Abbildung 6:** Schaltung zur Messung des Innenwiderstands

Es gilt mit der Maschenregel sowie dem Ohmschen Gesetz nach obiger Skizze  $U_e = R_i I$  sowie  $I = \frac{U_0}{R_V + R_i}$  und damit ergibt sich:

$$R_i = R_V \cdot \frac{U_e}{U_0 - U_e}$$

## 5 Versuch 3 - Photoeffekt und $\frac{h}{e}$ -Bestimmung

In diesem Versuch sollen nun verschiedene Messungen zum Photoeffekt durchgeführt werden. Als Aufbau soll dabei eine Quecksilberdampflampe, deren Licht über eine Linse zunächst gesammelt und über eine Irisblende zur Variation der Intensität des Lichts sowie einen Wellenlängen-Filter auf die Photozelle geleitet werden soll. Für den Versuch ist eine Hg-Dampflampe notwendig, da sie einerseits ein diskretes Spektrum besitzt und andererseits auch Wellenlängen im UV-Bereich emittiert, im Gegensatz zu einer herkömmlichen Halogenlampe.

### 5.1 Versuch 3.1 - Messung der Klemmspannung der Photozelle

Bei maximaler Lichtintensität soll die Klemmspannung der Photozelle für verschiedene Wellenlängen gemessen werden.

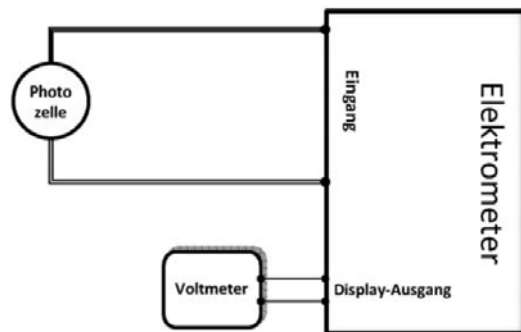


Abbildung 7: Aufbau zur Messung der Klemmspannung [6]

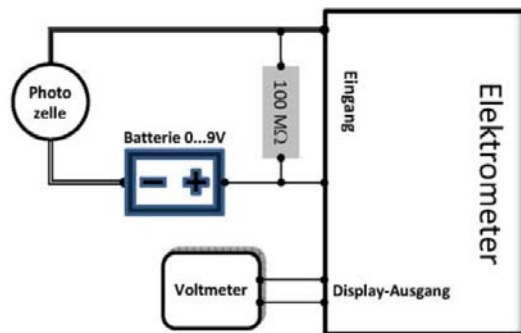
Die Wellenlängen können dabei mit Hilfe des zur Verfügung stehenden Filters eingestellt werden und die Messung für jede Wellenlänge mindestens dreimal wiederholt werden. Ferner soll mit Hilfe der Irisblende überprüft werden, ob die sich einstellenden Spannungen intensitätsunabhängig sind, was gemäß der Diskussion in den Grundlagen zu erwarten ist. Für die Messdaten sollte sich bei der Auftragung der Klemmspannung  $U$  gegenüber der reziproken Wellenlänge  $\lambda$  eine Gerade ergeben und es gilt mit  $\nu = \frac{c}{\lambda}$  und  $eU = h\nu - W_A$  (siehe Grundlagen):

$$U = \frac{hc}{e} \cdot \frac{1}{\lambda} - \frac{W_A}{e}$$

Das Verhältnis  $\frac{h}{e}$  kann folglich aus der Geradensteigung der Ausgleichsgeraden der Messwerte bestimmt werden. Der Achsenabschnitt liefert die Austrittsarbeit  $W_A$ .

### 5.2 Versuch 3.2 - Messung der Gegenspannung

Mit Hilfe des folgenden Aufbaus soll nun die Gegenspannung gemessen werden, die an die Photozelle angelegt werden muss, damit die Klemmspannung auf Null absinkt.



**Abbildung 8:** Aufbau zur Messung der Gegenspannung [6]

In diesem Versuch soll noch kein Vorwiderstand benutzt werden. Analog zum vorherigen Versuchsteil soll wieder für dieselben Wellenlängen die Messung durchgeführt werden und anschließend das Verhältnis  $\frac{h}{e}$  aus der Geradensteigung bestimmt werden.

### 5.3 Versuch 3.3 - Messung des Photostroms in Abhängigkeit von der angelegten Spannung

In die Schaltung aus Versuch 3.2 soll nun noch ein Arbeitswiderstand eingebaut werden, über dem mit dem Elektrometer die Spannung abgegriffen werden soll. Bei maximaler Lichtintensität von Licht der Wellenlänge 400nm soll nun der fließende Photostrom  $I$  bestimmt werden, indem die über dem Arbeitswiderstand abfallende Spannung  $U_A$  gemessen wird.  $I$  ergibt sich dann mit dem Arbeitswiderstand  $R_A$  und der Verstärkung  $V$  des Elektrometers zu:

$$I = \frac{U_A}{R_A V}$$

Es soll auch der Einfluss des Streulichts gemessen werden, in dem bei abgedunkelter Lampe der Photostrom gemessen wird. Das obige Ergebnis sollte dann über diese Messung korrigiert werden.

Erwartet wird eine Abhängigkeit, wie sie in den Grundlagen bereits diskutiert wurde (vgl. Abbildung 3).

### 5.4 Versuch 3.4 - Bestimmung des Abschwächfaktors eines Graufilters

Die Messung aus Versuch 3.3 soll nun wiederholt werden, wobei mit Hilfe eines Graufilters die Intensität reduziert wird. Der Abschwächfaktor des Graufilters kann aus dem Vergleich der Intensitätsmaxima bestimmt werden. Ferner sollen die Nulldurchgänge des Photostroms der Messungen aus Versuch 3.3 und 3.4 verglichen werden.

## 5.5 Versuch 3.5 - Messung der Gegenspannung für das Verschwinden des Photostroms

Es soll nun wieder die Schaltung wie in den vorherigen Versuchen verwendet werden. Es soll nun jedoch nicht der sich einstellende Photostrom gemessen werden, sondern die Gegenspannung bestimmt werden, die eingestellt werden muss, sodass der Photostrom verschwindet. Aus diesen Daten soll wieder das Verhältnis  $\frac{h}{e}$  bestimmt werden. Dies geschieht analog zu oben über die Geradensteigung im  $U-\frac{1}{\lambda}$ -Diagramm. Im Gegensatz zu Versuch 3.2 ist hier ein Stromfluss möglich, nämlich über den parallel zum Elektrometer geschalteten Arbeitswiderstand, während vorher der hohe Innenwiderstand des Elektrometers den Photostrom verhinderte.

## 6 Quellen

### Literatur

- [1] [http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fotoelektrischer\\_Effekt.svg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fotoelektrischer_Effekt.svg), abgerufen am 24.04.2013
- [2] [http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Quelle\\_U-Ersatz.svg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Quelle_U-Ersatz.svg), abgerufen am 24.04.2013
- [3] [http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Quelle\\_I-Ersatz.svg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Quelle_I-Ersatz.svg), abgerufen am 24.04.2013
- [4] Leybold Handblätter Physik, Bestimmung des Planckschen Wirkungsquantums
- [5] Vorlesungsfolien zur Vorlesung Moderne Experimentalphysik I, Atome und Moleküle; gehalten von Prof. Dr. Wim de Boer im SS2013 am Karlsruher Institut für Technologie
- [6] Aufgabenblatt zum Versuch Photoeffekt



A1)

t: Zeit für ~~n~~ n Teilstriche an der Elektrometerskala

- (a)  $n \cong 0,1$   $t = 240s$
- (b) Licht  $n \cong 1,0$   $t = 15s$
- (c) Licht und Anode  $n \cong 1,0$   $t = 7s$

A2) Verstärkung  $V=1$

$U_0 \cong 5,0 V$

$R_V$	$0 \Omega$	$0,1 G\Omega$	$1 G\Omega$	$10 G\Omega$
$U_{mess}$	5,037	5,040	5,023	4,905

Der

A3) Nullabgleich auf  $0,000 V$

3.1

$\lambda/nm$	360	400	440	490	540	590
<del>U/V</del>	<del>1,42</del>	<del>1,19</del>	<del>0,97</del>	<del>0,81</del>	<del>0,66</del>	<del>0,52</del>
U/V	1,42	1,19	0,97	0,81	0,66	0,52
U/V	1,44	1,19	0,96	0,81	0,65	0,52
U/V	1,43	1,17	0,96	0,81	0,66	0,52

Intensität:  
Blende  $\sim 1/2$  Radius

U/V	1,63	1,36	1,15	0,96	0,79	0,76
-----	------	------	------	------	------	------

Intensität:  
Blende geschlossen, Raumlicht aus

U/V	$\approx 0,03$				
-----	----------------	--	--	--	--



3.2

$\lambda/nm$	360	400	440	490	540	590
$U_{\text{gegen } V}$	1,42	1,17	0,94	0,80	0,65	0,49
$U_{\text{gegen } IV}$	1,42	1,21	0,98	0,81	0,67	0,53
$U_{\text{gegen } V}$	1,46	1,21	0,98	0,82	0,67	0,52

3.3

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

$V = 1 \text{ V}$

$U_{\text{batt}} / V$	-3,00	-2,90	-2,80	-2,70	-2,60	-2,50	-2,40	-2,30
$U_{\text{mess}} / V$	-0,235	-0,234	-0,233	-0,233	-0,233	-0,233	-0,232	-0,230
	-0,175	-0,175	-0,187	-0,183	-0,181	-0,180	-0,234	-0,180

	-2,20	-2,10	-2,00	-1,90	-1,80	-1,70	-1,60	-1,50
	-0,188	-0,241	-0,234	-0,229	-0,226	-0,170	-0,205	-0,180
	-1,40	-1,30	-1,20	-1,10	-1,00	-0,90	-0,80	-0,70
	-0,117	-0,062	0,002	0,065	0,124	0,181	0,255	0,340

	-0,60	-0,50	±0,00	0,50	1,00	1,50	2,00
	0,419	0,494	0,905	1,337	1,766	2,196	2,613

	2,50	3,00	4,00	5,00	6,00	7,00	8,00	8,85
	3,079	3,521	4,390	5,313	6,205	7,130	8,011	8,781

Blende zu:  $U_{\text{mess}} = 0,001 \text{ V}$  bei  $U_{\text{batt}} = 8,85 \text{ V}$

*Pa*



$\boxed{3.4}$   $R_V = 100 \text{ M}\Omega$   
 $V = 10$

$U_{\text{batt}}/V$	-3,00	-2,90	-2,80	-2,70	-2,60	-2,50	-2,40	-2,30
$U_{\text{mess}}/V$	-0,86	-0,86	-0,86	-0,86	-0,86	-0,87	-0,87	-0,87
	-2,20	-2,10	-2,00	-1,90	-1,80	-1,70	-1,60	-1,50
	-0,87	-0,86	-0,86	-0,85	-0,84	-0,83	-0,82	-0,76
	-1,40	-1,30	-1,20	-1,10	-1,00	-0,90	-0,80	-0,70
	-0,75	-0,47	-0,08	0,43	0,86	1,50	2,05	2,69
	-0,60	-0,50	0,00	0,50	1,00	1,50	2,00	2,50
	3,38	4,05	7,63	11,39	13,90	13,90	13,91	13,91
	3,00	4,00	5,00	6,00	7,00	8,00	8,83	
	13,92	13,93	13,98	14,02	14,02	14,02	14,02	

Pa

$\boxed{3.5}$   $R_V = 100 \text{ M}\Omega$  ( $V = 10^3$ )

$X/\text{mm}$	360	400	440	490	540	590
$U_{\text{batt}}/V$	1,42	1,17	0,95	0,80	0,66	0,51
$U_{\text{mess}}/V$	1,42	1,18	0,96	0,80	0,65	0,51
$U_{\text{batt}}/V$						

$\Delta U_{\text{mess}} = \pm 0,1 \text{ V}$

Pa



Auswertung

# Photoeffekt

P2 - 63

Matthias Linster  
Dominic Scheider  
(Gruppe DO-05)

25.04.2013

## Inhaltsverzeichnis

<b>1 Aufgabe 1: Hallwachs-Effekt</b>	<b>2</b>
<b>2 Aufgabe 2: Elektrometer</b>	<b>3</b>
<b>3 Aufgabe 3: Photoeffekt und <math>\frac{h}{e}</math>-Bestimmung</b>	<b>5</b>
3.1 Aufgabe 3.1: Bestimmung der Klemmenspannungen . . . . .	5
3.2 Versuch 3.2 - Messung der Gegenspannung . . . . .	8
3.3 Versuch 3.3 - Messung des Photostroms in Abhängigkeit von der angelegten Spannung . . . . .	10
3.4 Versuch 3.4 - Bestimmung des Abschwächfaktors eines Graufilters . . . . .	13
3.5 Versuch 3.5 - Messung der Gegenspannung für das Verschwinden des Photostroms . . . . .	16
<b>4 Hilfsmittel</b>	<b>18</b>

# 1 Aufgabe 1: Hallwachs-Effekt

Im ersten Abschnitt des Versuchs soll der HALLWACHS-Effekt demonstriert werden. Dazu wird eine Zinkplatte verwendet, welche mit dem Anschluss eines Elektroskops in Kontakt steht. Diese Platte wird negativ gegenüber dem geerdeten Gehäuse des Geräts aufgeladen, wobei Hochspannung ( $U \approx 2\text{kV}$ ) verwendet wird, sodass das Elektrometer voll ausschlägt. Vor der Verwendung der Platte wird diese abgeschmirgelt, sodass die Oxidschicht an der Metalloberfläche entfernt wird.

Es wird unter verschiedenen Bedingungen gemessen:

- Zuerst findet Versuchsteil (1) ohne weitere Hilfsmittel statt.
- Anschließend wird die Platte in Teil (2) mit einer Quecksilberdampf-Lampe bestrahlt.
- Schließlich wird in Teil (3) sowohl beleuchtet als auch in die Nähe einer auf positivem Potential liegenden Anode gebracht.

In jedem Fall wird eine Entladung der Platte beobachtet. Um die geforderte qualitative Aussage zumindest im Ansatz mit Zahlen untermauern zu können, messen wir die jeweilige Geschwindigkeit des Elektroskopzeigers in relativen Einheiten, bezogen auf die dort aufgetragenen Skalenstriche. Wir erhalten in den Einzelmessungen:

Messung	1	2 (Licht)	3 (Licht, Anode)
Geschwindigkeit / $\frac{\text{SKT}}{\text{s}}$	$\leq 0,0005$	$\approx 0,07$	$\approx 0,14$

**Tabelle 1:** Geschwindigkeiten des Elektroskopzeigers in relativen Einheiten.

Die beobachtete Entladung entspricht dem HALLWACHS-Effekt und tritt nur bei negativ geladenen Platten auf. Zur Erklärung werden die Überschusselektronen auf der negativ aufgeladenen Zinkplatte betrachtet.

Im ersten Versuchsteil geschieht eine kontinuierliche, aber langsame Entladung, deren Ursache einerseits kaum vermeidbare Mängel in der Isolierung im Elektroskop und auf Grund der Raumluft sind, andererseits die Energieübertragung an die auf der Metalloberfläche sitzenden Überschusselektronen durch das natürliche Licht.

Der zweite Versuchsteil weist explizit den Einfluss des Lichtes nach und zeigt den eigentlichen HALLWACHS-Effekt. Im Photonenbild ist der Effekt unmittelbar einsichtig: Photonen mit einer Energie gemäß  $E = h\nu$  sind im Licht der Quecksilberdampf-Lampe im Mittel wesentlich energiereicher als im Umgebungslicht. Sie können auf die Überschusselektronen diese Energie übertragen, sodass diese die Platte verlassen. Im Unterschied zum energieärmeren Raumlicht bleibt den Elektronen genügend kinetische Energie, dass deutlich weniger davon zur Platte zurückkehren; die Entladung geschieht signifikant schneller.

Im dritten Teil wird die Tendenz der Elektronen, zur Platte zurückzukehren, durch die auf positivem Potential liegende Anode verringert, sodass die Entladung noch schneller vonstatten geht.

## 2 Aufgabe 2: Elektrometer

In dieser Teilaufgabe soll die im Folgenden zu Grund liegende Messschaltung genauer betrachtet werden. Dazu wurden schon in der Vorbereitung die Begriffe der idealen Strom- respektive Spannungsquelle sowie des Volt- und des Amperemeters geklärt.

Die im folgenden verwendete Vakuum-Photozelle kann in die vorgestellte Auswahl nicht eindeutig eingeordnet werden. Ohne Belastung kann die Photozelle bei geeigneter Beleuchtung sowohl als Spannungs- als auch als Stromquelle verwendet werden. Jedoch ist der zur Verfügung gestellte Photostrom im Sättigungsfall abhängig von der Beleuchtungsintensität und im nicht gesättigten Fall eine charakteristische Funktion der anliegenden Spannung (vgl. Aufgaben 3.3 und 3.4). Umgekehrt ist die Spannung an der Photozelle nur im Gleichgewichtsfall maximal und konstant. Eine ideale Quelle liegt also keineswegs vor.

An dieser Stelle soll zunächst der Innenwiderstand des verwendeten Elektrometers bestimmt werden. Mit der in der Vorbereitung dargestellten Schaltung und Gleichung erhält man den Innenwiderstand  $R_i$  aus dem zugeschalteten Vorwiderstand  $R_V$ , der angelegten Spannung  $U_0$  und der vom Verstärker angezeigten Spannung  $V \cdot U_e$  beim Verstärkungsfaktor  $V$ :

$$R_i = R_V \cdot \frac{V \cdot U_e}{U_0 - V \cdot U_e} \Leftrightarrow R_V = R_i \cdot \frac{U_0 - V \cdot U_e}{V \cdot U_e} = R_i \cdot \left( \frac{U_0}{V \cdot U_e} - 1 \right) \quad (1)$$

Bei den Parametern

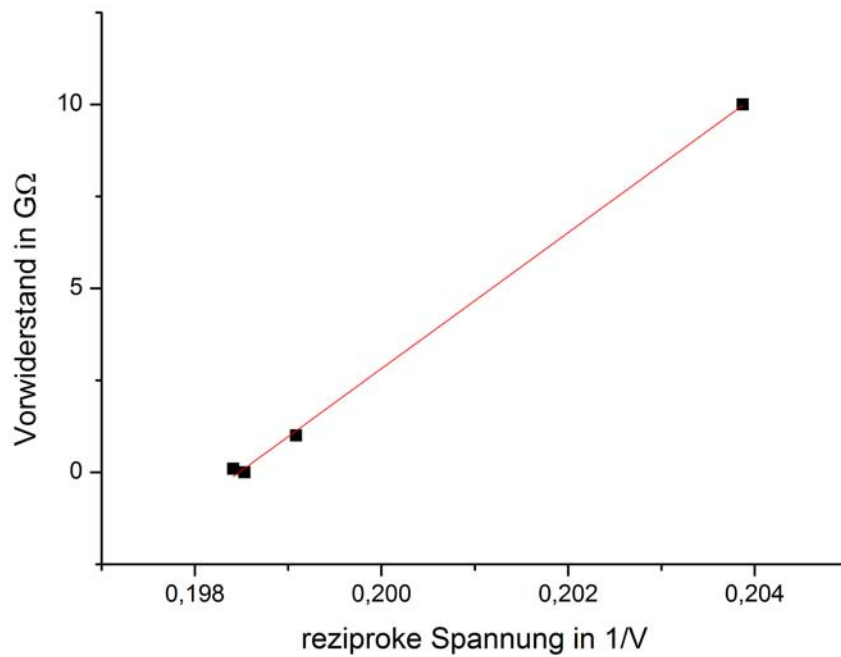
$$U_0 = 5,00\text{V} \quad V = 1$$

erhalten wir die Messwerte:

Vorwiderstand $R_V$ / $\text{G}\Omega$	0,0	0,1	1	10
Spannung $U_e$ / V	5,037	5,040	5,023	4,905

**Tabelle 2:** Messergebnisse zur Bestimmung des Elektrometerwiderstands.

Eine grafische Auftragung hat das Aussehen:



**Abbildung 1:** Messergebnisse zur Bestimmung des Elektrometerwiderstands. Ein linearer Fit ist eingezeichnet.

Lineare Regression liefert die Beziehung:

$$R_V = \frac{1}{U_e} \cdot 1848,8V \cdot G\Omega - 367G\Omega$$

Man erhält aus der wesentlich weniger fehlerbehafteten Steigung:

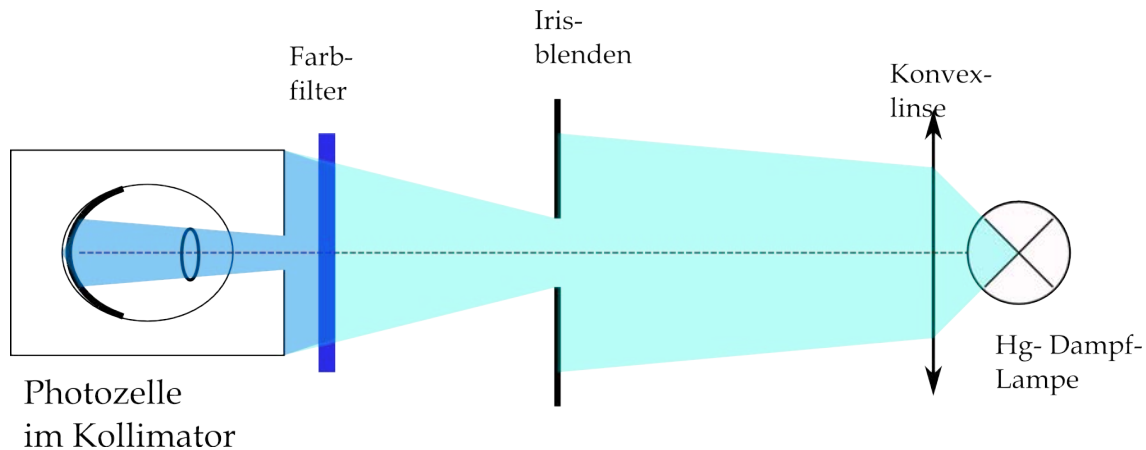
$$R_i = \frac{1848,8V \cdot G\Omega}{U_0} = 367G\Omega = 3,67 \cdot 10^{11}\Omega$$

Die Genauigkeit dieses Ergebnisses hängt dabei wesentlich von der Spannung  $U_0$  ab. Insgesamt liegt es jedoch im Bereich der Herstellerangabe ( $R_i \leq 10^{13}\Omega$ ).

### 3 Aufgabe 3: Photoeffekt und $\frac{h}{e}$ -Bestimmung

#### 3.1 Aufgabe 3.1: Bestimmung der Klemmenspannungen

Der optische Aufbau für die folgenden Versuche ist:



**Abbildung 2:** Strahlengang bei den Messungen mit der Photokathode. Die Farbfilter sind austauschbar.

Die Verwendung der Quecksilberdampf-Lampe ist dabei notwendig, um hinreichend stark ausgeprägte Photospannungen und -ströme zu erhalten und damit eine akzeptable Messgenauigkeit zu gewährleisten; so rief etwa bei Aufgabe 1 das Umgebungslicht einen wesentlich schwächeren photoelektrischen Effekt hervor als das Quecksilberlicht, dessen Photonen energiereicher sind. Selbstverständlich hängt die Ausprägung des Effekts auch stark vom Kathodenmaterial ab, und in Aufgabe 1 wurden nicht gebundene, sondern überschüssige Elektronen abgelöst; jedoch ist das Grundprinzip erkennbar.

Für die folgenden Messungen wurde zunächst ein Nullabgleich des Elektrometers durchgeführt, welcher im Millivoltbereich genau war. Dies rechtfertigt insbesondere die Genauigkeit der im Folgenden gemachten Spannungsangaben.

Im ersten Versuchsteil zum Photoeffekt wird die Klemmenspannung  $U$  an der Photozelle direkt gemessen, wobei die Wellenlänge des eingestrahlten Lichts variiert wird. Bei der Verstärkung  $V = 1$  erhalten wir die Messwerte:

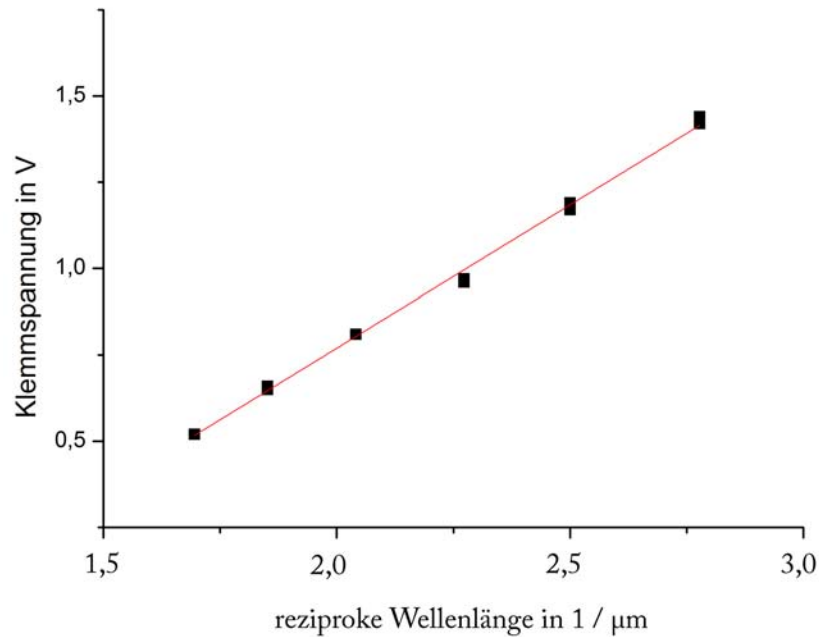
**Tabelle 3:** Messungen der Klemmenspannung an der Photozelle bei voller Lichtintensität.

Wellenlänge $\lambda$ / nm	Gegenspannungen $U_{\text{gegen}}$ / V		
	Messreihe 1	Messreihe 2	Messreihe 3
360	1,42	1,44	1,43
400	1,19	1,19	1,17
440	0,97	0,96	0,96
490	0,81	0,81	0,81
540	0,66	0,65	0,66
590	0,52	0,52	0,52

Man erkennt, dass die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse innerhalb der durch die Messgenauigkeit vorgegebenen Grenzen gewährleistet ist. Es gilt:

$$U = \frac{hc}{e} \cdot \frac{1}{\lambda} - \frac{W_A}{e} \quad (2)$$

Lineare Regression ergibt bei geeigneter Auftragung das folgende Resultat:



**Abbildung 3:** Grafische Auftragung der Klemmspannung über der inversen Wellenlänge. Ein linearer Fit wurde ebenfalls hinzugefügt.

$$U = 826\text{V} \cdot \text{nm} \cdot \frac{1}{\lambda} - 0,89\text{V}$$

Daraus erhält man das gesuchte Verhältnis:

$$\left(\frac{h}{e}\right)_{\text{exp}} = \frac{826\text{V} \cdot \text{nm}}{c} = 2,753 \cdot 10^{-15}\text{Vs} \quad (3)$$

Der theoretische Wert beträgt:

$$\left(\frac{h}{e}\right)_{\text{th}} = \frac{6,626 \cdot 10^{-34}\text{Js}}{1,602 \cdot 10^{-19}\text{C}} = 4,136 \cdot 10^{-15}\text{Vs} \quad (4)$$

Der gemessene Wert weicht davon um 33,4% ab, was einerseits an der mit den vorhandenen Mitteln erreichbaren Genauigkeit liegen kann, andererseits eine systematische Abweichung zur Ursache haben kann. Der erste Punkt ist dabei weniger plausibel, da erstens die Messwerte eine hinlängliche Reproduzierbarkeit aufwiesen und zweitens die lineare Anpassung gut ( $R^2 = 0,9969$ ) erscheint. Eine mögliche systematische Ursache kann im Auftreten von Kontaktpotentialen auf Grund der verschiedenen Materialien von Anode und Photokathode liegen; diese sollten jedoch durch die Bildung des Differenzenquotienten weitgehend ohne Einfluss bleiben.

Man erhält aus der Gleichung ferner die Austrittsarbeit aus der Photokathode, wenn man an den Offset die Elementarladung multipliziert:

$$W_{A,\text{exp}} = 0,89\text{eV} \quad (5)$$

Im Anschluss wurden noch einige Überprüfungen durchgeführt. Zuerst war dies eine Messung bei geringerer Intensität des Quecksilberdampf-Lichtes, erreicht durch Verringerung des Radius der Irisblende. Dieser wurde etwa halbiert, was auf die folgenden Werte führte:

$\lambda / \text{nm}$	360	400	440	490	540	590
$U / \text{V}$	1,63	1,36	1,15	0,96	0,79	0,76

**Tabelle 4:** Messungen der Klemmenspannung an der Photozelle bei verringerter Lichtintensität.

Diese Werte erscheinen im Rahmen des Photoeffekts unplausibel, da eine Verringerung der Intensität sich nicht auf Austrittsarbeit und Grenzfrequenz und damit auf die sich einstellende Klemmenspannung haben sollte. Vergleicht man mit den bei voller Intensität aufgenommenen Werten, so stellt man eine systematische Abweichung nach oben bei jeder Wellenlänge fest; diese Abweichungen liegen im Bereich  $\Delta U = (+0,15 \pm 0,05)\text{V}$ . Es ist zu vermuten, dass die Begründung im optischen Aufbau zu suchen ist, etwa in den Aberrationen der Konvexlinse, wo durch die Blende die stärker gebrochenen hochenergetischen Lichtanteile bevorzugt werden, was bei einem nichtidealen Farbfilter die resultierende Spannung durchaus in der beobachteten Richtung beeinflussen kann. Mit analoger Rechnung zur obigen erhält man hier:

$$U = 828\text{V} \cdot \text{nm} \cdot \frac{1}{\lambda} - 0,71\text{V}$$

Damit ergibt sich in der berechneten Konstante keine signifikante Abweichung; die Austrittsarbeit wird jedoch durch die systematische Abweichung signifikant kleiner.

Zum zweiten wurde der Einfluss des Umgebungslichtes überprüft. Bei ausgeschalteter Raumbeleuchtung und geschlossener Blende stellte sich eine Spannung von  $U = 0,03\text{V}$  ein, was im Vergleich zur Größe der zuvor gemessenen Klemmenspannungen nur unwesentlich ist. Die auftretende Spannung erklärt sich vermutlich durch in die Photozelle fallendes Streulicht.

### 3.2 Versuch 3.2 - Messung der Gegenspannung

Es sollte in diesem Versuch das Verhältnis  $\frac{h}{e}$  sowie die Austrittsarbeit  $W_A$  des Kathodenmaterials über die Gegenspannungsmethode bestimmt werden. Dazu wurde die Schaltung wie in der Vorbereitung dargestellt aufgebaut und jeweils die Spannung notiert, die an der Batterie eingestellt werden musste, sodass das Elektrometer keine Spannung mehr anzeigte. In diesem Fall entspricht die Batterie-Spannung gerade der kinetischen Energie der freigesetzten Elektronen.

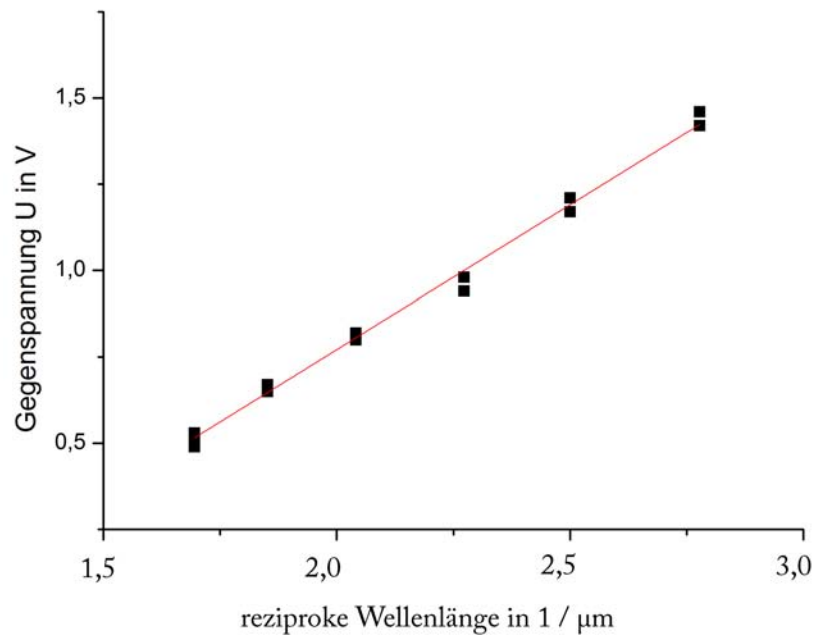
Wir erstellten drei Messreihen mit den Wellenlängen, die auch bereits im vorherigen Versuch zum Einsatz kamen. Es ergaben sich folgende Messdaten bei einer Verstärkung von  $V = 1$ :

**Tabelle 5:** Gegenspannungen  $U_{\text{gegen}}$  bei verschiedenen Wellenlängen  $\lambda$  des eingestrahlten Lichts

Wellenlänge $\lambda$ / nm	Gegenspannungen $U_{\text{gegen}}$ / V		
	Messreihe 1	Messreihe 2	Messreihe 3
360	1,42	1,42	1,46
400	1,17	1,21	1,21
440	0,94	0,98	0,98
490	0,80	0,81	0,82
540	0,65	0,67	0,67
590	0,49	0,53	0,52

Es sollte sich wieder bei Auftragung der Gegenspannung  $U_{\text{gegen}}$  gegenüber der reziproken Wellenlänge eine Gerade ergeben. Wir fassen die drei Messreihen zu einer zusammen und erhalten folgendes Diagramm:





**Abbildung 4:** Auftragung der Gegenspannung  $U_{\text{gegen}}$  gegenüber der inversen Wellenlänge, eingezeichnet ist ebenfalls der lineare Fit.

Wir erhalten folgende Daten für den linearen Fit der Form  $U = m \cdot \frac{1}{\lambda} + b$ :

$$m = 8,8 \cdot 10^{-7} \text{Vm}$$

$$b = -0,91 \text{V}$$

Dies ergibt analog zu oben folgende Werte für  $\frac{h}{e}$  sowie die Austrittsarbeit  $W_A$ :

$$\frac{h}{e} = 2,94 \cdot 10^{-15} \text{Vs}$$

$$W_A = 0,91 \text{eV}$$

Die Werte liegen nur geringfügig über den Werten aus vorherigem Versuch. Es ergibt sich wieder eine hohe Abweichung von etwa 28,9% des  $\frac{h}{e}$ -Wertes im Vergleich zum Theorie-Wert. Da auch hier die Regression wieder recht gut zu sein scheint, erhärtet sich der in Versuch 3.1 bereits erwähnte Verdacht, dass hier ein systematischer Fehler in der Anordnung zu suchen ist.

### 3.3 Versuch 3.3 - Messung des Photostroms in Abhängigkeit von der angelegten Spannung

In diesem Versuchsteil sollte der Photostrom in Abhängigkeit der angelegten Kathode-Anode-Spannung  $U_{\text{batt}}$  bestimmt werden. Dazu verwendeten wir wieder die in der Vorbereitung erwähnte Schaltung sowie Licht der Wellenlänge  $\lambda = 400\text{nm}$ . Da mit dem Elektrometer nur Spannungen gemessen werden können, erfolgte die Messung des Photostroms  $I$  durch Abgreifen der Spannung  $U_A$  über dem Arbeitswiderstand  $R_A$ , die nach dem Ohmschen Gesetz direkt proportional zum Photostrom ist:

$$I = \frac{U_A}{R_A V}$$

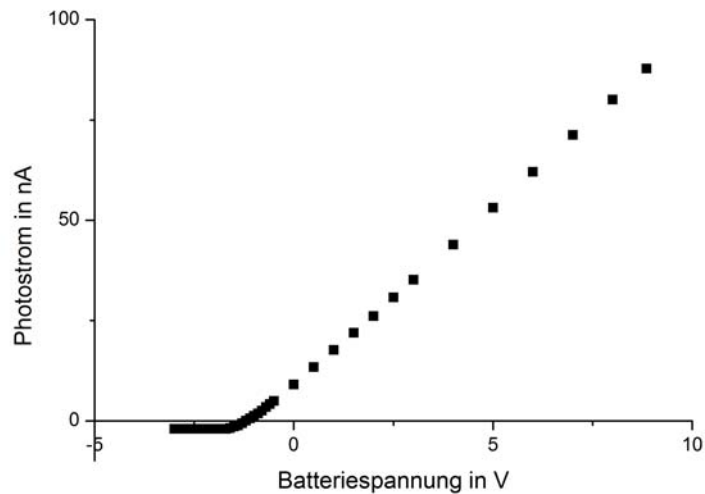
Wir wählten dabei als Widerstand  $R_A = 100\text{M}\Omega$  sowie als Verstärkung  $V = 1$  und erhielten folgende Messdaten:

**Tabelle 6:** Gemessene Spannung  $U_A$  am Arbeitswiderstand und die daraus resultierende Stromstärke  $I$  für verschiedene Batteriespannungen  $U_{\text{batt}}$ ; die Genauigkeit im Intervall  $[-3, -1,7]\text{V}$  war durch starke Schwankungen in den Spannungswerten begrenzt.

$U_{\text{batt}} / \text{V}$	$U_A / \text{V}$	Photostrom $I / \text{nA}$
-3,0	-0,2	-2
-2,9	-0,2	-2
-2,8	-0,2	-2
-2,7	-0,2	-2
-2,6	-0,2	-2
-2,5	-0,2	-2
-2,4	-0,2	-2
-2,3	-0,2	-2
-2,2	-0,2	-2
-2,1	-0,2	-2
-2,0	-0,2	-2
-1,9	-0,2	-2
-1,8	-0,2	-2
-1,7	-0,2	-2
-1,6	-0,180	-1,80
-1,5	-0,140	-1,40
-1,4	-0,117	-1,17
-1,3	-0,062	-0,62
-1,2	0,002	0,02
-1,1	0,065	0,65

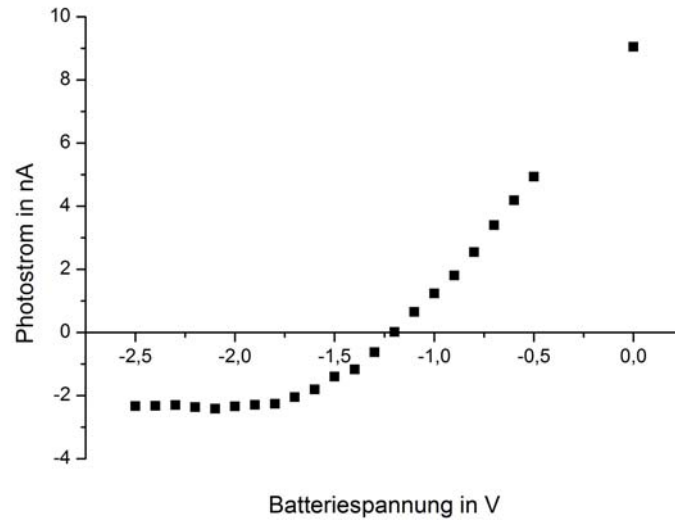
$U_{\text{batt}} / \text{V}$	$U_{\text{A}} / \text{V}$	Photostrom $I / \text{nA}$
-1,0	0,124	1,24
-0,9	0,181	1,81
-0,8	0,255	2,55
-0,7	0,340	3,40
-0,6	0,419	4,19
-0,5	0,494	4,94
0,0	0,905	9,05
0,5	1,337	13,37
1,0	1,766	17,66
1,5	2,196	21,96
2,0	2,613	26,13
2,5	3,079	30,79
3,0	3,521	35,21
4,0	4,390	43,90
5,0	5,313	53,13
6,0	6,205	62,05
7,0	7,130	71,30
8,0	8,011	80,11
8,85	8,781	87,81

Die Messung des Dunkelstroms ergab einen Spannungsabfall von  $U_{\text{A}} = 0,001\text{V}$  am Arbeitswiderstand, wodurch sich eine vernachlässigbare Korrektur ergibt. Trägt man den Photostrom gegenüber der Batteriespannung auf, so ergibt sich folgendes Diagramm:



**Abbildung 5:** Auftragung des Photostroms gegenüber der Batteriespannung

Es soll noch der Bereich des Nulldurchgangs näher untersucht werden. Dazu wird im Folgenden dieser Bereich vergrößert dargestellt:



**Abbildung 6:** Auftragung des Photostroms gegenüber der Batteriespannung im Intervall  $[-2,5; 0]V$

Da der Verlauf der Kurve im Bereich des Nulldurchgangs näherungsweise linear zu sein scheint, soll zur Bestimmung dieses Punktes ein linearer Fit der Form  $I = mU_{\text{batt}} + b$  durchgeführt werden. Es ergibt sich eine Gerade mit folgenden Parametern:

$$m = 7,4 \frac{\text{nA}}{\text{V}}$$

$$b = 8,7 \text{nA}$$

Daraus ergibt sich der Nulldurchgang bei der Batteriespannung  $U_{\text{batt},0}$  zu:

$$U_{\text{batt},0} \approx -1,17V$$

Das Diagramm lässt folgende Interpretation zu:

Bei einer negativen Spannung liegt aus der Sicht der von der Kathode emittierten Elektronen ein Gegenfeld an, sodass diese abgebremst werden. Ein Elektronen-Strom von der Kathode zur Anode kann in diesem Fall nur dann fließen, wenn die kinetische Energie der ausgelösten Elektronen die zur Überwindung des Gegenfeldes notwendige elektrische Energie übersteigt. Dies ist offenbar ab etwa einer Spannung von  $U_{\text{batt},0} = -1,17V$  der Fall, bei dem die kinetische Energie vollständig in elektrische Energie umgewandelt wird, sodass der Strom zum Erliegen kommt.

Oberhalb dieser Grenzspannung steigt die Photostromstärke näherungsweise linear an. Während für  $U_{\text{batt}} < 0V$  das Gegenfeld verringert wird, also noch kinetische Energie der

Elektronen nach Durchlaufen des elektrischen Feldes übrig bleibt, wirkt eine Spannung von  $U_{\text{batt}} > 0\text{V}$  als Beschleunigungsspannung, die den Elektronen zusätzliche kinetische Energie gibt. Dies resultiert in einer höheren Stromstärke. Die in der Vorbereitung angedeutete Abflachung der Kurve bei hohen Batteriespannungen bedingt durch die begrenzte Anzahl an Photonen und damit freigesetzter Elektronen ist hier jedoch noch nicht zu erkennen. Hier hätte die Messung vermutlich mit einer höheren Spannung fortgeführt werden müssen, was jedoch aufgrund der zur Verfügung stehenden Mittel nicht möglich war.

Unterhalb der Grenzspannung beobachtet man einen geringen Strom in die entgegengesetzte Richtung. Dies lässt sich durch eine Elektronenemission der Anode erklären. Aufgrund der Bauart der Photozelle trifft ein geringer Teil des Lichts auf die Anode und bedingt dort die Freisetzung von Elektronen nach dem Photoeffekt. Die anliegende Spannung wirkt für diese Elektronen als Beschleunigungsspannung, wodurch diese zur Kathode hin beschleunigt werden und von dieser absorbiert werden. Dies entspricht einem Strom in die entgegengesetzte Richtung.

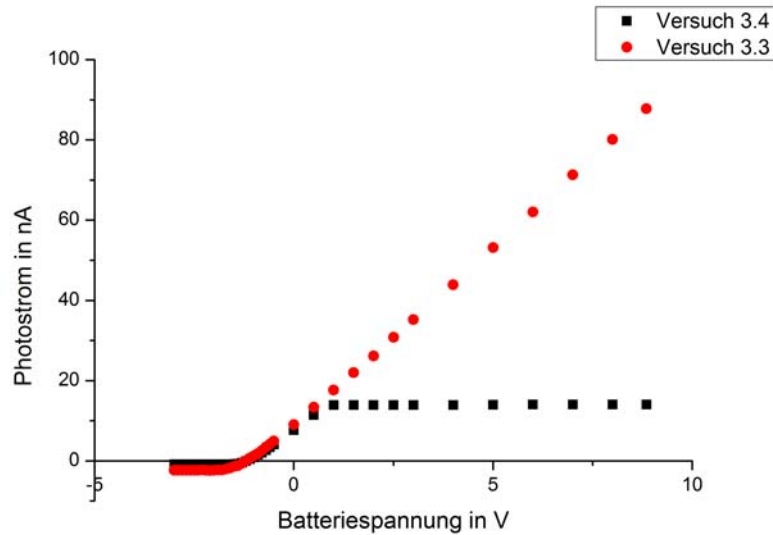
### 3.4 Versuch 3.4 - Bestimmung des Abschwächfaktors eines Graufilters

In diesem Versuchsteil führten wir obigen Versuch 3.3 nochmals durch, mit dem Unterschied, dass nun noch ein Graufilter in den Strahlengang des Lichts eingeführt wurde, der die Intensität der Strahlung verringert. Gemessen soll wieder bei der Wellenlänge  $\lambda = 400\text{nm}$ , wir wählten hier eine Verstärkung des Elektrometers von  $V = 10$ . Es ergaben sich folgende Messwerte:

**Tabelle 7:** Gemessene Spannung  $U_A$  am Arbeitswiderstand und die daraus resultierende Stromstärke  $I$  für verschiedene Batteriespannungen  $U_{\text{batt}}$

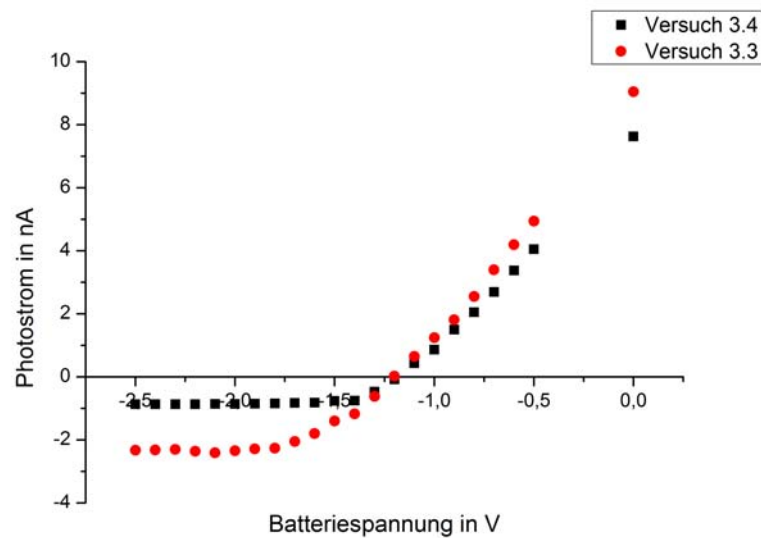
$U_{\text{batt}} / \text{V}$	$U_{\text{A}} / \text{V}$	Photostrom $I / \text{nA}$
-3,0	-0,86	-0,86
-2,9	-0,86	-0,86
-2,8	-0,86	-0,86
-2,7	-0,86	-0,86
-2,6	-0,86	-0,86
-2,5	-0,87	-0,87
-2,4	-0,87	-0,87
-2,3	-0,87	-0,87
-2,2	-0,87	-0,87
-2,1	-0,86	-0,86
-2,0	-0,86	-0,86
-1,9	-0,85	-0,85
-1,8	-0,84	-0,84
-1,7	-0,83	-0,83
-1,6	-0,82	-0,82
-1,5	-0,76	-0,76
-1,4	-0,75	-0,75
-1,3	-0,47	-0,47
-1,2	-0,08	-0,08
-1,1	0,43	0,43
-1,0	0,86	0,86
-0,9	1,50	1,50
-0,8	2,05	2,05
-0,7	2,69	2,69
-0,6	3,38	3,38
-0,5	4,05	4,05
0,0	7,63	7,63
0,5	11,39	11,39
1,0	13,90	13,90
1,5	13,90	13,90
2,0	13,91	13,91
2,5	13,91	13,91
3,0	13,92	13,92
4,0	13,93	13,93
5,0	13,98	13,98
6,0	14,02	14,02
7,0	14,02	14,02
8,0	14,02	14,02
8,85	14,02	14,02

Es ergeben sich folgende Diagramme. Zum besseren Vergleich wurden die Messreihe aus Versuch 3.3 ebenfalls eingezeichnet.



**Abbildung 7:** Auftragung des Photostroms gegenüber der Batteriespannung (schwarz); zum Vergleich wurde die Messreihe aus Versuch 3.3 in rot eingezeichnet

Sowie für die Messwerte im Bereich des Nulldurchgangs:



**Abbildung 8:** Auftragung des Photostroms gegenüber der Batteriespannung im Intervall  $[-2,5; 0]$ V; zum Vergleich wurde die Messreihe aus Versuch 3.3 in rot eingezeichnet

Betrachtet man die Messreihe dieses Versuchs, so stellt sich ab der Batteriespannung von etwa  $U_{\text{batt}} = 1\text{V}$  ein in etwa konstanter Wert ein. Hier wurde der Fehler gemacht,

dass die Verstärkung des Elektrometers zu stark eingestellt war und die maximale Ausgabespannung des Elektrometers (10V laut Aufgabenblatt) übertroffen wurde, sodass die Spannungswerte fehlerhaft sind. Wir verwerfen diese daher für die nachfolgenden Betrachtungen und beschränken uns auf das Intervall  $[-3; 1]$ V.

Im Wesentlichen entspricht der Verlauf des Photostrom-Graphen demjenigen aus Versuch 3.3. Es zeigt sich zunächst ein in etwa konstanter Strom in die negative Richtung (d.h. ein Elektronenfluss von Anode zu Kathode in der Photozelle), bevor bei einer bestimmten Grenzspannung ein Nulldurchgang stattfindet, ab dem der Photostrom in etwa linear ansteigt. Wie erwartet ist dieser Anstieg aufgrund der geringeren Intensität schwächer, als im vorherigen Versuch. Wir bestimmen den Nulldurchgang analog zu vorherigem Abschnitt über eine lineare Regression  $I = mU_{\text{batt}} + b$  und erhalten:

$$m = 6,2 \frac{\text{nA}}{\text{V}}$$

$$b = 7,3 \text{nA}$$

Damit ergibt sich eine Grenzspannung von:

$$U_{\text{batt},0} \approx -1,18 \text{V}$$

Die beiden Nulldurchgänge in den beiden Versuchsteilen stimmen folglich in etwa überein. Dies ist konsistent mit der Vorhersage, dass diese Grenzspannung unabhängig von der Intensität des Lichts ist. Dies kommt daher, dass die Photonen unabhängig von der Intensität, die nur ein Maß für die Anzahl der Licht-Quanten ist, eine für die Frequenz des Lichtes charakteristische Energie auf die Elektronen übertragen.

Es soll nun noch der Abschwächfaktor des Graufilters bestimmt werden. Wir wählen das Intervall  $[-1; 1]$ V für diese Bestimmung, da hier einerseits der Elektronenstrom von der Kathode aus relevant ist sowie die Werte für Spannungen  $U_{\text{batt}} > 1\text{V}$  vermutlich fehlerhaft sind. Aus dem Verhältnis der Photoströme aus beiden Versuchen ermitteln wir den Abschwächfaktor  $A$  durch Mittelwertbildung und erhalten:

$$A = 1 - \left\langle \frac{I_{\text{Filter}}}{I_{\text{ohne}}} \right\rangle \approx 0,197$$

Der verwendete Filter schwächt das Licht um folglich etwa 19,7% ab.

### 3.5 Versuch 3.5 - Messung der Gegenspannung für das Verschwinden des Photostroms

In diesem Versuch soll abschließend nochmals das Verhältnis von Planckschem Wirkungsquantum  $h$  zur Elementarladung  $e$  sowie die Austrittsarbeit des Materials bestimmt werden. Hier soll nun die Gegenspannung eingestellt werden, bei dem der Photostrom verschwindet. Da letzterer direkt proportional zum Spannungsabfall am Arbeitswiderstand ist, regelten wir die Batteriespannung solange, bis an diesem kein Spannungsabfall messbar war. Wir wählten für eine möglichst genaue Einstellung eine Verstärkung von

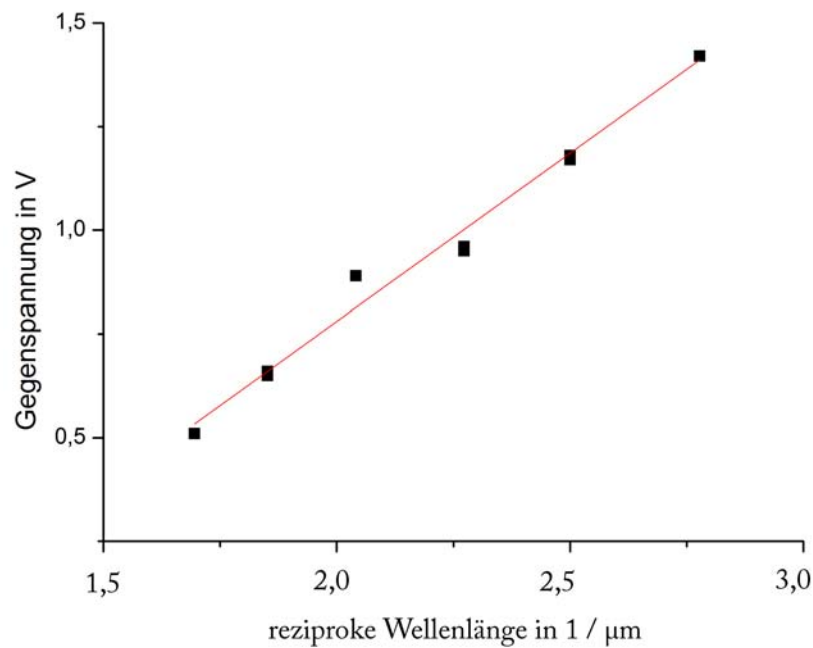


$V = 1000$  am Elektrometer sowie die Schaltung aus den Versuchen 3.3 bzw. 3.4. Es ergaben sich folgende Messwerte für die Gegenspannungen  $U_{\text{gegen}}$ :

**Tabelle 8:** Gegenspannungen  $U_{\text{gegen}}$  die zum Verschwinden des Photostroms führen für verschiedene Wellenlängen  $\lambda$

Wellenlänge $\lambda$ / nm	Gegenspannungen $U_{\text{gegen}}$ / V	
	Messreihe 1	Messreihe 2
360	1,42	1,42
400	1,17	1,18
440	0,95	0,96
490	0,89	0,89
540	0,66	0,65
590	0,51	0,51

Die Auswertung erfolgt analog zu Versuch 3.2, die graphische Auftragung von  $U_{\text{gegen}}$  gegenüber des Kehrwerts der Wellenlänge ergibt:



**Abbildung 9:** Auftragung der Gegenspannung  $U_{\text{gegen}}$  gegenüber der inversen Wellenlänge, eingezeichnet ist ebenfalls der lineare Fit.

Ein linearer Fit der Form  $U_{\text{gegen}} = m \cdot \frac{1}{\lambda} + b$  ergab folgende Parameter:

$$m = 8,1 \cdot 10^{-7} \text{Vm}$$

$$b = -0,84 \text{V}$$

Damit ergeben sich für  $\frac{h}{e}$  sowie die Austrittsarbeit  $W_A$  folgende Werte:

$$\frac{h}{e} = 2,70 \cdot 10^{-15} \text{Vs}$$
$$W_A = 0,84 \text{eV}$$

Die Abweichung liegt im Bereich derjenigen in den Versuchen 3.1 bzw. 3.2 und beträgt für das Verhältnis  $\frac{h}{e}$  hier etwa 34,7%. Dies bestätigt die vorherigen Ergebnisse.

## 4 Hilfsmittel

Die graphische Auftragung sowie die Bestimmung der Regressionsparameter erfolgte jeweils mit der Software Origin Pro Version 8.6G.