



SS/~~WS~~0.12./.....

Praktikum: (~~P~~/P2) (~~Di~~/Di/~~Di~~/~~Di~~) Gruppe-Nr: 11.

Name:Fleig..... Vorname:Georg.....

Name:Krause..... Vorname:Marcel.....

Versuch:Photoeffekt..... (~~n~~/ohne) Fehlerrechnung

Betreuer:Louisa Scholz..... Durchgeführt am: 03.07.12.

Abgabe am:

Rückgabe am:

Begründung:

2. Abgabe am:

Ergebnis: (+ / 0 / -)

Fehlerrechnung: ja / nein

Datum:

Handzeichen:

Bemerkungen:



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 nm die Klemmenspannungen der Photozelle. Die Filter befinden sich in dieser Reihenfolge in den Slots #1-#6 des Filterrads. Messen Sie mindestens dreimal für jede Wellenlänge indem Sie das Filterrads von Slot-#6 einfach weiter auf Slot-#1 drehen. So erhalten Sie ein Gefühl für die Reproduzierbarkeit der Messung. Prüfen Sie (qualitativ z.B. mit Irisblende), ob diese Spannungen intensitätsunabhängig sind. Was beobachten Sie bei abgeschotteter Beleuchtung?

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

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

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

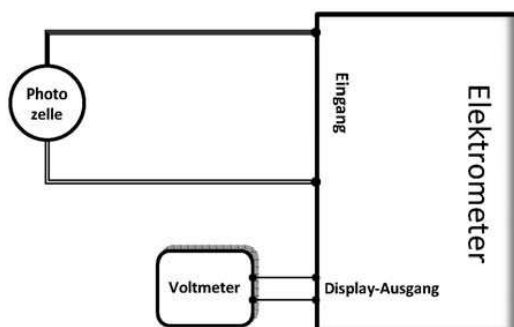
Zweckmäßige Spannungintervalle: -3 V bis $-0,5 \text{ V}$: $\Delta U = 0,1 \text{ V}$; $-0,5 \text{ V}$ bis 3 V : $\Delta U = 0,5 \text{ V}$; 3 V bis 9 V : $\Delta U = 1 \text{ V}$. Messen Sie bei maximaler Lichtintensität. Untersuchen Sie auch hier den Einfluss von Streulicht auf den gemessenen Photostrom.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

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

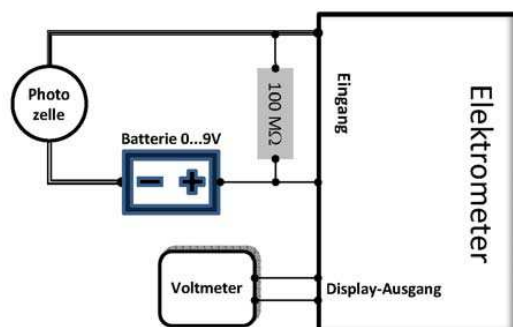
Diskutieren Sie qualitativ die Ursachen (z.B. Geometrie der Photozelle, Kathodenmaterial, Anodenmaterial, Lichtintensität, Energien und Anzahlen der austretenden Photoelektronen, Raumladung, Elektronenemission von der K-kontaminierten Anode durch Streulicht) für die beobachtete Strom-Spannungs-Abhängigkeit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

3.4 Wiederholen Sie die 360-nm Messung der vorherigen Aufgabe, wobei Sie diesmal das Ihrer Versuchsanordnung zugeordnete Graufilter verwenden. Bestimmen Sie anhand der Intensitätsmaxima den Abschwächfaktor des Graufilters. Zeichnen Sie die Messwerte in diesselden 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-Quecksilberdampf Lampe mit Vorschalt drossel;
drei Sammellinsen zur optischen Abbildung - $f = 65 / 100 / 200$ mm, $d = 32$ mm;
Halter für sechs Interferenzfilter;
sechs Interferenzfilter vom Perot-Fabry-Typ $\lambda = (360 / 400 / 440 / 490 / 540 / 590)$ nm, Halbwertsbreite jeweils 10 nm, Durchlässigkeit im Maximum jeweils 45%;
Zero-Aperture-Irisblende (unterschiedlich bei den drei Versuchsaufbauten: entweder manuell, oder als Photoverschluß mit Drahtauslöser oder elektrisch zu betätigen);
Vakuumphotozelle mit vollflächig aufgedampfter Kaliumkathode und ringförmiger Platin-Rhodium-Drahtanode, Kathodenanschluß über Koaxialkabel mit BNC-Stecker, Anodenanschluß über Doppelleitung mit Bananensteckern;
Universal-Meßverstärker (Phywe) in Elektrometerfunktion;
Standard-Multimeter zur Spannungsanzeige am Elektrometerausgang (0-10V);
BNC-T-Stück und 100 M Ω Arbeitswiderstand zur Strommessung;
potentialfreie Gleichspannungsquelle (Batterie) 0 bis 9 V, $R_i < 500 \Omega$, Einstellgenauigkeit 0,01 V;
Kästchen mit Widerständen, ca. 100 M Ω , ca. 1 G Ω , ca. 10 G Ω ;
Zeiss-Schiene mit Reitern;
Verbindungskabel

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

Literatur:

Bergmann, Schäfer: *Experimentalphysik*, Band III
Walcher: *Praktikum der Physik*
Hecht, Zajac oder Hecht: *Optics* oder *Optik*

Physikalisches Anfängerpraktikum P2

**Versuch:
P2-63,64,65
Photoeffekt**

Schriftliche Vorbereitung

von

Georg Fleig (georg@leech.it)
Marcel Krause (mrrrc@leech.it)

Gruppe: Di-11

Datum der Versuchsdurchführung:
03.07.12

Theoretische Grundlagen

Das Phänomen des Photoeffekts, auch lichtelektrischer Effekt genannt, ist Gegenstand der nachfolgenden Versuchsreihen. Es sollen bei zunächst die theoretischen Grundlagen geschaffen werden, auf die später in den einzelnen Versuchen zurückgegriffen wird. Dabei soll insbesondere der Photoeffekt selbst ausgiebig erläutert werden.

Photoeffekt

Der Begriff des Photoeffekts deckt im Allgemeinen drei verschiedene, physikalisch deutlich unterschiedliche Effekte ab. Allen gemeinsam ist dabei die Auslösung eines Elektrons aus einem Festkörper aufgrund von Wechselwirkung des Elektrons mit einem Photon. Je nach genauem Ablauf der physikalischen Vorgänge und der Gegebenheiten der Anordnung unterscheidet man den atomaren, den inneren sowie den äußeren lichtelektrischen Effekt. Im Praktikum begegnet uns vor allem letzterer, weshalb wir auf diesen besonders eingehen wollen.

Atomarer lichtelektrischer Effekt

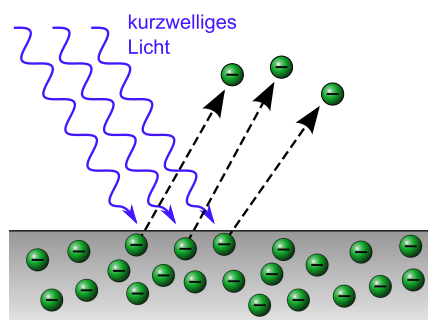
Den atomaren lichtelektrischen Effekt beobachtet man vor allem bei Gasen und bei anderen Materialien mit freien Atomen. Bestrahlt man diese mit energiereichem Licht, so absorbieren die Hüllen der Atome die einfallenden Photonen teilweise oder vollständig. Dadurch lösen sich Elektronen vom Atom aus. Es entstehen so freie Ladungsträger, weshalb man diesen Effekt auch Photoionisation nennt.

Innerer lichtelektrischer Effekt

Der innere lichtelektrische Effekt findet sich in Halbleitern vor. Bestrahlt man diese mit Licht ausreichender Energie, so gelangen die Elektronen durch Absorption der Photonen vom Valenzband des Materials in das energetisch höher gelegene Leitungsband. Dadurch findet eine teils beachtliche Erhöhung der elektrischen Leitfähigkeit des Halbleiters statt.

Äußerer lichtelektrischer Effekt

Die dritte Art des Photoeffekts schließlich ist der äußere lichtelektrische Effekt, der auch als Hallwachs-Effekt oder Photoemission bezeichnet wird. Um diesen zu demonstrieren, bestrahlt man eine Photokathode, bestehend entweder aus Halbleitermaterialien oder aus Metallen, mit monochromatischem Licht ausreichend niedriger Wellenlänge. Die nachfolgende Skizze veranschaulicht das Herauslösen der Elektronen durch das einfallende Licht.



Die Elektronen absorbieren die einfallenden Photonen der Frequenz ν vollständig. Ist die Energie eines Photons mindestens so groß wie die Bindungsenergie des Elektrons im Halbleiter- oder Metallgitter,

so wird das Elektron aus dem Gitter gelöst. Es bewegt sich dann in den der Platte gegenüberliegenden Halbraum und besitzt die Energie

$$E_{\text{ph}} = h \cdot \nu$$

wobei h das Plancksche Wirkungsquantum mit $h = 6,62606957(29) \text{ Js}$ als Proportionalitätsfaktor zwischen Energie und Frequenz eingeführt wurde. Dies widerspricht den Vorstellungen der klassischen Physik, denn nach obiger Formel ist die Energie der ausgelösten Elektronen einzig von der Frequenz der auftreffenden Strahlung abhängig, nicht aber von deren Intensität. Diese bewirkt lediglich eine Variation in der Anzahl der ausgelösten Elektronen.

Da wir zusätzlich eine Bewegung der Elektronen in den Halbraum betrachten, ergibt sich für die vollständige kinetische Energie T der Elektronen:

$$T = E_{\text{ph}} - W_K = h \cdot \nu - W_K$$

Dabei bezeichnet W_K die Austrittsarbeit der Kathode, die nötig ist, damit die Elektronen das Gitter verlassen. Ist die Frequenz der einfallenden Photonen zu gering, sodass sich also $E_{\text{ph}} < W_K$ ergibt, so findet gar kein Photoeffekt statt. Daran ändert auch eine Vergrößerung der Intensität des Lichts nichts.

Zur Bestimmung des Planckschen Wirkungsquantums reicht ein einfacher Versuchsaufbau bestehend aus einer Photokathode, einer Ringanode sowie einer geeigneten Lichtquelle wie beispielsweise einer Quecksilberdampfampe. Man verbindet Kathode und Anode entweder über einen Kondensator oder über eine Spannungsquelle und bestrahlt die Kathode nun mit monochromatischem Licht der Quelle.

Ist die Wellenlänge gering genug, so wird der Photoeffekt auftreten und man kann einen Photostrom registrieren. Nun kann man, je nach Aufbau, entweder die Spannung an der Spannungsquelle erhöhen oder aber warten, bis der Kondensator durch den Photostrom ausreichend geladen wurde. In beiden Fällen entsteht so ein elektrisches Gegenfeld zwischen den Elektroden, welches die ausgelösten Elektronen kontinuierlich abbremst und so deren Transport zur Anode verhindert.

Ab einer gewissen Grenzspannung U_0 findet man dann, dass der Photostrom auf Null absinkt. Dies bedeutet, dass das Gegenfeld so stark ist, dass selbst die am schwächsten gebundenen Elektronen mit der niedrigsten Austrittsarbeit W_K , und damit mit der höchsten kinetischen Energie T , nicht mehr gegen das Feld ankommen. Die Feldenergie ist also gleich groß wie die kinetische Energie dieser Elektronen:

$$E_{\text{feld}} = T = e \cdot U_0$$

Dabei bezeichnet e die Elementarladung mit $e = 1,602176565(35) \cdot 10^{-19} \text{ C}$. Setzt man dies in die obige Energiegleichung ein, so erhält man:

$$e \cdot U_0 = h \cdot \nu - W$$

Die Austrittsarbeit der Kathode wurde dabei zur Konstante W angepasst, die zusätzlich das Kontaktpotential von Kathode und Anode berücksichtigt. Häufig betrachtet man in Experimenten nicht die Frequenzen des einfallenden Lichts sondern dessen Wellenlänge. Über die Beziehung $c = \lambda \cdot \nu$, wobei c die Lichtgeschwindigkeit mit $c = 299792458 \text{ m/s}$ bezeichne, lässt sich die obige Formel auf die Wellenlänge umwälzen:

$$e \cdot U_0 = h \cdot \frac{c}{\lambda} - W \quad (1)$$

Über geeignete Messungen lässt sich dann das Plancksche Wirkungsquantum bestimmen.

Interferenzfilter

Interferenzfilter sind häufig eingesetzte optische Filter, die elektromagnetische Wellen bestimmter Wellenlängen passieren lassen und dicht benachbarte Wellenlängen herausfiltern. Die Funktionsweise lässt sich einfach über die Fresnelschen Formel erklären. Häufig sind Interferenzfilter aus dielektrischen Schichten aufgebaut, die auf ein Trägermaterial gedampft wurden.

Jeder polychromatische Lichtstrahl wird an der optischen Grenzfläche der dielektrischen Schicht teilweise reflektiert und teilweise transmittiert und dabei gebrochen. Im Träger selbst werden die transmittierten Strahlen erneut teils reflektiert und teils transmittiert.

Auf diese Weise treten vor und hinter dem Interferenzfilter eine Vielzahl an parallelen monochromatischen Strahlen aus, denn nur die Strahlen, deren Wellenlänge passend zur Dicke des Filters eingestellt sind, interferieren konstruktiv. Die restlichen Strahlen verschwinden aufgrund destruktiver Vielstrahlinterferenz.

Auf solche Weise aufgebaute Interferenzfilter eignen sich gut zur einfachen Filterung polychromatischer Lichtquellen, da sie verhältnismäßig günstig herzustellen sind.

Abbildungsgleichung und Abbildungsmaßstab

Möchte man mit Hilfe einer Linse der Brennweite f einen Gegenstand, der den Abstand g zur Linse besitzt, abbilden, so kann man die Abbildungsgleichung einer Linse nutzen, um die Bildweite b zu bestimmen. Diese Abbildungsgleichung, auch Linsengleichung genannt, lautet:

$$\frac{1}{g} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f} \quad (2)$$

Für den Abbildungsmaßstab, der ein Maß für die Vergrößerung des Gegenstands darstellt, gilt:

$$\beta = \frac{b}{g} = \frac{B}{G} \quad (3)$$

Dabei wurden die Gegenstands- respektive Bildgrößen G und B eingeführt.

Aufgabe 1: Demonstration des Hallwachs-Effekts

Der erste Versuch dient als Demonstrationsversuch zum Hallwachs-Effekt. Wir nutzen dafür eine Zink-Photokathode, die wir direkt vor Gebrauch frisch schmirgeln müssen. Dadurch entfernen wir eventuell vorhandene Zinkoxid-Schichten, die die notwendige Auslösearbeit der Elektronen unnötig erhöhen würden. Wir garantieren so also, dass der Photoeffekt mit dem verwendeten Licht auftreten kann.

Wir stecken die Zinkplatte dann auf den isolierten Anschluss eines elektrostatischen Elektrometers und verbinden dessen Gehäuse mit dem Masseanschluss des Hochspannungsgeräts. Durch kurzzeitiges Verbinden der Zinkplatte mit dem Minus-Anschluss des Hochspannungsgeräts bei einer Spannung von etwa $U \approx 2 \text{ kV}$ sorgen wir für einen Vollausschlag des Elektrometers.

Wir werden dann beobachten können, dass der Ausschlag schon ohne weiteres Zutun durch geringfügigen Ladungsausgleich sehr langsam wieder absinken wird. Nun beleuchten wir die Zinkplatte mit der Quecksilberdampfampe. Durch den Hallwachs-Effekt lösen sich Elektronen aus der Platte, es kommt zu einem rascheren Ladungsausgleich und der Ausschlag des Elektrometers wird schneller zurückgehen als zuvor.

Anschließend bringen wir noch eine an den Plus-Anschluss des Hochspannungsgeräts angeschlossene Metallelektrode in die Nähe der beleuchteten Zink-Photokathode. Der Rückgang des Elektrometer-Ausschlags, und damit die Entladung der Zinkplatte, wird nun noch rascher vorangehen. Zuvor konnten die durch den Hallwachs-Effekt ausgelösten Elektronen nur schlecht an die Umgebung abgeführt werden. Sobald jedoch die positiv geladene Metallelektrode in unmittelbarer Nähe zur Zinkplatte angebracht wird, werden die Elektronen schnell abgeführt und die Elektrometer-Anzeige sinkt rasch.

Aufgabe 2: Elektrometereigenschaften

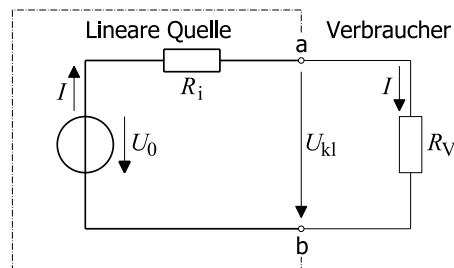
In der nächsten Aufgabe wollen wir uns mit den Elektrometereigenschaften beschäftigen, denn diese könnten eventuell einen Einfluss auf spätere Messungen in Aufgabe 3 haben. Wir klären dabei zunächst einige Begrifflichkeiten.

Begriffe

Ideale Spannungsquelle

Eine ideale Spannungsquelle besteht im einfachsten Fall aus einem elektrischen Zweipol. Zwischen den Anschlüssen der Spannungsquelle findet sich eine Klemmspannung U_{kl} vor, die stets konstant bleiben soll, unabhängig vom angeschlossenen Verbraucher. Dies ist nur dann möglich, wenn sich im Idealfall der Innenwiderstand R_i der Quelle zu $R_i = 0 \Omega$ ergibt.

Im Falle eines Kurzschlusses, also mit $R_V = 0 \Omega$, ergäbe sich aufgrund des Ohmschen Gesetzes bei der idealen Spannungsquelle das Problem eines unendlich hohen Stromes. In der Realität liegt also stets ein Innenwiderstand mit $R_i > 0 \Omega$ vor. Nachfolgend ist dann das Ersatzschaltbild einer realen Spannungsquelle aufgezeigt.



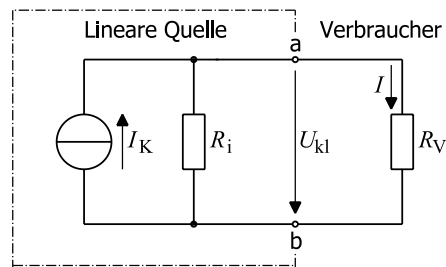
In der Praxis wäre beispielsweise eine Autobatterie eine annähernd ideale Spannungsquelle. Sie bietet stets hinreichend konstante Spannung zwischen ihren Klemmen, unabhängig vom Strom, der vom Verbraucher gefordert wird.

Ideale Stromquelle

Die ideale Stromquelle ist das elektronische Analogon zur idealen Spannungsquelle. Auch sie besteht aus einem Zweipol, zwischen dessen Anschlüssen ein Strom I entnommen werden kann. Im Falle der idealen Stromquelle bleibt dieser Strom unabhängig vom Verbraucher stets konstant. In diesem Fall ergibt sich für den Innenwiderstand ein Wert von $R_i \rightarrow \infty$.

Betrieibt man die Stromquelle im Leerlauf mit offenen Anschlüssen, also mit $R_V \rightarrow \infty$, so ergäbe sich nach dem Ohmschen Gesetz eine unendlich hohe Spannung. Deshalb findet sich in der Realität in Strom-

quellen stets ein endlicher Innenwiderstand vor, der so groß wie möglich sein sollte. Nachfolgend ist dann das Ersatzschaltbild einer realen Stromquelle skizziert.



Abstrahiert man den Begriff der Spannungsquelle auf das Wesentliche, so kann man sich in der Praxis einen Transistor als eine solche Quelle vorstellen. Dieser liefert stets annähernd denselben Kollektorstrom, auch wenn die Spannung zwischen Kollektor und Emitter variiert wird.

Voltmeter

Das Voltmeter ist ein Messgerät zur Bestimmung der elektrischen Spannung. Voltmeter werden stets parallel zu untersuchenden Bauteilen verschalten und geben so direkt die am Bauteil anliegende Spannung an. Idealerweise besitzen sie einen unendlich hohen Innenwiderstand, sodass durch sie kein Strom fließen kann.

In der Realität gibt es allerdings stets endliche Innenwiderstände, sodass kleine Ströme fließen. Tatsächlich wird dieser „Fehler“ in vielen Voltmetern zur Spannungsmessung via Stromstärkemessung genutzt.

Ampèremeter

Als Ampèremeter bezeichnet man Messgeräte zur Bestimmung der elektrischen Stromstärke. Zur Strommessung ist es notwendig, dass der Strom der Schaltung das Ampèremeter passiert, daher wird es in der Schaltung in Reihe verbaut. Idealerweise besitzen Ampèremeter keinerlei Innenwiderstände.

Die eigentliche Messung erfolgt häufig über ein Drehspulmesswerk, welches aufgrund der Lorentzkraft abhängig vom Strom ausschlägt. In der Realität besitzt jedes Ampèremeter einen geringen Innenwiderstand.

Einordnung der Photozelle

Die Photozelle kann in die oben erläuterten Begriffe der idealen Spannungs- sowie Stromquelle eingeteilt werden. Legt man zwischen den Elektroden der Photozelle wie in Aufgabe 1 durchgeführt eine Spannung an, so werden die durch die eintreffende Strahlung ausgelösten Elektronen schnell von der Photokathode abgeführt. Dadurch entsteht ein Strom in den an den Elektroden befestigten Drähten, der auch Photostrom genannt wird. In dieser Konfiguration kann die Photozelle als Stromquelle betrachtet werden.

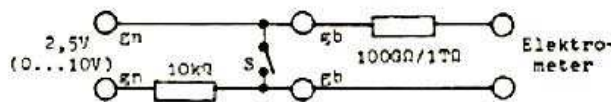
In einschlägiger Literatur wird vereinzelt von der Photozelle als Spannungsquelle gesprochen, wenn keine äußere Spannung zwischen den Elektroden zu einer raschen Abführung der Elektronen führt. In diesem Fall könnte man die Photozelle auch wie oben beschrieben in den Bereich der Spannungsquellen einteilen. Im Allgemeinen ist dies aber eher unüblich.

In beiden Fällen stellt die Photozelle jedoch stets eine reale, nie eine ideale Spannungs- oder Stromquelle dar. Da im Versuch sehr kleine Ströme im nA-Bereich vermessen werden sollen ist deshalb ein

hochempfindliches Messgerät in Form des Elektrometers mit einem geeignet hohen Eingangswiderstand notwendig.

Innenwiderstand des Elektrometers

Wir wollen im Versuch nun den Innenwiderstand des Elektrometers bestimmen. Da dieses, wie oben im Abschnitt zum Voltmeter angedeutet, kein ideales Spannungsmessgerät darstellt, besitzt es einen endlichen Innenwiderstand. Wir nutzen dazu einen Vorwiderstand R_V und eine Spannungsquelle mit beispielsweise $U_{\text{quell}} = 5 \text{ V}$. Wir schalten den Vorwiderstand in Reihe mit der Spannungsquelle und schließen dann das Elektrometer zum einen an die Spannungsquelle und zum anderen an den in Reihe geschalteten Widerstand an. Das nachfolgende Schaltbild soll dies veranschaulichen.



Nun messen wir die Spannung U_{mess} am Elektrometer. Je nach gewähltem Vorwiderstand wird sich diese wenig respektive stark von der Quellspannung U_{quell} unterscheiden. Da der Verstärkungsfaktor V zu $V = 1$ gewählt wird, ist die Stromstärke I durch diesen Aufbau dann durch

$$I = \frac{U_V}{R_V}$$

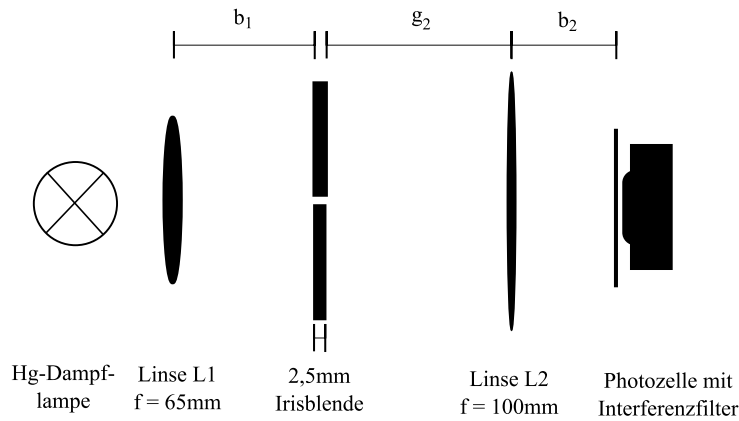
gegeben, wenn $U_V = U_{\text{quell}} - U_{\text{mess}}$ die Spannung ist, die am Vorwiderstand abfällt. Mit der so bestimmten Stromstärke, die in dieser Betriebsart auch durch das Messgerät fließt, können wir nun den Innenwiderstand des Elektrometers über

$$R_i = \frac{U_{\text{mess}}}{I} = R_V \cdot \frac{U_{\text{mess}}}{U_V} = R_V \cdot \frac{U_{\text{mess}}}{U_{\text{quell}} - U_{\text{mess}}}$$

bestimmen. Aufgrund der obigen Gleichung erwarten wir, dass sich Quell- und Messspannung bei im Vergleich zum Innenwiderstand niedrigen Vorwiderständen kaum, bei großen Vorwiderständen jedoch deutlich voneinander unterscheiden werden.

Aufgabe 3: Photoeffekt und h/e -Bestimmung

In der letzten Versuchsreihe führen wir weitere Experimente rund um den Photoeffekt durch und wollen dadurch das Verhältnis $\frac{h}{e}$ aus Planckschem Wirkungsquantum h und der Elementarladung e bestimmen. Unsere Experimentieranordnung ist in der nachfolgenden Skizze dargestellt.



Das Zentrum der Quecksilberdampflampe wird durch die Linse L1 im Maßstab $\beta = 1$ in die Irisblende abgebildet. Die zweite Linse L2 sorgt dafür, dass der nach der Lochblende divergierende Strahl auf die Photozelle abgebildet wird. Zuvor passiert der Strahl noch einen Interferenzfilter, sodass das Licht möglichst monochromatisch auf die Photozelle trifft.

Die auftretenden Abstände lassen sich leicht über die Linsengleichung berechnen, sofern die auftretenden Abbildungsmaßstäbe β_i bekannt sind. Man kann dann Gleichung (2) nach b oder g umformen und in Gleichung (1) einsetzen, dies liefert dann jeweils die andere Größe. Da auf dem Versuchsblatt die Abbildungsmaßstäbe allerdings nicht angegeben sind, bleibt es bei dieser allgemeinen Betrachtung. Es wird dann im Versuch davon ausgegangen, dass die Abstände der Apparatur bereits richtig gewählt sind und wir kontrollieren formal nur den richtigen Aufbau aller Geräte.

Im Versuch ist die Benutzung einer Quecksilberdampflampe unabdingbar. Die Lichtemission basiert hier auf einer gezielten Erhöhung von Elektronen in höhere Energieniveaus. Beim erneuten Herabfallen wandelt sich die Energie so in Photonen um, die von der Lampe ausgestrahlt werden. Da die Energieniveaus diskret sind und nur endlich viele davon vorkommen, ergibt sich so bei der Hg-Lampe ein Linienspektrum, auf das auch die verwendeten Interferenzfilter abgestimmt sind.

Würde man eine haushaltsübliche Halogenlampe benutzen, so ergäben sich im Wesentlichen zwei Probleme. Zum einen enthalten viele Halogenlampen UV-Filter, sodass das emittierte Licht kaum Anteile im nahen oder fernen Ultraviolett enthält. Das würde bedeuten, dass wir den Photoeffekt eventuell nur in einem sehr kleinen Wellenlängenbereich wahrnehmen würden.

Zum anderen ist eine Halogenlampe ein grauer Strahler, er sendet also ein temperaturabhängiges, kontinuierliches Spektrum aus. Die verwendeten Interferenzfilter sind auf solch ein kontinuierliches Spektrum aber nicht ausgelegt, sodass wir kaum einen gewünschten Wellenlängenbereich einstellen können.

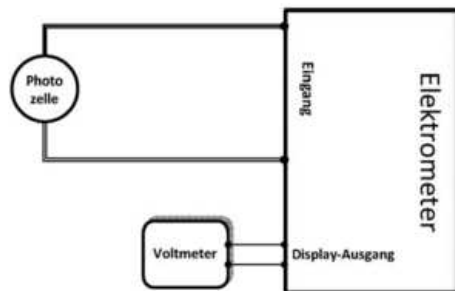
Bei den Messungen müssen wir durch Variation der Verdunkelung möglichst eine minimale Beeinflussung durch äußere Lichtquellen erreichen. Vor den eigentlichen Messungen ist es außerdem nötig, das Elektrometer zu eichen. Es ist zu empfehlen, das Gerät direkt bei einem Verstärkungsfaktor von $V = 100$ zu eichen, um genaue Messungen zu erreichen. Das Eichen selbst erfolgt durch einen entsprechenden Knopf am Elektrometer und einer Einstellung an den Reglern der Potentiometer.

Aufgabe 3.1: Klemmspannungen der Photozelle

Wir wollen zunächst die Klemmspannung der Photozelle in Abhängigkeit von der Wellenlänge des einfallenden Lichts messen. Dazu verwenden wir Licht der Wellenlängen $\lambda = 360\text{ nm}, 400\text{ nm}, 440\text{ nm}, 490\text{ nm}, 540\text{ nm}, 590\text{ nm}$, welches wir mit maximaler Lichtintensität auf die Photokathode strahlen. Die

dafür notwendigen Filter befinden sich bereits in dieser Reihenfolge im Filterrad, sodass wir dessen Position stets nur noch an die jeweilige Wellenlänge anpassen müssen.

Wir werden die Messungen dann für jede Wellenlänge noch mindestens zweimal wiederholen, um die Reproduzierbarkeit unserer Ergebnisse zu sichern. Außerdem wollen wir mit Hilfe der Irisblende prüfen, ob die gemessene Klemmspannung wirklich unabhängig von der einfallenden Lichtintensität ist. Nachfolgend ist Schaltung 1 am Elektrometer skizziert, die wir für die Spannungsmessung benötigen.



Zur Auswertung betrachten wir Formel (1), die gleich nach der Spannung umgestellt wurde:

$$U = \frac{h \cdot c}{e} \cdot \lambda^{-1} - \frac{W}{e} = a \cdot \lambda^{-1} + b \quad (4)$$

Wir werden die gemessene Spannung über der reziproken Wellenlänge auftragen und dann eine lineare Regression an die Werte durchführen. Dies liefert uns die Steigung a der Regressionsgeraden sowie den y -Achsenabschnitt b . Aus ersterer erhalten wir dann das Verhältnis h/e über:

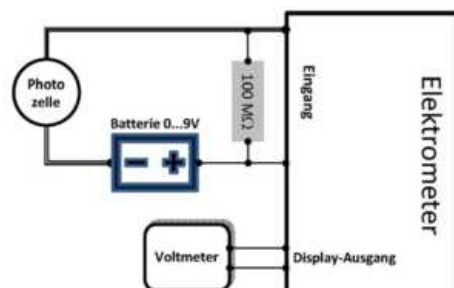
$$\frac{h}{e} = \frac{a}{c}$$

Die Lichtgeschwindigkeit c ist als per Definition festgelegter Wert als bekannt anzunehmen. Die Konstante b spielt mit $b = -\frac{W}{e}$ die Rolle der um das Kontaktpotential zwischen Anode und Kathode korrigierten Austrittsarbeit W , welche noch durch die Elementarladung normiert ist. Diese ergibt sich somit zu:

$$W = -b \cdot e$$

Aufgabe 3.2: Gegenfeldmethode zur Spannungsminimierung

Nachdem wir in Aufgabe 3.1 die Klemmspannungen gemessen haben, um h/e zu bestimmen, wollen wir nun die Gegenfeldmethode anwenden, um das Verhältnis erneut auszumachen. Dazu nutzen wir die nachfolgende Schaltung 2, jedoch noch ohne Vorwiderstand.



Die verwendeten Wellenlängen sind bei maximaler Lichtintensität dieselben wie in der Aufgabe zuvor. Wir erhöhen nun kontinuierlich die Spannung U der Spannungsquelle so lange, bis wir diejenige Spannung $U_{K=0}$ erreichen, die notwendig ist, um die Klemmspannung auf Null absinken zu lassen.

Der Versuch entspricht im Prinzip dem aus Aufgabe 3.1, allerdings stellte sich dort die Gegenspannung von alleine ein, hier hingegen werden wir sie manuell einstellen. Wir erwarten, dass sich durch eine akkurate Arbeitsweise hier ein genauerer Wert für das Verhältnis h/e ergeben wird als in Aufgabe 3.1.

Aufgabe 3.3: Photostrom in Abhängigkeit von der Spannung

Als nächstes werden wir ausschließlich für die Wellenlänge $\lambda = 400 \text{ nm}$ den sich einstellenden Photostrom in Abhängigkeit von der eingestellten Spannung U der Spannungsquelle betrachten. Auch hier nutzen wir Schaltung 2, dieses Mal jedoch mit dem parallel geschalteten Vorwiderstand $R = 100 \text{ M}\Omega$.

Die Strommessung mit dem Elektrometer erfolgt indirekt über eine Spannungsmessung der Spannung U_{mess} am Ausgang des Elektrometers. Je nach gewähltem Verstärkungsfaktor V ergibt sich der zu messende Strom I dann durch:

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

Zunächst wollen wir den Einfluss von Streulicht auf unsere Messungen überprüfen. Dazu schließen wir die Irisblende vollständig, sodass kein Licht der Hg-Lampe auf die Photozelle fallen soll. Dann messen wir den sich einstellenden Strom I_{dunkel} , den wir in den nachfolgenden Messungen berücksichtigen müssen. Als Intervalle ΔU der einzustellenden Spannung wählen wir $\Delta U = 0,1 \text{ V}$ für $U \in [-3,0 \text{ V}, -0,5 \text{ V}]$, $\Delta U = 0,5 \text{ V}$ für $U \in [-0,5 \text{ V}, 3,0 \text{ V}]$ sowie $\Delta U = 1 \text{ V}$ für $U \in [3,0 \text{ V}, 9,0 \text{ V}]$. Die Messungen sollen dann stets bei maximaler Lichtintensität erfolgen.

Es ist dabei zu erwarten, dass eine Erhöhung der Gegenspannung U zu einem linearen Absinken des Photostroms I führen wird. Erreicht der Strom den Wert $I = 0$, so wird er konstant auf diesem Wert verbleiben. Im negativen Spannungsbereich ist eigentlich nicht von einer Gegenspannung, sondern eher von einer Ansaugspannung zu sprechen. In diesem Bereich wird also bei absinkender Spannung der Strom linear immer größer werden, weil die Elektronen stärker zur Anode „gesaugt“ werden.

Aufgabe 3.4: Abschwächungsfaktor eines Graufilters

Wir wollen den Versuch 3.3. erneut mit denselben Voraussetzungen durchführen, allerdings verwenden wir nun zusätzlich den Graufilter, um die Lichtintensität zu dämpfen. Die Auswertung erfolgt formal analog zur vorigen Aufgabe. Im direkten Vergleich der Intensitätsmaxima können wir dann den Abschwächungsfaktor des Graufilters ermitteln.

Es sollen dann die Messwerte in die Diagramme zu Aufgabe 3.3 eingetragen werden, um den direkten Vergleich zu erleichtern. Außerdem wollen wir dann die Nulldurchgänge der Ströme in beiden Aufgaben vergleichen.

Aufgabe 3.5: Gegenfeldmethode zur Stromminimierung

Abschließend wollen wir das Verhältnis h/e erneut auf eine dritte Weise bestimmen. Wir nutzen dazu wieder Schaltung 2 und variieren nun die Gegenspannung $U_{I=0}$ so, dass der Photostrom gerade auf Null absinkt. Diese Gegenspannung bestimmen wir für alle in Aufgabe 3.1 aufgeführten Wellenlängen. Das gesuchte Verhältnis h/e ergibt sich dann auch analog zu dieser Aufgabe erneut über Gleichung (4) durch

eine lineare Regression.

Im Gegensatz zu Aufgabe 3.2 findet hier die Bestimmung der Gegenspannung über die Stromstärke statt. Durch den hohen Vorwiderstand erwarten wir, dass sich hier nochmals genauere Ergebnisse einstellen werden.

Quellenverzeichnis

Meschede, D.: Gerthsen Physik

Walcher, W.: Praktikum der Physik

Literaturwerte von c , e und h :

<http://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?c>

<http://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?e>

<http://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?h>

Zur idealen Spannungs- und Stromquelle:

<http://www.physikerboard.de/topic,9955,-stromquelle,-spannungsquelle.html>

Zum Spektrum von Halogenlampen:

<http://zeiss-campus.magnet.fsu.edu/articles/lightsources/tungstenhalogen.html>

Skizze zum lichtelektrischen Effekt:

http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Fotoelektrischer_Effekt.svg

Ersatzschaltbilder der Spannungs- bzw. Stromquellen:

http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Quelle_I-Ersatz.svg

http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Quelle_U-Ersatz.svg

Schaltbilder zu Aufgabe 2 und 3:

Aufgabenblatt und Vorbereitungshilfe zum Versuch P2-63,64,65 Photoeffekt

Physikalisches Anfängerpraktikum P2

**Versuch:
P2-63,64,65
Photoeffekt**

Auswertung

von

Georg Fleig (georg@leech.it)
Marcel Krause (mrrrc@leech.it)

Gruppe: Di-11

Datum der Versuchsdurchführung:
03.07.12

Aufgabe 1: Demonstration des Hallwachs-Effekts

Die erste Aufgabe war ein Demonstrationsversuch zum Hallwachs-Effekt. Wir haben eine Photokathode aus Zink so gut es ging glattgeschmirgelt, um mögliche Spuren von Zinkoxid zu beseitigen. Das Zinkoxid würde sich auf die Demonstration negativ auswirken, denn es erhöht die Auslösearbeit der Elektronen zum Teil erheblich. Anschließend haben wir die Zinkoxid-Platte auf ein Elektroskop gesteckt.

Mit Hilfe einer Hochspannungsquelle konnten wir die Zink-Kathode nun negativ aufladen, wodurch sich zusätzliche Elektronen als Ladungsträger auf ihr befanden. Bei einer Spannung von $U \approx 2 \text{ kV}$ erreichten wir etwa vollen Zeigerausschlag des Elektroskops.

Im ersten Versuchsteil haben wir die Platte möglichst von jeder Lichtquelle abgeschirmt und den Zeigerausschlag des Elektroskops beobachtet. Dieser ging auch ohne äußere Einflüsse sehr langsam zurück. Wir führen dies auf eine recht hohe Luftfeuchtigkeit im Versuchsraum zurück, durch die es einigen, vereinzelt Elektronen möglich war, die Platten zu verlassen.

Anschließend haben wir die Platte erneut vollständig aufgeladen und nun mit der Quecksilberdampf Lampe bestrahlt. Wir konnten nun sehen, dass der Zeigerausschlag sehr viel schneller zurückging als zuvor. Die einfallenden Photonen sorgten auf der Zink-Kathode für den Photoeffekt, wodurch Elektronen von ihr abgelöst wurden. Deshalb nahm die Ladung der Platte, und mit ihr der Zeigerausschlag, sehr viel rascher ab.

Zuletzt haben wir noch eine positiv geladene Metallelektrode in die Nähe der Photokathode gebracht. Dadurch nahm der Zeigerausschlag noch geringfügig schneller ab, da mit der Metallelektrode die Elektronen in der Raumladung um die Photokathode abgesaugt werden konnten. Der Effekt war allerdings bei weitem nicht so stark, wie wir es in der Vorbereitung vermutet hatten. Ansonsten haben sich unsere Erwartungen allerdings bestätigt.

Aufgabe 2: Elektrometereigenschaften

Im zweiten Versuchsblock haben wir uns im Wesentlichen mit den Eigenschaften des von uns verwendeten Elektrometers beschäftigt. Die dabei auf dem Aufgabenblatt erwähnten Begriffe und Fragestellungen wurden von uns bereits ausgiebig in der Vorbereitung beantwortet, daher sei an dieser Stelle darauf verwiesen.

Wir haben nun einen Vorwiderstand R_V in Reihe mit einer Spannungsquelle U_{quell} geschaltet und mit dem Elektrometer verbunden. Ein Voltmeter am Ausgang des Elektrometers zeigte uns dann die Spannung U_{mess} an, die mit Hilfe des Elektrometers gemessen werden konnte.

Zunächst haben wir $R_V = 0$ gewählt, also keinen Vorwiderstand benutzt und die Spannung direkt auf das Elektrometer gelegt. Als Spannungswert stellten wir zunächst $U_{\text{quell}} = 5,00 \text{ V}$ ein. Wir haben allerdings gemerkt, dass die am Elektrometer ausgegebene Spannung leicht erhöht war im Vergleich zur Quellspannung. Wir führen dies auf die ungenaue Einstellung der Quellspannung zurück und regelten diese solange, bis uns am Elektrometer $U_{\text{mess}} = 5,00 \text{ V}$ angezeigt wurde. Auf der Anzeige der Spannungsquelle war dann der Wert $U_{\text{quell}} = 4,96 \text{ V}$ abzulesen.

Anschließend haben wir drei verschiedene Vorwiderstände gewählt und jeweils die am Elektrometer abgegriffene Spannung notiert. Die Messwerte sind in nachfolgender Tabelle zu sehen.

R_V in $G\Omega$	U_{mess} in V	R_i in $G\Omega$
0,1	4,947	9,3
1,0	4,643	13,0
10,0	2,491	9,9

Aus den Messwerten konnten wir nun den Innenwiderstand des Elektrometers über

$$R_i = R_V \cdot \frac{U_{\text{mess}}}{U_{\text{quell}} - U_{\text{mess}}}$$

bestimmen, wie es in obiger Tabelle bereits geschehen ist. Dabei war U_{quell} nun durch die oben abgeglichenen $U_{\text{quell}} = 5,00 \text{ V}$ gegeben. Qualitativ lässt sich sagen, dass der Innenwiderstand des Elektrometers sehr hoch liegt. Es ließe sich darüber diskutieren, inwiefern eine Mittelwertbildung bei den obigen, recht stark schwankenden Messwerten sinnvoll ist. Es ergäbe sich quantitativ dann ein Wert von $R_{i,\text{mittel}} = 10,73 \text{ G}\Omega$.

Aufgabe 3: Photoeffekt und h/e -Bestimmung

Für die nachfolgenden Messungen haben wir zunächst einen Nullabgleich des Elektrometers durchgeführt. Dazu wählten wir eine Verstärkung von 100 und regelten den Abgleich so, dass am Multimeter eine Spannung von 0 V angezeigt wurde.

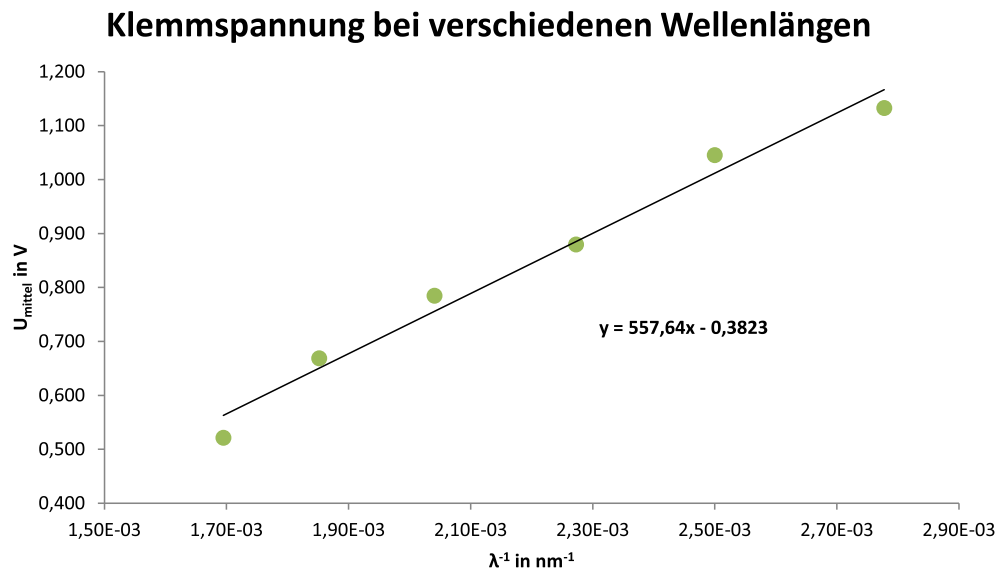
Aufgabe 3.1: Klemmspannungen der Photozelle

Wir wollten die Klemmspannung U_K an der Photozelle bei verschiedenen Wellenlängen messen. Außerdem sollte der Einfluss des Umgebungslichtes auf die Messung untersucht werden. Dazu führten wir jede Messung im hellen und abgedunkelten Raum durch. Wie die nachfolgenden Messwerte zeigen, kann das Umgebungslicht vernachlässigt werden, daher führten wir die weiteren Messreihen bei normalem Tageslicht durch. So konnten wir außerdem die Reproduzierbarkeit des Messwerte überprüfen. Die Messungen wurden für alle sechs verfügbare Wellenlängen des Interferenzfilters bei maximaler Intensität durchgeführt. Nachstehend sind die gemessenen Werte aufgelistet.

λ in nm	Umgebung	$U_{K,1}$ in V	$U_{K,2}$ in V	$U_{K,3}$ in V	U_{mittel} in V	λ^{-1} in nm^{-1}
360	hell	1,131	1,134	1,133	1,133	2,78E-03
	dunkel	1,134	-	-		
400	hell	1,046	1,045	1,045	1,045	2,50E-03
	dunkel	1,045	-	-		
440	hell	0,879	0,880	0,880	0,88	2,27E-03
	dunkel	0,880	-	-		
490	hell	0,785	0,784	0,785	0,785	2,04E-03
	dunkel	0,785	-	-		
540	hell	0,668	0,669	0,669	0,669	1,85E-03
	dunkel	0,669	-	-		
590	hell	0,521	0,522	0,521	0,521	1,69E-03
	dunkel	0,521	-	-		

Im Rahmen der Messgenauigkeit lässt sich hier direkt erkennen, dass das Umgebungslicht keinen Einfluss auf unsere Werte hatte und diese außerdem reproduzierbar waren. Eine Variation der Bestrahlungsintensität veränderte die gemessenen Spannungen nur minimal. Damit konnte die Unabhängigkeit zwischen Intensität und Klemmspannung gezeigt werden.

Wir bildeten den Mittelwert der gemessenen Klemmspannungen U_K zu jeder Wellenlänge λ und trugen diese über dem Kehrwert der Wellenlänge auf.



Die zugehörige Geradengleichung wurde bereits in der Vorbereitung hergeleitet.

$$U = \frac{h \cdot c}{e} \cdot \lambda^{-1} - \frac{W}{e} = a \cdot \lambda^{-1} + b$$

Mit Hilfe der Steigung a der Regressionsgeraden ist es uns nun möglich, auf den Wert von h/e sowie auf die Austrittsarbeit W zu schließen. Mit den Werten

$$a = 557,46 \text{ V} \cdot \text{nm} \quad \text{und} \quad b = -0,3823 \text{ V}$$

sowie den Werten für c und e aus der Vorbereitung ergibt sich das gesuchte Verhältnis zu

$$\frac{h}{e} = \frac{a}{c} = 1,859 \cdot 10^{-15} \frac{\text{J} \cdot \text{s}}{\text{C}}$$

Die Abweichung vom Literaturwert $(h/e)_{\text{lit}} = 4,14 \cdot 10^{-15} \frac{\text{J} \cdot \text{s}}{\text{C}}$ beträgt beachtliche -55,1%, wobei zumindest die Größenordnung getroffen wurde. Da unsere Messwerte im Schaubild relativ genau auf einer Geraden liegen, schließen wir grobe statistische Fehler aus. Anscheinend ist uns ein unbekannter systematischer Fehler untergekommen, welcher sich durch die gesamte Messreihe zog.

Schließlich können wir auch noch die Austrittsarbeit W der Elektronen bestimmen:

$$W = -b \cdot e = 6,13 \cdot 10^{-20} \text{ J} = 0,3823 \text{ eV}$$

Typische Austrittsarbeiten liegen im Bereich von $W \in [1, 5] \text{ eV}$. Unser Wert weicht von diesem Bereich ziemlich ab, was aber nicht weiter verwunderlich ist, da wir auch bei der Geradensteigung einen recht großen Fehler haben.

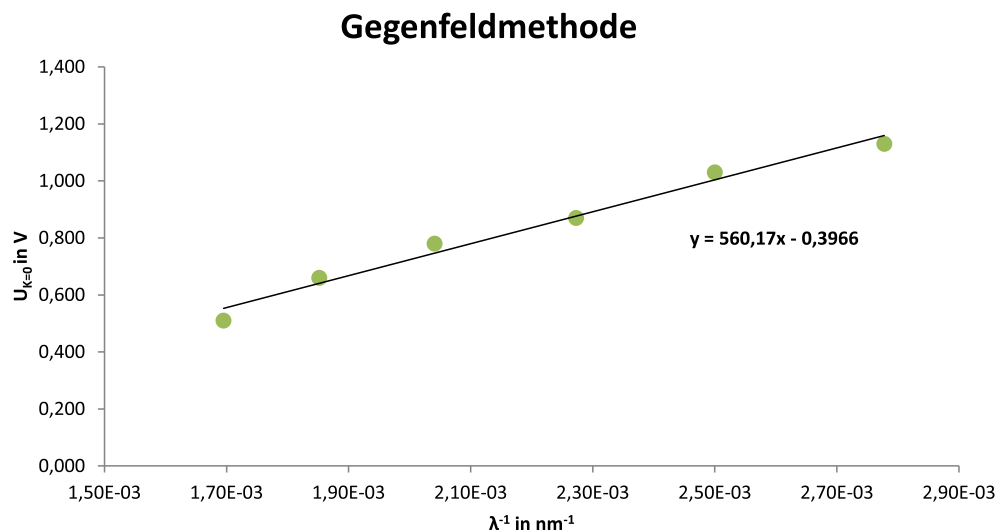
Aufgabe 3.2: Gegenfeldmethode zur Spannungsminimierung

Um h/e mit der Gegenfeldmethode zu bestimmen, bauten wir entsprechend Schaltung 2 eine Batterie als Spannungsquelle in Reihe zwischen Photozelle und Elektrometer ein. Wir regelten nun die Spannung

$U_{K=0}$ der Batterie so, dass die Klemmspannung Null betrug. In diesem Moment war das durch uns erzeugte Gegenfeld stark genug, um das der austretenden Elektronen aufzuheben. Nachstehend sind unsere Messwerte aufgelistet. Da wir zur späteren Berechnung für die Elementarladung e einen positiven Wert eingesetzt haben, wählten wir für die Spannungen $U_{K=0}$ ebenfalls ein positives Vorzeichen.

λ in nm	$U_{K=0}$ in V	λ^{-1} in nm ⁻¹
360	1,130	2,78E-03
400	1,030	2,50E-03
440	0,870	2,27E-03
490	0,780	2,04E-03
540	0,660	1,85E-03
590	0,510	1,69E-03

Und wieder wurde die Spannung über dem Kehrwert der Wellenlänge aufgetragen:



Die weitere Auswertung erfolgt analog zu Aufgabe 3.1. So erhalten wir wieder aus der Steigung $a = 560,17 \text{ V} \cdot \text{nm}$ und dem y-Achsen-Abschnitt $b = -0,3966 \text{ V}$ der Regressionsgeraden das gesuchte Verhältnis h/e sowie die Austrittsarbeit W :

$$\frac{h}{e} = \frac{a}{c} = 1,869 \cdot 10^{-15} \frac{\text{J s}}{\text{C}}$$

Die relative Abweichung vom Literaturwert ist mit -45,9% wieder ähnlich groß wie im vorigen Aufgabenteil. Wir vermuten wieder einen uns leider unbekannten systematischen Fehler in der Apparatur, da wir einen fast gleichen Wert für $\frac{h}{e}$ erhalten haben wie zuvor.

Auch die Austrittsarbeit W können wir wieder bestimmen.

$$W = -b \cdot e = 6,35 \cdot 10^{-20} \text{ J} = 0,3966 \text{ eV}$$

Entsprechend ist auch hier die Abweichung zu den üblichen Austrittsarbeiten relativ groß.

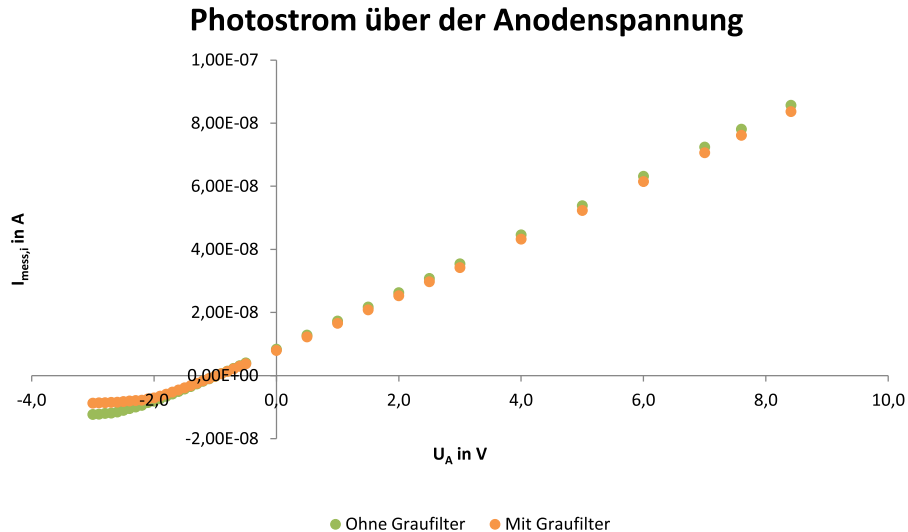
Aufgabe 3.3: Photostrom in Abhängigkeit von der Spannung

In diesem Aufgabenteil haben wir bei einer Wellenlänge von $\lambda = 400 \text{ nm}$ den Photostrom I_{mess} in Abhängigkeit von der angelegten Spannung U der Batterie gemessen. Wir nutzen dazu wieder Schaltung 2 mit einem parallel geschalteten Vorwiderstand $R = 100 \text{ M}\Omega$. Den Photostrom konnten wir so indirekt über die Spannungsmessung am Ausgang des Elektrometers messen.

Die Messung wurde für verschiedene Gegenspannungen U im Bereich von $U \in [-3, 9] \text{ V}$ bei maximaler Intensität des Lichtes durchgeführt. Außerdem wurde immer ein Wert mit und einer ohne einen zwischengeschalteten Graufilter aufgenommen. Dies war eigentlich Bestandteil von Ausgabe 3.4, allerdings empfanden wir die kombinierte Bearbeitung als sinnvoller. So ergab sich die folgende Messwerttabelle. Auf eine Korrektur wegen des einfallenden Streulichtes wurde verzichtet, da dieses bereits in Aufgabe 3.1 kaum eine Rolle gespielt hat.

U_A in V	Ohne Graufilter		Mit Graufilter		T
	$U_{\text{mess},1}$ in V	$I_{\text{mess},1}$ in A	$U_{\text{mess},2}$ in V	$I_{\text{mess},2}$ in A	
-3,0	-1,233	-1,23E-08	-0,875	-8,75E-09	0,710
-2,9	-1,224	-1,22E-08	-0,865	-8,65E-09	0,707
-2,8	-1,200	-1,20E-08	-0,861	-8,61E-09	0,718
-2,7	-1,190	-1,19E-08	-0,850	-8,50E-09	0,714
-2,6	-1,156	-1,16E-08	-0,845	-8,45E-09	0,731
-2,5	-1,103	-1,10E-08	-0,824	-8,24E-09	0,747
-2,4	-1,047	-1,05E-08	-0,806	-8,06E-09	0,770
-2,3	-0,998	-9,98E-09	-0,792	-7,92E-09	0,794
-2,2	-0,945	-9,45E-09	-0,782	-7,82E-09	0,828
-2,1	-0,857	-8,57E-09	-0,740	-7,40E-09	0,863
-2,0	-0,813	-8,13E-09	-0,709	-7,09E-09	0,872
-1,9	-0,735	-7,35E-09	-0,653	-6,53E-09	0,888
-1,8	-0,660	-6,60E-09	-0,590	-5,90E-09	0,894
-1,7	-0,586	-5,86E-09	-0,524	-5,24E-09	0,894
-1,6	-0,505	-5,05E-09	-0,458	-4,58E-09	0,907
-1,5	-0,427	-4,27E-09	-0,389	-3,89E-09	0,911
-1,4	-0,349	-3,49E-09	-0,319	-3,19E-09	0,914
-1,3	-0,266	-2,66E-09	-0,245	-2,45E-09	0,921
-1,2	-0,182	-1,82E-09	-0,166	-1,66E-09	0,912
-1,1	-0,104	-1,04E-09	-0,095	-9,50E-10	0,913
-1,0	-0,024	-2,40E-10	-0,020	-2,00E-10	0,833
-0,9	0,060	6,00E-10	0,057	5,70E-10	0,950
-0,8	0,140	1,40E-09	0,132	1,32E-09	0,943
-0,7	0,227	2,27E-09	0,212	2,12E-09	0,934
-0,6	0,312	3,12E-09	0,294	2,94E-09	0,942
-0,5	0,401	4,01E-09	0,372	3,72E-09	0,928
0,0	0,836	8,36E-09	0,795	7,95E-09	0,951
0,5	1,283	1,28E-08	1,225	1,23E-08	0,955
1,0	1,728	1,73E-08	1,656	1,66E-08	0,958
1,5	2,172	2,17E-08	2,083	2,08E-08	0,959
2,0	2,627	2,63E-08	2,530	2,53E-08	0,963
2,5	3,078	3,08E-08	2,974	2,97E-08	0,966
3,0	3,541	3,54E-08	3,422	3,42E-08	0,966
4,0	4,459	4,46E-08	4,324	4,32E-08	0,970
5,0	5,383	5,38E-08	5,233	5,23E-08	0,972
6,0	6,316	6,32E-08	6,149	6,15E-08	0,974
7,0	7,242	7,24E-08	7,063	7,06E-08	0,975
7,6	7,809	7,81E-08	7,615	7,62E-08	0,975
8,4	8,567	8,57E-08	8,367	8,37E-08	0,977

Durch Auftragen der Photoströme über die angelegten Spannungen U ergibt sich folgendes Schaubild:



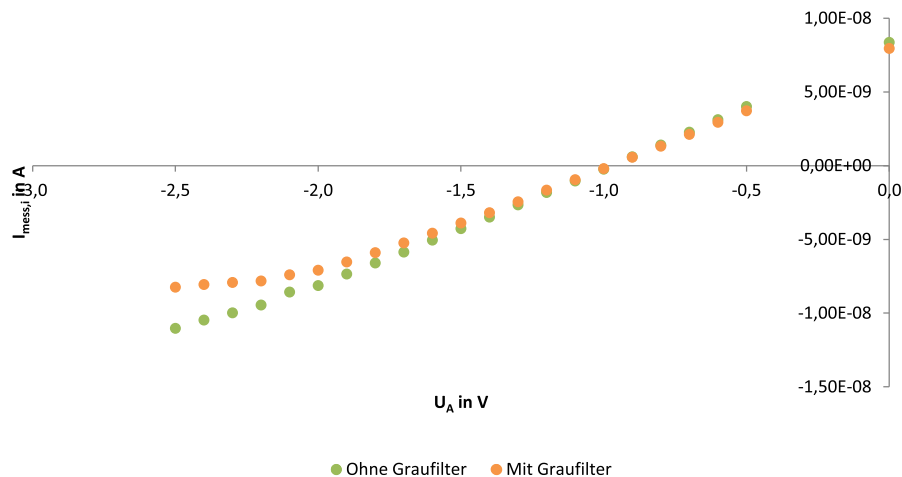
Bei einer anliegenden Gegenspannung $U < 0$ V zwischen Anode und Kathode erreichen nur noch dann die Elektronen die Anode, wenn ihre kinetische Energie groß genug ist, um das Gegenfeld zu überwinden. Ab einer Gegenspannung von etwa $U = -1$ V ist der Strom kurzzeitig Null, es kommen keine Elektronen mehr an der Anode an. Wird die Gegenspannung weiter erhöht, tritt plötzlich wieder ein Stromfluss auf. Dies liegt daran, dass nun auch aus der Anode Elektronen austreten und in Richtung Kathode fliegen. Daher kommt es zu einem geringen Stromfluss in umgekehrter (negativer) Richtung. Verhindern ließe sich das, indem die Photozelle so aufgebaut wäre, dass kein Licht auf die Anode treffen könnte.

Im positiven Spannungsbereich von U handelt es sich nicht mehr um eine Gegenspannung, sondern um eine Beschleunigungsspannung. Um die Kathode herum baut sich durch den Photoeffekt eine Elektronenwolke auf. Steigt nun die Beschleunigungsspannung U , wird diese Wolke zunehmend durch die Anode abgesaugt. So treffen auch Elektronen mit geringer kinetischer Energie auf der Anode auf und werden dort registriert. Anscheinend handelt es sich dabei um einen linearen Zusammenhang.

Wir vermuten, dass ab einem gewissen Punkt eine weitere Erhöhung von U nicht mehr in einem steigenden Photostrom resultiert, da bereits alle Elektronen direkt abgesaugt werden. Durch Erhöhung der Intensität des Lichtes könnte man noch mehr Elektronen pro Zeit auslösen und so den Photostrom weiter in die Höhe treiben (entsprechende Beschleunigungsspannung vorausgesetzt).

Der Nulldurchgang des Photostroms soll noch genauer untersucht werden. Dazu wählen wir den entsprechenden Bereich aus dem Schaubild aus und stellen ihn vergrößert dar.

Photostrom über der Anodenspannung (Detailansicht)



Unabhängig vom verwendeten Filter liegt der Nulldurchgang beide Male bei einer Gegenspannung von $U = -1,0 \text{ V}$. Diese Grenzspannung entspricht dem bereits gefundenen Wert bei $\lambda = 400 \text{ nm}$ aus Aufgabe 3.2. Damit ist die Grenzspannung außerdem unabhängig von der Intensität des Lichtes.

Aufgabe 3.4: Abschwächungsfaktor eines Graufilters

Im vorigen Aufgabenteil haben wir bereits die Messung mit dem Graufilter durchgeführt und die Messwerte direkt aufgelistet. Durch den Vergleich der Ströme $I_{\text{mess},1}$ ohne Graufilter und $I_{\text{mess},2}$ mit Graufilter konnten wir auf das Abschwächungsvermögen (Transmissionskoeffizient) T des Filters schließen. Auffallend ist dabei, dass der Wert nicht konstant ist, sondern in einem relativ großen Bereich schwankt. Wie bereits erwähnt werden bei hohen Beschleunigungsspannungen U direkt alle Elektronen von der Kathode abgesaugt. Der Photostrom hängt hier also nur noch von der Intensität der Lichtquelle ab. Da wir T durch den Vergleich der Photoströme berechnen, wählen wir den Bereich mit hohen Beschleunigungsspannungen, da im übrigen Bereich davon auszugehen ist, dass sich nicht nur die Intensität des Lichtes auf die Stärke des Stromes auswirkt.

Wir wählen den Bereich $U \in [4, 0 ; 8, 4] \text{ V}$ und bilden dort den Mittelwert der Transmissionskoeffizienten. Wir erhalten so

$$T = 0,974$$

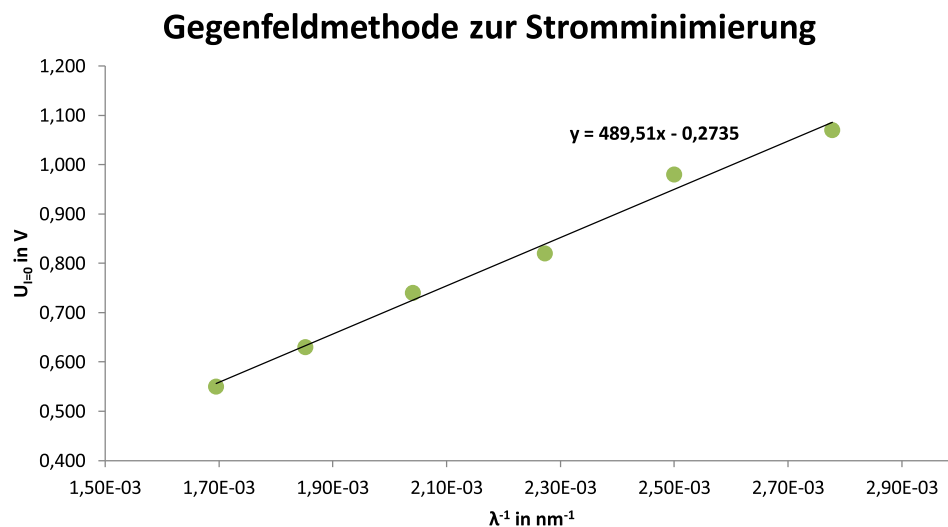
Aufgabe 3.5: Gegenfeldmethode zur Stromminimierung

Als abschließende Aufgabe haben wir erneut das Verhältnis von h/e bestimmt. Dabei haben wir die Gegenfeldmethode in Analogie zu Aufgabe 3.2 genutzt, allerdings war es nun der Photostrom, den wir minimiert haben. Wir haben erneut an Schaltung 2 experimentiert und haben nun die Gegenspannung $U_{I=0}$ dergestalt variiert, dass die Spannung U_{mess} am Elektrometer gerade verschwand. Da diese Spannung zum Strom proportional ist, verschwand somit auch der Photostrom.

Wir haben auf diese Weise die Spannung $U_{I=0}$ für jede Wellenlänge individuell eingestellt und notiert. Unsere Messwerte sind in nachfolgender Tabelle dargestellt.

λ in nm	$U_{i=0}$ in V	λ^{-1} in nm ⁻¹
360	1,070	2,78E-03
400	0,980	2,50E-03
440	0,820	2,27E-03
490	0,740	2,04E-03
540	0,630	1,85E-03
590	0,550	1,69E-03

Auch hier haben wir nun wieder die benötigte Spannung über der reziproken Wellenlänge aufgetragen und eine lineare Regression durch die Werte gelegt. Das entsprechende Schaubild ist nachfolgend dargestellt.



Die Regressionskoeffizienten sind hier $a = 489,51 \text{ V} \cdot \text{nm}$ sowie $b = -0,2735 \text{ V}$. Daraus lässt sich wieder das gesuchte Verhältnis von planckschem Wirkungsquantum zur Elementarladung bestimmen:

$$\frac{h}{e} = \frac{a}{c} = 1,633 \cdot 10^{-15} \frac{\text{J s}}{\text{C}}$$

Die relative Abweichung vom Literaturwert betrug hier -60,6% und war noch größer als zuvor. Auch hier vermuten wir einen unerkannten systematischen Fehler, welcher diese enorme Abweichung erklären würde.

Die Austrittsarbeit wäre hier nun:

$$W = -b \cdot e = 4,38 \cdot 10^{-20} \text{ J} = 0,2738 \text{ eV}$$