

## Bestimmung des Planckschen Wirkungsquantums nach Millikan

### Ziele

- Messung des Planckschen Wirkungsquantums mit dem Photoeffekt

### 1 Grundlagen

Die Messung des Planckschen Wirkungsquantums durch den äußeren photoelektrischen Effekt wird in jedem Lehrbuch der physikalischen Grundlagen besprochen. Es genügt daher hier eine Kurzfassung.

Wird die Oberfläche eines Metalls mit monochromatischem Licht bestrahlt, so wird den Elektronen im Metall der Energiebetrag  $E = h\nu$  zugeführt. Ist diese Energie größer als eine stoffspezifische Mindestenergie  $W_K$  (Austrittsarbeit der Elektronen), so werden Elektronen aus dem Metall herausgeschlagen. Sie besitzen dann im Vakuum die kinetische Energie

$$W_{\text{kin}} = h\nu - W_K . \quad (1)$$

Diese Beziehung wird Einstein zugeschrieben und ist eine Fundamentalformel, die auf dem Teilchencharakter von Licht beruht.  $W_K$  trägt den Index „K“, weil die lichtbestrahlte Elektrode im Experiment als Kathode geschaltet ist.

Ist die eingestrahlte Quantenenergie  $h\nu$  kleiner als die Austrittsarbeit  $W_K$ , können auch bei noch so hohen Lichtintensitäten keine Elektronen aus dem Metall herausgelöst werden. Dies kann experimentell bestätigt werden und hat seinerzeit klassische Vorstellungen über den Haufen geworfen, ein bedeutsames Experiment also.

Nun zum Versuch von Millikan, der nicht nur Öltröpfchen beobachtet hat. Aus Gleichung (1) folgt direkt: Bestrahlt man eine Metalloberfläche mit monochromatischem Licht verschiedener Frequenz und misst die kinetische Energie  $W_{\text{kin}}$  der herausgelösten Elektronen, so muss sich ein linearer Zusammenhang zwischen der kinetischen Energie  $W_{\text{kin}}$  und der Frequenz  $\nu$  des eingestrahlten Lichtes ergeben. Aus diesem Zusammenhang ergibt sich das Plancksche Wirkungsquantum  $h$ .

Man sollte meinen, auf diese Weise auch die ebenfalls interessante Austrittsarbeit  $W_K$  der Elek-

tronen aus der Photokathode bestimmen zu können. Jedoch zeigt eine genaue Analyse des Experiments, dass dies ein Irrtum ist, ein weit verbreiteter, wie Sie in der Datei *PhotoeffektDiskussionFermienergien.pdf* lesen können. Dort wird gezeigt, dass man in Wahrheit beim Versuch nach Millikan  $W_A$ , die Austrittsarbeit des Anodenmaterials misst.

Der Aufbau ist in Abbildung (1) dargestellt.

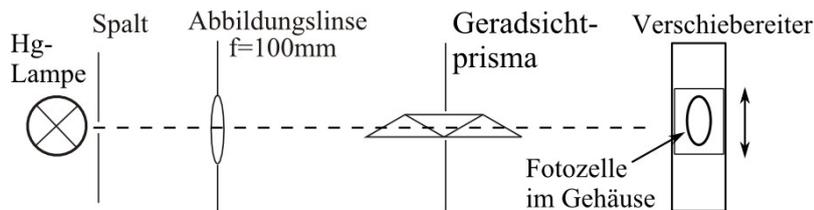


Abbildung 1: Optische Einrichtung zur Bestimmung des Planckschen Wirkungsquantums. Es handelt sich um ein Prismenspektrometer mit einem sogenannten Geradsichtprisma. Das Gehäuse der Photozelle hat einen Eintrittspalt, auf welchen der Quellschlitz durch die Linse für die jeweilige Wellenlänge abgebildet wird.



Abbildung 2: Bild der Photozelle. Silbergraue Kathode, mit Messinghülse oben verbunden. Ringförmiger Pt-Draht mit Schraubsockel verbunden.

Der optische Teil entspricht vom Prinzip her einem Prismenspektrometer mit der Besonderheit eines Geradsichtprismas.

Die Photozelle, Abbildung (2), ist eine Zwei-Elektroden-Röhre mit lichtempfindlicher Kathode (Kalium) und ringförmiger Anode (Platin) vor der Kathode. Sie wird wie folgt eingesetzt:

Zur Messung der kinetischen Energie der herausgeschlagenen Elektronen lässt man diese gegen ein elektrisches Feld zwischen der emittierenden Kathode und der Anode in der Vakuumröhre anlaufen. Mit wachsender Gegenspannung nimmt der Strom der auf dem Anodenring auftreffenden Elektronen ab. Es wird die Spannung  $U_0$ , die „Grenzspannung“ bestimmt, bei der dieser Strom Null ist. Wenn Photokathode und Anode aus gleichem Material wären, so könnte man für diese Spannung die Energiegleichung  $e \cdot U_0 = W_{\text{kin}}$  ansetzen und sodann Gleichung (1) einsetzen.

In *PhotoeffektDiskussionFermienergien.pdf* wird gezeigt, dass das Elektron aber nicht nur gegen  $U_0$  anlaufen muss, sondern gegen eine höhere effektive Gegenspannung, wenn Anode und Kathode aus verschiedenem Material sind und wenn  $W_A > W_K$  vorliegt.

Man findet

$$e \cdot U_0 = h \cdot \nu - W_A. \quad (2)$$

Es sei betont, dass die Gültigkeit von Gleichung (1) davon unberührt ist. Es ist nur so, dass die Gleichung (1) in diesem Experiment nicht direkt nachgewiesen wird.

Bei der Bestimmung von  $U_0(\nu)$  spielt nach Gleichung (2)  $W_K$  also keine Rolle, doch bestimmt  $W_K$  laut Gleichung (1), ob überhaupt Elektronen austreten können. Um im sichtbaren Bereich arbeiten zu können, muss also ein Kathodenmaterial mit relativ niedriger Austrittsarbeit verwendet werden.

Da die Austrittsarbeiten unabhängig von  $\nu$  sind, kann man aus Gleichung (2) die Messvorschrift für  $h$  ableiten:

$$h = \frac{e [U_0(\nu_2) - U_0(\nu_1)]}{\nu_2 - \nu_1} \quad (3)$$

Die Wellenlängen der verwendeten Linien und damit ihre Frequenzen sind durch die optische Spektroskopie wohlbekannt, so dass  $h$  aus Gleichung (3) bestimmt werden kann.

## 2 Aufgaben und Hinweise

Als erstes schalten Sie die Hg-Lampe (inkl. Lüfter) und den Messverstärker (Gerät mit blauem Gehäuse) ein, beide brauchen einige Zeit um stabil zu funktionieren.

### Sicherheitshinweis

#### Achtung Hg-Lampe!

Nicht direkt in die Lampe schauen. Dies kann zu irreversiblen Schäden auf der Netzhaut führen.  
Bei direktem Augenkontakt mit der Lampe ausliegende Schutzbrille tragen!

### 2.1 Vorbereitende Beobachtungen

Öffnen Sie bei eingeschalteter Hg-Lampe den Deckel des Spektrometers und beobachten Sie den Strahlengang und auch den Verstellmechanismus am Photozellengehäuse, Abbildung (1).

Nehmen Sie bei abgedunkeltem Raum einen Streifen weißen Papiers und beobachten Sie vor dem Photozellengehäuse die Linien des Spektrums. Beobachtbar sind folgende Linien:

Farbe	Sichtbarkeit auf Papier
rot	gut
gelb	gut
grün	gut
grünblau	kaum, je nach Augenlicht
blau-violett	gut
tief violett	mittel, erscheint als fahles blau weiß

Die Photozelle degradiert, wenn sie längere Zeit allzu starkem Licht und hohen Temperaturen ausgesetzt ist, bei den gegebenen Bedingungen im Labor besteht aber auch bei kurzzeitig eingeschalteter Deckenbeleuchtung keine Gefahr.

Schwenken Sie nun auf die blau-violette Linie und schließen Sie den Deckel. Sie werden damit Ihre erste Messung durchführen.

Später öffnen Sie den Deckel und stellen die weiteren Linien ein. Die schwache grünblaue Linie kann nur anhand eines Maximums im Photostrom zwischen blau-violetter und grüner Linie eingestellt werden.

## 2.2 Beschaltung der Photozelle

Bauen Sie zunächst die Schaltung nach Abbildung (3) auf. Am besten gelingt dies, wenn Sie mit der Masche aus dem Widerstand  $R$  (hier ein 10-Gang-Potentiometer), der Gegenspannungsquelle (hier zwei 1,5 V-Batterien in Reihe geschaltet) und dem Schalter beginnen.

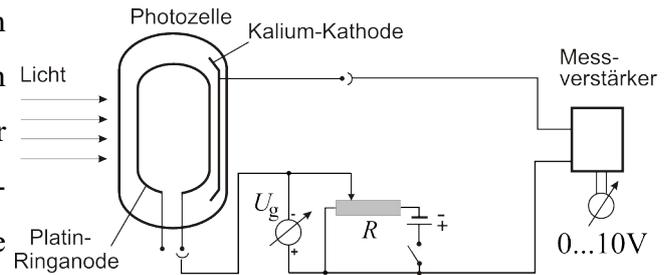


Abbildung 3: Schaltung für den Versuchsaufbau zur Bestimmung des Planckschen Wirkungsquantums bei Messung des Photostroms.

Der Messverstärker ist ein sogenannter Strom

verstärker. Diese Geräte zeichnen sich durch einen geringen Eingangswiderstand aus, es wird also der Eingangsstrom zur Verstärkung verwendet. Der Ausgang ist ein Spannungsausgang mit Ausgangswerten von 0 bis 10 V. Die Verstärkung  $\nu$  wird daher in A/V angegeben, so dass bei beispielsweise  $\nu = 2 \cdot 10^{-10} \text{ A/V}$  in den Eingang  $10^{-10} \text{ A}$  fließen, wenn am Ausgang 2 V anliegen.

Der Stromverstärker braucht einige Zeit, bis er stabil ist, was Sie folgendermaßen erkennen können: Schalten Sie auf höchste Verstärkung und halten Sie den Eingangs-Kurzschlusschalter „Null“ nach unten gedrückt. Nun kann man am Offset-Drehpotentiometer den Ausgang auf Null justieren. Wenn nach 3 Minuten beim erneuten Drücken von „Null“ der Ausgang bei Null geblieben ist, so ist das Gerät ausreichend stabil.

Bei geöffnetem Schalter, d. h. ohne Gegenspannung, sollten Sie für die blau-violette Linie einen deutlichen Ausschlag im Verstärkungsbereich  $2 \cdot 10^{-10} \text{ A/V}$  sehen. Verschieben Sie vorsichtig die Hg-Lampe seitlich und stellen Sie ein Strommaximum ein.

Verstellen Sie nun den Verschiebereiter, d. h. die Beobachtungswellenlänge, und üben Sie so, das Maximum einer Linie am Strom zu erkennen. Dies ist bei der blau-violetten Linie noch recht einfach, wird später bei anderen Linien aber eventuell schwieriger.

## 2.3 Probemessung des Photostroms als Funktion der Gegenspannung, $I_{\text{ph}}(U_g)$

Mit der gerade eingestellten blau-violetten Linie soll eine Probemessung des Photostroms als Funktion der Gegenspannung  $I_{\text{ph}}(U_g)$  durchgeführt werden.

Schalten Sie die Gegenspannung ein und verändern Sie mit dem Potentiometer von Null beginnend die an die Photozelle angelegte Spannung. Beobachten Sie gleichzeitig das Anzeigeelement des Stromverstärkers. Sie werden feststellen, dass oberhalb einer gewissen Spannung kein Strom mehr fließt, oder, dass ein geringer negativer Leckstrom entsteht, der aber nur schwach von der Gegenspannung abhängt. Ziel ist es, diejenige Gegenspannung zu bestimmen, bei der der

Photostrom gerade verschwindet. Eingangs wurde diese Spannung Grenzspannung  $U_0$  genannt. Den Wert für  $U_0$  direkt abzulesen ist nicht gerade einfach, wie Sie feststellen werden. Daher wird der gesamte Verlauf  $I_{\text{ph}}(U_g)$  aufgezeichnet.

Sowohl die vom Messverstärker ausgegebene Spannung, die proportional zum Photostrom  $I_{\text{ph}}$  ist, als auch die über das Potentiometer einstellbare Gegenspannung  $U_g$  werden über Spannungssensoren gemessen, die sich über „Bluetooth“ mit einem Endgerät verbinden lassen. Dies kann nach Installation der „measureApp“ entweder ein Smartphone oder ein Tablet (wird bei Bedarf zur Verfügung gestellt) sein. Eine Übersicht der wichtigsten Funktionen der App sowie der QR-Code zum Download befinden sich am Messplatz.

Für die Spannungsmessung müssen die Sensoren zunächst vorbereitet werden. Halten Sie dazu nacheinander den Schalter des einzelnen Sensors solange gedrückt, bis er im Eingabemenü der App erscheint und aktivieren Sie ihn durch Anklicken. Die Reihenfolge, in der die Sensoren im Menü aufgeführt werden, entspricht der umgekehrten Reihenfolge des Einschaltens. Als Abtastfrequenz sollte 5 Hz eingestellt sein. Ordnen Sie im unteren Teil des Eingabemenüs für die nachfolgende Messung den Koordinatenachsen jeweils die richtige Spannungsmessgröße zu, sodass Sie ein  $I_{\text{ph}}(U_g)$ -Diagramm aufzeichnen können.

Wählen Sie am Messverstärker eine geeignete Empfindlichkeit. Aktivieren Sie anschließend den roten Button der App, um die Messung zu starten. Beginnen Sie möglichst gleichzeitig, die Gegenspannung am Potentiometer von „Null“ auf das Maximum von 3 V zu erhöhen.

Sie erhalten einen Graphen wie in Abbildung (4). Die erneute Aktivierung des roten Buttons beendet die Messung.

Die Schwankungen des Stromes bei hoher Gegenspannung stören zwar etwas das Bild, aber man kann relativ leicht auf  $U_0 = (1,25 \pm 0,05) \text{ V}$  schließen. Ein Ausdruck auf DIN A4 erlaubt vielleicht genaueres Ablesen. Die Probemessung ist damit beendet.

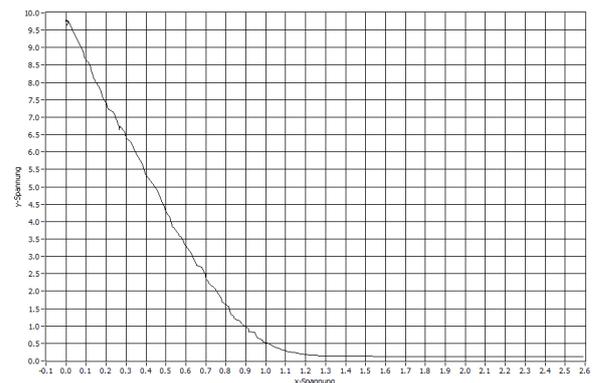


Abbildung 4: Typischer Verlauf eines  $I_{\text{ph}}(U_g)$  - Diagramms.

## 2.4 Messung von $I_{\text{ph}}(U_g)$

Die Spektrallinien von Quecksilber besitzen folgende Wellenlängen:

Farbe	Wellenlänge (nm)
gelb	578 (577+579)
grün	546
grünblau	492
blau-violett	435
tief violett	405

Für alle Linien:

- 1) Messen Sie  $I_{\text{ph}}(U_g)$  wie bei der Probemessung.
- 2) Messen Sie jeweils ein zweites Mal bei höherer Verstärkung ab der Stelle, wo  $I_{\text{ph}}(U_g)$  auf etwa 10% des Maximalwertes zurückgegangen ist. Im Bild oben wäre dies bis ca. 1,0 V. Dies dient der genaueren Ermittlung von  $U_0$ .

Um die schwache grünblaue Linie einzustellen, müssen sie von der 435 nm-Linie ausgehend langsam Richtung „rot“ schwenken und ein (schwach ausgeprägtes) Maximum vor der grünen Linie auffinden. Manche Personen können die grünblaue Linie auch direkt sehen.

Ermitteln Sie das jeweilige  $U_0$  indem Sie feststellen, an welcher Stelle der Strom eindeutig über den Werten des horizontalen Bereichs liegt. Tragen Sie die ermittelten Werte für  $U_0$  gegen die Frequenz der Linien auf und bestimmen Sie  $h$  durch lineare Regression aus der Steigung und mit Gleichung (3).

Eine Genauigkeitsangabe und ein Vergleich mit dem Literaturwert sind selbstverständlich.

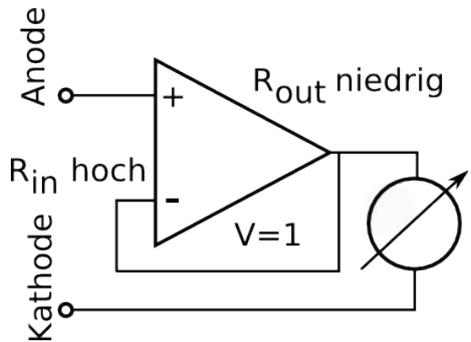
## 2.5 Alternative Messmethode mit einem Elektrometer

Statt mit Strommessung und einer Gegenspannung zu arbeiten, kann man auch mit einer „einfachen“ Spannungsmessung  $U_0$  bestimmen. Die Idee ist einfach: Die ausgelösten Photoelektronen treffen auf die Ringanode auf und laden diese auf. Dies geht so lange, bis sich zwischen Kathode und Anode  $U_0$  eingestellt hat. Die Form des elektrischen Feldes ist dabei unerheblich.

Der Haken beim Umsetzen dieser Idee ist, dass beim Messen von  $U_0$  mit einfachen Spannungsmessern die Anode entladen wird. Man braucht also einen Spannungsmesser der ohne Stromfluss funktioniert, d. h. ein Gerät mit sehr, sehr hohem Innenwiderstand. Solch ein Gerät heißt

bekanntlich **Elektrometer**. Während für hohe Spannungen Elektrometer mit elementaren Mitteln in Form von Blättchenelektrometern gebaut werden können, benötigt man „moderne“ Elektronik für  $U_0$  im Bereich von 1 V. Daher konnte Millikan so nicht messen.

Man realisiert dieses Gerät mit einem Operationsverstärker, dem Elektrometerverstärker, und einem „normalen“ Voltmeter. Das Prinzip sieht aus, wie rechts dargestellt: Der (nicht-invertierende) Eingang des Verstärkers hat einen sehr großen Eingangswiderstand („Leybold“-Gerät:  $R_i \geq 10^{13} \Omega$ ), die Photozelle wird also fast nicht mit einem Strom belastet.



Der Ausgang kann aber den Strom für ein Anzeigergerät liefern, ist also niederohmig („Leybold“-Gerät:  $1 \Omega$ ).

Abbildung 5: Operationsverstärker als Spannungsfolger.

Als Verstärkung wählt man der Einfachheit halber  $v = 1$ , was man mit der direkten Rückkopplung auf den invertierenden Eingang erreicht. Man spricht von einem sogenannten **Spannungsfolger**, siehe Abbildung (5). Die echten Schaltungen sehen etwas komplexer aus.

Im tatsächlichen Aufbau, siehe Abbildung (6), wird parallel zum Eingang bzw. zur Photozelle ein Kondensator geringer Kapazität geschaltet, um Schwankungen zu glätten (RC-Glied mit  $R = R_i$ ).

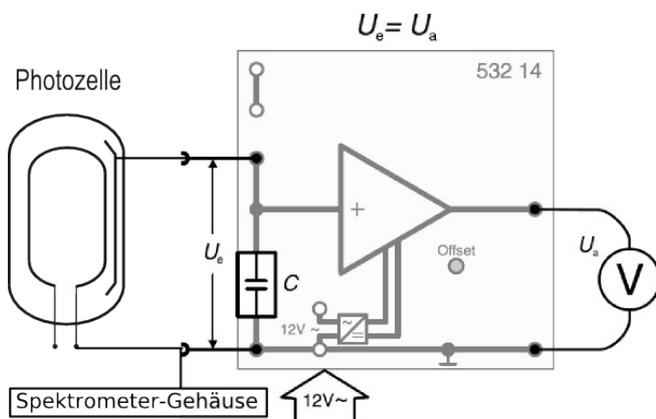


Abbildung 6: Beschaltung der Photozelle.

Die Beschaltung der Photozelle ist in Abbildung (6) skizziert. Wichtig ist, auch das Gehäuse des Spektrometers zu erden, was am besten über den Außenleiter des von der Photokathode kommenden Koaxialkabels geschieht. Parallel zum Kondensator ist ein Taster geschaltet (oben nicht eingezeichnet), der es erlaubt, den Kondensator vor einer neuen Messung zu entladen.

Als Voltmeter können Sie das analoge Multimeter verwenden.

Achtung: Der Eingang ist sehr empfindlich und reagiert leicht auf Influenzladungen, die Sie durch „Hand-Auflegen“ am Eingangskabel im Kondensator erzeugen können. Um diesen Effekt zu sehen, fahren Sie bei geschlossenem Schieber an der Hg-Lampe mit Ihrer Hand über das Kabel von der Photokathode zum Verstärkereingang, nachdem Sie den Taster gedrückt haben.

Messen Sie für alle Linien  $U_0$  mit dem Elektrometer und werten Sie wie bei der Strommethode aus. Vergleichen Sie die Ergebnisse kritisch.