

IIA3

Modul Atom-/Kernphysik

Photoeffekt

Anhand verschiedener Experimente wurde Ende des letzten Jahrhunderts gezeigt, dass Elektronen auch aus einem Metall befreit werden können, indem man seine Oberfläche mit Licht bestrahlt. Dieser Prozess heisst *photoelektrischer Effekt (Photoemission)* und die ausgesandten Elektronen *Photoelektronen*. Mittels der Photoemission ist es möglich, die PLANCK'sche Konstante zu bestimmen.

Versuch IIA3 - Photoeffekt

Anhand verschiedener Experimente wurde Ende des letzten Jahrhunderts gezeigt, dass Elektronen auch aus einem Metall befreit werden können, indem man seine Oberfläche mit Licht bestrahlt. Dieser Prozess heisst *photoelektrischer Effekt (Photoemission)* und die ausgesandten Elektronen *Photoelektronen*. Mittels der Photoemission ist es möglich, die PLANCK' sche Konstante zu bestimmen.

1.1 Fragen zur Vorbereitung

- Beschreibe den Photoeffekt in eigenen Worten.
- Beschreibe wie genau die Energie der Photonen in der Photozelle gemessen wird.
- Warum hat die Quecksilber-Hochdrucklampe ein (diskretes) Linienspektrum?

1.2 Theorie

1.2.1 Photoelektronen

Auf der Suche nach einer Quelle für elektromagnetische Wellen untersuchte HEINRICH HERTZ im Jahre 1887 die Entladung zwischen zwei Elektroden. Dabei beobachtete er, dass die Intensität der Entladung anwuchs, wenn er die Kathode mit ultraviolettem Licht bestrahlte. Dieser Effekt legte die Vermutung nahe, dass Metalloberflächen, die mit Licht bestrahlt werden, Elektronen aussenden. Kurze Zeit darauf konnte W. HALLWACHS und etwas später auch P. LENARD Elektronenemission an bestrahlten Oberflächen von Zink, Kalium, Rubidium und Natrium nachweisen.

In einem Metall gibt es viele Elektronen, die sich mehr oder weniger frei durch das Kristallgitter bewegen können. Bei nicht zu hohen Temperaturen vermögen sie aber nicht aus dem Metall herauszudringen, weil sie zu wenig Energie haben, um die starken COULOMB-Kräfte an der Oberfläche zu überwinden. Eine Möglichkeit, den Elektronen mehr Energie zu geben, besteht darin, das Metall zu erhitzen. Die Elektronen „dampfen“ dann aus der Oberfläche heraus; sie werden dann *Thermoelektronen* genannt. Diese Art von Elektronenemission (Thermoemission) tritt in Elektronenröhren auf. Eine zweite Möglichkeit ist die Feldemission. Hier werden durch ein starkes äusseres elektrisches Feld Elektronen aus dem Metall herausgesogen. Die austretenden *Feldelektronen* können sich durch elektrische Funken in der Luft bemerkbar machen, so z.B. in Zündkerzen.

1.2.2 MILLIKAN's Beobachtungen

Im Jahre 1914 untersuchte A. MILLIKAN den photoelektrischen Effekt nochmals mit grösster Sorgfalt. Abbildung 1 zeigt eine schematische Darstellung seiner Versuchsanordnung: Zur grossen Verwirrung seiner Zeitgenossen konnten seine Beobachtungen aber nicht mit der klassischen Wellentheorie des Lichtes (Elektrodynamik) erklärt werden:

- Die Emission von Elektronen (d.h. der photoelektrische Strom j in der Elektrode) wächst zwar an mit der Intensität der auf die Metalloberfläche fallenden Lichtstrahlung; die kinetische Energie der ausgesandten Elektronen erweist sich jedoch als unabhängig davon. Nach der Elektrodynamik wächst die Intensität I mit der Amplitude \vec{E} der Lichtwelle, das heisst mit der elektrischen Kraft $e\vec{E}$ auf das Elektron. Daher ist zu erwarten, dass auch die kinetische Energie E_{kin} des Photoelektrons mit I anwächst, was vom Experiment nicht bestätigt wird.
- Demgegenüber wurde eine charakteristische Abhängigkeit der Elektronenemission von der Frequenz der einfallenden Strahlung festgestellt. Abbildung 1.2 zeigt diese Abhängigkeit. Offenbar gibt es eine (noch vom Material abhängige) minimale Lichtfrequenz ν_0 , so dass - ganz gleich wie intensiv die Strahlung ist - keine Photoelektronen erzeugt werden, wenn die Lichtfrequenz kleiner als ν_0 ist. Auch dieses Phänomen ist im Widerspruch zur klassischen Wellentheorie des Lichtes. Diese fordert nämlich, dass der photoelektrische Effekt bei jeder Frequenz vorkommt, vorausgesetzt dass die Intensität

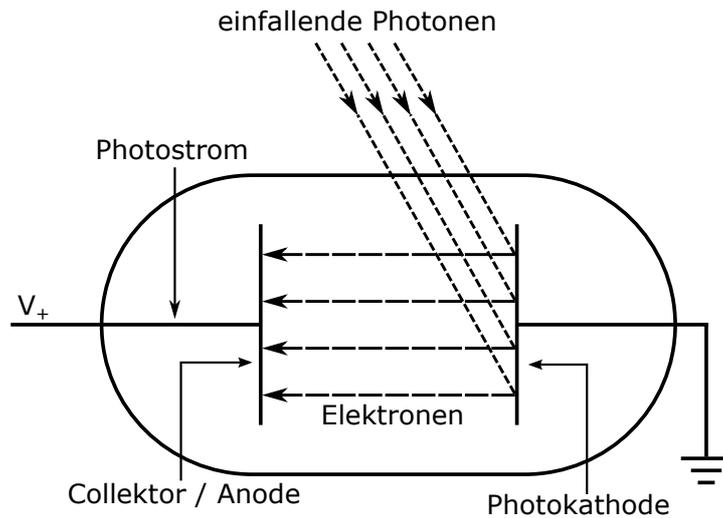


Abbildung 1.1: Schematische Darstellung von MILLIKANS Versuchsanordnung

des eingestrahlt Lichtes stark genug ist, um Elektronen aus der Oberfläche herauszuschlagen.

- Im weiteren sagt die Wellentheorie voraus, dass bei schwacher Lichtstrahlung eine merkbare Zeit verstreichen soll zwischen dem Einschalten der Einstrahlung und dem Moment, wo das Elektron genug Energie absorbiert hat, um das Metall verlassen zu können. Experimentell wurde keine solche Verzögerung festgestellt.

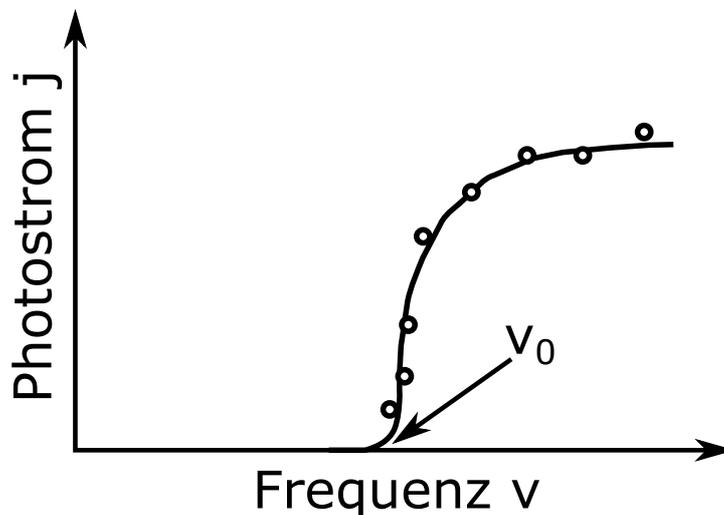


Abbildung 1.2: Abhängigkeit der Elektronenemission von der Frequenz des einfallenden Lichtes

1.2.3 EINSTEINS Erklärung

Im Jahre 1905, ein Jahrzehnt vor MILLIKANS Versuch, schlägt ALBERT EINSTEIN, gestützt auf die Beobachtungen von LENARD, eine einfache aber revolutionäre Theorie des photoelektrischen Effektes vor:

Sei Φ die Energie, die ein Elektron braucht, um aus einem gegebenen Metall auszutreten. Absorbiert dieses Elektron von der Lichtstrahlung die Energie E , gewinnt es die kinetische Energie

$$E_{kin} = E - \Phi \quad (1.1)$$

Offensichtlich tritt nur Emission auf, wenn grösser als Φ ist. EINSTEINS postuliert in Analogie zu einer von MAX PLANCK in anderem Zusammenhang gemachten Quantenhypothese, dass die Energie der Lichtstrahlung von den Elektronen nur in Quanten der Grösse

$$E = h\nu \quad (1.2)$$

absorbiert werden kann. Dabei ist ν die Lichtfrequenz und h die PLANCK'sche Konstante. Für die kinetische Energie der Photoelektronen erhält man somit:

$$E_{kin} = h\nu - \Phi \quad (1.3)$$

Nicht alle Elektronen brauchen gleich viel Energie Φ , um aus dem Metall herauszukommen. Doch für jedes Metall gibt es eine minimale Energie Φ_0 , die Austrittsarbeit genannt wird. Die maximale kinetische Energie für ein Photoelektron ist daher

$$E_{kin}^{max} = h\nu - \Phi_0 \quad (1.4)$$

Daraus folgt, dass für die Frequenz $\nu_0 = \Phi_0/h$ die maximale kinetische Energie $E_{kin}^{max} = 0$ wird; d.h. ν_0 ist jene minimale Frequenz für das Auftreten des Photoeffektes. Für Frequenzen ν kleiner als ν_0 ist $h\nu$ kleiner als die minimal benötigte Austrittsarbeit Φ_0 und es tritt somit keine Photoemission auf.

1.3 Experiment

1.3.1 Versuchszubehör

| Komponente | Anzahl |
|--|--------|
| Optiksystem mit Photozelle | 1 |
| Elektrometerverstärker | 1 |
| Messkondensator mit Taster | 1 |
| Multimeter | 1 |
| Koaxial-Messkabel | 1 |
| Experimentierkabel | 5 |
| Netzgerät für Quecksilber-Hochdrucklampe | 1 |

1.3.2 Versuchsaufbau

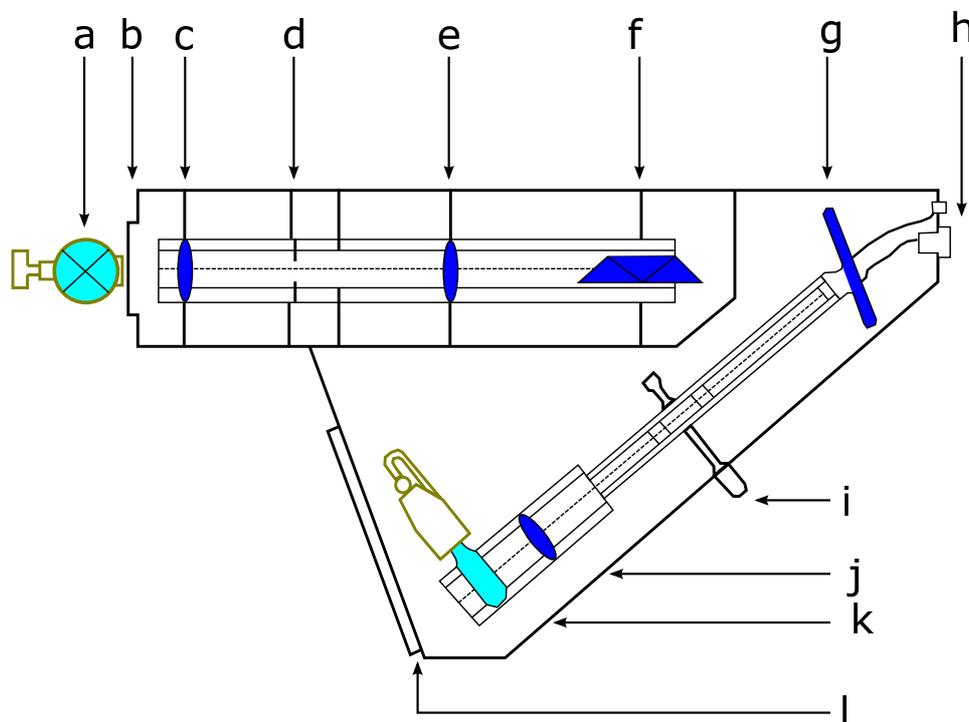


Abbildung 1.3: Kompaktanordnung der optischen Systeme.

- a) Quecksilber-Hochdrucklampe,
- b) Schieber,
- c) Sammellinse ($f=50\text{mm}$),
- d) Spalt,
- e) Abbildungslinse ($f=100\text{mm}$),
- f) Geradsichtprisma mit Kragen,
- g) Spiegel,
- h) Anschlüsse der Messleitungen,
- i) Gewindeführung des schwenkbaren Armes für die Photozelle,
- j) Sammellinse ($f=50\text{mm}$),
- k) Fotozelle,
- l) Fenster und Ablendschieber

In der vorliegenden Versuchsanordnung (Abbildung 1.3) wird das Licht einer Quecksilber-Hochdrucklampe spektral zerlegt. Die einzelnen Linien des Spektrums (siehe Tabelle 1.1) werden nacheinander auf eine Photokathode gelenkt. Die austretenden Photoelektronen werden von einer ringförmigen Platinanode aufgefangen.

Der so entstandene Photostrom j , lädt nun langsam den Kondensator am Elektrometerverstärker. Das heisst, dass Ladungen von der Platinanode auf den Kondensator wandern. Für den Zusammenhang zwischen Ladung Q und Spannung V_0 am Kondensator mit Kapazität C gilt:

$$V_0 = \frac{Q}{C}$$

Die Spannung am Kondensator entspricht also der Spannung zwischen Anode und Kathode der Fozelle. Dies führt zu einem elektrischen Feld in der Zelle, welches dem Photostrom j entgegenwirkt. Je mehr Ladungen auf den Kondensator fliessen, desto grösser wird die Gegenspannung und desto kleiner wird der Strom. Wenn schliesslich das elektrische Potential, das die Elektronen zu überwinden haben, grösser wird als ihre kinetische Energie ($eV \geq E_{kin}^{max}$), dann verschwindet der Strom ganz (e ist die Ladung des Elektrons). Zwischen der kritischen Gegenspannung V_0 und der Frequenz des eingestrahlt Lichtes existiert also die folgende lineare Beziehung:

$$E_{kin}^{max} = V_0 e = h\nu - \Phi_0 \tag{1.5}$$

$$\Rightarrow V_0 = \frac{h}{e}\nu - \frac{\Phi_0}{e} \tag{1.6}$$

Mit der experimentell ermittelten Frequenzabhängigkeit von V_0 kann also die Lichtquantenhypothese direkt getestet werden und das Wirkungsquantum h bestimmt werden.

1.3.3 Durchführung

| Farbe | Wellenlänge [nm] | Frequenz ν [10^{14} Hz] |
|---------|------------------|--------------------------------|
| rot | 650 | 4.6 |
| gelb | 578 | 5.19 |
| grün | 546 | 5.49 |
| türkis | 493 | 6.08 |
| blau | 436 | 6.88 |
| violett | 405 | 7.41 |

Tabelle 1.1: Hauptlinien der Hg-Lampe

- Stecke den Kondensator mit Taster an den Eingang des Elektrometerverstärkers.
- Verbinde das Koaxialkabel mit dem Optiksysteem (h) in Abbildung 1.3) und dem Eingang (grosser Stecker), bzw. der Erdung (kleiner Stecker) des Elektrometerverstärker.
- Verbinde die beiden Klinkeausgänge des Optiksysteems mit einem kurzen Experimentierkabel. Verbinde sie nun mit einem weiteren Experimentierkabel mit der Erdung des Elektrometerverstärkers.
- Verbinde die Erdung des Elektrometerverstärkers mit einem weiteren Experimentierkabel mit der Erdung an der Steckerleiste.

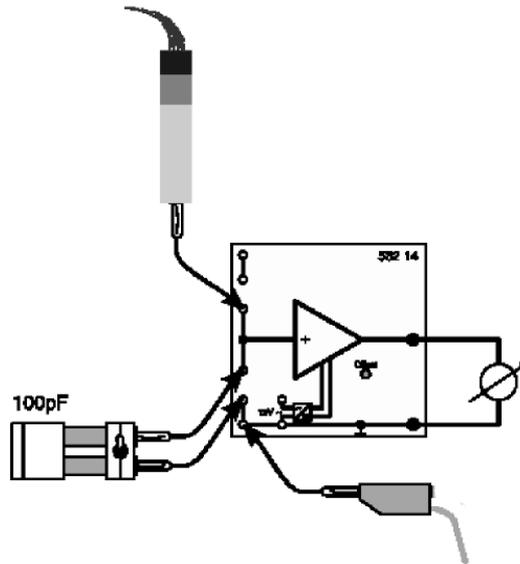


Abbildung 1.4: Elektrometerverstärker

- Schliesse das Multimeter an den Ausgang des Elektrometerverstärkers an.
- Schalte die Quecksilber-Hochdrucklampe ein. Beachte, dass sie im Betrieb sehr heiss werden kann!
- Justiere die Optik so, dass in der Ebene der letzten Sammellinse (k) in Abbildung 1.3) klar abgetrennte Spektrallinien sichtbar werden.
- Schwenke mit der Gewindeführung die Photozelle zur ersten Spektrallinie. Der Schatten eines Markierungstiftes, der im Beobachtungsfenster sichtbar ist, zeigt uns die Position der Photozelle.
- Während der Messung muss der Metalldeckel aufliegen und der Schieber am Beobachtungsfenster geschlossen sein.

1.3.4 Aufgaben zur Auswertung

1. Stelle die Photozelle wie oben beschrieben auf die erste Spektrallinie ein. Entlade den Kondensator durch Drücken des Tasters. Danach warte etwa eine Minute, bis sich die Spannung stabilisiert hat. Jetzt kannst Du die Gegenspannung V_0 am Multimeter ablesen. Beachte, dass dieser Aufbau sehr sensibel auf induktive Störungen reagiert. Das heisst, dass Du während der Messung dich, sowie die Experimentierkabel möglichst nicht bewegen solltest.
2. Wiederhole die Messung für jede der übrigen Linien (mindestens fünf) und trage die Daten in die Tabelle ein.
3. Plote V_0 und ΔV_0 als Funktion von ν auf (siehe Tabelle 1.1), erstelle einen linearen Fit und bestimme so die PLANCK'sche Konstante h . Du erhältst h aus der Steigung der Geraden, welche durch Gleichung (1.6) bestimmt wird. Die Elementarladung e darfst Du als bekannt voraussetzen.

4. Vergleiche den Wert mit dem tabellierten Wert einer Präzisionsmessung (einen theoretischen Wert gibt es nicht!) und diskutiere die Unsicherheiten an Hand deines Fits.

1.4 Literatur

- Paul A. Tipler, *Physik für Naturwissenschaftler und Ingenieure*, Spektrum
- Horst Stöcker, *Taschenbuch der Physik*, Verlag Harri Deutsch

A.1 Kurzbiographien von A. EINSTEIN und R. A. MILLIKAN

ALBERT EINSTEIN, geboren 1879 in Ulm, Deutschland, starb 1955. Er studierte am Physikalischen Institut der ETHZ. Nachdem er sein Diplom im Jahre 1900 absolviert hatte arbeitete er am Schweizerischen Patentamt in Bern. Während dieser Zeit schrieb er drei berühmte Abhandlungen, die alle im Jahre 1905 in der Zeitschrift Annalen der Physik erschienen. Sie behandelten den sogenannten photoelektrischen Effekt, die BROWN'sche Bewegung und die Spezielle Relativitätstheorie. Danach arbeitete er an verschiedenen Orten in Bern, Prag und Zürich und als Direktor am Kaiser Wilhelm Institut in Berlin. 1933 wurde er Mitglied des Institute of Advanced Studies in Princeton, N.J., wo er sich auch während des Zweiten Weltkrieges niederliess. 1921 erhielt er den Nobelpreis für die korrekte Vorhersage des photoelektrischen Effekts. Vor der experimentellen Bestätigung dieses Gesetzes, wurde EINSTEIN unter anderem von PLANCK an der Preussischen Akademie der Wissenschaften empfohlen. Die anfänglich skeptische Einstellung gegenüber seiner Photonenhypothese findet ihren Ausdruck in dem Empfehlungsschreiben, in dem es heisst:

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass kaum ein grosses Problem existiert, von denen es so viele in der modernen Physik gibt, zu dem Einstein keinen grossen Beitrag geleistet hätte. Dass er manchmal sein Ziel durch seine Spekulationen verfehlt hat, beispielsweise durch die Hypothese des Lichtquants, kann eigentlich nicht allzu schwer wiegen, weil es nicht möglich ist, neue fundamentale Ideen einzuführen ohne dann und wann ein Risiko auf sich zu nehmen.

ROBERT ANDREWS MILLIKAN geboren im Jahre 1868 in Morrison, Illinois, starb 1953. Nach seiner Studienzeit in den Vereinigten Staaten und Deutschland, war MILLIKAN Professor an der Universität von Chicago und am California Institute of Technology. MILLIKAN wurde bekannt durch die Bestimmung der Elementarladung und seine Arbeit am photoelektrischen Effekt. Er erhielt den Nobelpreis im Jahre 1923.