

Photoelektrischer Effekt Demonstrationsgerät

Anleitung

Hinweis: Nach dem Einstecken, Einschalten und Drehen am Drehknopf „Light Intensity“ wird die Lampe hell. Falls nicht, bitte Lampe herausnehmen, Kontakte reinigen und wieder einsetzen.

Einleitung und Theorie

Laut Einstein wird Licht in Form von Photonen emittiert und die Energieverteilung der Photonen ist nicht kontinuierlich (wird nicht durch die elektromagnetische Theorie von Maxwell geregelt). Vielmehr hat ein Photon eine Einheitsenergie von $h\nu$, wobei ν die Frequenz des Lichts und h eine Konstante ist. Durch die Beleuchtung einer Metalloberfläche mit Licht absorbieren die freien Elektronen des Metalls die Energie der Photonen. Wenn die Energie des Photons höher ist als die Barriereenergie des Metalls, könnten Elektronen aus der Metalloberfläche austreten. Dieser Effekt wird als photoelektrischer Effekt bezeichnet. Die kinetische Energie des entkommenden Elektrons (d. h. Photoelektrons) beträgt:

$$E = h\nu - W_s - \frac{1}{2}mv_m^2 = h\nu - W_s \quad (1)$$

Dabei ist h die Plancksche Konstante ($6,626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$), ν die Frequenz des Beleuchtungslichts, m die Masse eines Elektrons, v_m ist die Anfangsgeschwindigkeit des Photoelektrons an der Metalloberfläche und W_s die Fluchtenergie oder die Austrittsarbeit des Metalls.

Gleichung (1) gibt die maximale kinetische Energie des Photoelektrons ohne Hindernis im Raum an. Je höher die Frequenz des Beleuchtungslichts ist, desto größer ist die maximale kinetische Energie des Photoelektrons, wie in Abb. 1 (a) zu sehen ist. In Anbetracht der bestimmten anfänglichen kinetischen Energie des Photoelektrons können einige Photoelektronen von der Metalloberfläche (Kathode) entweichen und einen Photostrom bilden, auch wenn zwischen Anode und Kathode keine positive Spannung angelegt ist. Wenn diese Spannung bei einem bestimmten Wert umgekehrt wird, erreichen die Photoelektronen die Anode nicht mehr und daher ist der Photostrom zu diesem Zeitpunkt Null, wie in Abb. 1 (b) dargestellt. Dieses negative Potential U_s wird als Grenzspannung des photoelektrischen Effekts bezeichnet und beschrieben durch:

$$eU_s - \frac{1}{2}mv_m^2 = 0 \quad (2)$$

Ersetzen wir (2) durch (1), erhalten wir

$$eU_s = h\nu - W_s \quad h\nu = \frac{1}{2}mv_m^2 + W_s \quad (3)$$

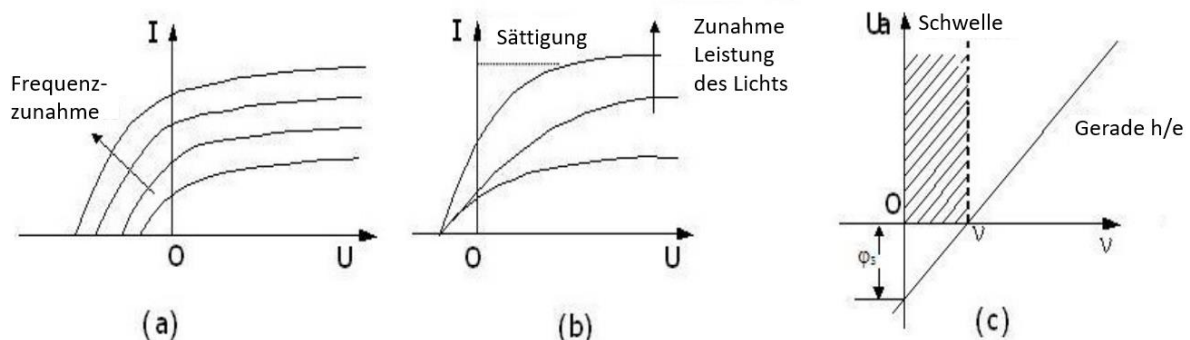


Abbildung 1

Dynamische Energie von Photoelektronen im Verhältnis zur Lichtfrequenz (a), Photostrom im Verhältnis zur Lichtleistung (b) und Grenzfrequenz des photoelektrischen Effekts (c)

Gleichung (3) wird Einsteins Gleichung genannt, die besagt, dass kein Photostrom entsteht, wenn die Photoelektronenenergie $h\nu$ kleiner als die Austrittsarbeit W_s ist, da Elektronen unter solchen Bedingungen nicht aus der Metalloberfläche entweichen können. Für ein bestimmtes Metallmaterial

beträgt die Mindestfrequenz des Beleuchtungslichts zur Erzeugung eines photoelektrischen Effekts $\nu_0 = W_s/h$, was als Grenzfrequenz des photoelektrischen Effekts (auch als Rotgrenze bekannt) bezeichnet wird. Die Austrittsarbeit W_s ist die inhärente Eigenschaft eines Metallmaterials, die unabhängig von der Frequenz des einfallenden Lichts ist. Gleichung (3) kann wie folgt umgeschrieben werden:

$$U_s = \frac{h}{e} \nu - \frac{W_s}{e} = \frac{h}{e} (\nu - \nu_0) \quad (4)$$

Gleichung (4) zeigt, dass die Grenzspannung U eine lineare Funktion der Frequenz des einfallenden Lichts ν ist. Offensichtlich ist $U_s = 0$, wenn $\nu = \nu_0$, unter solchen Bedingungen gibt es keinen Photostrom. Die Steigung der geraden Linie, wie durch Gleichung (4) beschrieben, ist eine Konstante $k (=h/e)$, wie in Abb. 1 gezeigt (c), also

$$h = ek \quad (5)$$

wobei e die Elektronenladung ist ($1,602 \times 10^{-19}$ C).

Daher kann die Plancksche Konstante berechnet werden, indem die Grenzspannung U_s und die Frequenz des Beleuchtungslichts gemessen, die U_s - ν -Kurve aufgezeichnet und die Steigung k ermittelt wird. Hinweis: Das Beleuchtungslicht muss keine einheitliche Wellenlänge haben, da für die Bestimmung der Grenzspannung (U_s) nur die Grenzwellenlänge (die maximale Frequenz) von Bedeutung ist. Dies liegt daran, dass die Photoelektronen, die durch Lichteinstrahlung bei der Grenzwellenlänge freigesetzt werden, die maximale kinetische Energie haben. Wenn die Photoelektronen mit der maximalen kinetischen Energie durch das Umkehrpotential gestoppt werden können, können auch andere Photoelektronen mit geringerer kinetischer Energie gestoppt werden. Somit kann eine breitbandige Lichtquelle wie eine Wolframlampe mit Farbfiltern verwendet werden, um die Plancksche Konstante basierend auf Gleichung (4) zu messen.

Abbildung 2 zeigt das experimentelle Schema des photoelektrischen Effekts zur Bestimmung der Planckschen Konstante mithilfe einer photoelektrischen Röhre. Wenn ein Lichtstrahl mit der Frequenz ν und der Leistung P die Kathode einer Fotoröhre beleuchtet, entweichen Photoelektronen aus der Kathode. Wenn an die Anode relativ zur Kathode ein positives Potential angelegt wird, werden die Photoelektronen beschleunigt; legt man an die Anode ein umgekehrtes Potential an, werden die Photoelektronen abgebremst. Der Photostrom nimmt mit zunehmendem Umkehrpotential U_{KA} ab. Schließlich ist der Photostrom Null, wenn $U_{KA} = U_s$. Abbildung 3 zeigt die typische I-V-Kennlinie einer Fotoröhre.

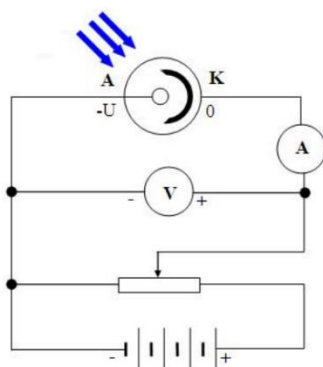


Abbildung 2 Versuchsaufbau

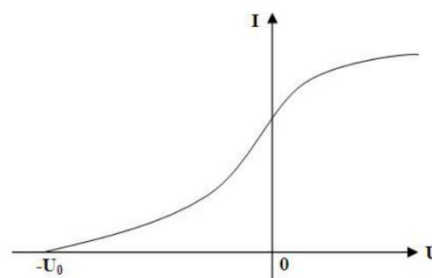


Abbildung 3 Kennlinie

Durch Beleuchtung einer Fotoröhre mit unterschiedlichen Lichtfrequenzen ν können entsprechende I-V-Kurven der Fotoröhre erfasst werden, sodass die entsprechenden Grenzspannungen U_s der Fotoröhre erhalten werden können. Durch das Zeichnen der U_s - ν -Kurve sollte eine annähernd gerade Linie zu sehen sein, wie sie durch Einsteins photoelektrische Gleichung vorhergesagt wurde. Daher kann die Plancksche Konstante h aus der Steigung k der Geraden mithilfe von Gl. (5) berechnet werden. Darüber hinaus kann die Abschaltspannung U_0 des Kathodenmaterials aus dem Schnittpunkt der I-V-Kurve mit der horizontalen Achse des Diagramms ermittelt werden. Somit kann die Grenzfrequenz ν_0 aus U_0 erreicht werden, die dem Elektronenaustrittspotential entspricht, wie in Abb. 1 (c) dargestellt.

Aufbau

Ein schematisches Diagramm des Geräts ist in Abb. 4 dargestellt. Das Gerät besteht aus einer Lichtquelle, einer lichtempfangenden Fotoröhre, einem Gleichstromverstärker und fünf Farbfiltern. Die Lichtquelle und die Empfangseinheit sind auf der Grundschiene montiert und können in ihrem Abstand eingestellt und auf der Skala abgelesen werden.

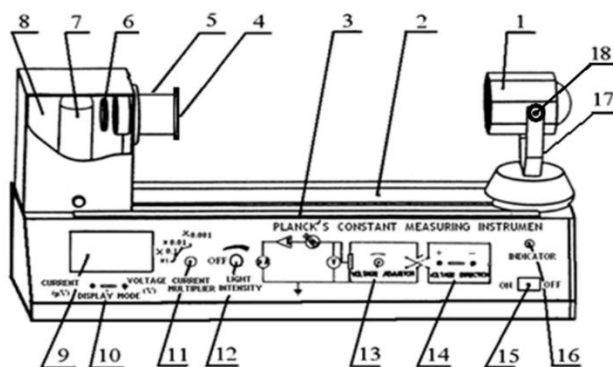


Abbildung 4: schematischer Aufbau des Apparats

- 1 – Lichtquelle 2 – Grundschiene 3 – Maßstab (Länge = 400 mm)
- 4 – Empfängerabdeckung (oder Filter) 5 – Empfängertubus 6 – Fokussierlinse
- 7 – Vakuum-Fotoröhre 8 – Empfängerbox 9 – Digitales Messgerät (V oder I)
- 10 – Anzeigemodus-Schalter (V oder I) 11 – Strommultiplikator 12 – Lichtintensität anpassen
- 13 – Beschleunigungsspannungseinstellung 14 – Spannungspolaritätsschalter 15 – Netzschalter
- 16 – Betriebsanzeige 17 – Feststellschraube 18 – Befestigungsknopf

Einrichtung und Einstellung

Hinweis: Schrauben Sie nach Erhalt des Geräts die Abdeckplatte des Empfängerkastens (8) ab und entfernen Sie den Schutzschwamm. Stellen Sie sicher, dass der Fototubus völlig frei ist und schrauben Sie die Abdeckplatte wieder fest.

Achtung: Bitte gehen Sie vorsichtig mit dem Fototubus und der Glühbirne um, da diese sehr zerbrechlich sind!

1) Einrichtung

A. Stellen Sie das Instrument auf einen sicheren Tisch, stellen Sie sicher, dass das Empfängerrohr (5) mit der Abdeckung (4) blockiert ist, schalten Sie das Gerät ein, stellen Sie den Lichtintensitätsregler (12) auf eine mittlere Lichtstärke ein und schieben Sie die Lichtquelle (1) auf die 250-mm-Position und ziehen Sie die Sicherungsschraube (17) fest. Wenn die Lampe nicht eingeschaltet ist, prüfen Sie, ob die Glühbirne aus der Halterung rutscht.

B. Passen Sie die Neigung der Lichtquelle an, damit das Licht direkt auf den Fototubus fällt.

2) Elektrische Einstellung

A. Stellen Sie den Anzeigemoduschalter (10) auf Spannungsanzeige und stellen Sie den Beschleunigungsspannungseinsteller (13) ein, um einen stabilen Spannungswert von $\pm 15 \text{ V}$ zu erhalten.

B. Stellen Sie den Anzeigemoduschalter (10) auf die Stromstärkeanzeige und halten Sie die Fotoröhre abgedeckt, während Sie den Strommultiplikator (11) einstellen, um zwischen „ $\times 1$ “, „ $\times 0,1$ “, „ $\times 0,01$ “ oder „ $\times 0,001$ “ zu wählen, um den Dunkelstrom sicherzustellen ist kleiner als $0,003 \mu\text{A}$.

C. Ändern Sie den Lichtintensitätsregler (12), um verschiedene Lichtintensitätsstufen zwischen stark, mäßig, schwach oder aus anzuzeigen.

D. Optimale Bedingungen: Das Licht sollte auf den zentralen Bereich der Kathodenplatte der Fotoröhre und nicht auf die Anode scheinen und der maximale Strom sollte beobachtet werden. Diese Bedingungen wurden im Werk erreicht. Wenn eine Ausrichtung erforderlich ist, öffnen Sie die obere Platte des Empfängerkastens (8), wenn die Lampe eingeschaltet ist. Das Bild der Lampe ist auf der Kathodenplatte zu sehen. Passen Sie die Position und Neigung der Lampe an, um das Bild in den zentralen Bereich der Platte zu bringen (Dies sollte von einem erfahrenen Techniker oder Ausbilder durchgeführt werden).

Experimentelles Verfahren

1) Schieben Sie die Lichtquelle (1) auf die 250-mm-Position, schalten Sie den Strom ein, heizen Sie das System 5 Minuten lang vor und stellen Sie den Strommultiplikator (11) auf die Position „ $\times 1$ “.

2) Platzieren Sie den roten Farbfilter (635 nm) auf dem Empfängerrohr (5), stellen Sie den Lichtintensitätsregler (12) auf mäßige Lichtstärke ein, den Spannungspolaritätsschalter (14) auf „+“, den Stromvervielfacher (11) auf „ $\times 1$ “ oder „ $\times 0,1$ “ und drehen Sie den Beschleunigungsspannungsregler (13), um den Fotostrom schrittweise bis zur Sättigung zu erhöhen, und zeichnen Sie die entsprechende Spannung auf. Mit dem Anzeigemoduschalter (10) können Sie zwischen Strom- und Spannungsanzeige umschalten.

3) Blockieren Sie das Empfängerrohr von Hand. Der Fotostrom sollte sofort verschwinden. Wenn Sie die Hand entfernen, sollte der Photostrom erneut auftreten, was darauf hinweist, dass sich der Photostrom sehr schnell bildet (nicht länger als 10^{-9} s).

4) Ändern Sie den Abstand (R) zwischen Lichtquelle (1) und Vakuum-Fotoröhre (7), zeichnen Sie den Abstandswert (R) mit dem entsprechenden Fotostrom (I) auf und zeichnen Sie die $I - 1/R^2$ -Kurve. Es sollte eine gerade Linie entstehen.

5) Lichtintensitätsregler (12) auf starkes Lichtniveau einstellen, Lichtquelle auf 300 mm Position schieben, Spannungspolaritätsschalter (14) auf „-“, Anzeigemoduschalter (10) auf Stromstärke-Anzeige, Beschleunigungsspannung auf 0 V, und stellen Sie den Stromstärke-Multiplikator (11) auf „ $\times 0,001$ “ ein. Passen Sie die Beschleunigungsspannung an, um den Photostrom auf Null zu senken, und notieren Sie den Beschleunigungsspannungswert für die Wellenlänge 635 nm.

6) Wiederholen Sie Schritt 5) für jeden Filter und notieren Sie den Spannungswert für jede Wellenlänge.

7) Konvertieren Sie die fünf Wellenlängen in Frequenzen ($\nu=c/\lambda$, wobei $c=3\times 10^8$ m/s die Lichtgeschwindigkeit ist), zeichnen Sie die Beschleunigungsspannung gegen die Frequenz auf und berechnen Sie die Steigung der gezeichneten Linie mithilfe der Methode der kleinsten Quadrate Anpassung und leiten Sie die Plancksche Konstante mithilfe von Gleichung ab. (5).

Hinweis: 1. Um Messfehler zu minimieren, vermeiden oder minimieren Sie Streulicht auf den Sensor.

2. Um den Effekt des Dunkelstroms zu minimieren, sollte die Kurve von Beschleunigungsspannung und Dunkelstrom zunächst durch Messung der Beschleunigungsspannung mit entsprechendem Fotostrom bei blockierter Empfängerröhre erfasst werden. Anschließend sollte der erfasste Dunkelstrom als „Null“-Fotostrom bei der Messung der Grenzspannung im Experiment verwendet werden. Wenn im Experiment beispielsweise die Abschaltspannung eines bestimmten Filters auf -0,5 V voreingestellt ist, was einem echten Nullstromausgang entspricht, und der Dunkelstrom bei dieser Spannung wie zuvor gemessen $0,001 \mu\text{A}$ beträgt, sollte die Beschleunigungsspannung sein leicht angepasst, bis sich der Fotostrom von $0 \mu\text{A}$ auf $0,001 \mu\text{A}$ ändert. Mit anderen Worten sollte die Beschleunigungsspannung, die $0,001 \mu\text{A}$ entspricht, als Abschaltspannung verwendet werden und nicht die Beschleunigungsspannung, die dem Nullstrom entspricht.

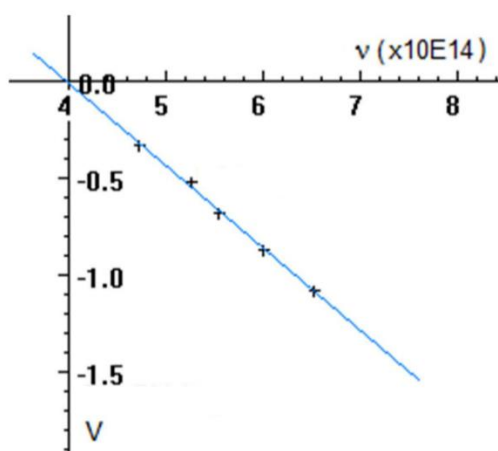
Achtung: Die Halogen-Wolframlampe kann sehr heiß werden, wenn sie einige Minuten lang eingeschaltet ist. Berühren Sie daher die Lampe oder das Lampengehäuse nicht mit bloßen Händen!

Beispiel für die Datenerfassung und -verarbeitung

Hinweis: Die folgenden Daten dienen nur zu Referenzzwecken und stellen keine Kriterien für die Geräteleistung dar:

Die Abschaltspannungen bei verschiedenen Wellenlängen sind in der folgenden Tabelle aufgeführt:

Wellenlänge (nm)	460	500	540	570	635
Frequenz (10^{14}Hz)	6.52	6.00	5.56	5.26	4.72
Us (V)	-1.08	-0.87	-0.68	-0.52	-0.33



Berechnung: $h = 6.803 \times 10^{-34}$ Js. Fehler ist 2.7%.