

Versuchsanleitung A 1 : Plancksches Wirkungsquantum

1 Einleitung

Der Umgang mit Lichtquanten ist heute so selbstverständlich, dass man sich kaum vorstellen kann, dass der äußere photoelektrische Effekt seiner gegen Ende des 19. Jahrhunderts mit Hilfe der klassischen Physik versuchten Erklärung unüberwindliche Schwierigkeiten bereitete.

Dieser 1887/88 von HEINRICH HERTZ (1857-1894) und WILHELM HALLWACHS (1859-1922) entdeckte Effekt, der unverständlich blieb, solange man Licht ausschließlich als Wellenphänomen ansah, war nur eine der gegen Ende des 19. Jahrhunderts bekannten Erscheinungen, die einer Deutung im Rahmen der klassischen Physik widerstanden. Diese Schwierigkeiten konnten schließlich mit Hilfe völlig neuer, im ersten Drittel des 20. Jahrhunderts entwickelter Vorstellungen über die Eigenschaften von Teilchen und Wellen überwunden werden. Den ersten Schritt auf diesem Wege ging MAX PLANCK (1858-1957) im Jahre 1900. Er berechnet die Energiedichte der von einem schwarzen Strahler der Temperatur T emittierten Wärmestrahlung je Frequenzintervall $d\nu$ unter der Annahme, dass die die Strahlung emittierenden Elektronen harmonische Oszillatoren sind und Energie nur in ganzzahligen Vielfachen von $h\nu$ aufnehmen und abgeben können. Das Resultat seiner Rechnung stand in hervorragender Übereinstimmung mit dem Experiment und enthielt auch die auf der Grundlage klassischer Vorstellungen entwickelte und nur für kleine Frequenzen gültige Beziehung von RAYLEIGH-JEANS als Spezialfall.

Da Oszillatoren Energie nur in Vielfachen von $h\nu$ aufnehmen und abgeben können, schlug ALBERT EINSTEIN (1879-1955) 1905 vor, elektromagnetische Strahlung als aus Teilchen bestehend aufzufassen, die die Energie $h\nu$ besitzen. Die entsprechenden Teilchen werden als Lichtquanten oder Photonen bezeichnet.

1909 erweiterte EINSTEIN seine Lichtquanten-Hypothese und ordnete ihnen eine Energie W und einen Impuls p gemäß

$$W = h\nu \quad \text{und} \quad p = \frac{h}{\lambda} \quad (1-1)$$

zu. Die Konstante h heißt PLANCKSches Wirkungsquantum oder PLANCKSche Konstante und besitzt den (Tabellen)-Wert $h = 6,6261 \cdot 10^{-34} \text{ Js}^2$.

Im Abschnitt 2 dieser Anleitung werden Sie sehen, dass diese Hypothese der Schlüssel zum Verständnis des oben erwähnten (äußeren) photoelektrischen Effekts ist.

Durch EINSTEINS Ideen wurde dem Licht eine korpuskulare Struktur zugeordnet und die NEWTONschen Vorstellungen von der korpuskularen Natur des Lichts neu belebt. Andererseits sind aber die Interferenz- und Beugungserscheinungen des Lichts nur im Rahmen einer Wellennatur des Lichtes verständlich.

Licht kann sich also sowohl wie ein Teilchenstrom (Photonenstrom) als auch wie eine Welle verhalten.

1924 veröffentlichte schließlich LOUIS DE BROGLIE (1892-1987) seine Hypothese der Materiewellen. Er ordnete freien Teilchen eine Energie und einen Impuls gemäß (1-1) zu und forderte für alle physikalischen Objekte sowohl Wellen- als auch Teilchenverhalten. Das ist eine bemerkenswerte theoretische Leistung, denn die Beugung von Elektronen (z. B. an einem Nickelkristall) wurde experimentell erst 1927 von C. J. DAVISSON und L. H. GERMER gefunden.

Der generelle Welle-Teilchen-Charakter der physikalischen Objekte führte zur Entwicklung einer vollständig neuen, heute als Quantenmechanik bezeichneten physikalischen Theorie, mit deren Hilfe einschneidende Widersprüche zwischen dem Experiment und den theoretischen Vorstellungen der klassischen Physik am Ende des 19. Jahrhunderts aufgelöst werden konnten.

2 Grundlagen

Der photoelektrische Effekt oder äußere Photoeffekt wurde 1887 von HEINRICH HERTZ entdeckt, 1888 von WILHELM HALLWACHS genauer untersucht und im Jahr 1900 von PHILIPP LENARD (1862-1947) quantitativ beschrieben.

Das Bild 1 zeigt eine evakuierte Glasröhre (Photozelle), die zwei Elektroden (Katode und Anode) enthält.

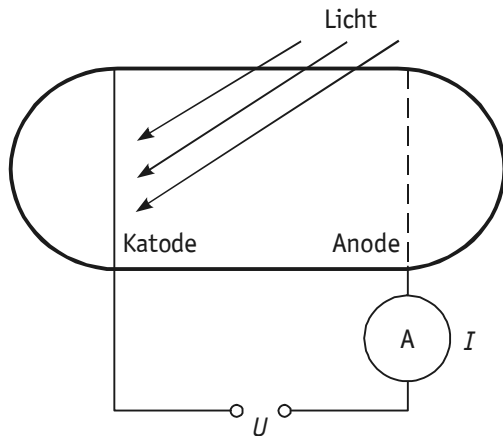


Bild 1 Photozelle

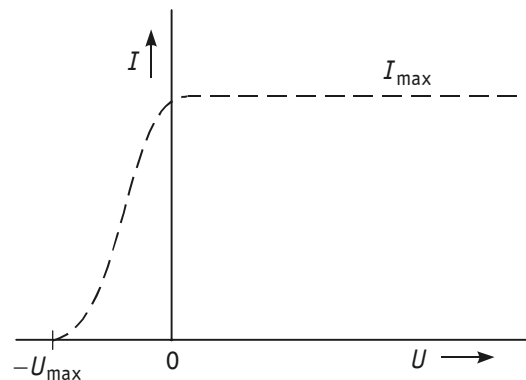


Bild 2 Kennlinie der Photozelle

Auf die linke der beiden über eine einstellbare (nicht dargestellte) Spannungsquelle verbundenen Elektroden fällt monoenergetisches Licht der Frequenz ν . Man beobachtet die in Bild 2 skizzierte Strom-Spannungs-Kennlinie. Das Licht löst aus der bestrahlten Katode Elektronen heraus, die bei $U > 0$ alle zur Anode gelangen. Der Strom I_{\max} ist proportional zur Lichtleistung. Ist die Anode relativ zur Photokatode auf negativem Potential, so nimmt mit wachsendem $|U|$ der Photostrom ab, weil jetzt nur noch die Elektronen mit einer kinetischen Energie größer oder gleich $e|U|$ zur Anode gelangen. Nur sie können die Bremsspannung $|U|$, also ein abbremssendes elektrisches Feld zwischen den Elektroden, überwinden.

Elektronen, deren kinetische Energie kleiner als $e|U|$ ist, gelangen nicht mehr zur Anode. Die energiereichsten der aus der Photokatode herausgelösten Elektronen hatten nach Bild 2 offenbar gerade die kinetische Energie $e|U_{\max}|$. Eine Änderung der Lichtleistung hat keinen Einfluss auf U_{\max} . Wiederholt man jedoch das Experiment mit monoenergetischem Licht einer anderen Frequenz, so ändert sich der Wert U_{\max} , er hängt also von der Frequenz des einfallenden Lichtes ab und nicht von dessen Leistung. Man beobachtet die lineare Abhängigkeit

$$|U_{\max}| = B\nu + A \quad \text{für} \quad \nu \geq \nu_g \quad (2-1)$$

Die Größen Anstieg B und Absolutglied A in Gl. (2-1) können aus den Messpunkten $(\nu, |U_{\max}|)$ bestimmt werden. Bemerkenswert ist, dass eine gewisse Grenzfrequenz ν_g überschritten werden muss, damit überhaupt Photoelektronen emittiert werden und ein Photostrom beobachtet werden kann.

Nach den Vorstellungen der klassischen Physik müssten die in der Photoelektrode befindlichen Elektronen unter der Einwirkung der auftreffenden Lichtwelle erzwungene Schwingungen ausführen. Fiele die Frequenz der einfallenden Lichtquelle mit der Eigenfrequenz des im Metall gebundenen Elektrons zusammen, so läge Resonanz vor. Das Elektron könnte das Metall verlassen. Seine kinetische Energie wäre proportional zur Intensität des Lichtes und, wie Rechnungen zeigten, käme es zu einer beträchtlichen zeitlichen Verzögerung der Emission. Tatsächlich setzt aber der Photostrom unmittelbar mit dem Lichteinfall auf die Photoelektrode ein, und die maximal auftretende kinetische Energie der Photoelektronen hängt, wie erwähnt, nicht von der Intensität des Lichtes ab, sondern nur von dessen Frequenz.

Betrachtet man aber (monoenergetisches) Licht als einen Strom von Photonen der Energie $h\nu$ je Photon und nimmt an, dass ein im Katodenmaterial gebundenes Elektron ein Photon entweder vollständig oder gar nicht absorbiert, also dessen Energie $h\nu$ übernimmt oder nicht, so muss die Bilanzgleichung

$$\frac{m}{2}v^2 = h\nu - W_a \quad (2-2)$$

gelten. Die kinetische Energie der emittierten Elektronen ist gleich der vom absorbierten Photon übernommenen Energie $h\nu$, vermindert um einen Betrag W_a , die sogenannte Austrittsarbeit. Diese ist erforderlich, um die Energiebarriere zu überwinden, die die Bindung des Elektrons im Metall darstellt.

Gleichung (2-2) heißt die "EINSTEINSche Gleichung" des photoelektrischen Effektes.

Setzt man

$$\frac{m}{2}v^2 = e |U_{\max}| \quad , \quad (2-3)$$

so folgt mit (2-2)

$$e |U_{\max}| = h\nu - W_a \quad . \quad (2-4)$$

Die Division von (2-4) durch die Elementarladung e liefert

$$|U_{\max}| = \frac{h}{e} \nu - \frac{W_a}{e} \quad . \quad (2-5)$$

Diese Gleichung entspricht vollständig dem experimentellen Befund nach Gleichung (2-1). Aus dem Vergleich von (2-5) mit (2-1) findet man

$$B = \frac{h}{e} \quad \text{und} \quad A = -\frac{W_a}{e} \quad . \quad (2-6)$$

Der Wert von W_a hängt vom speziellen Material der Photoelektrode ab (z. B. 4,3 eV für Cu, 1,8 eV für Cs).

3 Versuchsanordnung

Im Versuch dient eine Quecksilberdampf Lampe zusammen mit einem Satz von Metallinterferenzfiltern zur Herstellung (näherungsweise) monoenergetischen Lichtes bekannter Frequenz ν . Mit Hilfe einer Öffnungsblende wird die Lichtleistung so eingestellt, dass der Strommesser (Gleichstrommessverstärker) einen geeigneten Photostrom anzeigt.

Die Elektroden (Anode und Katode) der Photozelle sind über Schaltschnüre mit dem Schaltbrett nach Bild 3 verbunden. Die Spannungsquelle für die Bereitstellung einer einstellbaren Bremsspannung, das Voltmeter V für die Messung der Bremsspannung U (wie $|U_{\max}|$ der Kürze wegen fortan heißen soll) und der Strommesser A für den Photostrom sind in das Schaltbrett integriert.

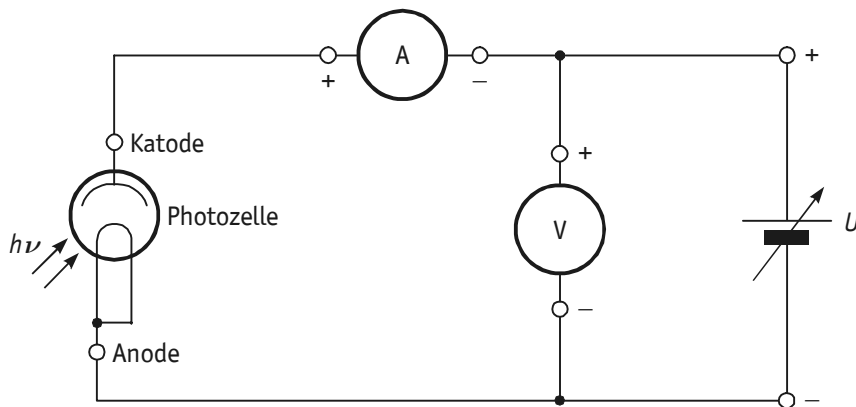


Bild 3 Schaltung zur Messung der Bremsspannung

4 Aufgaben

In diesem Abschnitt werden die zu bearbeitenden Aufgaben nur grundsätzlich aufgeführt. Genauere Hinweise zur Versuchsdurchführung befinden sich am Arbeitsplatz.

- 4.1 Es ist die Bremsspannung U für verschiedene monoenergetische Bestrahlungen der Photozelle zu bestimmen.
- 4.2 Durch die Messpunkte (ν_k, U_k) ist mittels Ausgleichsrechnung [1] eine Gerade zu legen.
- 4.3 Aus den mit der Auswertung nach 4.2 erhaltenen Werten für Anstieg B und Absolutglied A der Geraden bestimmen Sie das PLANCKsche Wirkungsquantum h und die Austrittsarbeit W_a . Benutzen Sie dazu die Elementarladung $e = (1,60218 \pm 0,00003) 10^{-19} \text{ As}$.
- 4.4 Zeichnen Sie die Ausgleichsgerade $U=f(\nu)$ und tragen Sie dazu die Messpunkte ein. Lesen Sie die Grenzfrequenz ab und bestimmen Sie die zugehörige Grenzwellenlänge.

5 Fragen

- 5.1 Skizzieren Sie den Versuchsaufbau (Schaltung mit Photozelle, regelbarer Spannungsquelle, Strom- und Spannungsmesser).
- 5.2 Wozu wird die Austrittsarbeit benötigt?
- 5.3 Wie berechnet man die Energie eines Lichtquants?
- 5.4 Wodurch unterscheiden sich äußerer und innerer photoelektrischer Effekt hinsichtlich der Elektronenbewegungen?
- 5.5 Drücken Sie die kinetische Energie eines Photoelektrons mit Hilfe seiner Bremsspannung aus.
- 5.6 Formulieren Sie die Energiebilanz des äußeren Photoeffektes.
- 5.7 Wieviel Js sind 1 eV (Elektronenvolt)?
- 5.8 Welche Bedeutung hat die Grenzwellenlänge des Photoeffektes und wovon hängt sie ab?
- 5.9 Eine Ladung q soll gegen die Potentialdifferenz U verschoben werden. Welche Verschiebungsarbeit ist zu leisten?
- 5.10 Skizzieren Sie die Bremsspannung als Funktion der Frequenz und erläutern Sie die Bestimmung von h und W_a aus dem Funktionsverlauf.

Literatur

- [1] Geschke, D. (Hrsg.) : Physikalisches Praktikum
 Teubner-Verlag, Leipzig, 2001
 ISBN 3-519-10206-4
- [2] Hering, E. u. a. : Physik für Ingenieure
 Springer-Verlag, Berlin, 2004
 ISBN 3-540-21036-9