

5 Einführung in die Atomphysik

5.1 Grundlegende Elemente der Quantenphysik

5.1.1 Lichtelektrischer Effekt

Nach dem ersten wissenschaftlichen Streit über die Natur des Lichts zwischen den Anhängern einer Korpuskeltheorie (Newton, Descartes) und den Verfechtern einer Wellentheorie (Huygens, Fresnel) galt die Wellennatur des Lichts zu Ende des vergangenen Jahrhunderts als gesichert, besonders als die elektromagnetischen Wellen 1887/88 von Heinrich Hertz entdeckt wurden. Praktisch gleichzeitig aber ergaben Versuche von Hertz und Hallwachs (1887), dass manche Erscheinungen nur zu verstehen waren, wenn dem Licht Korpuskelcharakter zugeschrieben wurde.

Grunderscheinungen

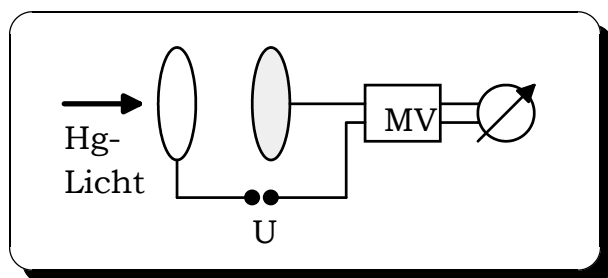
Versuch: Eine frisch geschmirgelte Zinkplatte wird mit dem Licht einer Quecksilberdampfampe bestrahlt. Dieses Licht hat einen hohen UV-Anteil (großer Frequenz bzw. kurzer Wellenlänge).

Ergebnis: War die Platte vorher negativ geladen, so geht der Ausschlag beim Belichten schnell zurück. Eine positive Ladung bleibt dagegen bestehen.

Erklärung: Man könnte vermuten, dass das Licht die Luft vor der Platte ionisiert. Dann müsste sich aber die Platte bei beliebiger vorheriger Aufladung entladen, wie ein einfacher Versuch (Ionisierung der Luft durch Entzünden eines Streichholzes) zeigt. Offenbar vermag das Licht der Lampe Elektronen aus der Zinkplatte auszulösen.

Treffen die aus der Zinkplatte ausgelösten Elektronen auf eine Auffängerelektrode, so sollte sich in einem zwischen die Elektroden geschalteten empfindlichen Strommesser ein Fotostrom nachweisen lassen.

Versuch:



Vor die Zinkplatte wird eine Spiralelektrode gestellt. Beide Elektroden

werden mit den Polen einer Hochspannungsquelle verbunden; in den Stromkreis ist außerdem ein stromempfindlicher Messverstärker mit angeschlossenem Messgerät geschaltet. Dann wird die Spannung variiert, die Polarität geändert und eine Glasplatte zwischen Lampe und Elektroden gehalten.

Ergebnisse:

1. Es fließt auch ohne Anlegen einer Spannung ein (geringer) Fotostrom, der u. a. von der Entfernung zwischen den beiden Elektroden abhängt.
2. Der Fotostrom hängt in gewissen Grenzen von der angelegten Spannung ab; eine kleine Gegenspannung bringt den Fotostrom sofort zum Erliegen.
3. Eine Glasplatte zwischen Lampe und Elektroden, die den UV-Anteil des Lichts der Quecksilberdampfampe zurückhält, lässt den Fotostrom ebenfalls sofort zum Erliegen kommen.

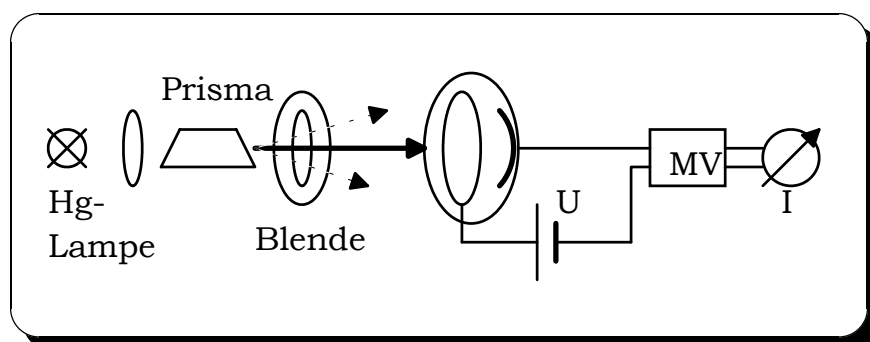
Vorläufige Zusammenfassung: Genügend kurzwelliges Licht vermag aus geeigneten Materialien schwach gebundene Elektronen auszulösen.

Qualitative Untersuchungen mit der Fotozelle

Der Fotostrom wird entscheidend durch die Dicke der Luftschicht zwischen den Elektroden geschwächt; dies ist an der hohen Spannung zu erkennen, die anzulegen ist.

Für die folgenden Versuche wird deshalb eine sog. Fotozelle verwendet. Sie besteht aus einem evakuierten Glaskolben, in den ein Draht als Auffänger für Elektronen eingeschmolzen ist, die von der an der rückwärtigen Innenseite aufgedampften Alkalimetallschicht ausgelöst werden.

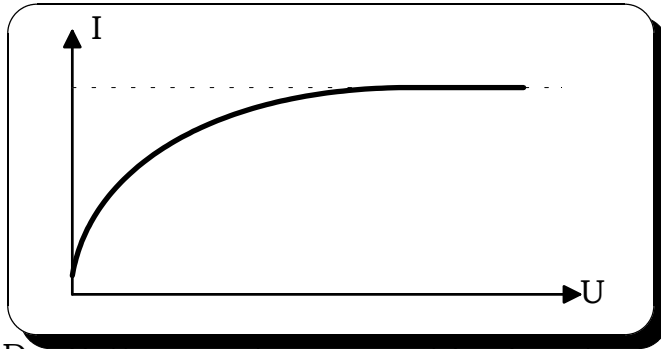
Versuch:



Die Fotozelle wird mit dem Licht der Quecksilberdampfampe beleuchtet. Zwischen Kathode und Anode liegt die Spannung U , der Fotostrom wird mit einem empfindlichen Strommesser gemessen. Mit einer geeigneten Optik (Linsen, Geradsichtprisma) lässt sich das Licht spektral auffächern, so dass auch monochromatisches Licht auf die Kathode gelangen kann. Der Lichteinfall kann mit einer Irisblende geregelt werden. Es wird jeweils ein Parameter variiert, um die Abhängigkeit des Fotostroms von diesem Parameter zu untersuchen.

Ergebnisse und Erklärungen:

1. Die U-I-Kennlinie zeigt ein klares Sättigungsverhalten (vgl. Skizze).



2. Der Sättigungsstrom nimmt bei konstanter Saugspannung beim Öffnen der Blende ebenfalls zu.
Ohne Beweis: Der Fotostrom ist der einfallenden Lichtintensität in weiten Grenzen direkt proportional.
3. Nach dem Umpolen der Spannung müssen die ausgelösten Elektronen gegen ein elektrisches Gegenfeld anlaufen. Bei einer bestimmten Spannung verschwindet der Fotostrom. Dies kann so gedeutet werden, dass die Energie $\frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$ der schnellsten Elektronen nicht mehr ausreicht, um die elektrische Arbeit $e \cdot U$ aufzubringen. Es gilt also $\frac{1}{2} \cdot m \cdot v_{\max}^2 = e \cdot U$.
Die zum Verschwinden des Fotostroms nötige Gegenspannung ist also unmittelbar ein Maß für die Energie der ausgelösten Fotoelektronen. Diese Spannung ist von der Frequenz des einfallenden Lichts abhängig; die Abhängigkeit wird im nächsten Kapitel genauer untersucht; qualitativ erkennt man, dass die Gegenspannung mit zunehmender Frequenz des eingestrahlt Lichts ebenfalls zunimmt.
4. Verändert man bei der Spannung, die den Fotostrom gerade verschwinden lässt, die Öffnung der Irisblende, so bleibt der Strom Null. Dies lässt darauf schließen, dass bei konstanter Frequenz der einfallenden Strahlung die kinetische Energie der ausgelösten Elektronen von der Intensität der einfallenden Strahlung nicht abhängt.
5. Der Fotostrom setzt bei verschiedenen Intensitäten sofort ein.
6. Der Fotostrom ist nur bis zu einer langwelligen Grenze der einfallenden Strahlung möglich.

Die bisherigen Ergebnisse beim lichtelektrischen Effekt können dann so zusammengefasst werden:

1. Der Sättigungsstrom ist proportional der einfallenden Lichtintensität.
2. Der lichtelektrische Effekt setzt im Rahmen der bisherigen Messgenauigkeit trägheitslos ein. (Lawrence, Beams, 1927).
3. Die Geschwindigkeit der Fotoelektronen ist unabhängig von der Intensität des einfallenden Lichts (Lenard).
4. Die Geschwindigkeit der Fotoelektronen nimmt der Frequenz des eingestrahlt Lichts zu.
5. Es existiert eine langwellige Grenze für den Fotoeffekt.

Versagen der Wellentheorie des Lichts

Die oben aufgeführten experimentellen Resultate (1. - 5.) lassen sich mit dem Wellenbild des Lichts nicht erklären. Dies soll im folgenden qualitativ gezeigt werden (Aus Bergmann-Schaefer, Lehrbuch der Experimentalphysik, Band III, de Gruyter, Berlin 1974, Seite 702 - 703).

Eine nahe liegende Annahme ist die, dass die elektrische Feldstärke E des Lichts auf die Elektronen wirkt und diese zum Mitschwingen anregt. Wenn die erzeugten Schwingungsamplituden groß genug werden, so können die Elektronen aus dem Metall ausgelöst werden. Man muss sich diesen Vorgang so denken, dass das Elektron von der auffallenden Strahlung immer mehr Energie aufnimmt, bis seine Energie schließlich so groß geworden ist, dass es die normalerweise sein Austreten verhindernden Kräfte überwindet und mit einer bestimmten Geschwindigkeit herausfliegt. Es ist dann weiter zu erwarten, dass die nach dem Austritt noch vorhandene kinetische Energie bzw. die Geschwindigkeit des Elektrons um so größer ausfällt, je größer die Intensität des auffallenden Lichtes ist. Weiter sollte man erwarten, dass eine gewisse Zeit vergehen muss, bis das Elektron genügend Energie von der Strahlung aufgenommen hat, dass der Auslöseprozess um so später einsetzt, je schwächer die Strahlung ist. Beides steht im Widerspruch zu den experimentellen Ergebnissen (2., 3.).

Ebenso unverständlich sind Frequenzabhängigkeit der Elektronengeschwindigkeit und Grenzfrequenz. Nach klassischer Vorstellung könnte man eher den umgekehrten Effekt erwarten, dass nämlich das Elektron wegen seiner Trägheit immer weniger Energie aufnimmt.

Die Auffassung, dass die Energie der Elektronen aus der Strahlung stamme, ist also nach der klassischen Theorie unhaltbar, weil ihre Folgerungen dem Experiment widersprechen. Es bleibt die zweite Möglichkeit zu erörtern, dass die Energie der Fotoelektronen aus dem Wärmeinhalt des Metalls stammt, wobei der Strahlung nur eine auslösende Wirkung zukäme. Aber dann ist einerseits ein gesetzmäßiger Zusammenhang mit der Frequenz nicht zu verstehen, und andererseits sollte man eine Erhöhung der Geschwindigkeit erwarten, wenn das Material hoch erhitzt wird. Aber auch dieser Effekt tritt nicht ein. Also scheidet auch diese Möglichkeit der Erklärung des Fotoeffekts aus. Da aber die Energie der Elektronen nur aus der Strahlung oder aus dem Metall stammen kann, ist ein Verständnis der Erscheinungen durch die klassische Wellentheorie unmöglich.

Ein Zahlenbeispiel soll die Unmöglichkeit einer klassischen Erklärung verdeutlichen. Eine Glühlampe von 100 W elektrischer Leistung liefert eine Lichtstärke von etwa 80 cd, d. h. im Abstand von 1 m wird eine Energiestromdichte von rund $700 \frac{\text{erg}}{\text{cm}^2 \cdot \text{s}}$ erzeugt. Dieses Licht soll auf ein lichtelektrisch besonders wirksames Metall, z. B. Na, fallen. Wegen der hohen Reflexion dringt nur 10 % der Lichtintensität in das Metall ein, wo sie innerhalb einer Strecke von etwa $1,5 \cdot 10^{-6}$ cm vollständig absorbiert wird, d. h. in

einem Volumen von 10^{-6} cm^3 an die dort befindlichen freien Elektronen abgegeben wird. Da Na das Atomgewicht 23 und nahezu die Dichte 1 hat, entfallen auf dieses Volumen rund $4 \cdot 10^{16}$ Atome und ebenso viele "freie" Elektronen. Von der absorbierten Energie ist aber nur der Teil wirksam, dessen Wellenlänge unterhalb 543 nm, der langwelligen Grenze für Na, liegt. Das reduziert die für den lichtelektrischen Effekt zur Verfügung stehende Energie auf ein Drittel. Danach empfangt jedes Elektron in der Sekunde eine Energie von $5 \cdot 10^{-16} \text{ erg}$. Dem Haltepotential von 2 Volt entspricht eine maximale kinetische Energie von $2 \text{ eV} = 3,2 \cdot 10^{-12} \text{ erg}$. Zur Aufbringung dieser Energie aus der oben berechneten sekundlichen Energiestrahlung brauchte also jedes Elektron die Zeit von rund $6 \cdot 10^3 \text{ s}$, also nicht ganz zwei Stunden, ein Ergebnis, welches in krassem Widerspruch zum Experiment steht.