

Physik

Chemie · Biologie

Technik



LEYBOLD DIDACTIC GMBH

10/1989

Gebrauchsanweisung
Instruction Sheet
Instrucciones de Servicio

558 79

Kompaktanordnung zur Bestimmung des
Planckschen Wirkungsquantums

Compact Arrangement for Determining
Planck's Constant

Disposición compacta para determina-
ción de h

Bitte Informationen der Gebrauchsanweisung zur Fotozelle zur
 h -Bestimmung (558 77) beachten!

Please observe the information given in the Instruction Sheet for
the photocell for determining h (558 77)!

Observar, por favor, las instrucciones de servicio para la célula
fotoeléctrica para determinar la constante h de Planck (558 77).

Bestimmung des Planckschen Wirkungsquantums mit Hilfe des Foto-Effekts mit der Kompaktanordnung

Beim Foto-Effekt hängt die Energie der ausgelösten Elektronen nur von der Frequenz ν des eingestrahlten Lichtes ab. Mit Hilfe dieser Abhängigkeit wird das Wirkungsquantum h bestimmt.

Durch Bestrahlung mit Licht können Elektronen aus einer Metalloberfläche herausgeschlagen werden (fotoelektrischer Effekt). Dabei hängt ihre Zahl von der Intensität des eingestrahlten Lichtes ab, ihre Energie aber nur von dessen Frequenz ν . Diese Befunde lassen sich deuten, wenn man das Licht als Strom von "Photonen" betrachtet und voraussetzt, daß jedes Fotoelektron von einem einzelnen Photon der Energie $h\nu$ abgelöst wird.

Bezeichnen wir mit A_K die Austrittsarbeit des Elektrons aus der Fotokathode, erhalten wir für seine kinetische Energie die "Einsteinsche Beziehung".

$$\frac{1}{2} m v_0^2 = h\nu - A_K \quad (1)$$

m_0 : Ruhmasse des Elektrons
 A_K : vom Katodenmaterial abhängige Austrittsarbeit.

Die Messungen werden mit einer Alkali-Fotozelle durchgeführt:

Licht fällt durch eine ringförmige Anode (Platindraht) auf eine Kaliumschicht. Die Foto-Elektronen gelangen auf die Anode und werden als Fotostrom I_F gemessen. Läßt man die Elektronen gegen eine negative Anodenspannung U anlaufen, nimmt der Fotostrom ab (Fig. 1).

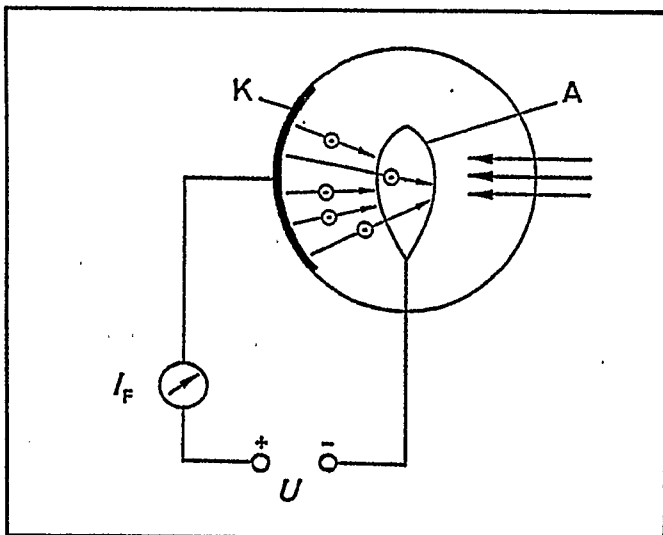


Fig. 1: Anordnung beim Foto-Effekt, schematisch.

Je nachdem, aus welchem Zustand des Leitungsbandes die Elektronen stammen, wie groß ihre Geschwindigkeitskomponente in Richtung des elektrischen Bremsfeldes ist und welche Stoßprozesse sie auf ihrem Weg durchführen, ist ihre kinetische Energie verschieden groß, so daß bei wachsendem U immer weniger Elektronen das Bremspotential überwinden können. Wenn auch die Elektronen von der oberen Kante des Leitungsbandes und mit Austrittsgeschwindigkeiten in Richtung des elektrischen Bremsfeldes nicht mehr bis zur Anode gelangen können, wird $I_F = 0$.

Die hierzu erforderliche Bremsspannung bezeichnen wir mit $U_0(\nu)$.

Nach (1) gilt:

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

A : Austrittsarbeit
(vgl. Hinweis 3 am Ende des Abschnitts)

Erhöht man die Frequenz des eingestrahlten Lichtes um $\Delta\nu$, steigt die Elektronenenergie um $h\Delta\nu$ an, so daß man die Bremsspannung um ΔU_0 erhöhen muß, um den Strom wieder zu null zu machen. Dabei gilt

$$e\Delta U_0 = h\Delta\nu \quad (e = \text{Elementarladung})$$

d.h. der Energiezuwachs $h\Delta\nu$ wird durch den Energieverlust $e\Delta U_0$ gerade kompensiert.

Trägt man die Bremsspannung $U_0(\nu)$ gegen ν auf, erhält man eine Gerade mit der Steigung (vgl. (2)):

$$\frac{\Delta U_0}{\Delta\nu} = \frac{h}{e}$$

Bei bekannter Elementarladung e erhält man

$$h = e \frac{\Delta U_0}{\Delta\nu} \quad (3)$$

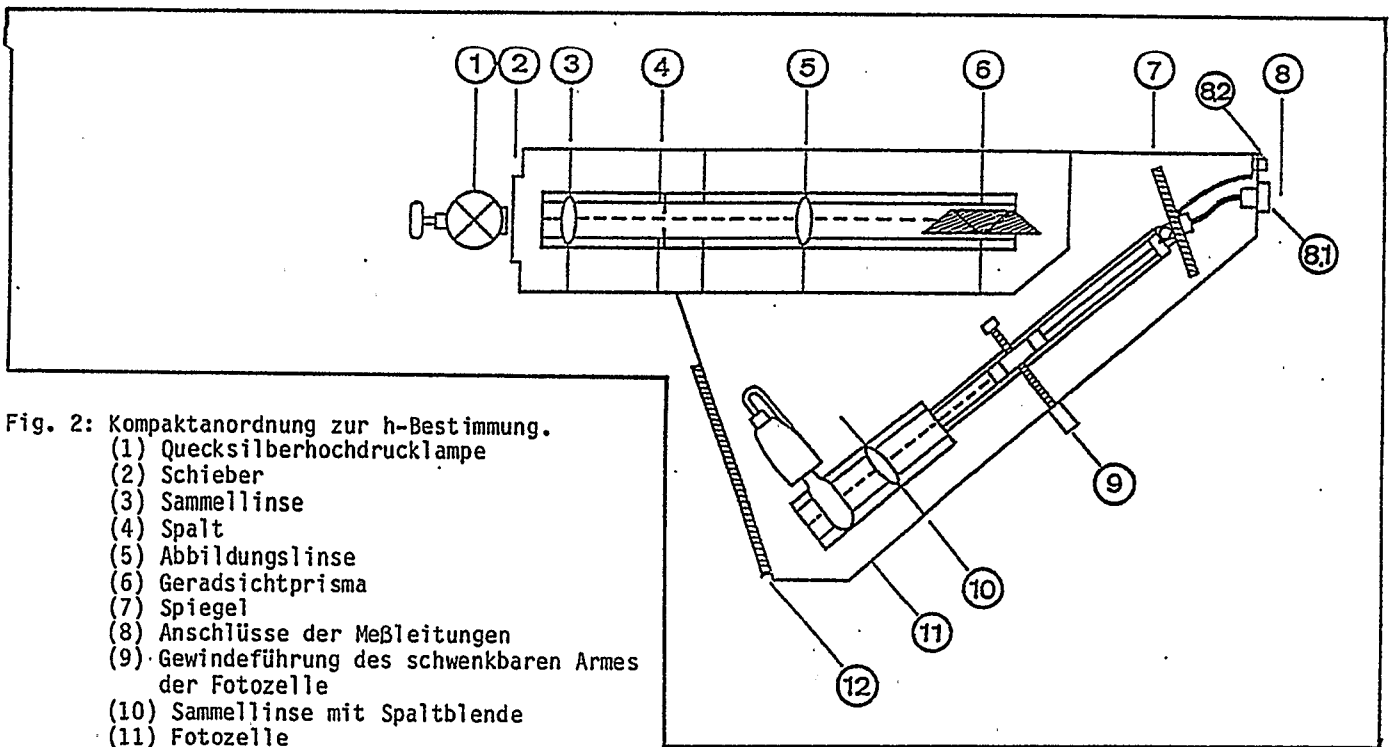


Fig. 2: Kompaktanordnung zur h-Bestimmung.

- (1) Quecksilberhochdrucklampe
- (2) Schieber
- (3) Sammellinse
- (4) Spalt
- (5) Abbildungslinse
- (6) Geradsichtprisma
- (7) Spiegel
- (8) Anschlüsse der Meßleitungen
- (9) Gewindeführung des schwenkbaren Armes der Fotozelle
- (10) Sammellinse mit Spaltblende
- (11) Fotozelle
- (8.1) Anschluß für Meßverstärker
- (8.2) 4-mm-Buchsen
- (12) Fenster und Abblendschieber

Aufbau:

Optische Justierung (Fig. 2):

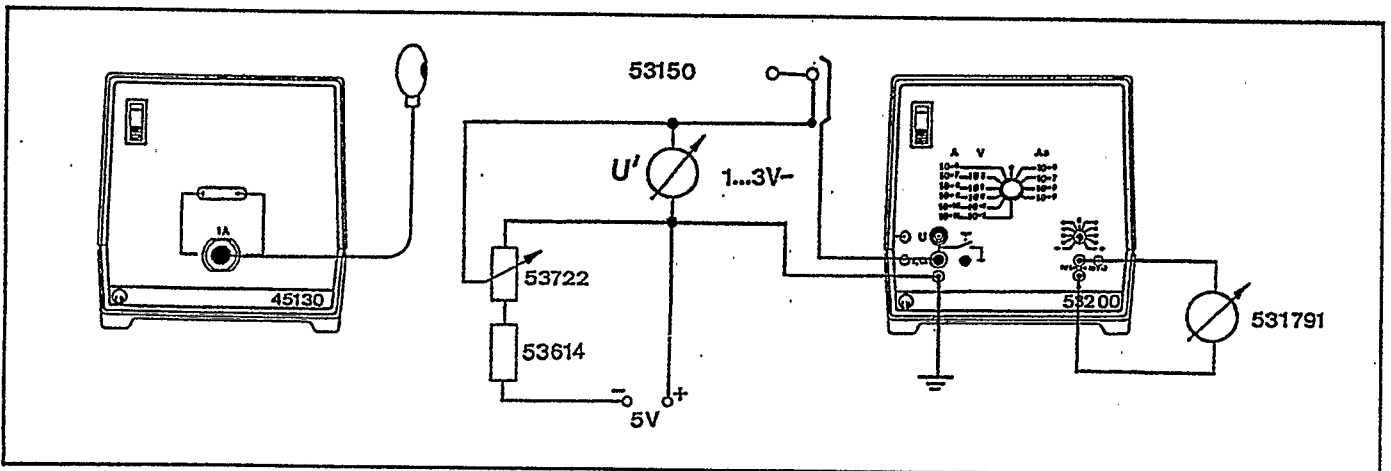
Vorbereitung: Innenseite der Plexiglasplatte des Austrittsfensters (12) von innen mit weißem Papier belegen. Geradsichtprisma (6) und Linse mit Spaltblende (10) aus dem Strahlengang nehmen. Elektrische Verbindungen herstellen (Fig. 3). Hg-Lampe (1) in 5 mm Abstand vor dem Gehäuse der Kompaktanordnung befestigen (Lichteinfall muß durch Schieber (2) verhindert werden können) und anschalten.

- Lichtbogen der Hg-Lampe (1) mit Linse (3) auf Spalt (4) abbilden (Spalt in Haltermitte, Lampe und Linse justieren).
- Spalt mit Linse (5) auf Austrittsfenster abbilden, dazu Linse (5) und evtl. Spiegel (7) justieren.
- Geradsichtprisma (6) so einsetzen, daß am Austrittsfenster die gelbe Hg-Linie innen, die violette außen liegt (auf lichtdichte Befestigung des schwarzen Gummikragens achten).
- Fotozelle in Fassung einschrauben; Linse mit aufgesetzter Spaltblende so in den Strahlengang setzen, daß eine Spektrallinie auf der Fotokathode abgebildet wird.
- Zweiten Schritt der Justierung evtl. wiederholen.

Geräte:

| | |
|--|-------------|
| 1 Kompaktanordnung zur Bestimmung des Wirkungsquantums | 558 79 |
| 1 Quecksilber-Hochdrucklampe | 451 15 |
| 1 Universal-Drossel | 451 30 |
| 1 Fotozelle zur h-Bestimmung | 558 77 |
| 1 Stabilisiertes Netzgerät, > 5 V Gleichspannung, 100 mA | z.B. 522 31 |
| 1 Meßwiderstand 1 kOhm | 536 14 |
| 1 Schiebewiderstand 1 kOhm | 537 22 |
| 1 I-Meßverstärker D | 532 00 |
| 1 Drehspulinstrument P | 531 791 |
| 1 Vielfach-Meßinstrument 1 H-LH | 531 50 |
| 2 Experimentierkabel, blau, 50 cm | 501 26 |
| 4 Experimentierkabel, rot, 50 cm | 501 25 |
| 2 Experimentierkabel, blau, 1 m | 501 31 |
| 1 Experimentierkabel, rot, 1 m | 501 30 |
| 1 Experimentierkabel, schwarz, 1 m | 501 33 |
| 1 Experimentierkabel, blau, 25 cm | 501 21 |

Fig. 3: Elektrische Verbindungen



Durchführung:

Raum teilweise abdunkeln. Die Spaltblende der Linse (10) besitzt einen Markierungsstift, dessen Schatten im Austrittsfenster sichtbar ist.

Bremsspannung U_0 für gelbes Licht ermitteln.

- Dazu Schwenkarm mit Hilfe der Gewindeführung (9) so einstellen, daß der Schatten des Markierungsstiftes auf der gelben Spektrallinie liegt.
- Mit dem Abblendschieber das Austrittsfenster (12) bedecken (falls nicht im völlig verdunkelten Raum gearbeitet wird).
- U' (Spannung an Fotozelle) mit Schiebewiderstand auf 0 stellen, Fotostrom I_0 messen; dann U' solange erhöhen, bis $I' = 0$ wird (Bereich 10^{-11} A), U_0 ablesen.
- Die beschriebenen Punkte für die grüne, türkisfarbene, blaue und violette Linie wiederholen. Wechsel der Spektralfarbe durch Bewegen des Schwenkarmes.

Meßbeispiel:

Frequenzen der Quecksilberlinien nach Tabelle 1.

Tabelle 1

| Farbe | gelb | grün | türkis | blau | violett |
|----------|------|------|--------|------|---------|
| Frequenz | 5,19 | 5,49 | 6,88 | 6,08 | 7,41 |

$10^{14} \cdot s^{-1}$

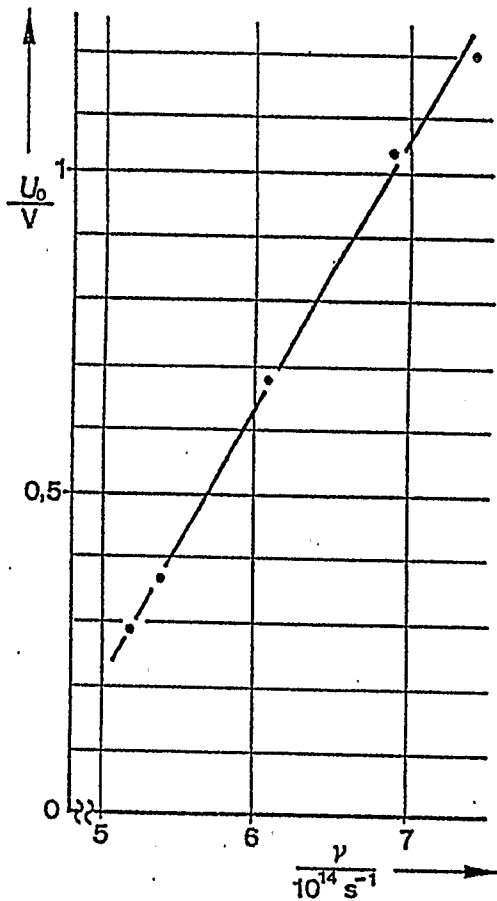


Fig. 4: Frequenz ν als Funktion der Bremsspannung U_0 , für die der Fotostrom I_F null wird.

Auswertung und Ergebnis:

In Fig. 4 ist U_0 gegen ν aufgetragen. Die Frequenzen der verwendeten Hg-Spektrallinien sind aus Tabelle 1 entnommen.

In Fig. 5 ist I_0 , als grobes Maß für die Lichtintensität, gegen ν aufgetragen. Offenbar existiert kein systematischer Zusammenhang. Ein Vergleich mit Fig. 4 zeigt, daß die kinetische Energie der Fotoelektronen nicht von der Intensität des Lichtes, sondern nur von seiner Frequenz abhängt (die Kurve in Fig. 4 steigt linear an, d.h. die Energie der Fotoelektronen steigt linear an, obwohl die Intensität nicht mit der Frequenz steigt).

Aus Fig. 4 ergibt sich eine Geradensteigung

$$\frac{\Delta U_0'}{\Delta \nu} = 4,28 \cdot 10^{-15} \text{ Vs.}$$

Mit $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ A}\cdot\text{s}$ folgt

$$h = 6,86 \cdot 10^{-34} \text{ Js}^2.$$

Die Abweichung vom Literaturwert $h = 6,625 \cdot 10^{-34} \text{ Js}^2$ beträgt für diese Messung und für diese Fotozelle 3,5 %. Größere Abweichungen sind aufgrund der Streuungen bei der Fotozelle möglich.

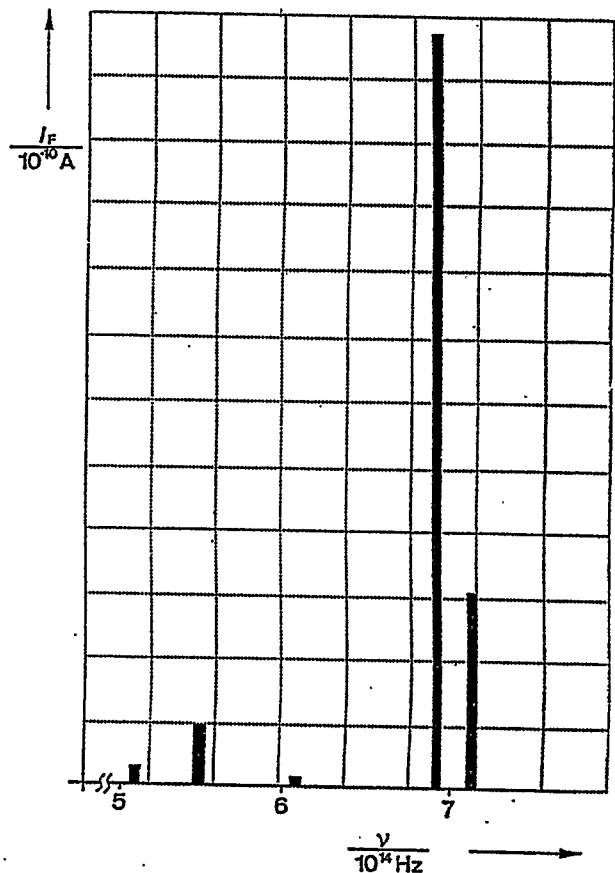


Fig. 5: Fotostrom I_F , als Maß für die Lichtintensität, als Funktion der Frequenz. I_F in willkürlichen Einheiten.

Hinweise:

1. Die Verwendung von Kalium als Katodenmaterial erklärt sich aus der besonders niedrigen Austrittsarbeit (Alkalimetall mit schwach gebundenem Außenelektron).

2. Fehlerquellen:

a) Kaliumbelag auf der Anode. Folge: Bei Belichtung des Anodenringes wirkt dieser als Katode und es fließt ein Fotostrom in der "falschen" Richtung. Insbesondere tritt bei Erhöhung von U' über U_0 hinaus ein starker "Gegenstrom" auf. Abhilfe: Anode vorsichtig ausheizen. Dazu die beiden Anschlüsse des Anodenringes an einen Stelltransformator (z.B. 522 20) anschließen. Im verdunkelten Raum Anodenring beobachten und Heizspannung vorsichtig erhöhen. Sobald der Anodenring zu glühen beginnt, Heizspannung abschalten. Der gesamte Ausheizvorgang sollte nicht länger als 15 Sekunden dauern.

b) Die Fotozelle ist nicht sauber. Folge: Kriechstrom zwischen Anode und Katode, der ebenfalls als Gegenstrom gemessen wird. Abhilfe: Fotozelle mit Alkohol säubern.

c) Die optischen Flächen sind nicht sauber (Staub, Fingerabdrücke). Folge: Streulicht, das bei kleinen Frequenzen zu einem zu hohen U_0 führt. Abhilfe: Optische Oberflächen (besonders Prisma!) reinigen.

Bei sorgfältiger Versuchsdurchführung ist der Meßfehler meist kleiner als 10 %.

3. Entgegen der in vielen Lehrbüchern vertretenen Ansicht ist es prinzipiell unmöglich, die Austrittsarbeit A_K der Fotokatode zu messen. Dies ergibt sich aus folgender Überlegung:

Elektronen in der Katode befinden sich in einem Potentialtopf der Tiefe A_K (Fig. 6), die vom Fermi-niveau ϵ_F an gerechnet wird. Analog befinden sich die Elektronen der Anode in einem Potentialtopf der Tiefe A_A . Verbindet man Katode und Anode leitend miteinander, stellen sich die Fermi-niveaus auf gleiche Höhe ein (Fig. 6).

Legt man zwischen Anode und Katode eine Spannung U an, verschieben sich die Fermi-niveaus um $e \cdot U$ gegeneinander. Elektronen aus der Katode müssen nun die höchste Stelle des entstandenen Potentialgebirges überwinden, um zur Anode zu gelangen; diese ist aber durch $A_A + e \cdot U'$ gegeben.

Der Anodenstrom wird gerade Null, wenn $h\nu = eU_0 + A_A$ ist (Fig. 7).

Die häufig angegebene Gleichung $h\nu = eU_0 + A_K$ geht von der Vorstellung aus, daß die Potentialdifferenz $e \cdot U$ zwischen den Rändern der Potential-Töpfe angelegt wird, statt (wie es korrekt ist) zwischen den Fermi-niveaus.

Die Messung von A_A ist ohne großen Aufwand nicht möglich, da A_A von der Kristallorientierung und Oberflächenbelegung durch Restgasatome sehr stark abhängt.

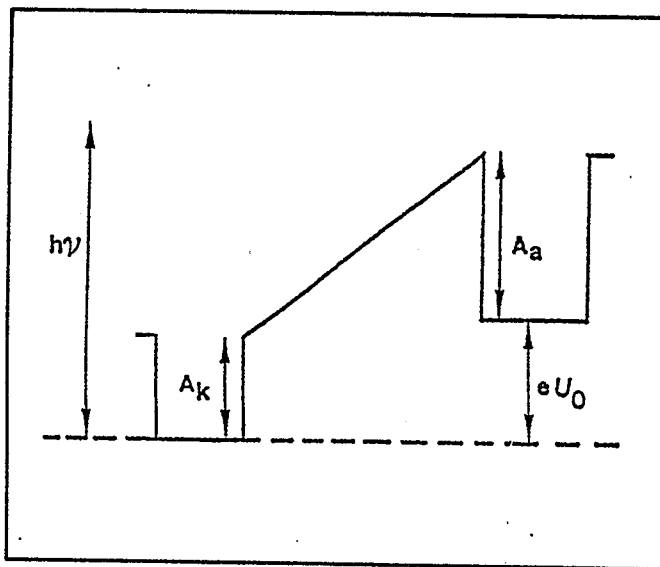


Fig. 7: Energieverhältnisse beim Anlegen einer Bremsspannung.

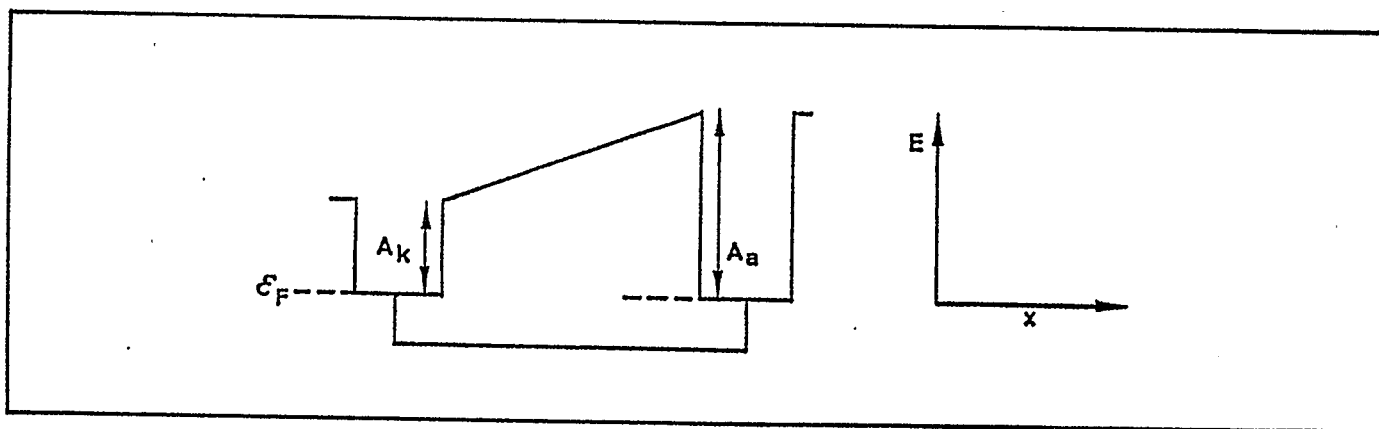


Fig. 6:

- A_K : Austrittsarbeit Katode
- A_A : Austrittsarbeit Anode
- ϵ_F : Fermi-Energie

Determining Planck's constant by means of the photoelectric effect using the compact arrangement

In the case of the photoelectric effect, the energy of the released electrons depends only on the frequency ν of the incident light. The quantum of action h is determined using this functional relationship.

Electrons may be knocked out from a metal surface due to irradiation with light (photoelectric effect). The number of electrons depends on the intensity of the incident light, but their energy, however, only on its frequency ν . This situation may be clarified if light is considered as a stream of "photons" and it is assumed that each photoelectron is released by an individual photon possessing the energy $h\nu$.

If we designate the work function of the electron out of the photocathode as A_C , we obtain the "Einstein relationship" for its kinetic energy.

$$\frac{1}{2} m v_0^2 = h\nu - A_C \quad (1)$$

m_0 : rest mass of the electron

A_C : work function dependent on the cathode material.

The measurements will be carried out using an alkaline photocell:

Light strikes a layer of potassium after passing through a ring-shaped anode (platinum wire). The photoelectrons reach the anode and are measured as photocurrent I_p . The photocurrent decreases if the electrons are allowed to come up against a negative anode voltage U (Fig. 1).

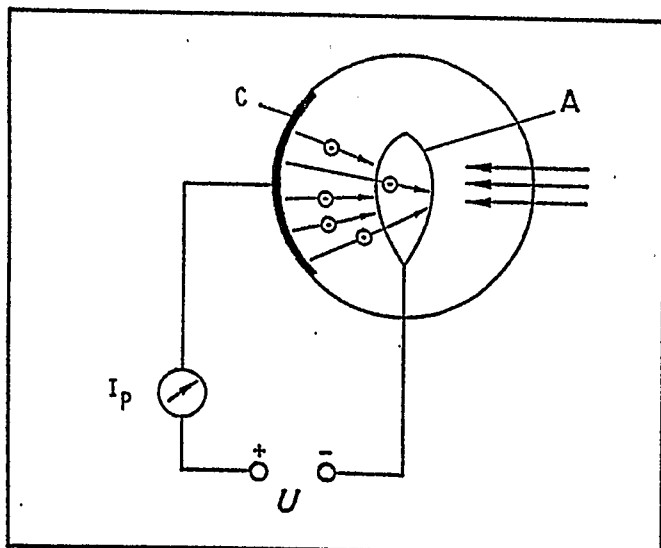


Fig. 1: Setup for the photoelectric effect, schematic.

The kinetic energy of the electrons varies, so that less and less electrons can overcome the retarding potential for increasing U , dependent on the state of the conduction band from which the electrons originate, the magnitude of their velocity component in the direction of the electric retarding field and on the collision processes they carry out on their path. $I_p = 0$

when even the electrons from the upper edge of the conduction band with emission velocities in the direction of the electric retarding field can no longer reach the anode.

The required negative anode potential to achieve this state is designated by $U_0(\nu)$.

In accordance with (1):

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

A : work function

(see note 3 at the end of the section)

If the frequency of the incident light is increased by $\Delta\nu$, the electron energy increases by $h\Delta\nu$, so that the negative anode potential must be increased ΔU_0 in order to bring the current back to zero. Here, the following equation applies

$$e\Delta U_0 = h\Delta\nu \quad (e = \text{elementary charge})$$

i.e. the energy increase $h\Delta\nu$ is just compensated for by the energy loss $e\Delta U_0$.

If negative anode potential $U_0(\nu)$ is plotted against ν , we obtain a straight line with a gradient given by (see (2)):

$$\frac{\Delta U_0}{\Delta\nu} = \frac{h}{e}$$

We obtain the following for a known elementary charge e

$$h = e \frac{\Delta U_0}{\Delta\nu} \quad (3)$$

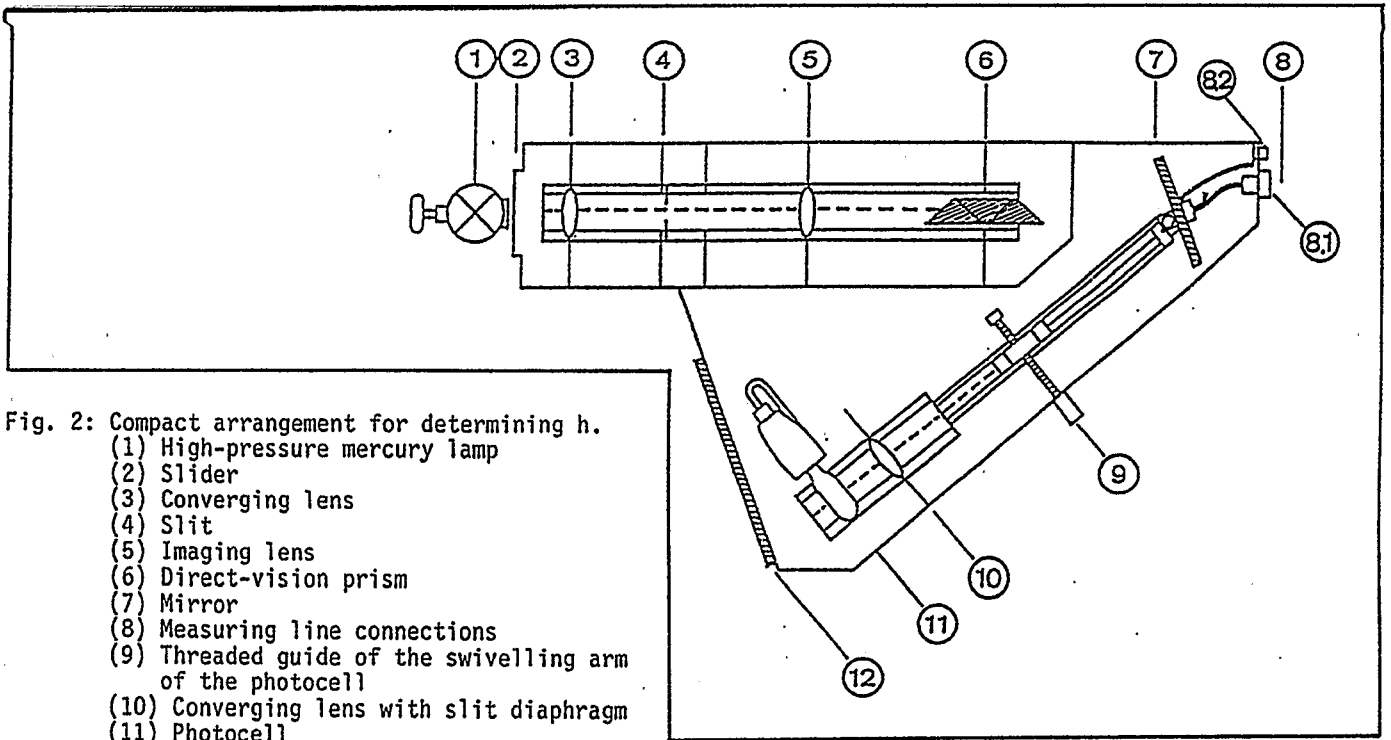


Fig. 2: Compact arrangement for determining h .

- (1) High-pressure mercury lamp
- (2) Slider
- (3) Converging lens
- (4) Slit
- (5) Imaging lens
- (6) Direct-vision prism
- (7) Mirror
- (8) Measuring line connections
- (9) Threaded guide of the swivelling arm of the photocell
- (10) Converging lens with slit diaphragm
- (11) Photocell
- (8.1) Connection for measuring amplifier
- (8.2) 4-mm socket
- (12) Window and dimming slider

Setting up:

Optical adjustment (Fig. 2):

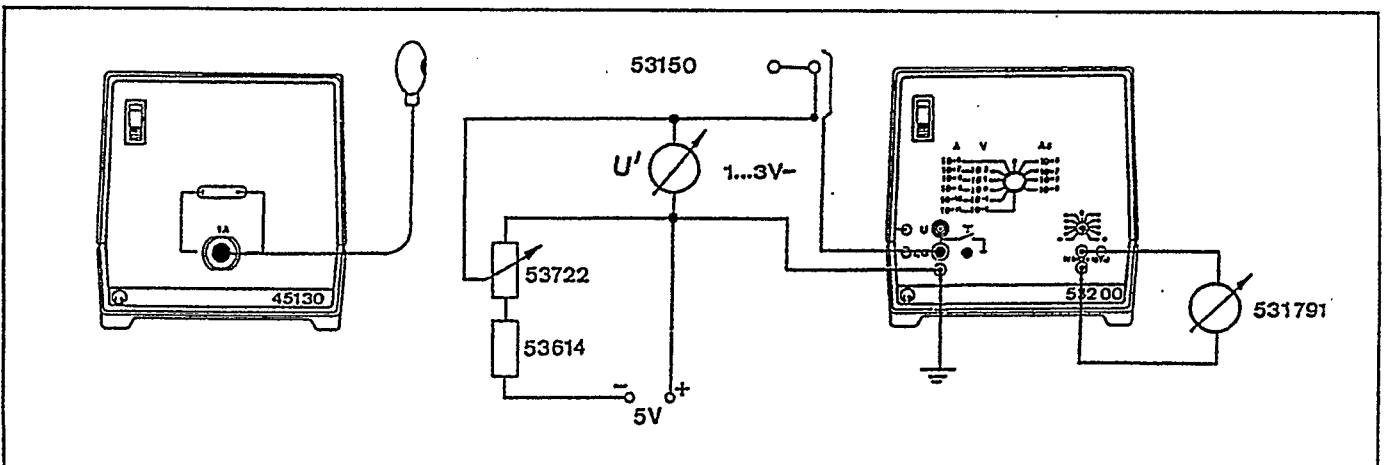
Preparation: cover the inner side of the Plexi-glass plate of the emission window (12) with white paper. Remove the direct-vision prism (6) and the lens with slit diaphragm (10) from the beam path. Make the necessary electrical connections (Fig. 3). Secure the Hg lamp (1) at a distance of 5 mm in front of the compact arrangement housing (light must be prevented from entering by means of slider (2)) and switch on.

- Form an image of the Hg lamp (1) on the slit (4) with the lens (3) (slit in the center of the holder, adjust the lamp and lens).
- From an image of the slit on the emission window with lens (5) by adjusting lens (5) and, if necessary, mirror (7).
- Insert the direct-vision prism (6) so that the Hg line is on the inside at the emission window with the violet line on the outside (ensure that the black rubber collar is fitted in such a way that no light can pass through).
- Screw the photocell into the socket; place the lens with mounted slit diaphragm in the beam path so that the image of a spectral line is formed on the photo cathode.
- If necessary, repeat point 2.

Apparatus:

| | |
|---|-------------|
| 1 compact arrangement for determining Planck's constant | 558 79 |
| 1 high-pressure mercury lamp | 451 15 |
| 1 universal choke | 451 30 |
| 1 photocell for determining h | 558 77 |
| 1 regulated power supply unit, ≥ 5 V DC, 100 mA | e.g. 522 31 |
| 1 measuring resistor 1 k Ω | 536 14 |
| 1 rheostat 1 k Ω | 537 22 |
| 1 I-measuring amplifier D | 532 00 |
| 1 moving coil instrument P | 531 80 |
| 1 multimeter 1 H-LH | 531 50 |
| 2 connecting leads, blue, 50 cm | 501 26 |
| 4 connecting leads, red, 50 cm | 501 25 |
| 2 connecting leads, blue, 1 m | 501 31 |
| 1 connecting lead, red, 1 m | 501 30 |
| 1 connecting lead, black, 1 m | 501 33 |
| 1 connecting lead, blue, 25 cm | 501 21 |

Fig. 3: Electrical connections



Carrying out the experiment:

Partially darken the room. The slit diaphragm of the lens (10) has a marking pin whose shadow is visible on the emission window.

Determine the negative anode potential U_0 for yellow light.

- To do this, adjust the swivelling arm using the threaded guide (9) so that the shadow of the marking pin is on the yellow spectral line.
- Cover the emission window (12) with the dimming slider if you are not working in a completely darkened room.
- Set U' to 0 by means of the rheostat, and measure the photocurrent I_0 ; then, increase U' until $I' = 0$ (range 10^{-11} A). Read off U_0 .
- Repeat points 1.1-1.3 for the green, turquoise, blue and violet lines. Change the spectral colour by moving the swivelling arm.

Measurement example:

Frequencies of the mercury lines in accordance with Table 1.

Table 1

| Color | yellow | green | turquoise | blue | violet |
|-----------|--------|-------|-----------|------|--------|
| Frequency | 5.19 | 5.49 | 6.88 | 6.08 | 7.41 |

$10^{14} \cdot s^{-1}$

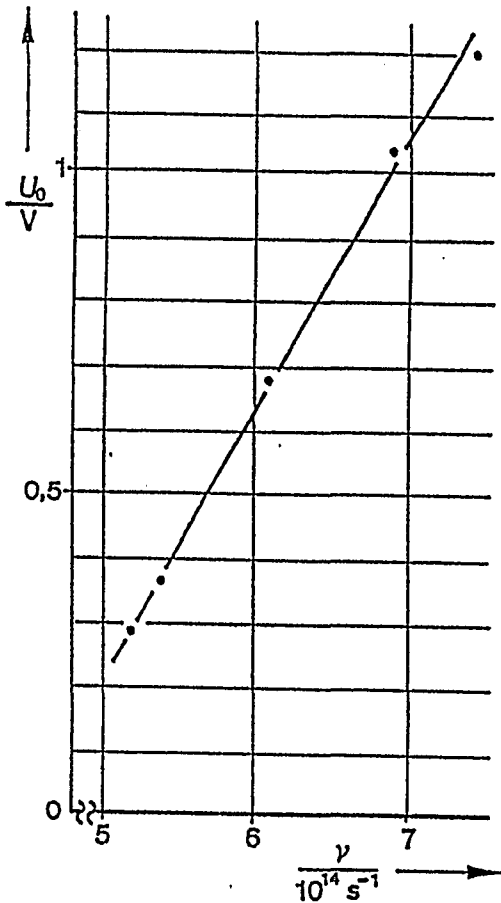


Fig. 4: Frequency ν as a function of negative anode potential U_0 at which the photocurrent I_p becomes 0.

Evaluation and results:

U_0 is plotted against ν in Fig. 4. The frequencies of the Hg spectral lines used are taken from Table 1.

I_0 is plotted against ν as a rough measure of light intensity in Fig. 5. There is clearly no systematic relationship. A comparison with Fig. 4 shows that the kinetic energy of the photoelectrons does not depend on the light intensity, but only on its frequency (the curve in Fig. 4 rises linearly, i.e. the energy of the photoelectrons rises linearly although the intensity does not increase with frequency).

From Fig. 4 we obtain a straight-line gradient

$$\frac{\Delta U_0'}{\Delta \nu} = 4,28 \cdot 10^{-15} \text{ Vs.}$$

With $e = 1.6 \cdot 10^{-19}$ A it follows

$$h = 6,86 \cdot 10^{-34} \text{ Ws}^2.$$

The deviation from the theoretical value, $h =$

$6.625 \cdot 10^{-34} \text{ Ws}^2$, is 3.5 % for this measurement and this photocell. Large deviations are possible due to scattering in the photocell.

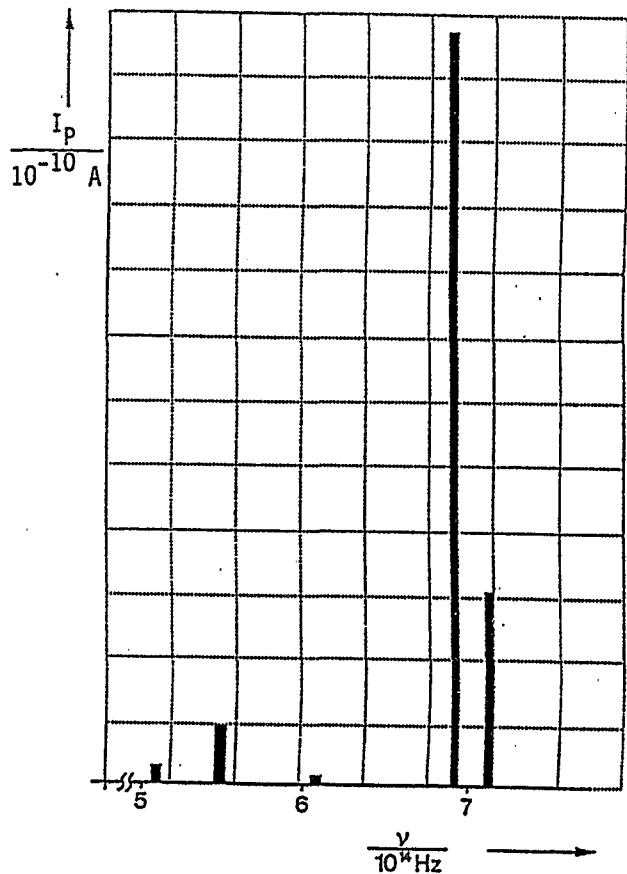


Fig. 5: Photocurrent I_p , as a measure of light intensity, as a function of frequency. I_p in arbitrary units.

Notes:

1. The use of potassium as the cathode material is explained by the particularly low work function (alkaline metal with weakly-linked photoelectron).

2. Sources of error:

a) Potassium coating on the anode. The result of this is that this acts as a cathode when the anode ring is illuminated and a photocurrent flows in the "wrong" direction. In particular, a strong "opposing current" occurs when U' is increased through U_0 . This can be remedied by carefully heating out the anode. To do this, connect both anode ring connections to a variable transformer (e.g. 522 20). In a darkened room observe the anode ring and carefully increase the heating voltage. Switch off the heating voltage as soon as the anode ring begins to glow. The whole heating process should not last longer than 15 seconds.

b) The photocell is not clean. The result is a leakage current between anode and cathode which is also measured as an opposing current. This can be remedied by cleaning the photocell with alcohol.

c) The optical surfaces are not clean (dust, fingerprints). The result of this is stray light leading to an excessively high U_0 at low frequencies. This can be remedied by cleaning the optical surfaces, in particular the prism.

The measurement error is mostly less than 10 % if the experiment is carried out carefully.

3. It is principally impossible to measure the work function A_C of the photocathode, in spite of

the view represented in many text books. This is shown by the following observation:

Electrons in the cathode are in a potential well with a depth of A_C (Fig. 6) the latter being measured from the fermi level ϵ_F . In the same way,

the electrons of the anode are also in a potential well with a depth of A_a . If a conducting connection is created between the cathode and anode, the fermi levels adjust so that they are at the same height (Fig. 6).

If a voltage U is applied between anode and cathode, the fermi levels are displaced by $e \cdot U$ with respect to each other. Electrons from the cathode must now overcome the highest point of the potential "mountain" which has been created in order to reach the anode; however, this is given by $A_a + e \cdot U'$.

The anode current becomes zero when

$$h\nu = eU_0 + A_a$$

(Fig. 7).

The often-quoted equation

$$h\nu = eU_0 + A_C$$

assumes that the potential difference $e \cdot U$ is applied between the edges of the potential wells instead of (as is correct) between the fermi levels.

It is not possible to measure A_a without going to a lot of trouble since A_a greatly depends on the crystal orientation and surface accumulation of residual gas atoms.

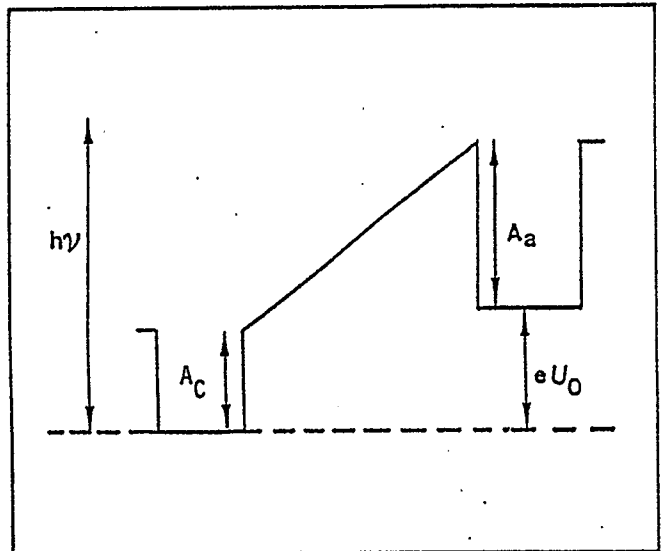


Fig. 7: Energy relationships when a negative anode potential is applied.

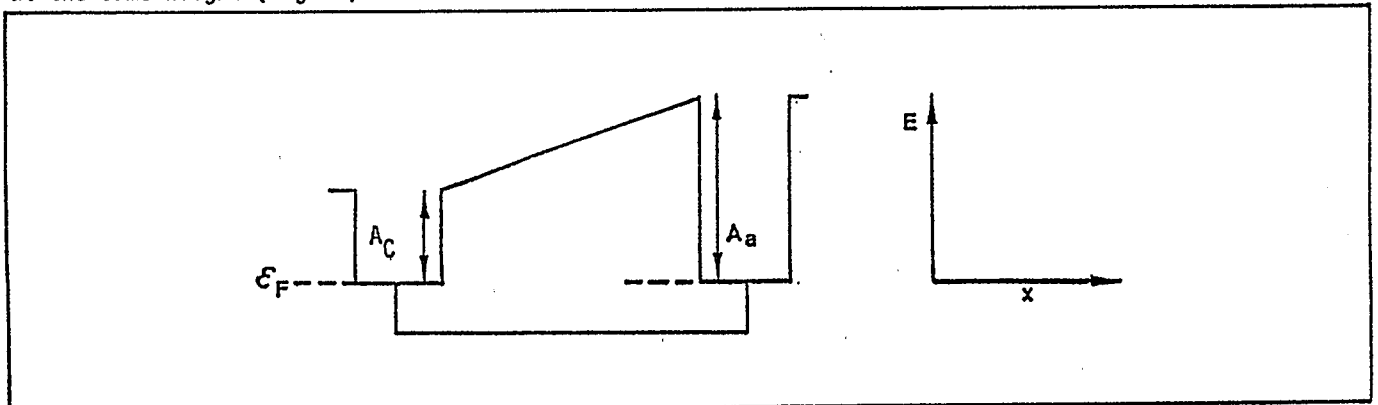


Fig. 6:

- A_C : cathode work function
- A_a : anode work function
- ϵ_F : fermi energy

Determinación de la constante de Planck con ayuda del efecto fotoeléctrico con la disposición compacta.

En el efecto fotoeléctrico la energía de los electrones liberados solo depende de la fre-

cuencia ν de la luz irradiada. Con ayuda de esta dependencia se determina la constante h .

Por irradiación con luz se pueden sacar electrones de una superficie de metal (efecto fotoeléctrico). Su número depende de la intensidad de la luz irradiada, pero su energía de la frecuencia ν . Estos fundamentos tienen significación si se considera la luz como corriente de "fotones" y se dá por supuesto que cada fotoelectrón es liberado por un fotón único de energía $h\nu$.

Si asignamos por A_K la función trabajo para sacar un electrón del fotocátodo, obtenemos para su energía cinética la "relación de Einstein"..

$$\frac{1}{2} m v_0^2 = h\nu - A_K \quad (1)$$

m_0 = masa de reposo del electrón

A_K = la función trabajo dependiente del material catódico

Las mediciones son desarrolladas con una fotocélula de álcali: La luz cae a través de un ánodo en forma de anillo (alambre de platino) sobre una capa de potasio. Los fotoelectrones llegan al ánodo y son medidos como fotocorriente I_F . Si se dejan fluir los electrones contra una tensión anódica U negativa, disminuye la fotocorriente (Fig. 1).

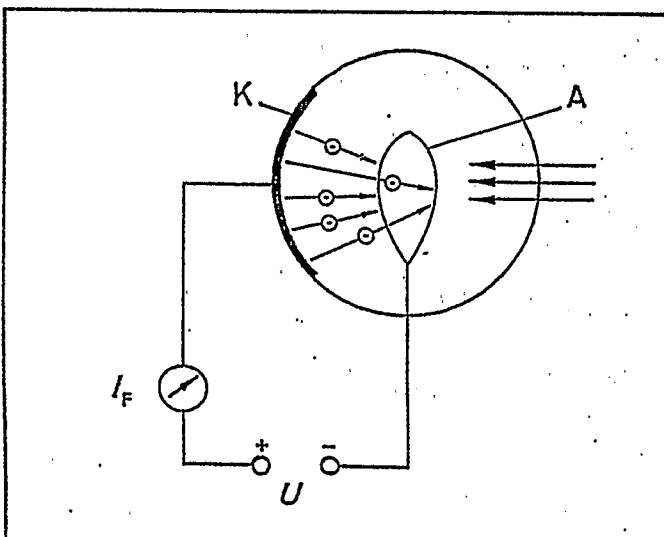


Fig. 1: Disposición en el efecto fotoeléctrico-esquemático.

Según de que estado de la cinta de conducción provengan los electrodos, de que tamaño sea su componente de velocidad en dirección al campo de frenado eléctrico, y cuales procesos de choque se desarrollen en su camino, su energía cinética es de distinto tamaño, de manera que con un U creciente cada vez menos electrones pueden vencer el potencial de frenado. Cuando también los electrones del canto superior de la cinta conductora y con velocidades de salida en dirección al campo de frenado eléctrico no puedan llegar hasta el ánodo, $I_F = 0$.

La tensión de frenado necesaria para ello la designamos con U_0 (V).

Según (1) vale:

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

A: función trabajo (comparar indicación 3 al final del experimento)

Si se aumenta la frecuencia de la luz irradiada en $\Delta\nu$, aumenta la energía electrónica en $h \Delta\nu$, de manera que hay que aumentar la tensión de frenado en ΔU_0 para volver a hacer cero la corriente. Aquí vale

$$e\Delta U_0 = h\Delta\nu \quad (e = \text{carga elemental})$$

es decir, el aumento de energía $h \Delta\nu$ se compensa apenas por la pérdida de energía $e \Delta U_0$.

Si se grafica la tensión de frenado U_0 (V) contra ν , se obtiene una recta con una pendiente (vea (2)):

$$\frac{\Delta U_0}{\Delta\nu} = \frac{h}{e}$$

con carga elemental e conocida se obtiene

$$h = e \frac{\Delta U_0}{\Delta\nu} \quad (3)$$

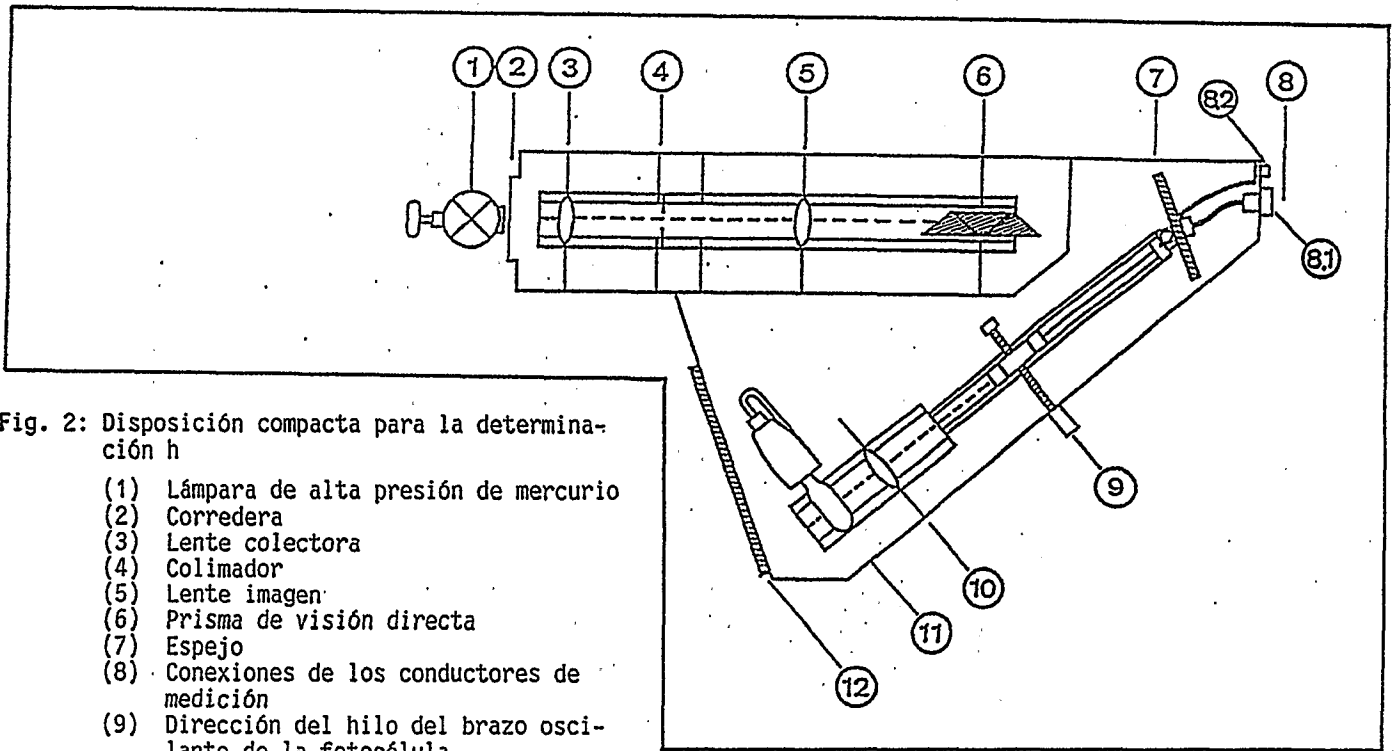


Fig. 2: Disposici3n compacta para la determinaci3n h

- (1) L3mpara de alta presi3n de mercurio
- (2) Corredera
- (3) Lente colectora
- (4) Colimador
- (5) Lente imagen
- (6) Prisma de visi3n directa
- (7) Espejo
- (8) Conexiones de los conductores de medici3n
- (9) Direcci3n del hilo del brazo oscilante de la fotoc3lula
- (10) Lente colector con diafragma de ranura
- (11) Fotoc3lula
- (8.1) Conexi3n para amplificador de medici3n
- (8.2) Casquillos de 4 mm
- (12) Ventana y corredor de diafragma

Montaje

Ajuste 3ptico (Fig. 2):

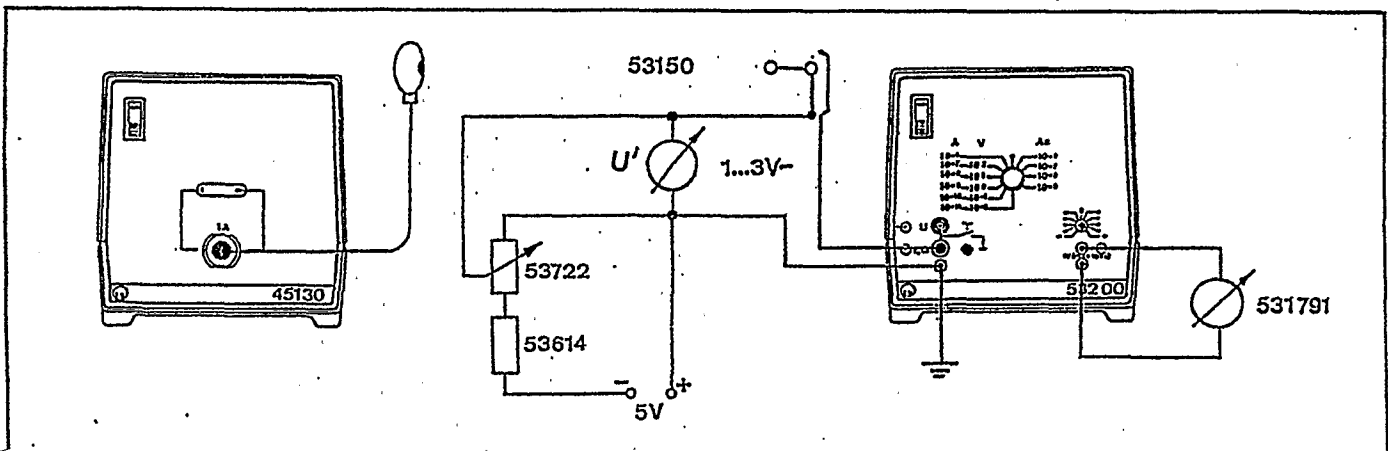
Preparaci3n: Forrar el lado interior de la placa de plexiglas de la ventana de salida (12) por dentro con papel blanco. Sacar el prisma de visi3n directa (6) y la lente con diafragma de ranura (10) del camino de los rayos. Montar las conexiones el3ctricas (Fig. 3). Sujetar la l3mpara de mercurio (1) a una distancia de 5 mm antes de la carcasa de la disposici3n compacta. (entrada de luz debe poder evitarse por corredera (2)) y encender.

- Proyectar el arco de luz de la l3mpara de mercurio (1) con la lente (3) sobre la ranura (4) (ranura en la mitad del sujetador, ajustar l3mpara y lente).
- Proyectar la ranura con la lente (5) sobre la ventana de salida, para ello ajustar lente (5) y eventualmente el espejo (7).
- Colocar el prisma de visi3n directa (6) de tal manera que en la ventana de salida la l3nea de mercurio amarilla est3 por dentro, y la violeta por fuera (fijarse en la fijaci3n a prueba de luz del cuello de goma negro).
- Atornillar la fotoc3lula en la montura; colocar el lente con diafragma de ranura sobrepuesto de tal manera en el camino de los rayos, que se proyecte una l3nea espectral sobre el fotoc3todo.
- Repetir eventualmente el punto 2.

Equipamiento:

| | |
|--|--------|
| 1 Dispositivo compacto para la determinaci3n de la constante h | 558 79 |
| 1 L3mpara de alta presi3n de mercurio | 451 15 |
| 1 Estrangulador universal | 451 30 |
| 1 Fotoc3lula para la determinaci3n de h | 558 77 |
| 1 Aparato de red estabilizada, >5V tensi3n continua, 100 mA por ejemplo | 522 31 |
| 1 Resistencia de medici3n 1 K Ohm | 536 14 |
| 1 Resistencia variable 1 K Ohm | 537 22 |
| 1 Amplificador de medici3n D | 532 00 |
| 1 Instrumento de bobina m3vil P | 531 80 |
| 1 Instrumento de medici3n m3ltiple 1H-LH | 531 50 |
| 2 Cables de experimentaci3n, azul, 50 cm | 501 26 |
| 4 Cables de experimentaci3n, rojo, 50 cm | 501 25 |
| 2 Cables de experimentaci3n, azul, 1 m | 501 31 |
| 1 Cable de experimentaci3n, rojo, 1 m | 501 30 |
| 1 Cable de experimentaci3n, negro, 1 m | 501 33 |
| 1 Cable de experimentaci3n, azul, 25 cm | 501 21 |

Fig. 3: Conexiones el3ctricas



Ejecución:

Oscurecer parcialmente la habitación. El diafragma de ranura del lente (10) posee un pasador de marcación, cuya sombra es visible en la ventana de salida.

Determinar la tensión de frenado U_0 para luz amarilla.

- Para ello ajustar el brazo oscilante con ayuda de la dirección del hilo (9) de manera que la sombra del pasador de marcación esté sobre la línea espectral amarilla.
- Cubrir la ventana de salida (12) con el corredor de diafragma (si no se trabaja en una pieza totalmente oscurecida).
- Poner en 0 U' con la resistencia variable, medir la fotocorriente I' ; después aumentar U' hasta que $I' = 0$ (rango 10^{-11} A), leer U_0 .
- Repetir los puntos antes mencionados para línea verde, color turquesa, azul y violeta. Cambio del color espectral por movimiento del brazo oscilante.

Ejemplo de medición:

Frecuencias de las líneas de mercurio según tabla 1.

Tabla 1

| Color | amarillo | verde | turquesa | azul | violeta |
|------------|------------------------|-------|----------|------|---------|
| Frecuencia | 5,19 | 5,49 | 6,88 | 6,08 | 7,41 |
| | $10^{14} \cdot s^{-1}$ | | | | |

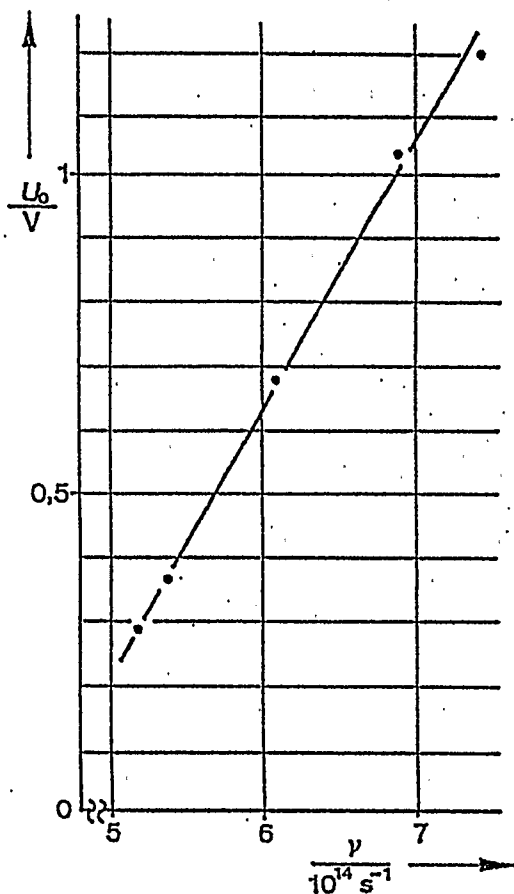


Fig. 4: Frecuencia ν como función de la tensión de frenado U_0 , para la cual la fotocorriente I_F se hace cero.

Evaluación y resultado

En la fig. 4 está graficado U_0 contra ν . Las frecuencias de las líneas espectrales de mercurio utilizadas se obtienen de la tabla 1.

En la figura 5 está graficado I_0 , como medida grosera para la intensidad de luz, contra ν . Apparently no systematic relation exists. A comparison with figure 4 shows that the kinetic energy of the photoelectrons does not depend on the intensity of the light, but only on its frequency (the curve in figure 4 increases linearly, that is, the energy of the photoelectrons increases linearly, although the intensity does not increase with the frequency).

De la figura 4 da una pendiente recta

$$\frac{\Delta U_0}{\Delta \nu} = 4,28 \cdot 10^{-15} \text{ Vs.}$$

Con $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ A}\cdot\text{s}$

$$h = 6,86 \cdot 10^{-34} \text{ W s}^2.$$

La desviación del valor literario $h = 6,625 \cdot 10^{-34} \text{ W s}^2$ es, para esta medición, y para esta fotocélula 3,5%. Mayores desviaciones son posibles a raíz de los esparcimientos en la fotocélula.

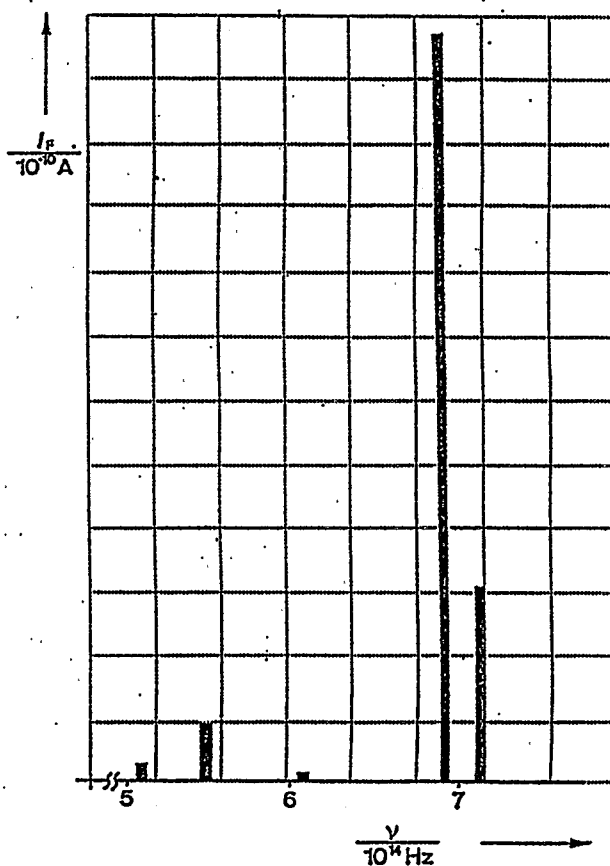


Fig. 5: Fotocorriente I_F como medida para la intensidad de luz, como función de la frecuencia. I_F en unidades arbitrarias.

Indicaciones:

1. La utilización de potasio como material catódico se justifica por la función trabajo es especialmente baja (metal alcalino con electron externo debilmente ligado).
2. Fuentes de error
 - a) Revestimiento de potasio sobre el ánodo: al iluminar el anillo anódico éste actúa como cátodo y fluye una fotocorriente en la dirección "erronea". Especialmente se produce, al aumentar U' más allá de U_0 , una "corriente contraria": fuerte. Ayuda: calentar cuidadosamente el ánodo. Para ello conectar ambas conexiones del anillo anódico a un transformador (por ejemplo 522 20). Observar el anillo anódico en una pieza oscurecida, y aumentar cuidadosamente la tensión de calentamiento. Apenas el anillo anódico comience a estar al rojo, desconectar la tensión de calentamiento. El proceso completo de calentamiento no debería durar más allá de 15 segundos.
 - b) La fotocélula no está limpia. Consecuencia: corriente de fuga entre ánodo y cátodo, la cual es medida como corriente contraria. Ayuda: limpiar la fotocélula con alcohol.
 - c) Las superficies ópticas no están limpias (polvo, huellas digitales). Consecuencia: luz parásita, la que lleva con bajas frecuencias a un U_0 muy alto. Ayuda: limpiar superficies ópticas (especialmente prisma). Con un desarrollo cuidadoso del experimento, el error de medición por lo general es menor que 10%.
3. Contrariamente a la opinión representada en muchos libros de enseñanza, por principio es imposible medir la función trabajo A_K del fotocátodo. Esto se da por el siguiente pensamiento:

Electrones en el cátodo se encuentran en una olla potencial de profundidad A_K (fig. 6), que se calcula a partir del nivel de Fermi \mathcal{E}_F . Análogamente los electrones del ánodo se encuentran en una olla potencial de profundidad A_a . Si se conectan ánodo y cátodo entre sí, los niveles de Fermi se ajustan a la misma altura (fig. 6).

Si se pone una tensión U entre ánodo y cátodo se desplazan los niveles de Fermi en $e \cdot U$ entre sí. Electrones del cátodo deben ahora vencer el lugar más alto de la montaña potencial producida para llegar al ánodo; pero ésta está dada por $A_a + e \cdot U'$.

La corriente anódica se hace cero cuando (Fig. 7).

$$h\nu = eU_0 + A_a$$

La igualdad frecuentemente dada

$$h\nu = eU_0 + A_K$$

Sale de la suposición que la diferencia potencial $e \cdot U$ está conectada entre los bordes de las ollas potenciales, en vez (como es correcto) entre los niveles de Fermi.

La medición de A_a no es posible sin grandes complicaciones, ya que A_a depende muy fuertemente de la orientación del cristal y el revestimiento de la superficie por átomos de gas restantes

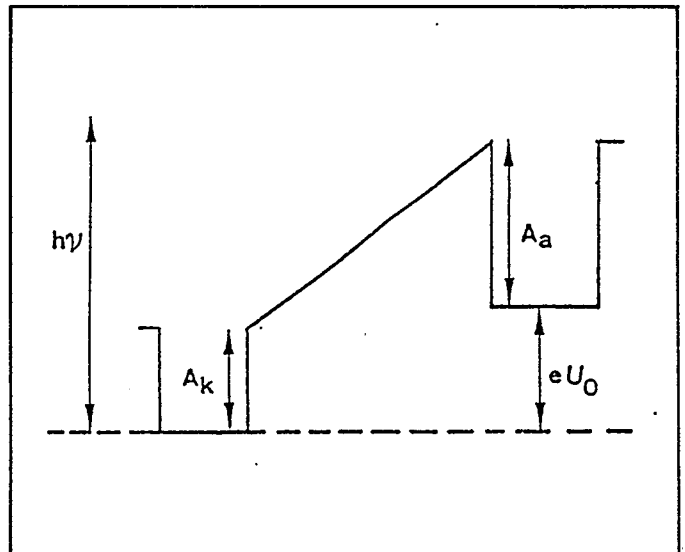


Fig. 7: Comportamientos de la energía al conectar una tensión de frenaje.

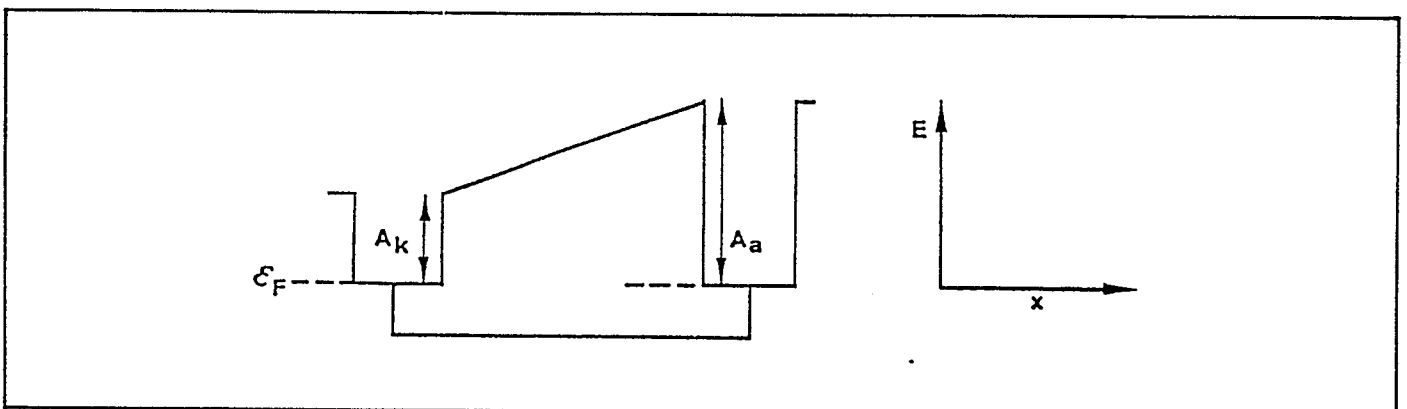


Fig. 6: A_K : función trabajo del cátodo
 A_a : función trabajo del ánodo
 \mathcal{E}_F : energía Fermi