

4.4 Photoeffekt

1 Physikalische Grundlagen

Licht wird gemeinhin durch elektromagnetische Wellen mit Wellenlängen von einigen 100 nm beschrieben. Gemäß dem Welle-Teilchen-Dualismus ist ebenso eine Darstellung durch einen Strom von Teilchen, den Photonen, möglich. Deren Energie ist proportional zur Frequenz der Welle und es gilt:

$$W_{ph} = h \cdot f$$

mit der Planckschen Konstanten h .

Trifft ein Photon auf eine Metalloberfläche kann, es seine Energie vollständig an ein Elektron (i.A. ein Leitungselektron) abgeben. Ist die übertragene Energie größer als die Austrittsarbeit W_A für Elektronen aus dem Metall, so kann das Elektron das Metall mit der kinetischen Energie

$$W_{kin} = \frac{1}{2} m v^2 = hf - W_{A,Kathode} \quad \text{Einstein-Gleichung}$$

verlassen. Der Nachweis dieses Zusammenhangs erfolgt durch die Messung der kinetischen Energie der Photoelektronen.

Photospannung

Der Hauptbestandteil des apparativen Aufbaus ist eine Vakuum-Photozelle mit 2 Metallelektroden. Die Photoelektronen treten aus der vom Licht bestrahlten Kathode aus und bewegen sich mit der Geschwindigkeit v zur gegenüber liegenden Elektrode. Wenn sie die Anode erreichen, bewirkt deren zunehmende Ladung ein elektrisches Gegenfeld zwischen Anode und Kathode, das die Photoelektronen abbremst und die Zunahme der Ladung und damit die elektrische Spannung zwischen den Elektroden begrenzt. Die Spannung U_{ph} im Gleichgewicht ist ein Maß für die maximale kinetische Energie der Photoelektronen.

$$eU_{ph} = \frac{1}{2} m v_{max}^2 = hf - W_{A,Kathode}$$

Die Photospannung U_{ph} wird mit einem Elektrometer gemessen.

Emissionsstrom und Gegenspannung

Der Emissionsstrom der kontinuierlich aus der Kathode herausgeschlagenen Photoelektronen ist in einem äußeren Stromkreis durch Spannungsabfall an einem Ohmschen Widerstand messbar. Das Anlegen einer ausreichend hohen Beschleunigungsspannung zwischen Photokathode (-) und Anode (+) sorgt dafür, dass alle Elektronen die Anode erreichen und als Sättigungsstrom I_{max} nachgewiesen werden. Oberhalb einer durch die Austrittsarbeit der Kathode bestimmten Lichtfrequenz f_{gr} ist der Emissionsstrom direkt proportional zur Intensität des einfallenden Lichtes.

Aufgrund der Geschwindigkeitsverteilung der Photoelektronen fließt auch bei kleinen Gegenspannungen U_G ein Photostrom, da die kinetische Energie der Elektronen ausreicht, das Gegenfeld (Photokathode (+) und Anode (-)) zu überwinden. Erst für $U_G \geq U_{G,max}$ wird der Photostrom gleich Null. Die maximale Gegenspannung $U_{G,max}$ entspricht bis auf eine additive Konstante der maximalen kinetischen Energie der Elektronen.

Da sowohl die Photokathode, als auch die Gegenanode eine Austrittsarbeit für Elektronen haben, entsteht über die Verbindung durch den äußeren Stromkreis eine Kontaktspannung U_{Kontakt} zwischen ihnen.

$$eU_{\text{Kontakt}} = W_{A, \text{Kathode}} - W_{A, \text{Anode}}$$

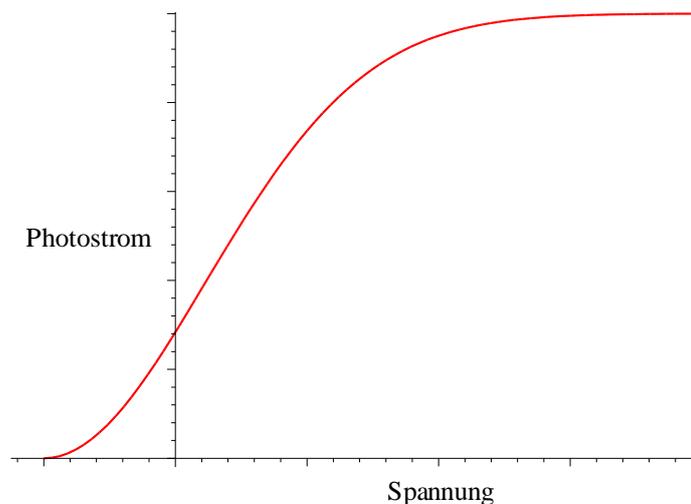
Diese geht in die Energiebilanz ein:

$$\begin{aligned} eU_{G, \text{max}} &= \frac{1}{2} m v_{\text{max}}^2 - eU_{\text{Kontakt}} \\ eU_{G, \text{max}} &= hf - W_{A, \text{Kathode}} - (W_{A, \text{Kathode}} - W_{A, \text{Anode}}) \\ eU_{G, \text{max}} &= hf - W_{A, \text{Anode}} \end{aligned}$$

Die Gegenspannung ist also unabhängig von der Austrittsarbeit der Photokathode.

Beim Anlegen einer Gegenspannung geht der Photostrom I_{Ph} kontinuierlich gegen Null. Die Abnahme erfolgt nicht linear, sondern aufgrund von Materialeigenschaften (Bändermodell) findet man:

$$I_{\text{Ph}} \sim (U_G - U_{G, \text{max}})^2$$



2 Aufgabenstellung

- Es sind die Photospannungen U_{Ph} für 4 verschiedene Lichtwellenlängen zu messen
- Für 4 verschiedene Lichtwellenlängen λ sind die Kennlinien $I_{\text{Ph}}(U)$ zu messen und daraus die Gegenspannung $U_G(\lambda)$ und der Sättigungsstrom zu bestimmen.
- Das Verhältnis $\frac{h}{e}$ und die Austrittsarbeit W_A sind zu bestimmen.
- Die relativen Intensitäten der 4 Lichtwellenlängen der Hg-Lampe sind zu ermitteln.

3 Erforderliche Geräte

- 1 Vakuumphotozelle
- 1 Hg-Lampe mit Vorschaltgerät
- 4 Interferenzfilter:

| | |
|------------------------------|------------------------------|
| $\lambda_1 = 366 \text{ nm}$ | $\lambda_2 = 405 \text{ nm}$ |
| $\lambda_3 = 436 \text{ nm}$ | $\lambda_4 = 546 \text{ nm}$ |
- 1 Elektrometerverstärker
- 1 Netzgerät $-5 \text{ V} \leq U \leq +15 \text{ V}$ mit Spannungsanzeige

4 Versuchsdurchführung

Schalten unmittelbar zu Versuchsbeginn die Hg-Lampe ein, da sie erst nach ca. 10 Minuten konstant leuchtet (wichtig für 4.2).

4.1 Photospannung

Einstellung der Geräte:

- Schalter S_1 am Netzgerät in Position 1
- Schalter S_2 am Elektrometerverstärker auf Spannungsmessung („Electrometer“)
- Verstärkungsfaktor („Amplification“) des Elektrometerverstärkers $V = 1$

Messung:

1. Kontrollieren Sie vor jeder Messung den Nullpunkt durch Drücken der Taste am Elektrometerverstärker und Abgleich mit dem Nullpunktregler.
2. Messen Sie für jede Wellenlänge λ die Photospannung.

Zu Bearbeiten:

Stellen Sie die Ergebnisse $|U_{ph}(f)|$ grafisch dar und bestimmen Sie die Größe h/e und die Austrittsarbeit $W_{A, \text{Kathode}}$

4.2 Photostrom

Einstellung der Geräte:

- Schalter S_1 am Netzgerät in Position 2
- Schalter S_2 am Elektrometerverstärker auf Strommessung („Low Drift“)
- Verstärkungsfaktor („Amplification“) des Elektrometerverstärkers $V = 10^2 - 10^3$

Messung:

Mittels des Potentiometers am Netzgerät lässt sich die Spannung zwischen Photokathode und Anode im Bereich von $-2\text{ V} < U < +15\text{ V}$ variieren. Messen Sie für jede Wellenlänge λ die Kennlinie der Photodiode, speziell:

1. Die Abnahme des Photostromes I_{ph} beim Anlegen einer Gegenspannung in Schritten von 0.1 V .
2. Den Sättigungswert I_{max} beim Anlegen einer Beschleunigungsspannung in Schritten von 0.5 V .

Beachten Sie, dass die Messung des Photostrom nicht direkt, sondern durch den Spannungsabfall an einem $10\text{ k}\Omega$ Widerstand (Innenwiderstand des Elektrometerverstärkers) erfolgt.

Zu Bearbeiten:

1. Stellen Sie die Kennlinien grafisch dar.
2. Bestimmen Sie aus einer linearisierten Auftragung für jede Wellenlänge die maximale Gegenspannung $U_{\text{G, max}}$.
3. Stellen Sie die Ergebnisse $|U_{\text{G}}(f)|$ grafisch dar und bestimmen Sie die Größe h/e und die Austrittsarbeit $W_{\text{A, Anode}}$.
4. Berechnen Sie aus Ihren Ergebnissen die Plancksche Konstante h .
5. Bestimmen Sie aus dem Sättigungsstrom I_{max} das Intensitätsverhältnis der 4 Wellenlängen unter der Annahme, dass jedes Photon ein Photoelektron erzeugt.

5 Literatur

Dobrinski, Krakau, Vogel : Physik für Ingenieure

Stroppe : Physik für Studenten der Natur- und Ingenieurwissenschaften

Kuypers, Hummel, Kempf, Wild : Physik für Ingenieure, Band 2