A 54: Photoeffekt

1. Einführung

Die Beleuchtung einer Metalloberfläche kann zu einer messbaren Elektronenemission führen. Diese Erscheinung wurde zum ersten Mal von H. Hertz (1887) beobachtet und auf der Basis der Quantennatur des Lichtes von A. Einstein (1905) erklärt. Wenn man einen Lichtstrahl als Teilchenfluss (Photonen) betrachtet, von denen jedes Teilchen die Energie $E_{ph} = h\nu$ trägt, dann folgt aus dem Energieerhaltungssatz im Photoionisationsprozess:

$$h\nu - \phi = E_{kin,max}, \qquad (1)$$

d.h. das gemessene Maximum der kinetischen Energie der emittierten Elektronen (Photoelektronen) stellt eine Differenz zwischen der Photonenenergie $E_{ph} = h\nu$ und der Austrittsarbeit ϕ dar. Die maximale kinetische Energie der Photoelektronen hängt also von der Photonenenergie, d.h. von der Wellenlänge des Lichtes λ ab:

$$h\nu = hc/\lambda \qquad (2)$$

Das Ziel des Praktikumversuches ist es, die Austrittsarbeit der vorhandenen Metalloberflächen ϕ und die Plancksche Konstante h zu bestimmen.

2. Schematische Darstellung des Experiments

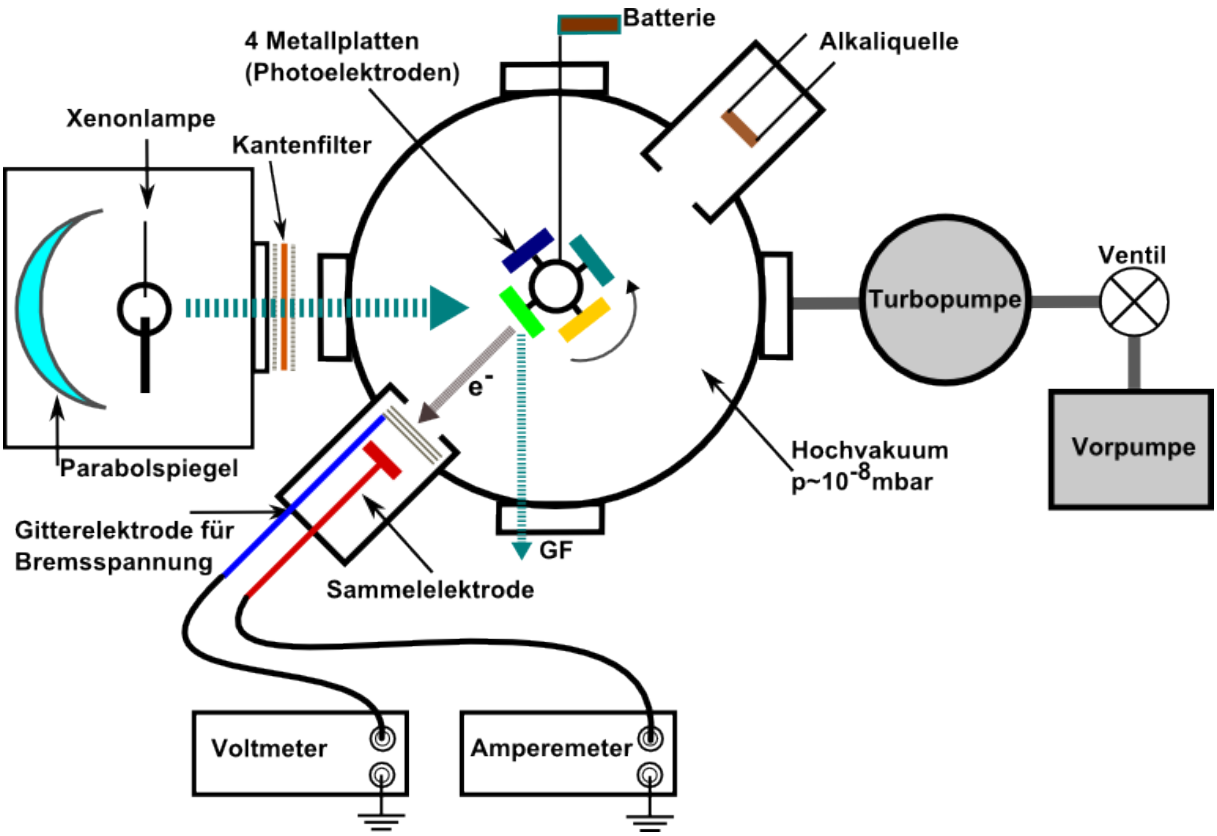

Abb. 1: Schema des Versuches

3. Das Messprinzip

In diesem Experiment wird der Strom *I* der Photoelektronen gemessen, die unter Beleuchtung einer Metallplatte (Photokathode) die Oberfläche verlassen und die Sammelelektrode erreichen. Die Photoelektronen müssen auf ihrem Weg zum Detektor das Feld der Gitterelektrode überwinden. Um die maximale kinetische Energie der Photoelektronen zu bestimmen, erhöht man das bremsende negative Potential des Gitters *U* schrittweise, bis keine Photoelektronen mehr den Detektor erreichen können, d.h. bei $U = U_{max}$ ($I = 0$) gilt dann $E_{kin,max} = eU_{max}$ (e – Elektronenladung). Laut Gleichung (2) hängt die maximale kinetische Energie der Photoelektronen von der gewählten Wellenlänge des Lichtes λ ab. Um bei einer ausgesuchten Metalloberfläche die Austrittsarbeit ϕ zu bestimmen, wird die Messung von $E_{kin.max}$ für mehrere Wellenlängen λ wiederholt und die Abhängigkeit $U_{max}(\nu)$ aufgetragen.

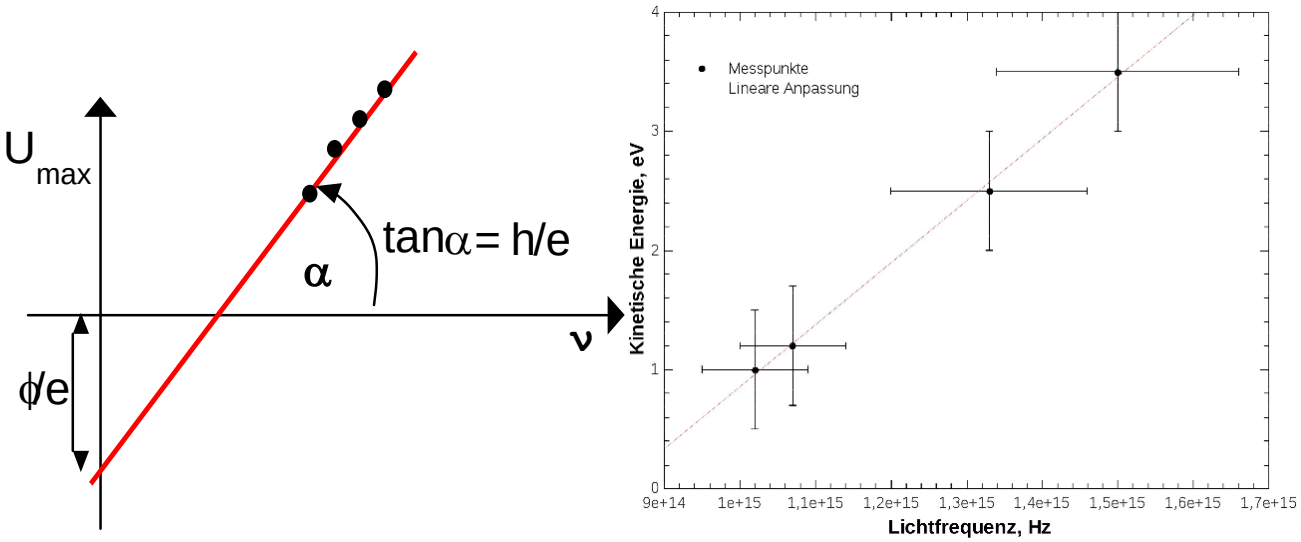

Abb. 2: Auswertungsprinzip mit schematischer Skizze (links) und mit Origin (rechts)

Aus der Steigung der Geraden wird die Plancksche Konstante und aus dem Achsenabschnitt der Geraden mit der U-Achse die Austrittsarbeit berechnet.

4. Durchführung des Experiments

Die Arbeit an diesem Experiment beginnt mit dem Einschalten der Vorvakuumpumpe VP. Nach ca. 20 Minuten wird die Turbomolekularpumpe TP eingeschaltet und nach ca. 2 Minuten soll das Trennventil V geöffnet werden. Damit wird das Vakuum in der Hauptkammer im Bereich 10^{-6} mbar erreicht (Dieser Teil sollte vom Betreuer durchgeführt werden). Vor dem Start des Experimentes ist die Spannung des Batteriepacks U_{Batt} zu messen. Die Messung beginnt, indem man die Spannungsversorgung der Lichtquelle einschaltet und nach ca. 2 Minuten die Entladung an der Xenonlampe zündet (schneller Druck auf die rote Starttaste). Die Lampe emittiert intensives UV-Licht. Der Lichtstrahl muss auf das Zentrum der Photokathode A, die Eichkathode (Kupfer, 330°), geführt werden. Die richtige geometrische Strahlführung erkennt man daran, dass das Licht nach der Reflexion an der

Photokathode im Zentrum des Fensters GF erscheint (der orangene Filter wird im Zentrum beleuchtet).
Die Abhängigkeit von der Wellenlänge λ wird mittels der Kantenfilter gemessen. Ein Kantenfilter blockiert den hochenergetischen Teil des Photonenflusses und definiert damit die minimale Wellenlänge λ^* wie auch die maximale Frequenz der durchgelassenen Lichtwelle (siehe Abb. 3). Die hochenergetischen Photonen ($E^*=h\nu^*$, $\nu^*=c/\lambda^*$) dieser Lichtwelle leisten den größten Beitrag zum Photoeffekt.

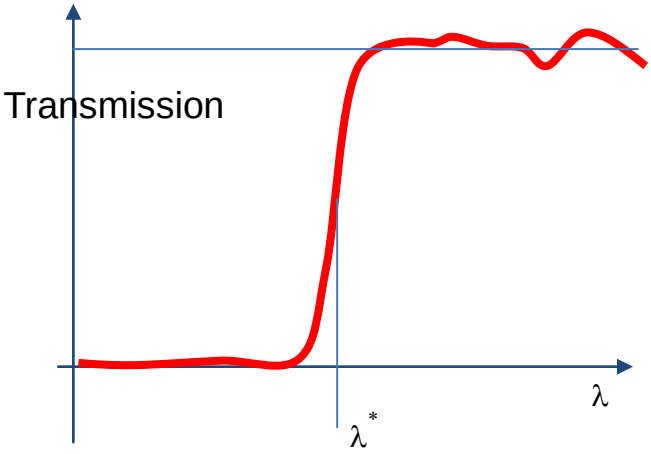

Abb. 3
Typische Charakteristik eines Kantenfilters: Transmission vs Wellenlänge, T(λ).

Die Messung des Stroms der Photoelektronen kann jetzt durch Einschalten des Picoamperemeters beginnen (Messbereich <1μA). Bei einer Wellenlänge λ (der entsprechende Kantenfilter) und einer gewählten Photokathode (A, B, C oder D) wird der Photoelektronenstrom I_e als Funktion der Bremsspannung U_{Brems} gemessen. Jede Messung der $I_e(U_{Brems})$ Funktion wird mit einem Labview-Programm gesteuert. Die Rechnergestützte Ansteuerung befindet sich auf dem Desktop im Ordner „PHOTOEFFEKT A54“. Die Ansteuerung besteht aus zwei Teilen: „Readme“ und „Photoeffekt-Messprogramm“. Im „Readme“ sind die Parameter des Messvorgangs detailliert beschrieben. Im zweiten Schritt soll das „Photoeffekt-Messprogramm“ gestartet werden. Bevor man die automatische Messung der $I_e(U_{Brems})$ Funktion beginnt, ist die optische Anordnung (Lichtstrahl-Photokathode-Detektor) zu optimieren. Die Maximierung des Stroms I_e wird durch die Taste „Adjust Photocathode“ aktiviert. Der Winkel der gewählten Photokathode ist solange zu verstellen, bis das Messgerät der relativen Intensität 100 % anzeigt. Dann kann der maximale Strom vom Picoamperemeter abgelesen werden (ohne Kantenfilter). Die $I_e(U_{Brems})$ Funktion wird mit dem „Photoeffekt-Messprogramm“ gemessen. Zunächst jedoch müssen die aus dem Programm „Readme“ entnommenen Messparameter in die vorgesehene Felder im „Photoeffekt-Messprogramm“ gesetzt werden: die Anfangsspannung U_i=-20 V, die Endspannung U_f=-35 V und die Schrittweite ΔU (von -0.1 bis -0.5 V). Dieses Spannungsfenster ist durch die aktuelle Batteriespannung vordefiniert (U_{batt} ca. -27 V) und kann entsprechend variiert werden. Die Messung wird mit der Taste „Start“ aktiviert. Das Programm erhöht schrittweise die Bremsspannung U_{Brems} mit einer einstellbaren Schrittweite ΔU und die Stromstärke des Picoamperemeters wird dabei automatisch ausgelesen und als Y-Achse logarithmisch aufgetragen (-1*(Stromstärke+Offset)). Das Offset ist festgelegt. Die aufgenommene $I_e(U_{Brems})$ Funktion soll nach dem Stoppen des Messprogramms („Stop“-Taste) in den Ordner „Eigene Dateien“ gespeichert werden (File-Name: Gruppennummer, Winkel, Wellenlänge). Diese Prozedur wird für alle vorhandenen Kantenfilter (λ^*) durchgeführt, um die Austrittsarbeit der Photokathode A zu bestimmen. Diese Serie soll auch für die übrigen 3 Photokathoden B, C und D durchgeführt werden.
Im zweiten Teil des Versuches soll der Einfluss der Deponierung von Alkaliatomen auf die Metalloberfläche der Photokathode B demonstriert werden. Dazu muss die Xenonlampe

ausgeschaltet und die Alkaliquelle an eine Stromquelle angeschlossen werden. Der Heizstrom soll stufenweise, innerhalb von 20 Minuten, auf 6 A erhöht werden und dann ca. 15 Minuten lang bei 6 A stehen bleiben. Dabei werden Alkaliatome auf die Photokathode aufgedampft. Nachdem die Stromversorgung ausgeschaltet wurde, soll die Photokathode ca. 2 Minuten ruhen. Danach wird die Photokathode B durch Drehung vor den UV-Strahl gestellt. Es gilt also, die Messung der beschichteten Photokathode mit allen verfügbaren Filtern durchzuführen. Nach Abschluss der Messung ist zunächst die Lichtquelle samt Netzteil auszuschalten. Anschließend wird das Ventil V geschlossen, bevor zuerst die Turbomolekularpumpe und dann erst die Vorvakuumpumpe ausgeschaltet werden.

5. Auswertung

Zum Auslesen der jeweiligen Bremsspannung werden die Daten wie in Abbildung 3 geplottet. $U_{Brems,max}$ und dessen Unsicherheit werden ausgelesen. Dabei enthält der erhaltene Wert neben U_{max} auch U_{Batt} und einen baubedingeten systematischen Fehler der Anlage ΔU_{Syst}:

$$\frac{E_{kin}}{e} = U_{Brems,max} - U_{Batt} + \Delta U_{syst} \qquad (3)$$

Diese Verschiebung ΔU_{Syst} wird aus einer Messung mit einer bekannten Metallplatte bestimmt und für alle unbekannten Platten einbezogen. Die berechneten U_{max} werden wie in Abbildung 2 mit den zugehörigen Fehlerintervallen über der maximalen Frequenz der einfallenden Photonen aufgetragen und die jeweiligen Austrittsarbeiten daraus berechnet. Dies soll für alle Kathoden inklusive der Bedampften ausgewertet werden. Bei der Bestimmung der Planckschen Konstante h wird der Mittelwert aus allen 4 Experimenten mit entsprechender Fehlerrechnung berechnet.
Der zum Beginn des Experiments gemessene Photostrom soll nun in Abhängigkeit der Anregungsenergie betrachtet werden. Dazu sollen mittels der Funktion

$$I(hv) = a * \exp\left((hv - \varphi)/b\right)$$

die berechneten und gemessenen Werte gefittet werden. Die Parameter der Anpassung und Überlegungen zu deren Relevanz, wie auch die Plancksche Konstante und die 5 Werte der Austrittsarbeiten gehören zu den relevanten Resultaten dieses Versuchs.

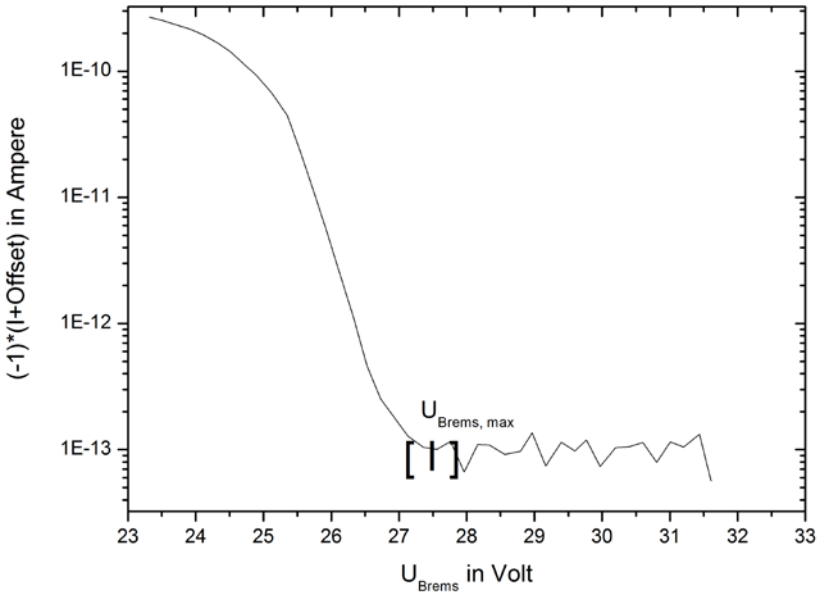

Abb. 4: Beispielmessung mit geschätzter Position von $U_{Brems,\,max}$ als 27,5±0,5V.

Vergleichen Sie die erhaltenen Austrittsarbeiten mit tabellarischen Werten, um das Material der benutzten Photokathoden zu identifizieren.

6. Fehlerrechnung

Bei diesem Versuch ist der Fehler der linearen Regression zu bestimmen. Die Fehler der maximalen Bremsspannung $U_{Brems,\,max}$ werden aus den $I(U_{Brems})$ –Graphen abgeschätzt.
Die kürzeste Wellenlänge λ (steht auf den Kantenfiltern) entspricht 50% Lichtdurchlässigkeit. Die Fehler der Wellenlänge für die Auswertung könnten daher als 20nm angenommen werden.

Die Bestimmung eines Fehlers der linearen Regression $y = ax + b$ mit bekanntem Messfehler und der Konfidenz $K = 1 - \alpha$ wird wie folgt vorgenommen:

1. Die Steigung a und der Achsenabschnitt b werden mit Hilfe von Auswertprogrammen bestimmt.
2. x_a wird aus der Gleichung $\Phi(x_a) = 1 - \frac{\alpha}{4}$ bestimmt, wobei $\Phi(x_a)$ die Standardnormalverteilung darstellt und tabelliert ist. Für die Konfidenz K=0,8 (α=0,2) folgt $x_a \approx 1{,}65$. In diesem Versuch soll die Berechnung mit der Konfidenz 0,95 vorgenommen werden.
3. Die Fehler für die Steigung a und den Achsenabschnitt b werden wie folgt berechnet:

$$\Delta a = \frac{x_a \sigma}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}}, \quad \Delta b = x_a \sigma \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{\bar{x}^2}{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}}$$

Dabei ist σ der bekannte Fehler von y_i.

Tipp: Ältere Originversionen berechnen den Fehler der linearen Regression als:

$$\Delta a_{Origin} = \frac{s}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}}, \quad \Delta b_{Origin} = s \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{\bar{x}^2}{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}}$$

Mit der Abschätzung der Standardabweichung s (wird ebenfalls in Origin angezeigt, wenn bei der Anpassung unter „zu berechnende Eigenschaften“ die Option „Wurzel-MSE“ aktiviert wird)

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-2}\sum_{i=1}^{n}(y_i - ax_i - b)^2}$$

Damit ergibt sich

$$\Delta a = \frac{\Delta a_{Origin}\, x_a\, \sigma}{s}, \quad \Delta b = \frac{\Delta b_{Origin}\, x_a\, \sigma}{s}$$

Mit aktuellen Originversionen lassen sich auch Fehler für einen gewählten Konfidenzbereich direkt anzeigen.

Für die Darstellung des Ergebnisses des Planckschen Wirkungsquantums wird aus den verschiedenen h_i-Werten ein Mittelwert gebildet und die Unsicherheit ist durch den maximalen Fehler Δh_i gegeben.

7. Themen zur Vorbereitung

a) Elektron im periodischen Potential des Festkörpers (Bloch-Funktion)
b) Fermi-Gas der Elektronen, Fermi-Statistik, Zustandsdichte und Fermi-Energie (Sommerfeld-Modell)
c) Definition der Austrittsarbeit und das chemische Potential der Elektronen im Festkörper
d) Beschreibung des Lichtstrahls als elektromagnetische Welle
e) Welle-Teilchen-Dualismus
f) Grundlagen der Photoelektronenspektroskopie

8. Literatur

a) C. Kittel, Einführung in die Festkörperphysik, Oldenburg-Verlag, München, 2013.
b) G. Ertl, J. Küppers, Low energy electrons and surface chemistry, VCH, Weinheim, 1985.
c) H.P. Bonzel, Ch. Kleint: Prog. Surf. Sci., 49, 107 (1995).
d) L. Bergmann et al., Optik, de Gruyter, Berlin, 1987.
e) H. Paul, Photonen, Experimente und ihre Deutung, WTB, Akademie-Verlag, Berlin, 1985.
f) A. Einstein, Ann. Phys., 17, 132 (1905).
g) S. Hüfner, Photoelectron Spectroscopy, Springer-Verlag, Berlin, 1995.
h) M. Henzler, W. Göpel, Oberflächenphysik des Festkörpers, Teubner Studienbücher, Stuttgart, 1994.
i) Skript zur Vorlesung „Physikalische Chemie der Grenzflächen“, A. Böttcher im ILIAS 2017.

9. Zusatzfragen

a) Welche Wechselwirkungen tragen zur Austrittsarbeit eines Festkörpers bei?
b) Was geschieht bei Temperaturerhöhung mit Elektronen im Festkörper und wie kommt es zur Thermoemission aus Metalloberflächen (Richardson-Dushman-Gleichung)?