

# A1 PHOTOEFFEKT

## PHYSIKALISCHE GRUNDLAGEN

**Grundbegriffe: Welle-Teilchen-Dualismus, Photon, Photoelektron, Photozelle, Bändermodell, Austrittsarbeit, Plancksches Wirkungsquantum, Lichtspektrum.**

Im Jahre 1887 beobachtete W. Hallwachs, dass eine isoliert aufgestellte Metallplatte bei Bestrahlung mit kurzwelligem Licht negative Ladungen abgibt und sich dabei positiv auflädt, solange die Lichtfrequenz eine bestimmte Grenze nicht unterschreitet. Von P. Lenard wurde gezeigt, dass es sich bei den negativen Ladungen um Elektronen (die sog. Photoelektronen) handelt. Die Deutung des Photoeffektes, welcher auf der Grundlage der damals anerkannten klassischen elektromagnetischen Lichttheorie nicht erklärt werden konnte, trug wesentlich zur Entstehung der Quantentheorie bei. Deshalb gehört dieser Versuch zu den Grundexperimenten der Physik.

Nach dem klassischen Wellenbild des Lichtes würden die freien Elektronen im Metall durch das elektrische Feld der Lichtwelle beschleunigt und damit zum Mitschwingen angeregt und dabei solange Energie aufnehmen, bis sie die normalerweise das Austreten aus dem Metall verhindernden Kräfte überwinden könnten. Hiernach müsste die nach dem Austritt noch vorhandene kinetische Energie der Elektronen mit wachsender Lichtintensität zunehmen. Auch müsste bei schwacher Strahlung die Auslösung umso später einsetzen, je schwächer die Strahlung ist, da eine gewisse Zeit benötigt wird, bis ein Elektron genügend Energie von der Strahlung aufgenommen hat. Die experimentellen Befunde stehen im Widerspruch zu diesem Wellenbild. Auch können hiermit die beobachtete Zunahme der kinetischen Energie der Photoelektronen mit steigender Lichtfrequenz  $\nu$  sowie die untere Grenzfrequenz für die Auslösung der Elektronen nicht erklärt werden.

Die Erklärung des Problems gab A. Einstein 1905 mit seiner Formel der Energiebilanz des Photoeffektes

$$E_{\text{kin}} = h\nu - W_A \quad (1)$$

auf der Grundlage folgender Annahmen: Das Licht besteht aus einem Strom von einzelnen korpuskularen Lichtquanten (Photonen) mit der Energie  $W = h\nu$  ( $h$ : Plancksches Wirkungsquantum). Diese Energie kann von einem Elektron absorbiert werden. Das Elektron wird ausgelöst, wenn die absorbierte Energie die Bindungsenergie, die sog. Austrittsarbeit  $W_A$ , übersteigt. Den Differenzbetrag behält das Elektron als kinetische Energie  $E_{\text{kin}}$  in Abhängigkeit von der Lichtfrequenz. Unterhalb der Grenzfrequenz  $\nu_{\text{gr}}$  kann das Photon die Austrittsarbeit nicht aufbringen. Jedes Photoelektron erhält seine Energie von je einem Photon, da die Wahrscheinlichkeit für die Absorption von zwei Photonen durch ein Elektron sehr gering ist. Deshalb sind die Anzahl der Photoelektronen proportional zur Lichtintensität und ihre kinetische Energie nur abhängig von der Photonenenergie.

Zum besseren Verständnis des Photoeffektes kann man zunächst die Energieverteilung der Elektronen im Metall anhand des Bändermodells betrachten. Bei Metallen ist das Leitungsband  $L$  auch bei Temperaturen  $T \approx 0$  K teilweise besetzt. Das oberste im Grundzustand ( $T = 0$  K) besetzte Energieniveau des Leitungsbandes heißt Fermi-Niveau. Da die Leitungselektronen im

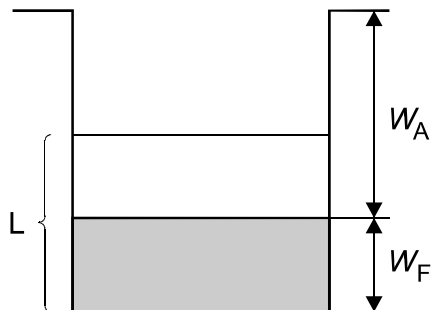


Abb.1 LEITUNGSELEKTRONEN IM POTENTIALTOPF

Metall frei beweglich sind, kann man das Metall vereinfachend durch einen rechteckigen Potentialtopf beschreiben, der bis zum Fermi-Niveau mit Elektronen gefüllt ist (Abb.1).

Wird ein Photon von einem Elektron absorbiert, so kann dieses den Potentialtopf (das Metall) verlassen, wenn mindestens die Austrittsarbeit  $W_A$  übertragen wurde. Da grundsätzlich aus allen besetzten Niveaus Elektronen ausgelöst werden können, besitzen die Photoelektronen eine Energieverteilung, die außer von der Lichtfrequenz auch von der Besetzungswahrscheinlichkeit der Energie-

zustände im Leitungsband abhängt. Bei Zimmertemperatur kann man näherungsweise annehmen, dass die Photoelektronen mit der maximalen kinetischen Energie aus dem Fermi-Niveau stammen, weil nur rel. wenige Elektronen höhere Energieniveaus  $W > W_F$  besetzen. Diese thermische Anregung ist im Wesentlichen auf den Energiebereich  $W - W_F \leq kT$  beschränkt ( $k$ : Boltzmann-Konstante). Bei Zimmertemperatur ist  $kT \approx 25$  meV und damit gegen die Austrittsarbeit vernachlässigbar.

Die Untersuchung des Photoeffektes kann in einer sog. Photozelle erfolgen (Abb.2). In einer evakuierten Kammer befinden sich zwei Elektroden, die zylinderförmige Photokatode  $K$  und die stabförmige Anode  $A$  in der Achse des Kato-

denzylinders. Elektronen, die durch Photonen aus der Katode ausgelöst werden, können zum Teil zur Anode gelangen und als Photostrom  $I_{ph}$  gemessen werden. Die Spannung  $U$  zwischen den Elektroden kann variiert werden. Die Abhängigkeit  $I_{ph} = f(U)$  bezeichnet man als Kennlinie der Photozelle. Legt man eine „Brems-  
spannung“  $U$  zwischen die Elektroden, so können nur solche Elektronen zur Anode gelangen, deren kinetische Energie mindestens  $eU$  ( $e$ : Elementarladung) beträgt. Erhöht man die Brems-  
spannung bis zu einem Wert  $U_0$ , bei welchem der Photostrom gerade verschwindet, so gelangen nur noch die schnellsten Elektronen unmittelbar bis zur Anode. Ihre kinetische Energie (Gl.(1)) hat sich auf dem Weg von der Katode zur Anode vollständig in die potentielle Energie

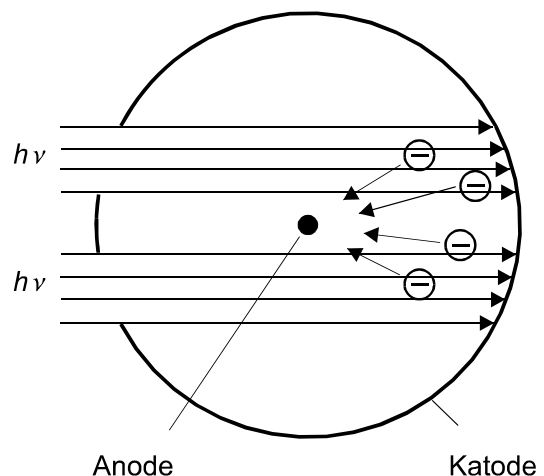


Abb.2 PRINZIP DER PHOTOZELLE

$$eU_0 = h\nu - W_A \quad (2)$$

umgewandelt.

Trägt man die Bremsspannung  $U_0$  als Funktion der Photonenfrequenz  $\nu$  auf, so erhält man eine Gerade, aus deren Anstieg das Plancksche Wirkungsquantum  $h$  berechnet werden kann. Der Achsabschnitt  $W_A/e$  auf der  $U_0$ -Achse liefert jedoch nicht, wie man zunächst denken könnte, die Austrittsarbeit aus der Katode. Das wäre nur der Fall, wenn Anode und Katode aus dem gleichen Material bestehen würden. Aus anwendungstechnischen Gründen verwendet man bei tech-

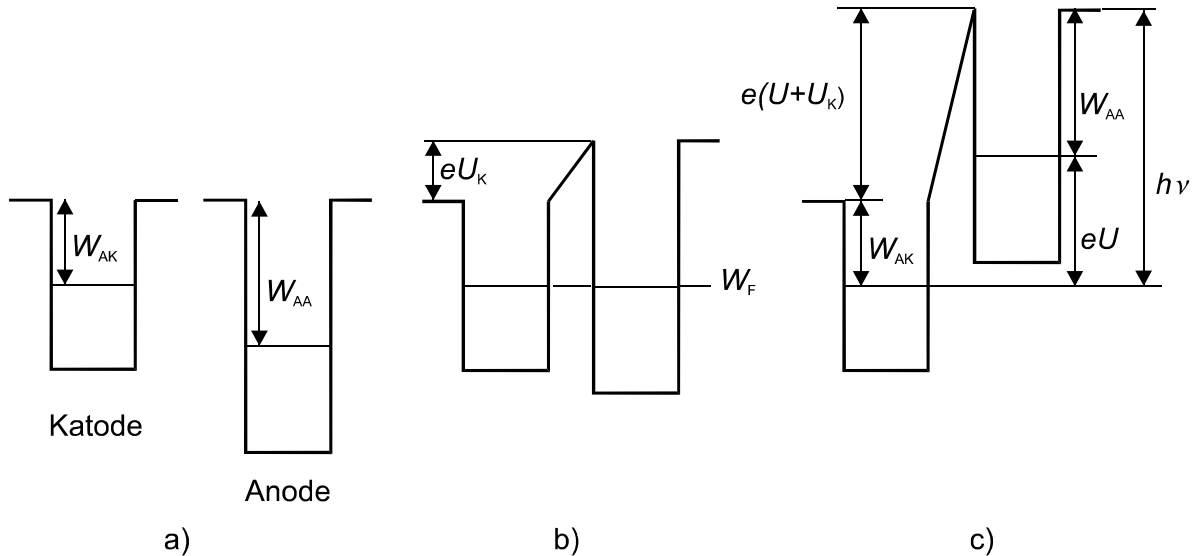


Abb.3 AUSTRITTSARBEIT UND KONTAKTPOTENTIAL

nisch genutzten Photozellen für die Katode ein Material mit möglichst niedriger Austrittsarbeit  $W_{AK}$  und für die Anode mit möglichst hoher Austrittsarbeit  $W_{AA}$ . Folglich besteht zwischen den Elektroden auch ohne äußere Spannung ein so genanntes Kontaktpotential  $U_K$  (siehe Abb.3): Wenn man zwei Metalle mit unterschiedlicher Austrittsarbeit (Abb.3a) miteinander leitend verbindet (Abb.3b), so fließen solange Elektronen vom Metall mit der niedrigeren Austrittsarbeit in das andere, bis die Fermi-Niveaus auf gleicher Höhe liegen. Das erste Metall wird dadurch relativ positiver und zwischen beiden entsteht eine Potentialdifferenz, die Kontaktpotential  $U_K = (W_{AA} - W_{AK})/e$ . Legt man jetzt eine Bremsspannung  $U$  zwischen Katode und Anode (Abb.3c), so beträgt die Gesamtarbeit, die die Elektronen auf dem Weg zur Anode verrichten müssen,  $W_{AK} + e(U + U_K)$ . Deshalb verschwindet der Photostrom, sofern diese Energie von je einem Photon aufgebracht wird, wenn gerade gilt

$$h\nu = W_{AK} + e(U_0 + U_K) \quad \text{bzw.} \quad eU_0 = h\nu - W_{AK} - eU_K = h\nu - W_{AA}.$$

Deshalb könnte die Austrittsarbeit aus der Katode grundsätzlich nur bei Kenntnis des Kontaktpotentials bestimmt werden. Aber hierzu ist der Photoeffekt mit einer gewöhnlichen Photozelle wenig geeignet, da Austrittsarbeiten aus Metallen sehr stark von Oberflächenverunreinigungen (z.B. durch Restgasatome) und von der Kristallorientierung abhängen.

## AUFGABEN

1. Justierung der Messanordnung
2. Messung der Kennlinie  $I_{ph} = f(U)$  einer Photozelle im Bereich der Anodenspannung von -15 V bis +60V für die gelbe (579,1 nm) Spektralfarbe einer Quecksilberhochdrucklampe, grafische Darstellung und Interpretation.
3. Messung der Bremsspannung  $U_0$ , für welche der Photostrom verschwindet, für die Spektralfarben gelb (579,1 nm), grün (546,1 nm), blaugrün (491,6 nm), blau (435,8 nm), violett (404,7 nm) und ultraviolett (365,0 nm).  $U_0$  wird jeweils 6 mal gemessen und daraus die Standardabweichung bestimmt.
4. Grafische Darstellung  $U_0 = f(\nu)$  mit den Messwerten aus Aufgabe 3 und Eintragung von Fehlerbalken an den Messpunkten. Bestimmung des Planckschen Wirkungsquantums  $h$  aus dem Anstieg.
5. Abschätzung der Grenzfrequenz  $\nu_{gr}$  für die Auslösung von Photoelektronen aus der grafischen Darstellung der Aufgabe 4.
6. Messung der Bremsspannung  $U_0$  als Funktion der Lichtintensität für die Farben grün, blau und violett, grafische Darstellung der Ergebnisse und Interpretation.
7. Diskutieren Sie qualitativ mögliche Quellen für systematische Messfehler, ihre Auswirkung auf die Ergebnisse sowie Möglichkeiten zur Unterdrückung.

## VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

Das Prinzip des Versuchsaufbaus zeigt Abb.4 in der Draufsicht. Alle Bauteile sind verschiebbar auf einer optischen Bank angeordnet. Der Kondensator KO dient zur Sammlung des Lichtes aus der Quecksilberhochdrucklampe HgL und gleichmäßigen Ausleuchtung des Spaltes Sp. Mit dem Projektionsobjektiv PO wird der Spalt Sp auf die erste Eintrittsblende EB1 der Photozelle PZ abgebildet. Das dazwischen befindliche Geradsichtprisma GP bewirkt die Auffächerung des Lichtes in die Spektralfarben gelb, grün und blau.

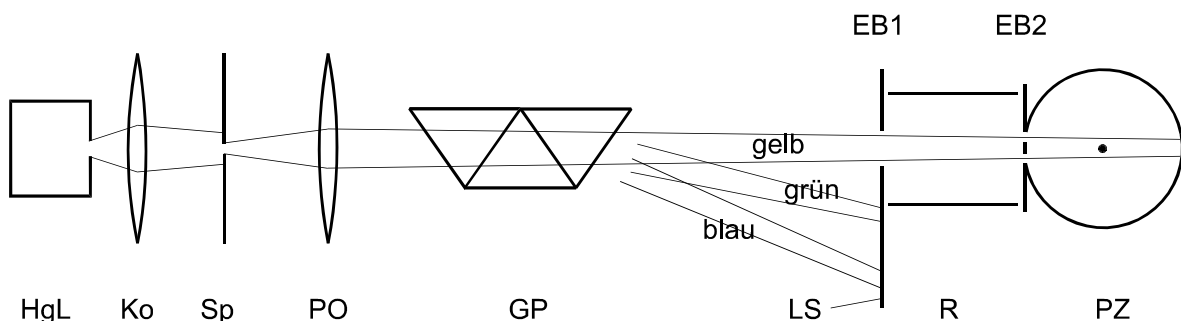
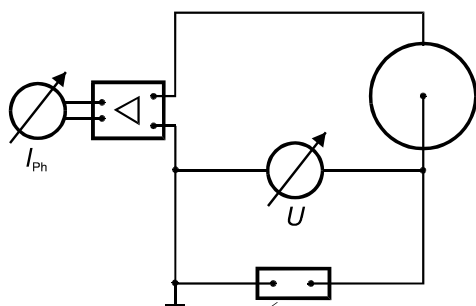


Abb.4 VERSUCHSAUFBAU

Mit dem Projektionsobjektiv PO wird der Spalt Sp auf die erste Eintrittsblende EB1 der Photozelle PZ abgebildet. Das dazwischen befindliche Geradsichtprisma GP bewirkt die Auffächerung des Lichtes in die Spektralfarben gelb, grün und blau.

zung des Lichtes in seine Spektralfarben. Zum getrennten Einfangen der Spektralfarben mit der Eintrittsblende EB1 ist die Photozelle auf einem schwenkbaren Arm montiert. Außerdem kann durch leichtes Verdrehen der Photozelle um ihre senkrechte Achse erreicht werden, dass das Licht auch optimal durch die zweite Eintrittsblende EB2 hindurchtritt. Durch die Anordnung von zwei hintereinander liegenden Blenden mit einem dazwischen liegenden innen geschwärzten Rohr R erreicht man, dass nur rel. wenig störendes Streulicht in die Photozelle gelangt und der Raum nicht völlig abgedunkelt werden muss. Zur Erleichterung der Justierung ist die Eintrittsblende EB1 von einem fluoreszierenden Leuchtschirm LS umgeben, welcher auch eine rel. starke UV-Linie sichtbar werden lässt und somit für die Messung verfügbar macht.



umpolbare Spannungsversorgung:  
Anodenspannung 0 bis -15 V (Bremsspannung)  
Anodenspannung 0 bis +60 V (Saugspannung)

Abb.5 ELEKTRISCHE SCHALTUNG

Die Justierung (Aufgabe 1) ist sehr sorgfältig vorzunehmen und erfordert einige Zeit. Die Justierung ist ausreichend, wenn die Farben auf dem Leuchtschirm LS, welcher die Eintrittsblende EB1 umgibt, soweit getrennt werden, dass sie die Blende ohne Überlagerung passieren können, und der Photostrom für gelbes Licht bei  $U = 0$  wenigstens 5 nA beträgt. Das optimale Einfädeln des Lichtes durch EB1 und EB2 erreicht man iterativ durch abwechselndes Schwenken des Armes und Drehen der Photozelle. Zur guten Beobachtung von EB2 wird das Rohr zwischen den Eintrittsblenden vorübergehend herausgeklappt. Beachten Sie, dass häufiges Ein- und Ausschalten die Lebensdauer der Lampe verkürzt.

Die Kennlinien  $I_{ph} = f(U)$  von Aufgabe 2 werden auf Millimeterpapier grafisch dargestellt. Es wird empfohlen, die Bereiche der positiven und negativen Anodenspannung getrennt mit unterschiedlichem Ordinatenmaßstab darzustellen.

Bei der Bestimmung der Bremsspannungen  $U_0$  (Aufgaben 3 und 6) ist jeweils bis zum empfind-

**Achtung:**

Das Licht der Quecksilber-Hochdrucklampe ist stark UV-haltig. Sehen Sie deshalb niemals in den Strahlengang hinein und schützen Sie Ihre Augen und die anderer Anwesender durch geeignete Abschirmung vor Streulicht.

lichsten Messbereich des Picoamperemeters herunterzuschalten.

Für Aufgabe 4 folgt die Länge der Fehlerbalken aus den in Aufgabe 3 bestimmten Standardabweichungen.

Für Aufgabe 6 wird die Lichtintensität mit Hilfe eines gestuften Graufilters, welcher auf dem Leuchtschirm LS magnetisch haftet, variiert.

Für Aufgabe 7 kann man z.B. überlegen, ob bzw. warum auch eine „entgegengesetzte“ Komponente des Photostroms auftreten kann und ob noch andere Störströme mitgemessen werden könnten.

### FRAGEN

1. Was versteht man unter dem Welle-Teilchen-Dualismus des Lichtes? Welche grundlegenden Experimente stützen die jeweilige Sicht?
2. Welche Anwendungen des äußeren Photoeffektes kennen Sie?
3. Was versteht man unter dem inneren Photoeffekt? Kennen Sie ein Beispiel für seine technische Nutzung?