

Versuch D 4: Lichtelektrischer Effekt

1. Literatur: Bergmann-Schaefer, Lehrbuch der Experimentalphysik, Bd. III: Optik
 Gerthsen-Kneser-Vogel, Physik
 Pohl, Bd. 3: Optik u. Atomphysik

Stichworte: Welle-Teilchen-Dualismus von Licht: Licht als elektromagn. Welle, Feldvektoren, Intensität; Lichtquantenhypothese, Lichtteilchen, Photonenenergie, -impuls, -masse, Plancksche Konstante, Photoeffekt, Photozelle, Potenzialtopfmodell, Austrittsarbeit, Fermi-Energie, Kontaktspannung

2. Grundlagen

2.1 Lichtelektrischer Effekt

Werden Metalle mit Licht bestrahlt, so kann man feststellen, dass sie Elektronen freisetzen. Sind z.B. zwei Metallelektroden, Kathode und Anode, (vorzugsweise) in einem evakuierten Behälter gegenüberstehend angebracht und wird die Kathode mit Licht bestrahlt, emittiert diese Elektronen an die Anode. Sie lädt sich dabei soweit positiv auf, bis eine Grenzspannung U_0 (von einigen Volt) zwischen Anode und Kathode erreicht ist, die infolge des erzeugten Bremsfeldes einen weiteren

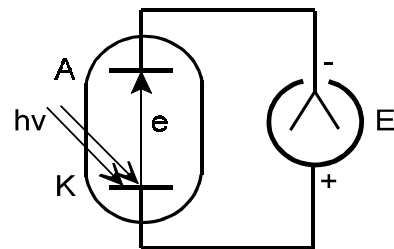


Abb. 1:
 Lichtelektrischer Effekt schematisch:
 K: Photokathode
 A: Anode
 hv: Licht
 e: Photoelektron
 E: Elektrometer

Ladungsfluss verhindert (s. Abb. 1).

Dieser (äußere) *lichtelektrische* oder *Photo-Effekt* wurde bereits durch frühe Versuche von Hertz und Hallwachs (1887) nachgewiesen. Weitergehende Experimente von Lenards (1902) ergaben, dass die Grenzspannung unabhängig von der Intensität des bestrahlenden Lichts ist, d.h. die kinetische Energie der aus

der Kathode abgelösten Elektronen nicht von der Lichtintensität abhängt. Dieses Verhalten lässt sich im Rahmen der klassischen Theorie elektromagnetischer Wellen nicht erklären, da mit steigender Lichtintensität auch das die Elektronen beschleunigende elektrische Feld des Lichts anwächst.

Planck konnte 1900 die *Temperaturstrahlung* eines *schwarzen Körpers* (s. Versuch D8, Temperaturstrahlung) korrekt beschreiben, indem er annahm, dass der Energieaustausch zwischen den in der Materie schwingenden Atomen bzw. Molekülen und dem elektromagnetischen Lichtfeld nicht kontinuierlich sondern in kleinsten der Lichtfrequenz ν proportionalen Energiebeträgen sog. *Energiequanten*

$$E = h\nu \quad (1)$$

erfolgt. Die Proportionalitätskonstante $h = 6,626 \times 10^{-34} \text{ Js}$ ist die Plancksche (Wirkungs)Konstante.

Einstein hatte 1905 die *Lichtquantenhypothese* aufgestellt, welche besagt, dass Licht selbst aus Lichtteilchen, sog. *Photonen* besteht, welche die Energie $E = h\nu$ haben. Den Photoelektronen wird bei der Lichtabsorption die Photonenenergie übertragen, d.h. der Energieaustausch zwischen Licht und Materie findet generell in Lichtquanten der Energie $h\nu$ statt. Diese zunächst durchaus skeptisch betrachtete Hypothese haben genauere Versuche zum Photo-Effekt von Millikan (1914) bestätigt. Er fand insbesondere, dass ein Photostrom - unabhängig von der Intensität des Lichts - nur für Frequenzen oberhalb einer Grenzfrequenz ν_a stattfindet, welche vom Material der Elektroden abhängt.

Diese und andere Experimente, nämlich die Emission von Metallelektroden durch Temperatur (s. Versuch C12: *Kennlinien von Elektronenröhren*) und elektrische Felder (sog. *Feldemission*) stellen klar, dass die Leitungselektronen zur Ablösung aus dem Metall eine materialspezifische Energie, die Austrittsarbeit W benötigen. Im Falle des Photo-Effekts, also der Bestrahlung mit Licht der Frequenz ν beträgt die (maximale) kinetische Energie E_{kin} der freigesetzten Elektronen

$$E_{\text{kin}} = h\nu - W \quad (2)$$

Die Energie E_{kin} der Elektronen geteilt durch die Elementarladung entspricht gerade der eingangs erwähnten Grenzspannung U_0 zwischen Anode und Kathode, also

$$eU_0 = h\nu - W = h(\nu - \nu_a) = h\nu - eU_a \quad (3)$$

Aus Gl. (3) wird zum einen ersichtlich, dass Elektronen für Lichtfrequenzen $\nu < \nu_a$ nicht aus dem Metall austreten können. Zum anderen kann man Gl. (3) umformen, so dass

$$U_0 = \frac{h}{e} \nu - U_a \quad (4)$$

Bestimmt man die Spannung U_0 für verschiedene Lichtfrequenzen ν , erhält man aus der Auftragung $U_0(\nu)$ eine Gerade mit der Steigung h/e und dem Achsenabschnitt $-U_a$. Es lässt sich also aus dem linearen Zusammenhang $U_0(\nu)$ viel einfacher als über die Temperaturstrahlung die Plancksche Konstante h bestimmen.

Die Bestimmung der Planckschen Konstanten aus dem Photoeffekt ist die Aufgabe des vorliegenden Experiments. (Vergl. auch: h -Bestimmung aus der kurzwelligen Kante des Bremsspektrums von Röntgenstrahlen; Versuch B10, Versuch mit Röntgenstrahlen).

Bei der Größe eU_a in Gl. (3) handelt es sich jedoch nicht, wie Gl. (2) vermuten lässt, um die Austrittsarbeit W_K der Kathode sondern um die Austrittsarbeit W_A der Anode, weil sich zwischen Anode und Kathode die sog. *Kontaktspannung* $U_K = (W_A - W_K)/e$ einstellt. Die Energieverhältnisse zwischen den beiden Elektroden werden im Potenzialtopfmodell (Abb. 2) verdeutlicht. (Vergl. auch Versuch C12, Kennlinien von Elektronenröhren).

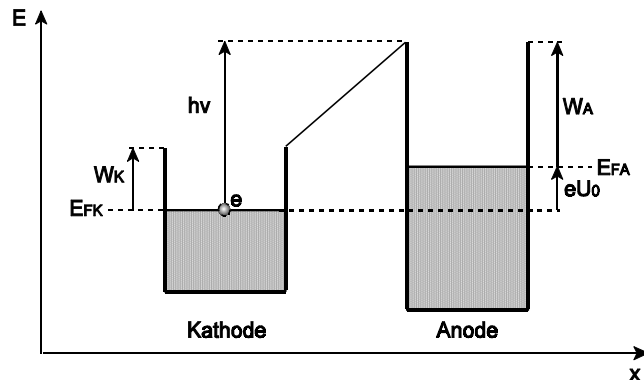


Abb. 2: Potenzialtopfmodell zu den Energieverhältnissen beim lichtelektrischen Effekt: E_{FK} , E_{FA} ; W_K , W_A : Fermi-Energien E_F bzw. Austrittsarbeiten W der Kathode und Anode

Das Potenzialtopfmodell beschreibt die energetischen Verhältnisse der Leitungselektronen in Metallen. Ihre Energiezustände sind für die Temperatur $T = 0$ bis zu einer Maximalenergie, der sog. *Fermienergie* E_F besetzt, oberhalb E_F unbesetzt. Die Verhältnisse sind bei Raumtemperatur ($T = 300$ K) nicht wesentlich geändert. Damit ein Elektron den Potentialtopf, d.h. das Metall verlassen kann, muss ihm mindestens die Energie W , die Austrittsarbeit des Metalls zugeführt werden. W beträgt ca. 2 eV für Alkalimetalle und ca. 4 - 5 eV für viele Übergangsmetalle. Zum Vergleich dazu sind die Photonenenergien für rotes Licht: $h\nu(650\text{nm}) \approx 1,9$ eV; für blaues Licht: $h\nu(450\text{nm}) \approx 2,8$ eV.

Sind Kathode und Anode z. B. über einen Spannungsmesser U in leitendem Kontakt, so sind für den spannungslosen Zustand die Fermi-Niveaus auf gleicher Höhe, bei einer Spannung U_0 um die Energie eU verschoben. Aus Abb. 2 wird ersichtlich, dass die Energie W in Gln. (2) und (3) (für den hier vorliegenden Fall $W_K \leq W_A$) die Austrittsarbeit W_A der Anode ist.

Wird an die wie in Abb. 1 beschriebene Photozelle eine variable Gleichspannung U angeschlossen, lässt sich der Photostrom $I(U)$ der Zelle bestimmen. Das Schaltbild zeigt Abb. 3a, den typischen Verlauf der Kennlinie $I(U)$ für monochromatisches Licht zeigt Abb. 3b.

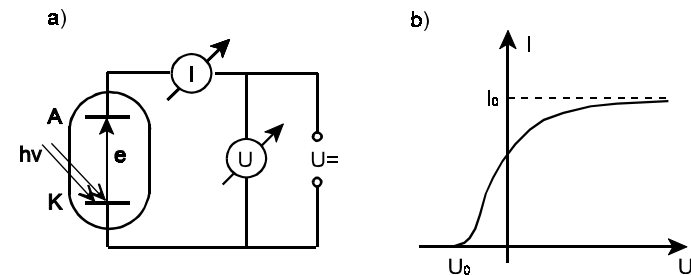


Abb. 3: a) Schaltbild zur Bestimmung der Kennlinie $I(U)$ einer Photozelle, b) typischer Kennlinienverlauf

Man beobachtet, dass der Photostrom I für eine genügend hohe Lichtfrequenz ν (bzw. genügend kleine Austrittsarbeit W_A der Anode) bei der negativen Spannung U_0 einsetzt und für Spannungen $U > U_0$ zunächst $\sim (U - U_0)^2$ anwächst und bei weiter steigender Spannung einem Sättigungswert I_0 zustrebt. Der Verlauf der Kennlinie ist für $U > U_0$ von der Intensität des auf die Kathode treffenden Lichts

abhängig: Je höher die Lichtintensität, desto größer ist der Sättigungsstrom I_0 .

Anmerkung: Abhängig von der Beleuchtung der Photozelle kann auch für Spannungen $U < U_0$ ein geringer negativer Photostrom auftreten. Dieser rührt von Elektronen der Anode her, welche durch direkte Bestrahlung oder Lichtreflexion der Kathode austreten und zur Kathode hin beschleunigt werden.

3. Aufgabenstellung

- 1. Aufgabe:** Bestimmen Sie durch Messung der Ladespannung eines an eine Fotozelle angeschlossenen Kondensators die Grenzspannung U_0 für verschiedene Wellenlängen des Lichts einer Hg-Dampflampe.
- 2. Aufgabe:** Bestimmen Sie aus der Auftragung $U_0(v)$ der Messergebnisse der ersten Aufgabe die Plancksche Konstante h .
- 3. Aufgabe:** Bestimmen Sie die Kennlinien $I(U)$ der Photozelle für die gleichen Wellenlängen des Hg-Lichts wie in der ersten Aufgabe.
- 4. Aufgabe:** Bestimmen Sie aus Auftragsungen $I^{1/2}(U)$ für jede Wellenlänge durch Extrapolationen die Grenzspannung U_0 und daraus wie zuvor die Plancksche Konstante h .

4. Versuchsaufbau

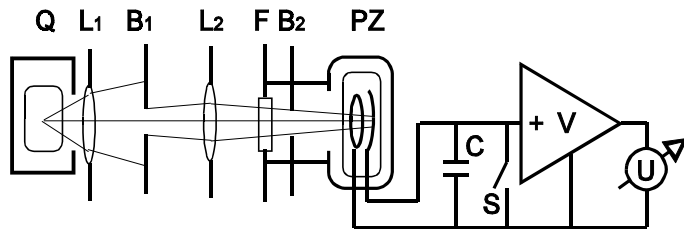


Abb. 4: Versuchsaufbau zur h -Bestimmung mit dem Elektrometervverstärker; Q Hg-Dampflampe, $L_{1,2}$ Sammellinsen, $B_{1,2}$ Blenden, F Farbfilter, PZ Photozelle, C Kondensator, S Schalter, V Elektrometervverstärker, U Spannungsmesser

Den Versuchsaufbau zur 1. Aufgabe zeigt Abb. 4 schematisch: Das von der Hg-Dampflampe ausgehende Licht wird durch Linsen gebündelt und Blenden begrenzt. Es durchläuft ein Filterrad, auf dem sich vier verschiedene dem Hg-Spektrum entsprechende Filter befinden, die durch Drehen des Rades abwechselnd in den Lichtstrahl gebracht werden können. Das gefilterte Licht trifft auf die Kathode der Photozelle, welche aus einer mit Kalium bedeckten oxidierten Silberschicht besteht. Die Anode ist ringförmig und besteht aus Wolfram-Iridium. Damit die Zelle für sichtbares Licht funktionieren kann, muss sich allerdings auch etwas Kalium (mit kleiner Austrittsarbeit ≈ 2 eV) auf der Anode befinden. Kathode und Anode sind mit einem Kondensator (100 pF) verbunden, der mit einem Schalter kurzgeschlossen werden kann.

Die Kondensatorspannung U wird mit einem Elektrometer-Verstärker gemessen, der als Impedanzwandler arbeitet. Der Eingang ist sehr hochohmig, der Ausgang niederohmig, die Verstärkung ist 1.

Fällt bei geöffnetem Schalter Licht auf die Kathode, lädt der Photostrom den Kondensator solange auf, bis die Kondensatorspannung der Grenzspannung U_0 entspricht und kein weiterer Phot- bzw. Ladestrom fließt.

Die für Aufgabe 3 zur Bestimmung der Kennlinien $I(U)$ geänderte Schaltung zeigt Abb. 5:

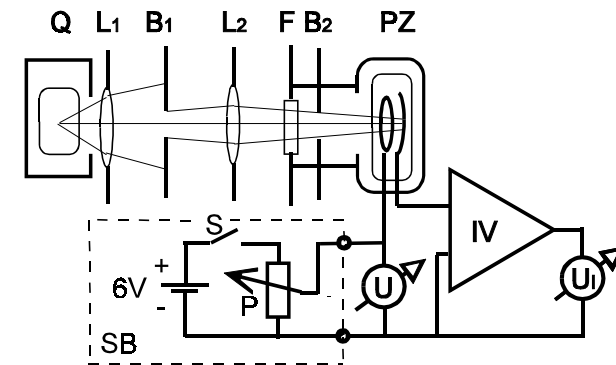


Abb. 5: Versuchsaufbau zur Bestimmung der Kennlinien $I(U)$ der Photozelle PZ; SB Spannungsbox mit Batterie 6V, Schalter S, Potentiometer P; Stromverstärker IV mit Spannungsmesser U_1

Die Spannungsbox SB liefert eine bei eingeschaltetem Schalter S mit dem Potentiometer P einstellbare Spannung U. Mit einem Stromverstärker IV und nachgeschaltetem Spannungsmesser U₁ wird der Photostrom I(U) bestimmt. Für Spannungen U mit anderer Polarität ist die Spannungsbox entsprechend umzupolen.

5. Versuchsdurchführung und Auswertung

5.1 1. und 2. Aufgabe

Bauen sie den Versuch gem. Abb. 4 auf. Mit dem Koaxialstecker wird die Kathode der Photozelle mit der entsprechenden Buchse am Elektrometereingang verbunden. Die am Verstärker an Masse liegende Abschirmung des Kabels ist auch mit dem Lampengehäuse verbunden. Sie stellt eine zum Kondensator C zusätzliche Kapazität dar. Die Ringanode der Photozelle wird mit beiden Kabeln an der Masse-Seite des Verstärkereingangs angeschlossen. Stellen Sie sicher, dass insbesondere das Kathodenkabel während der Messungen nicht bewegt wird (hiebei entstehen Fehlerströme durch Reibungselektrizität und Kapazitätsänderungen).

Nach dem Einschalten des Netzgerätes für die Hg-Lampe ist vor Beginn der Messung ca. 5 min. zu warten, bis die Lampe erwärmt ist und hell strahlt. Der Messverstärker zur Bestimmung der Kennlinien (3. Aufgabe) ist ebenfalls schon einzuschalten. Er sollte zur Stabilisierung mindestens eine Viertelstunde warmlaufen (Standby-Betrieb, Stromwahlschalter auf Null).

Justieren Sie die Blenden so, dass B₁ eine Öffnung ca. 15 mm Ø hat (Blendenmarke auf ca. 13.30h in Strahlrichtung gesehen) und B₂ eine Öffnung von ca. 6 mm Ø (ca. 14.30h). Es sollte nur wenig Licht auf die Mitte der Kathode fallen, damit die Ringanode nicht beleuchtet wird.

Die verwendeten Filter sind Interferenzfilter für die sichtbaren Spektrallinien des Hg-Spektrums. Ihre Daten sind in der unten folgenden Tabelle zusammengefasst.

Die Transmission der Filter außerhalb der angegebenen Bereiche ist < 0,01 %, also vernachlässigbar klein. Ist das Filterrad so gestellt, dass das Licht ungefiltert hindurchgeht, hat die Hg-Spektrallinie im UVA mit $\lambda = 365$ nm die höchste Photonenenergie.

Schließen Sie vor jeder Messung den Schalter S (Abb. 4). Kontrollieren Sie die Anzeige des Spannungsmessers. Dieser sollte im Messbereich (2V) digital Null anzeigen; andernfalls ist die Offsetspannung des Elektrometerverstärkers zu justieren.

Wellenlänge (nm)	Halbwertsbreite (nm)	max. Transmission (%)	Farbe
578 ± 2	9,8	> 50	gelb
546 ± 2	10,3	> 54	grün
436 ± 2	8,3	> 40	blau
405 ± 2	10,8	> 30	violett
ohne Filter: 365	-	-	UVA

Beginnen Sie die Messung der Grenzspannung U₀ mit dem Filter der Wellenlänge 578 nm. Warten Sie nach Öffnen des Schalters 2 min. (Stoppuhr) bis zur Notierung der Grenzspannung U₀. Wechseln Sie nach Schließen des Schalters den Filter und setzen Sie die Messung mit dem Filter der jeweils nächst niedrigeren Wellenlänge entsprechend fort. Bestimmen Sie abschließend die Grenzspannung für das ungefilterte Licht des Hg-Spektrums ($\lambda = 365$ nm).

Wiederholen Sie anschließend die Messreihe der Grenzspannungen U₀. Die Ergebnisse sollten um weniger als 10 % von der vorhergehenden Messung abweichen. Andernfalls ist die Messreihe ein weiteres Mal zu wiederholen.

Tragen Sie in der Auswertung die aus den Messreihen gebildeten Mittelwerte U₀ der Grenzspannungen über den Lichtfrequenzen ν auf. Markieren Sie die Fehler der Frequenzen (entsprechend den Halbwertsbreiten der Wellenlängen gemäß Tabelle) sowie der Spannungen U₀ (entsprechend der Differenzen der Messreihen) durch horizontale sowie vertikale Fehlerbalken. Bestimmen Sie durch Ausgleichsgeraden U₀(ν) die Steigung der Geraden und daraus mit Gl. (4) die Plancksche Konstante h sowie die eff. Austrittsarbeit W_A der Anode. Schätzen Sie die (statistischen) Fehler der Messung mittels Geraden durch die Messpunkte mit (plausibler) maximaler bzw. minimaler Steigung ab.

5.2 3. und 4. Aufgabe

Bauen Sie den Versuch gem. Abb. 5 auf. Das Kathodenkabel ist an der I-Buchse anzuschließen, die Kabel der Ringanode über die Spannungsbox und das Voltmeter an die eingangsseitige Masse des Verstärkers. Der Verstärker ist auf den Bereich 10⁻⁸ A einzustellen (1V der Ausgangsspannung U₁ entspricht 10⁻⁸ A).

Beginnen Sie wie die Abb. zeigt mit der Bestimmung der Kennlinien in

Flussrichtung. Das Potentiometer an der Spannungsbox ist auf Null zu stellen, der Schalter einzuschalten. Der Lichtstrahl auf die Fozelle wird zunächst unterbrochen und die Ausgangsspannung U_1 am Verstärker mit dem Offsetregler so gut es geht auf Null gestellt. Die Restspannung U_{IR} ist zu notieren und später von den Messdaten abzuziehen.

Bestimmen Sie die Kennlinien $U_1(U)$ bzw. $I(U)$ bei 0 V beginnend in Schritten von ca. 0,2 V bis 3 V für alle vier Filter. Die Aufnahme der Kennlinie ohne Filter ist für positive Spannungen wenig sinnvoll, da sich die Beiträge der verschiedenen Spektrallinien überlagern.

Nehmen Sie nach Umpolen der Spannungsbox die Kennlinien für alle Filter sowie auch ohne Filter in Sperrichtung auf. Bestimmen Sie wieder bei 0 V beginnend nun in Schritten von ca. -0,1 V $U_1(U)$ bzw. $I(U)$ soweit zu negativen Spannungen, bis U_1 sich mindestens in einem Spannungsintervall von ca. 0,5 V nicht mehr ändert. Prüfen Sie auch hier, ob bei Unterbrechung des Lichtstrahls die Spannung U_{IR} angezeigt wird. Ist dies nicht der Fall, so fließt für genügend große negative Spannungen wahrscheinlich ein Photostrom von der Anode. Die diesem (konstanten) Strom entsprechende Spannung ist von den Messdaten ebenfalls abzuziehen.

In der Auswertung ist also zunächst der für alle Filter-Wellenlängen wie beschrieben für positive und negative Spannungen korrigierte Strom I im Intervall zwischen -2 V und +3 V zu bestimmen. Danach ist für alle Wellenlängen zusammen in einem Graphen $(I/I_0)^{1/2}$ über U aufzutragen ($I_0 = 10^{-8}$ A). Benutzen Sie für jede Wellenlänge ein verschiedene Messpunkt-Symbole. Bestimmen Sie mittels Ausgleichsgeraden durch die jeweiligen Messpunkte die Grenzspannungen $U_0(\lambda)$. (Als Voraussetzung hierfür muss $I^{1/2}$ in einem Spannungsintervall oberhalb U_0 tatsächlich proportional zu U sein!). Die Messergebnisse für die ungefilterte Strahlung können nur unmittelbar in der Umgebung von U_0 ausgewertet werden. Warum? Schätzen Sie die Fehler für die extrapolierten U_0 -Werte ab.

Tragen Sie wie in der Auswertung der ersten Aufgabe $U_0(v)$ auf und bestimmen Sie die Plancksche Konstante h . Schätzen Sie wie zuvor den Fehler von h aus dem Fehler der Ausgleichsgeraden ab. Vergleichen Sie das Ergebnis für h der zweiten und vierten Aufgabe mit dem Literaturwert. Diskutieren Sie mögliche Fehler bei der Durchführung und Auswertung Ihres Experiments.

6. Fragen zur Selbstkontrolle

- 1) In welchen Experimenten zeigt das Licht Welleneigenschaften, in welchen Teilcheneigenschaften? Nennen sie Beispiele für den Welle-Teilchen-Dualismus des Lichts.
- 2) Nennen Sie charakteristischen Größen zur Beschreibung einer klassischen Lichtwelle und beschreiben Sie ihren Zusammenhang.
- 3) Beschreiben Sie den (äußeren) lichtelektrischen Effekt (Photoeffekt) wie er z.B. mit einer Photozelle beobachtet werden kann. Beschreiben Sie in diesem Zusammenhang den Kennlinienverlauf $I(U)$ einer Photozelle.
- 4) Welche Beobachtungen des Effekts können nicht durch die klassische Theorie des Lichts als elektromagnetische Welle beschrieben werden?
- 5) Welche Aussage macht die von Einstein aufgestellte Lichtquanten-hypothese?
- 6) Welche Experimente erlauben über den vorliegenden Versuch hinaus die Bestimmung der Planckschen Konstante h ?
- 7) Welche Materialgröße kann mit einer Photozelle im Prinzip aus der Frequenzabhängigkeit der Grenzspannung bestimmt werden?
- 8) Beschreiben Sie die Begriffe Austrittsarbeit, Fermienergie und Kontaktspannung von Metallen anhand des Potentialtopfmodells.