

O-18 – Photoeffekt

Bestimmung des Planck'schen Wirkungsquantums h

(Version 1 – 15. April 2014)

In diesem Experiment wird der Wert des Planck'schen Wirkungsquantums h (Max Planck, Nobelpreis 1918) bestimmt, einer echten Naturkonstante. Dabei wird der sog. *Photoeffekt* ausgenutzt, der bereits 1887 durch Hertz und Hallwachs entdeckt und schließlich durch die Quantennatur des Lichts erklärt wurde, wofür Albert Einstein mit dem Nobelpreis ausgezeichnet worden ist. Der Photoeffekt stellt einen wichtigen Meilenstein in der Entwicklung der Quantenmechanik dar und ist die Grundlage der Photoelektronenspektroskopie, einer in der modernen Forschung weit verbreiteten experimentellen Technik zur Untersuchung der elektronischen Struktur von Materialien.

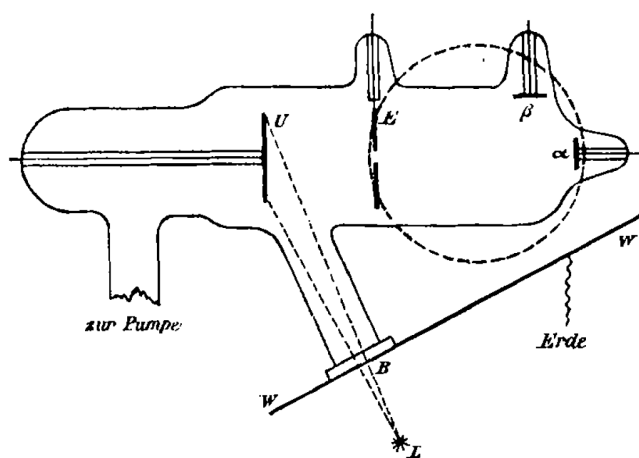


Abbildung 1: Links: Historischer Aufbau zur Untersuchung des Photoeffekts, aus P. Lenard, *Annalen der Physik* **307**, 359 (1900). Rechts: Photozelle in diesem Experiment

Photoeffekt

Bestrahlt man eine metallische Platte mit Licht im sichtbaren oder ultravioletten Spektralbereich, so kann man bei geeigneter Anordnung eine elektrostatische Aufladung der Platte beobachten. Die Ursache für diese Aufladung ist der Photoeffekt, bei dem die Leitungselektronen des Metalls Photonen mit der Energie $E_{\text{Licht}} = h\nu$ absorbieren. Die Leitungselektronen sind durch das Kristallpotenzial an das Metall gebunden und tragen ihrerseits zur Bindung der Atome im Kristall bei. Die Mindestenergie, die ein Elektron aufnehmen muss, um das Kristallpotenzial zu überwinden und aus dem Metall austreten zu können, ist eine charakteristische Eigenschaft des Materials und wird *Austrittsarbeit* ϕ_A genannt. Die kinetische Energie der emittierten Elektronen (auch *Photoelektronen*) ergibt sich dann aus der berühmten Einsteingleichung,

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

Vorbereitung: Inwiefern widerspricht die beobachtete Abhängigkeit des Photoeffekts von der Intensität und der Frequenz des Lichts der klassischen Vorstellung?

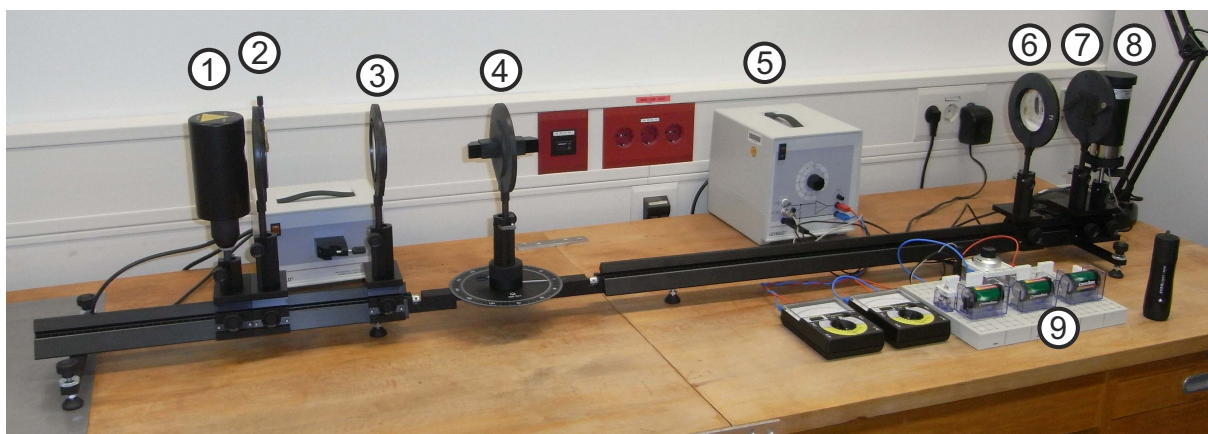


Abbildung 2: Experimenteller Aufbau.

Die Photozelle besteht vereinfacht dargestellt aus einer solchen ‘Metallplatte’, die hier allerdings durch eine metallische Schicht auf der Innenseite eines Glaskolbens repräsentiert wird (s. Abb. 1). Trifft Licht auf die metallische Schicht, werden daraus Photoelektronen emittiert, sofern die Energie des Lichts groß genug ist, um die Austrittsarbeit des Metalls zu überwinden. In einer Schaltung fungiert die Metallschicht als Kathode, die Anode ist hier als Drahring ausgeführt, auf dem ein geringer Teil der Photoelektronen eingesammelt werden. Schließt man die Photozelle über ein Amperemeter kurz, so fließt unter Bestrahlung ein *sehr kleiner* Photostrom, der mit einem Pikoamperemeter messbar ist.

Vorbereitung: Wieso vergrößert man nicht die Fläche der Anode, um mehr Photoelektronen einzusammeln?

Aufbau

Die Grundidee des Experiments besteht darin, dass man die verschiedenen Wellenlängen einer Spektrallampe durch ein Prisma trennt und separat auf die Photozelle strahlt. Durch eine Gegenspannung wird der Photostrom unterdrückt, woraus sich unter Verwendung der Einsteingleichung (1) und der Elementarladung der Wert des Planckschen Wirkungsquantums bestimmen lässt. Die experimentelle Anordnung ist in Abb. 2 gezeigt. Sie besteht aus einem optischen Aufbau auf der Schiene und einem elektrischen Aufbau für die Messung des Stroms an der Photozelle sowie die Gegenspannung.

Optischer Aufbau - Prismenspektrometer

Die optischen Komponenten des experimentellen Aufbaus sind auf einer Schiene mit Drehgelenk angeordnet. Auf dem kürzeren Arm der Schiene befindet sich eine Quecksilberdampf-Lampe ①, die ein diskretes Linienspektrum erzeugt.

**Achtung! Die Spektrallampe wird sehr heiß – nicht anfassen!
Nicht direkt in die Lampe blicken – UV-Strahlung!**

Unmittelbar vor der Lampe befindet sich ein verstellbarer Kollimationsschlitz ②, mit dem sich die Helligkeit und Breite der Linien, und somit auch der Betrag des Photostroms regeln lassen.

Vorsicht beim Verstellen des Spalts - nicht die heiße Lampe berühren! Der Spalt wird über eine Linse ③ (Brennweite $f = 150$ mm) nach unendlich abgebildet, um einen parallelen Strahlengang zu erzeugen.

Vorbereitung: Weshalb ist das notwendig? Wie erreicht man das?

Hinter der Linse befindet sich auf einem Drehgelenk ein sog. *Geradsichtprisma* ④, das die unterschiedlichen Wellenlängen des Quecksilberspektrums trennt. Das Geradsichtprisma behält seine Orientierung in Bezug auf die Lampe, wenn der Arm mit der Photozelle zur Wahl der Wellenlänge geschwenkt wird.

Vorbereitung: Wie “funktioniert” ein Prisma? Worin unterscheidet sich das Geradsichtprisma von einem herkömmlichen Dreiecksprisma?

Auf dem schwenkbaren längeren Arm der optischen Schiene befindet sich eine zweite Linse ⑥ ($f = 150$ mm), mit der der Kollimationsspalt ② auf die Photozelle ⑧ abgebildet wird. Mit Hilfe einer Spaltblende ⑦ wird durch Schwenken des Arms die Wellenlänge ausgewählt, mit der die Photozelle ⑧ beleuchtet wird.

Vorbereitung: Anhand einer Skizze des Strahlengangs sollen die Positionen und Abstände der optischen Elemente erklärt werden.

Elektrischer Aufbau - Kompensationsmethode

Die elektrische Anordnung wird als *Kompensationsmessung* bezeichnet, da hier eine Gegenspannung U_G an die Photozelle angelegt wird, welche die Photoelektronen überwinden müssen, sofern sie genügend kinetische Energie besitzen. Theoretisch erhält man somit den Wert der kinetischen Energie der emittierten Photoelektronen durch die Messung des Wertes der Gegenspannung U_G^0 , für welchen der Photostrom versiegt - die kinetische Energie der Elektronen ist dann genau gleich dem Potenzialgefälle zwischen Photokathode und Anode,

$$eU_G^0 = E_{\text{kin}} = h\nu - \phi_A, \quad (2)$$

wobei die kinetische Energie der Photoelektronen durch die Einsteingleichung (1) gegeben ist. Experimentell sind zahlreiche Abweichungen von der naiven theoretischen Erwartung zu beobachten (s. z. B. R. A. Millikan, Phys. Rev. **7**, 355 (1916)). So beobachtet man z. B. einen *Dunkelstrom* der Photozelle, der auf Kriech- oder Leckströme an der Zelle selbst sowie ein Restsignal durch geringe Streustrahlung zurückzuführen ist, sowie Offsets durch unvermeidbare Kontaktpotenziale oder den Signalverstärker. Diese Störquellen lassen sich nicht ohne Weiteres so weit eliminieren, dass eine quantitative Auswertung mit Hilfe von Gleichung 2 möglich wäre. Daher nutzen wir die lineare Abhängigkeit der Kompensationsspannung von der Frequenz des Lichts aus, und ermitteln den Wert von h aus der Steigung der Messwerte, auf die der experimentelle Offset keinen Einfluss besitzt. Auf diese Weise hatte Millikan bereits 1916 den Wert des Planckschen Wirkungsquantums mit einer Abweichung von weniger als einem Prozent vom heutigen Literaturwert gemessen.

Im Experiment wird die Gegenspannung mit Hilfe von Batterien erzeugt, die ideale Gleichspannungsquellen darstellen, weil sie - anders als netzbetriebene Spannungsquellen - *potenzialfrei* sind, und somit die äußerst geringen Stromstärken nicht über Masseleitungen o. ä. abfließen können. Der Betrag der Gegenspannung kann über ein Potenziometer eingestellt werden. Die elektrische Schaltung ⑨ ist auf einem Steckbrett bereits vorbereitet. **Nach der Messung unbedingt den Schalter an den Batterien öffnen (0), damit diese sich nicht über das Potenziometer entladen!**

Der Photostrom ist so klein, dass er verstärkt werden muss. Der Messverstärker ⑤ gibt ein Spannungssignal aus, welches auf dem angeschlossenen Multimeter beobachtet werden kann. In der Regel ist der kleinste Messbereich von 10^{-11} A am besten geeignet, wobei die Angabe des Messbereichs der gemessenen Stromstärke bei einem Signal von 10 V entspricht (d. h. bei einer Anzeige von 3 V im Messbereich 10^{-11} A ist der gemessene Photostrom $I_{\text{ph}} = 0,3 \times 10^{-11}$ A). Die Einstellungen am Messverstärker sind sorgfältig justiert und sollten **nicht verändert werden**, insbesondere sollte der Offset nicht verstellt werden (s. u.).

Messung

Um einen gut ausgeprägten Photostrom beobachten zu können, sollte zunächst die optische Anordnung überprüft und ggf. optimiert werden. Dabei geht man folgendermaßen vor:

1. Zunächst kontrolliert man die Abbildung der Kollimationslinse ③. Die Abbildung ist dann scharf, wenn man die gelbe Doppellinie getrennt auflösen kann.
2. Das Geradsichtprisma ④ soll so ausgerichtet sein, dass das Licht vom Kollimationsspalt die brechende Fläche ungefähr in der Mitte trifft. Dazu kann es nützlich sein, den Spalt etwas schmaler zu stellen. In der Regel ist diese Einstellung in Ordnung und muss nur dann korrigiert werden, wenn der Aufbau stark verstellt worden ist.
3. Man wählt eine der stärkeren Linien aus, und richtet die optische Schiene mit der Photozelle so aus, dass die Linie durch den Spalt auf die Photozelle fällt. Nun stellt sich ein Photostrom ein, der auf dem Multimeter am Messverstärker abgelesen werden kann. Dabei sollte *keine Gegenspannung* an der Photozelle anliegen (Schalter auf 0).
4. Der Spannungsverstärker sättigt bei einem Wert von ca. 14 V. Um den Messbereich optimal auszunutzen, öffnet man den Kollimationsspalt ② so weit, dass man ein Signal zwischen 10 - 14 V erhält. Man arbeitet während der Messung einer Wellenlänge möglichst im selben Messbereich (s. u.).
5. Man optimiert die Abbildung der Sammellinse ⑥ auf die Photozelle, um eine möglichst große Ausbeute an Photoelektronen zu erzielen. Möglicherweise muss der Kollimationsspalt nachjustiert werden, wenn der Verstärker durch die Zunahme des Photostroms sättigt. Die Position der Photozelle sollte nicht verändert werden.
6. Wenn das Multimeter zur Messung des Photostroms *bipolar* betrieben werden soll (s. u.), sollte vor Beginn der Messung der Nullpunktsgleich für die bipolare Skala geprüft und ggf. nachgestellt werden.

Die Positionen der Komponenten auf der optischen Schiene brauchen in der Regel während des gesamten Experiments nicht mehr verändert zu werden.

Vorbereitung: Welche Komponenten müsste man eigentlich für jede Wellenlänge nachjustieren, und warum ist das so? Wieso kann man dennoch meistens darauf verzichten? Wann lohnt es sich trotzdem nachzujustieren, und welche Komponenten würde man wie verändern?

Nun werden die *Kennlinien* der Photozelle, d. h. der Photostrom I_{ph} als Funktion der angelegten Gegenspannung U_G für alle fünf sichtbaren Linien des Quecksilberspektrums aufgenommen. Die Lampe sollte vor Beginn der Messungen mindestens 20 min lang gelaufen sein, um die nötige Betriebstemperatur zu haben.

1. Man wählt eine Wellenlänge aus, indem man die Schiene mit der Photozelle in die entsprechende Position bringt, so dass diese Linie exakt in den Spalt fällt. Als Anhaltspunkt für die korrekte Position dient der Betrag des Photostroms (ohne Gegenspannung!).
2. Man optimiert die Breite des Kollimationsspalts, so dass das Signal am Verstärker für den gewählten Messbereich bei verschwindender Gegenspannung knapp unterhalb des Sättigungswertes (ca. 14 V) liegt.
3. Man bestimmt den Wert des Dunkelstroms, indem man die Photozelle (bzw. den Eintrittsspalt) völlig abdeckt. Sollte während der Messung der Messbereich verstellt werden, muss die Messung des Dunkelstroms für diesen Bereich wiederholt werden. Nach Möglichkeit sollte der Messbereich während der Messung einer Wellenlänge nicht verändert werden. Zeigt sich eine Abweichung des Dunkelstroms für verschiedene Messbereiche, deutet dies darauf hin, dass der Offset am Verstärker verstellt ist. Dann muss der Offset nachjustiert werden, bis die Werte des Dunkelstroms sowie des Photostroms nicht mehr vom Messbereich abhängen. **ACHTUNG: diese Einstellungen sind sehr empfindlich und in der Regel optimal justiert. Sie sollten nur dann verstellt werden, wenn alle anderen Fehlerquellen ausgeschlossen worden sind!**
4. Man stellt das Potenziometer auf Nullanschlag und schließt den Schalter in der Anordnung für die Gegenspannung. Durch Verstellen des Potis erhöht man die Gegenspannung und beobachtet eine Abnahme des Signals für den Photostrom, bis dieser schließlich negativ wird. In diesem Bereich nimmt man ungefähr 10 - 15 Messwerte für Gegenspannungen im Abstand von etwa 0,1 V auf. Während das Messsignal abnimmt, muss der Messbereich des Multimeters für den Photostrom sinnvoll angepasst werden, um eine möglichst präzise Messung zu erlauben.*
5. Für größere Gegenspannungen und negative Werte des Photostroms wird die Messung fortgesetzt, bis sich der Wert nicht mehr ändert. In der Nähe der Gegenspannung, bei der der Photostrom einen konstanten Wert annimmt, werden einige weitere Messwerte mit kleinerem Abstand aufgenommen - dieser Bereich ist der entscheidende für die Auswertung. Den Bereich höherer Gegenspannungen deckt man mit 3 - 4 weiteren Messpunkten im Abstand von 0,5 - 1 V ab.

*Da das Signal im Laufe der Messung das Vorzeichen wechselt, muss das Multimeter auf bipolaren Betrieb (rote Skalen) eingestellt werden. Eine bessere Ablesegenauigkeit erzielt man hingegen im unipolaren Betrieb (schwarze Skalen), den man verwenden kann, solange der Photostrom positiv ist. Natürlich lässt sich durch Umstecken des Multimeters die Polarität geeignet wählen, so dass stets unipolar gemessen werden kann.

Auswertung

1. Für alle fünf Quecksilberlinien wird zunächst die Kennlinie grafisch aufgetragen. Zur Bestimmung der Fehlerbalken legt man eine sinnvolle Ablesegenauigkeit der Messgeräte zugrunde, und berücksichtigt eine Unsicherheit der Messgeräte von 5% des Skalenvollauschlags.
2. Man überlegt sich ein *reproduzierbares* Kriterium für die quantitative Bestimmung der Kompensationsspannung U_G^0 und ihrer Unsicherheit aus den Kennlinien.
3. Die so ermittelten Werte werden grafisch als Funktion der *Frequenz* des Lichts aufgetragen.
4. Unter Verwendung von Gleichung (2) bestimmt man mittels *grafischer* Geradenanpassung zunächst den Wert des Quotienten h/e , und mit dem Literaturwert der Elementarladung e schließlich das Plancksche Wirkungsquantum h .

Spektrum der Hg-Lampe:

Farbe der Linie	Wellenlänge λ (nm)	relative Intensität
gelb	579	4%
	577	3%
grün	546	14%
blaugrün	492	1%
blau	436	52%
violett	408	2%
	405	23%
UV	390	1%

Für die Wellenlänge nimmt man eine Unsicherheit von 1 nm an.

Vorbereitung: Was ist die Ursache für diese Unsicherheit? Welche Wellenlänge muss man in der Auswertung für die beiden Doppellinien verwenden?

Zusatzaufgabe für Physikstudenten und interessierte Nebenfächler

Wenn man ein weißes Blatt Papier hinter dem Geradsichtprisma in den Strahlengang hält, erkennt man in einigem Abstand von den bekannten Linien des Quecksilberspektrums auf der violetten Seite ein bläuliches Leuchten. Was ist die Ursache für diese Leuchterscheinung? Aus diesem Licht soll ein weiterer Wert für die Bestimmung von h ermittelt werden.

Zusammenfassung

Der Bericht soll mit einer Zusammenfassung der Messergebnisse und ihrer Bewertung abgeschlossen werden. Dazu gehört hier insbesondere auch die Diskussion der Vorgehensweise zur Bestimmung des Wertes der Kompensationsspannung, sowie des Einflusses der verschiedenen experimentellen Fehlerquellen auf das Ergebnis. Welche Erkenntnisse hat dieses Experiment geliefert? Nebenfachstudenten sollen einen Bezug herstellen zu ihrem Hauptfach, Lehramtsstudenten zur Erfahrungswelt eines Schülers.