

5.1. h -Bestimmung mit dem Photoeffekt

Ziel

Mit Hilfe des Photoeffekts wird eine Naturkonstante, das PLANCKSche Wirkungsquantum h , bestimmt. Der Versuch vermittelt wesentliche Grundlagen im Zusammenhang mit der Quantennatur des Lichtes.

Hinweise zur Vorbereitung

Die Antworten auf diese Fragen sollten Sie vor der Versuchsdurchführung wissen. Sie sind die Grundlage für das Gespräch mit Ihrer Tutorin/Ihrem Tutor vor dem Versuch. Informationen zu diesen Themen erhalten Sie in der unten angegebenen Literatur.

- Was ist der Photoeffekt?
- Wie funktioniert eine Photozelle?
- Welche Größe bestimmt, ob Elektronen das beleuchtete Metall verlassen können?
- Wo treten in diesem Versuch Austrittsarbeit und Kontaktspannung auf?
- Was ist eine Kompensationsmessung und wieso benötigt man sie in diesem Versuch?

Zubehör

- LEDs mit verschiedenen Wellenlängen
- Photozelle
- Messverstärker (Vollausschlag im empfindlichsten Messbereich bei 10^{-11} A)
- Netzgerät
- vier digitale Multimeter
- Batterie
- Drehpotentiometer $R = 230 \Omega$

Grundlagen

Photoemission

Elektronen in der Photokathode absorbieren die Energie $h \cdot \nu$ der einfallenden Photonen. Ist ihre Energie anschließend hoch genug, so können sie das Metall verlassen und führen so zu einer positiven Aufladung der beleuchteten Elektrode. Die Elektronen haben nach dem Verlassen der Kathode eine gewisse maximale kinetische Energie E_{kin} , die aber nicht ganz der Energie der absorbierten Photonen entspricht, sondern etwas niedriger ist. Dies liegt

daran, dass beim Austritt aus jedem Material die sog. Austrittsarbeit W_A aufgebracht werden muss, bzw. beim Eintritt wieder frei wird.

Es gilt die sog. EINSTEIN-Gleichung

$$E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} m_e v^2 = h \cdot \nu - W_{A,\text{Kathode}} \quad . \quad (5.1.1)$$

Die Messung der maximalen kinetischen Energie der Elektronen kann auf verschiedene Arten erfolgen. Denkbar wäre z. B., die Fluggeschwindigkeit direkt zu bestimmen. Allerdings wäre ein dafür geeigneter Aufbau sehr aufwändig. Einfacher ist es, zwischen Kathode und Anode eine Gegenspannung anzulegen, die gerade so eingestellt wird, dass auch die schnellsten Elektronen die Anode gerade nicht mehr erreichen. Der (relativ) einfach messbare Photostrom wird für diesen Wert U_{max} dann gerade null. $U_{\text{max}} \cdot e$ entspricht bis auf einen konstanten Summanden der kinetischen Energie E_{kin} . Die Konstante kommt daher, dass natürlich nicht nur die Kathode, sondern auch die Anode eine Austrittsarbeit hat. Da die beiden Elektroden über das Messgerät verbunden sind, muss auch noch die Kontaktspannung berücksichtigt werden, so dass schließlich gilt:

$$\begin{aligned} U_{\text{max}}(\nu) \cdot e &= E_{\text{kin}} - U_{\text{Kontakt}} \cdot e \\ &= (h \cdot \nu - W_{A,\text{Kathode}}) - (W_{A,\text{Anode}} - W_{A,\text{Kathode}}) \\ &= h \cdot \nu - W_{A,\text{Anode}} \quad . \end{aligned} \quad (5.1.2)$$

Die Austrittsarbeit der Kathode spielt für den Wert der Gegenspannung also tatsächlich keine Rolle. Ihre Größe entscheidet aber natürlich trotzdem darüber, ob *überhaupt* Photoelektronen emittiert werden können und wie hoch deren kinetische Energie ist¹.

Die Austrittsarbeiten hängen nicht von der Frequenz des eingestrahlteten Lichtes ab. Deshalb kann man auch ohne ihre Kenntnis mit Hilfe der Gleichung (5.1.2) aus zwei Messungen von $U_{\text{max}}(\nu)$ für verschiedene Lichtfrequenzen ν_1 und ν_2 durch Differenzbildung die Konstante h bestimmen:

$$h = \frac{e \cdot [U_{\text{max}}(\nu_2) - U_{\text{max}}(\nu_1)]}{\nu_2 - \nu_1} \quad . \quad (5.1.3)$$

Man nennt h das PLANCKSche Wirkungsquantum.

Die Tatsache, dass zwar die *Anzahl*, jedoch (zumindest für konventionelle Lichtquellen) *nicht die Energie* der austretenden Elektronen von der Intensität der Strahlung abhängt, führte um 1900 zu großen Erklärungsschwierigkeiten im Rahmen der allgemein akzeptierten *Wellentheorie* des Lichtes. Die Beobachtung, dass die Farbe, und damit die Wellenlänge bzw. Frequenz, die Energie der Elektronen bestimmte, war völlig unverständlich. Die Probleme konnten erst durch die im Jahr 1905 von EINSTEIN vorgeschlagene *quantenmechanische* Deutung des Photoeffektes beseitigt werden.

¹Dieser Punkt wird in der Literatur leider sehr häufig falsch dargestellt. Der Einfluss der Kontaktspannung wird meist (auch in vielen Lehrbüchern) nicht erwähnt [Ley71, HRW03]. Eine detaillierte Darstellung findet sich z. B. bei [Jam73, RT76, Str80] und insbesondere in der historischen Publikationen von R. A. MILLIKAN aus dem Jahren 1916 [Mil16c, Mil16b] und 1921 [Mil21a].

Kompensationsmessung

Da der erreichbare Photostrom sehr gering ist, und die Photospannung bei Belastung stark abfällt, muss eine Methode zur Messung der Photospannung gewählt werden, die möglichst die völlig unbelastete Spannung misst. Dies geschieht durch eine Kompensationsmessung, bei der die Photospannung durch eine einstellbare Gegenspannung aufgehoben wird, so dass gerade *kein* Photostrom fließt. Den Strom überwacht man dabei für höchste Messgenauigkeit mit Hilfe eines empfindlichen Messverstärkers. Die Gegenspannung entspricht dann betragsmäßig der Photospannung und kann problemlos mit einem üblichen Multimeter gemessen werden.

Versuchsdurchführung

Achtung: Das gelegentlich notwendige Ausheizen der Ringanode aus Platindraht darf *nur* von einem/einer erfahrenen Betreuer/in durchgeführt werden, da sonst bleibende Schäden an der Photozelle entstehen können. Der entsprechende Teil des Schaltbildes soll beim Versuch normalerweise *nicht* mit aufgebaut werden.

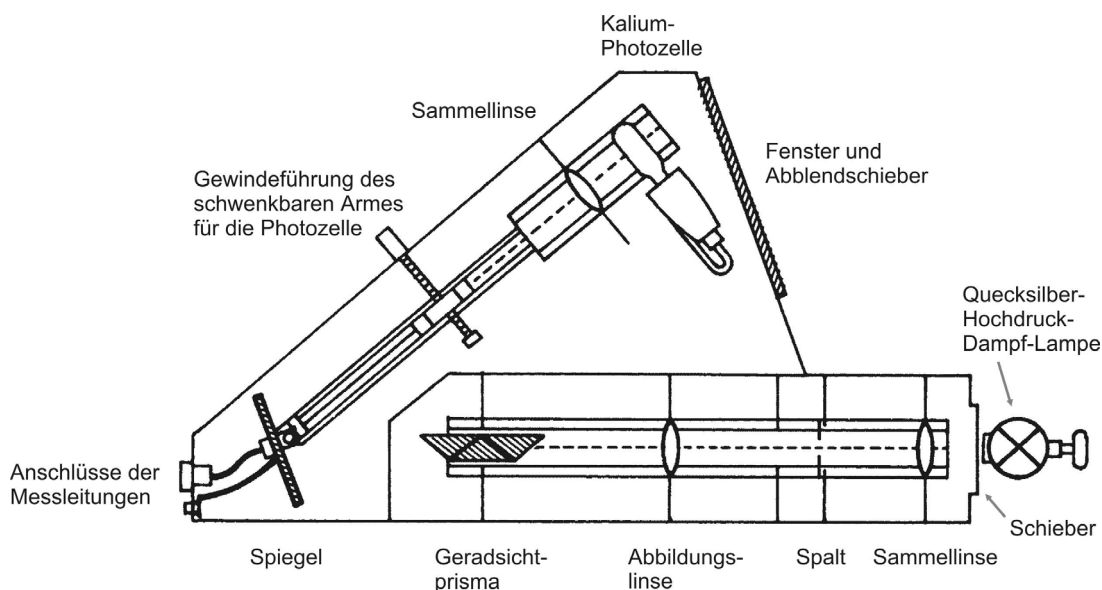


Abbildung 5.1.1.: Versuchsaufbau zur h -Bestimmung mit Hilfe des Photoeffekts nach [Ley71]. Bei dem im Anfängerpraktikum befindlichen Aufbau wird das Prisma im Vergleich zu dieser Skizze um 180° gedreht eingesetzt, um besser an den Blenden vorbeizukommen. Dadurch vertauscht sich lediglich die Reihenfolge der Spektrallinien.

Im Versuch wird Licht einer Quecksilber-Hochdruck-Dampf-Lampe mit Hilfe eines Geradsichtprismas spektral zerlegt. Die Linien des Spektrums werden einzeln nacheinander auf eine Photozelle gelenkt. Durch eine Gegenspannung wird der entstehende Photostrom unterdrückt (Kompensationsmethode). Aus der Abhängigkeit der notwendigen Gegen-

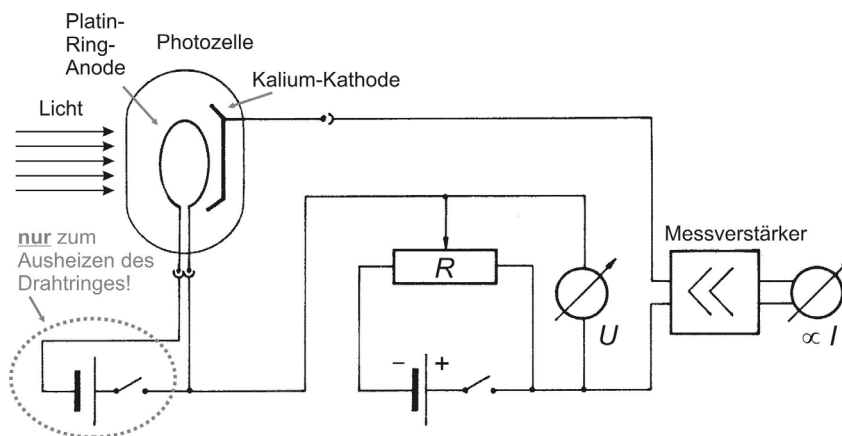


Abbildung 5.1.2.: Schaltbild zur h -Bestimmung mit Hilfe des Photoeffekts nach [Ley71]. Das am Ausgang des Messverstärkers liegende Multimeter muss auf Gleichspannungsmessung (Messbereich ≥ 1 V) eingestellt werden. Der angezeigte Wert ist dann proportional zum durch den Messverstärker fließenden Strom I .

spannung von der Wellenlänge des Lichtes wird das PLANCKSche Wirkungsquantum h ermittelt.

1. Öffnen Sie das Spektrometergehäuse und kontrollieren Sie den Strahlengang (Abbildung 5.1.2). Die Sammellinse wird so eingestellt, dass sie das Licht der Quecksilberdampfampe auf den Spalt bündelt. Der Spalt wiederum wird über die Abbildungslinse auf das Fenster abgebildet. Durch das Geradsichtprisma entsteht für jede Spektrallinie ein getrenntes Bild des Spaltes. Die Spaltbilder können durch Schwenken des Spiegels und der Photozelle einzeln auf die flächige Kathode der Photozelle gelenkt werden. Vermeiden Sie dabei möglichst, dass gleichzeitig auch die Ringanode beleuchtet wird. Die Abbildung auf der Kathode soll ruhig etwas unscharf sein, um eine etwas größere Fläche zu beleuchten.
2. Korrigieren Sie folgendermaßen den Nullpunkt des Messverstärkers: alle Lichteintrittsöffnungen des Spektrometers schließen, die Gegenspannung auf null bringen und dann im zweitempfindlichsten *Strom*messbereich des Messverstärkers (10^{-10} A) die Anzeige mit Hilfe des dafür vorgesehenen Reglers auf null einstellen.
3. Öffnen Sie den Schieber bei der Hg-Dampfampe und messen Sie zu *jeder* Spektrallinie aus Tabelle 5.1.1 die Photospannung an der Photozelle (evtl. bis auf die sehr schwache Linie bei 493 nm). Während der Messung selbst muss der Aufbau an allen anderen Stellen unbedingt gut geschlossen sein – auch der Schieber an der Mattscheibe muss geschlossen bleiben, um Streulicht zu vermeiden. Die Spannungsmessung selbst erfolgt mittels der Kompensationsmethode (siehe Schaltbild in Abbildung 5.1.2). Dabei erhöhen Sie die Gegenspannung langsam durch Verändern des Schiebewiderstandes, bis die Stromanzeige gerade auf $I = 0$ zurückgeht. Warten

Wellenlänge λ	Frequenz $\nu = \frac{c}{\lambda}$	Farbe
578 nm	$5.19 \cdot 10^{14}$ Hz	gelb
546 nm	$5.49 \cdot 10^{14}$ Hz	grün
493 nm	$6.08 \cdot 10^{14}$ Hz	blaugrün
436 nm	$6.88 \cdot 10^{14}$ Hz	blau
405 nm	$7.41 \cdot 10^{14}$ Hz	violett

Tabelle 5.1.1.: Wellenlängen und Frequenzen der auszumessenden Hg-Spektrallinien. Die Linie bei 493 nm ist sehr schwach und muss nicht unbedingt bearbeitet werden. Die Farben können durch Fluoreszenz auf weißem Papier leicht verändert erscheinen.

Sie vor dem Ablesen ein bisschen, bis sich wirklich ein Gleichgewicht eingestellt hat, und regeln Sie – falls nötig – nochmals etwas nach.

Hinweis: Kontrollieren Sie immer wieder, ob der Nullpunkt noch stimmt, indem Sie den Schieber schließen und die Gegenspannung abschalten. Ein Driften des Messverstärkers kann nicht ausgeschlossen werden.

4. Tragen Sie *unbedingt schon während der Versuchsdurchführung* die gemessenen Werte der Gegenspannung als Funktion der Frequenz der Spektrallinie in ein $U(\nu)$ -Diagramm ein.

Auswertung

1. Bestimmen Sie aus der Auftragung der gemessenen Werte der Gegenspannung als Funktion der Frequenz der Spektrallinie ($U(\nu)$ -Diagramm) die Steigung und den Achsenabschnitt der passenden Ausgleichsgeraden.

Führen Sie hierzu eine **Ausgleichsrechnung** durch, wie sie z. B. in Kapitel C im Rahmen der Messunsicherheitsanalyse beschrieben ist.

2. Die soeben ermittelte Steigung der Ausgleichsgeraden ist der von Ihnen bestimmte Messwert für den Quotienten h/e der PLANCKSchen Konstante h und der Elementarladung e . Berechnen Sie h unter Verwendung des Literaturwertes $e = 1.602176462(63) \cdot 10^{-19}$ C. Vergleichen Sie das Ergebnis mit dem Literaturwert $h = 6.62606876(52) \cdot 10^{-34}$ J s (Literaturwerte aus [COD98, MT99, MT00]).

Fragen und Aufgaben

1. Erklären Sie die Funktionsweise eines Geradsichtprismas und skizzieren Sie den zugehörigen Strahlengang.
2. Nennen Sie andere Methoden zur Bestimmung der PLANCKSchen Konstanten h .

3. Haben alle durch Photoeffekt aus einem Metall herausgelösten Elektronen die gleiche kinetische Energie?
4. Unter den Effekten, die historisch die Vorstellung von Photonen als Teilchen unterstützten, spielt der COMPTON-Effekt eine wichtige Rolle. Beim COMPTON-Effekt wird wie beim Stoß zweier Kugeln Energie und Impuls von einem Photon auf ein Elektron übertragen.
Wenn die Energie eines Photons $E = h \cdot \nu$ ist, wie groß ist dann sein Impuls p ?

Ergänzende Informationen

Historisches

Der Photoeffekt wird auch „äußerer lichtelektrischer Effekt“ genannt, nämlich im Gegensatz zum „inneren lichtelektrischen Effekt“, bei dem durch Lichteinwirkung im Inneren von Halbleitern Ladungen getrennt werden. Seine Entdeckung geht bis ins späte 19. Jahrhundert zurück. H. HERTZ bemerkte bei seinen Versuchen an elektrischen Funkenstrecken, dass das von einer Funkenstrecke ausgesandte ultraviolette Licht den Überschlag in einer zweiten Funkenstrecke begünstigte, besonders dann, wenn deren *negativer* Pol bestrahlt wurde. 1887 untersuchte HALLWACHS den Effekt näher und fand, dass bei der Bestrahlung negative Ladungen aus dem Metall ausgelöst werden, so dass es sich bis zu einem bestimmten „Haltepotential“ positiv auflädt. Damals war die Natur der Ladungsträger in Metallen noch nicht geklärt, so dass explizit bewiesen werden musste, dass es sich bei den herausgelösten Ladungen um Elektronen handelt. Dieser Schritt gelang LENARD durch experimentelle Bestimmung der spezifischen Ladung e/m .

Die Abhängigkeit des Sättigungsstroms von der Intensität der Strahlung wurde bereits 1888–1890 durch J. ELSTER und H. GEITEL eingehend untersucht. Sie fanden eine strenge Proportionalität über 7 Größenordnungen. Es dauerte fast ein Jahrhundert, bis mit dem Laser eine Lichtquelle zur Verfügung stand, die es erlaubte, Lichtintensitäten zu erzeugen, die so hoch sind, dass die Proportionalität nicht mehr erfüllt ist.

EINSTEIN gab im Jahr 1905 eine Deutung des Photoeffektes, die zur Übereinstimmung mit der Quantentheorie führte [Ein05]. Die Konstante h wurde übrigens bereits im Jahr 1900 von PLANCK bei der Behandlung des Strahlungsgesetzes der Wärmestrahler eingeführt. Die Bestimmung von h aus der Geradensteigung der Energie der Elektronen beim Photoeffekt als Funktion der Frequenz des eingestrahlteten Lichtes wurde hingegen erstmals im Jahr 1916 durch MILLIKAN erfolgreich durchgeführt [Mil16a].

Literaturhinweise

Der Photoeffekt wird in den meisten Standard-Lehrbüchern beschrieben, allerdings leider oft unter Vernachlässigung der Kontaktspannung.

Eine sehr ausführliche Darstellung findet sich u. a. in [Gör62] und [Her94].

Interessant zu lesen (wenn auch etwas länglich) sind die historischen Publikationen zu diesem Thema, z. B. [Mil16a, Mil21b].

Zum Geradsichtprisma siehe z. B. [GGG78].

Literaturverzeichnis

- [COD98] CODATA (COMMITTEE ON DATA FOR SCIENCE AND TECHNOLOGY), NIST (NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY): <http://www.codata.org/>, <http://physics.nist.gov/cuu/Constants/>, 1998. Datenbank für Fundamentalkonstanten usw.
- [Ein05] EINSTEIN, A.: *Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt*. Ann. d. Phys., 17:132–148, 1905.
- [GGG78] GOBRECHT, HEINRICH, JENS H. GOBRECHT und KLAUS H. GOBRECHT (Herausgeber): *Bergmann-Schaefer – Lehrbuch der Experimentalphysik*, Band III: Optik. Walter de Gruyter, Berlin, 7. Auflage, 1978.
- [Gör62] GÖRLICH, PAUL: *Photoeffekte – Band 1: Historische Entwicklung, Photoemission der Metalle*, Band 1. Akademische Verlagsgesellschaft Geest & Portig K.-G., Leipzig, 1. Auflage, 1962.
- [Her94] HERRMANN, KLAUS H.: *Der Photoeffekt – Grundlagen der Strahlungsmessung*. Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig · Wiesbaden, 1. Auflage, 1994.
- [HRW03] HALLIDAY, DAVID, ROBERT RESNICK und JEARL WALKER: *Physik*. WILEY-VCH GmbH & Co. KGaA, Weinheim/Germany, 1. Auflage, 2003. Authorized translation from the English language 6. edition.
- [Jam73] JAMES, A. N.: *Photoelectric effect, a common fundamental error*. Physics Education, 8(6):382–384, 1973.
- [Ley71] LEYBOLD-HERAEUS GMBH & CO. KG: *Gebrauchsanweisung zur Kompaktanordnung zur Bestimmung des Planckschen Wirkungsquantums*. Technischer Bericht 55879, Leybold, Bonner Straße 504, 5000 Köln 51, 1971. Achtung: Fehler in der Bestimmung der Austrittsarbeit durch Vernachlässigung der Kontaktspannung.
- [Mil16a] MILLIKAN, R. A.: *A direct photoelectric determination of PLANCK's „h“*. Phys. Rev., 7(3):355–388, 1916.
- [Mil16b] MILLIKAN, R. A.: *Einstein's photoelectric equation and contact electromotive force*. Phys. Rev., 7(1):18–32, 1916.
- [Mil16c] MILLIKAN, R. A.: *Quantenbeziehungen beim photoelektrischen Effekt*. Physikalische Zeitschrift, 17(11):217–221, 1916.
- [Mil21a] MILLIKAN, R. A.: *The distinction between intrinsic and spurious contact e.m.f.s and the question of the absorption of radiation by metals in quanta*. Phys. Rev., 18(3):236–244, 1921.

- [Mil21b] MILLIKAN, R. A.: *A means of distinguishing between intrinsic and spurious contact electromotive forces*. Phys. Rev., 17(3):399, 1921. Abstract of a paper presented at the Chicago meeting of the Physical Society, December 28–30, 1920.
- [MT99] MOHR, PETER J. and BARRY N. TAYLOR: *CODATA recommended values of the fundamental physical constants: 1998*. Journal of Physical and Chemical Reference Data, 28(6):1713–1852, 1999. CODATA 1998 recommended values.
- [MT00] MOHR, PETER J. and BARRY N. TAYLOR: *CODATA recommended values of the fundamental physical constants: 1998*. Reviews of Modern Physics, 72(2):351–495, 2000. CODATA 1998 recommended values.
- [RT76] RUDNICK, J. and D. S. TANNHAUSER: *Concerning a widespread error in the description of the photoelectric effect*. Am. J. Phys., 44(8):796–798, August 1976.
- [Str80] STRNAD, J.: *Die Austrittsarbeit beim Photoeffekt*. Praxis der Naturwissenschaften – Physik, Seiten 343–344, 11 1980.