



Martin-Luther-Universität
Halle-Wittenberg
Institut für Physik

Fortgeschrittenen- Praktikum

Stand der Anleitung:
18.08.2021



Versuch B02: Photoeffekt

1. Aufgaben

1. Untersuchen Sie das Linienspektrum einer Quecksilber-Gasentladungslampe.
 - a) Nehmen Sie das Lampenspektrum mittels Prismenmonochromator und Photoelektronenvervielfacher auf und ordnen Sie die gefundenen Linien anhand von Literaturdaten den Wellenlängen zu.
 - b) Korrigieren Sie die Intensitäten in Bezug auf die spektrale Durchlässigkeit des Monochromatorprismas und die spektrale Empfindlichkeit des Photoelektronenvervielfachers. Vergleichen Sie die Linienintensitäten mit Literaturdaten.
2. Bestimmen Sie das Plancksche Wirkungsquantum mit der Gegenspannungsmethode.
 - a) Messen Sie die Abhängigkeit des Photoelektronenstroms von der Gegenspannung und ermitteln Sie das Plancksche Wirkungsquantum aus der kompensierenden Gegenspannung.
 - b) Bestimmen Sie das Plancksche Wirkungsquantum mithilfe eines Modells, das die Impulsverteilung der Photoelektronen berücksichtigt, und vergleichen Sie die Ergebnisse.

2. Kontrollfragen

Wie sieht die prinzipielle Anordnung zur Beobachtung des äußeren lichtelektrischen Effekts (Photoeffekt) aus?

Wie funktioniert ein Prismen-Monochromator? Wie funktioniert ein Photoelektronenvervielfacher und welchen Verstärkungsfaktor hat das im Versuch verwendete Gerät?

Worin besteht die Bedeutung des Photoeffekts für die Entwicklung der modernen Physik?

Welche experimentellen Beobachtungen beim Photoeffekt führten zur quantenphysikalischen Erklärung durch Einstein?

Welche Rolle spielen diese Eigenarten bei der von Millikan verwendeten Gegenspannungsmethode zur Bestimmung des Planckschen Wirkungsquantums?

Wie und warum weichen die Messergebnisse in Millikans Versuch zum Photoeffekt von Einsteins Erklärung ab?

Auf welche beiden Naturkonstanten kann die von Einstein verwendete Größe β zurückgeführt werden?

Wie hängt die Gegenspannung, bei der der Photoelektronenstrom verschwindet (kompensierende Gegenspannung), mit dem Impuls der Photoelektronen und wie hängt dieser mit der Energieverteilung der Elektronen im Festkörper zusammen?

Auf welche Weise kann mithilfe der Gegenspannungsmethode das Plancksche Wirkungsquantum bestimmt werden?

Welche Methoden existieren noch zur Bestimmung des Planckschen Wirkungsquantums?

Worin besteht der Grundgedanke der Photoelektronenspektroskopie?

3. Grundlagen

3.1 Äußerer Photoeffekt

Durch die Bestrahlung mit Licht können aus einer Metalloberfläche Elektronen herausgelöst werden. Dieser Vorgang wird als äußerer photoelektrischer Effekt - kurz „Photoeffekt“ - und die austretenden Ladungsträger als Photoelektronen bezeichnet. Bei genauerer Untersuchung lässt sich eine Reihe bemerkenswerter Feststellungen treffen:

- Eine Vergrößerung der Lichtintensität führt zu einer Erhöhung der Zahl der Photoelektronen, nicht aber ihrer kinetischen Energie.
- Die kinetische Energie der Photoelektronen ist umgekehrt proportional zur Wellenlänge des eingestrahlt Lichts.
- Oberhalb einer gewissen Grenzwellenlänge, die sich je nach bestrahltem Material unterscheidet, werden keine Elektronen herausgelöst.

Ausgehend von Beobachtungen von Alexandre Becquerel, Heinrich Hertz und Wilhelm Hallwachs im 19. Jahrhundert wurden diese Zusammenhänge 1902 von Philipp Lenard untersucht [1], ohne dass er eine schlüssige Erklärung für die Befunde angeben konnte. Lenard erhielt 1905 den Nobelpreis für Physik für seine Forschungen über aus Elektroden austretende Elektronen, die „Kathodenstrahlen“ genannt wurden. Er diskreditierte sich jedoch später nachhaltig durch sein Eintreten für eine rassistische „Deutsche Physik“ und seine antisemitisch motivierte Ablehnung von Albert Einsteins Relativitätstheorie.

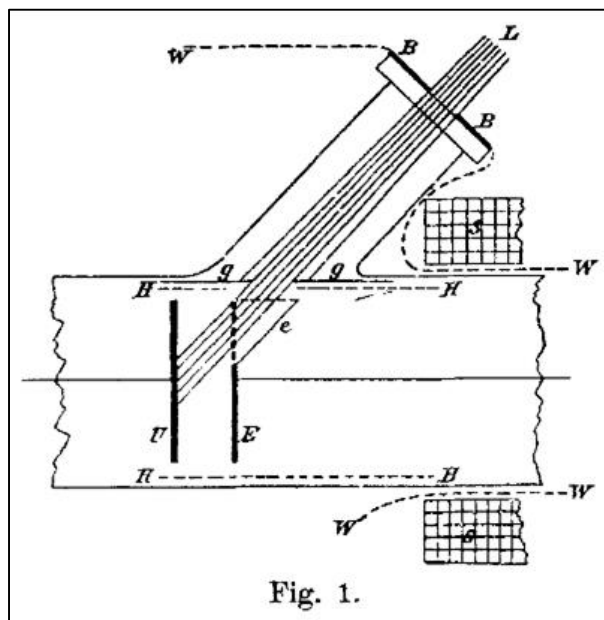


Abb. 1 Skizze der Versuchsanordnung von Lenard aus [1]. U ist die beleuchtete Kathode und E die Anode.

Einstein lieferte 1905 die Erklärung der Eigenarten des Photoeffekts in einer berühmten Arbeit [2], für die er den Physik-Nobelpreis des Jahres 1921 erhielt und die einen wichtigen Meilenstein in der Entwicklung der Quantenphysik darstellt. Einstein ging davon aus, dass Licht aus diskreten Objekten besteht, die sich im Vakuum mit einer von ihrer Energie unabhängigen Geschwindigkeit ausbreiten und die er in Anlehnung an Max Plancks Theorie der Wärmestrahlung „Lichtquanten“ nannte. Die Energie E_{Ph} der später so genannten Photonen hängt über das Plancksche Wirkungsquantum h mit der Frequenz ν bzw. über die Lichtgeschwindigkeit c mit der Wellenlänge λ zusammen:

$$E_{Ph} = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (1)$$

Um Elektronen aus der Materialoberfläche herauszulösen ist eine Mindestenergie, die sogenannte Austrittsarbeit E_A , erforderlich. Die darüber hinausgehende Energie der Photonen wird auf die Elektronen als kinetische Energie E_{kin} übertragen:

$$E_{kin} = E_{Ph} - E_A \quad (2)$$

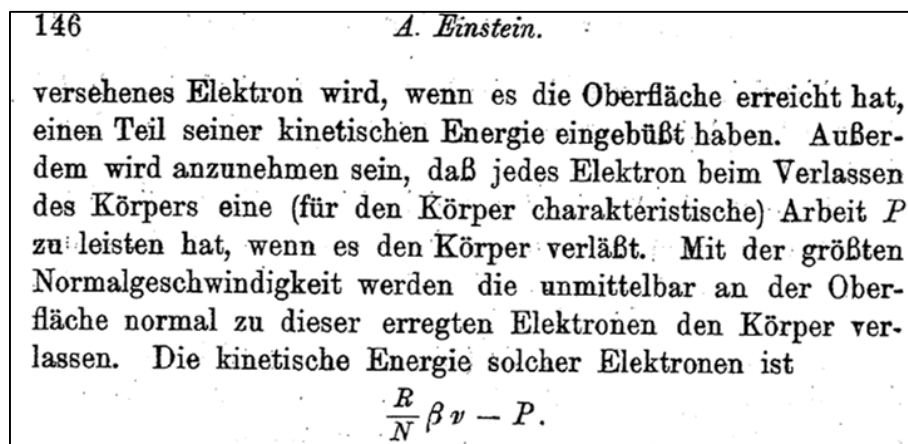


Abb. 2 Auszug aus Einsteins Erklärung des Photoeffekts [2]. Das Plancksche Wirkungsquantum wird hier in der Form $\frac{R}{N}\beta$ wiedergegeben (R ist die Gaskonstante, N die Avogadro-Zahl), $\nu = \frac{c}{\lambda}$ ist die Frequenz der Lichtquanten und P die Austrittsarbeit.

Robert Millikan veröffentlichte 1916 die Ergebnisse einer genauen Messung mithilfe der bereits von Lenard verwendeten Gegenspannungsmethode [3] und wies nach, dass die Proportionalitätskonstante zwischen der Energie der Photoelektronen und der Frequenz der Lichtquanten mit dem Planckschen Wirkungsquantum übereinstimmt. Millikan erhielt 1923 den Nobelpreis für Physik für die Bestimmung der Elementarladung und die Untersuchung des Photoeffekts. Nach seinem Tod kam es jedoch zu Vorwürfen der Manipulation von Daten in beiden Experimenten (in Bezug auf den Photoeffekt siehe hierzu [4]).

Bei der Gegenspannungsmethode wird der beleuchteten Kathode eine Anode gegenübergestellt, so dass zwischen beiden Elektroden der Photoelektronenstrom gemessen werden kann. Wird nun eine Gegenspannung U_G angelegt, so muss, um die Anode zu erreichen, die kinetische Energie der in Richtung der Anode aus der Kathode austretenden Elektronen größer sein als der Energieverlust im elektrischen Gegenfeld. Der

Photoelektronenstrom verschwindet daher bei der kompensierenden Gegenspannung U_0 , d. h. wenn $qU_G = qU_0 = E_{kin}$ (mit der Elementarladung q), so dass in diesem Fall aus Gl. (1) und (2) folgt:

$$qU_0 = \frac{hc}{\lambda} - E_A \quad (3)$$

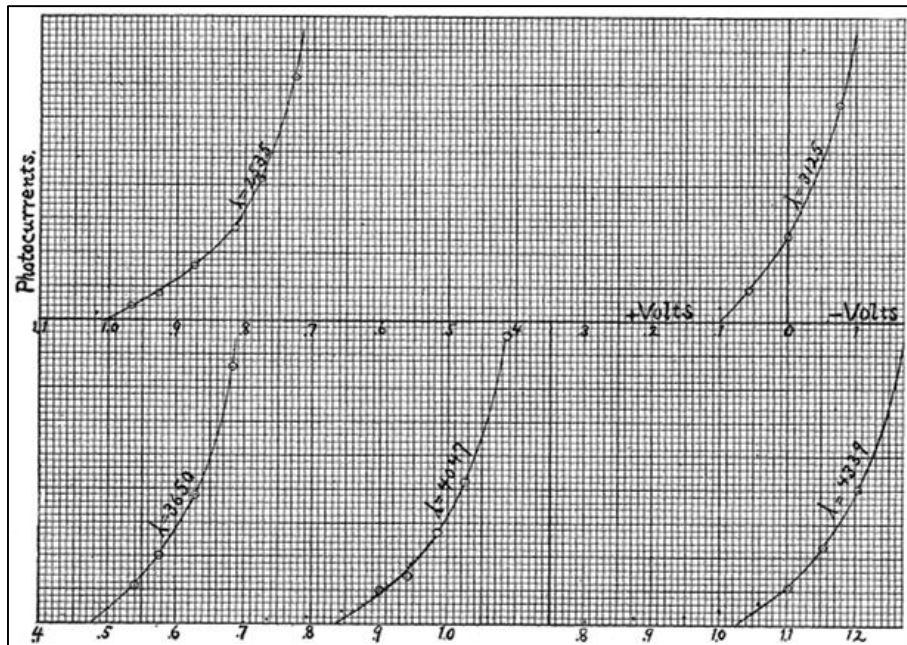


Abb. 3 Diagramm aus Millikans Arbeit zum Photoeffekt [3]. Dargestellt ist der Photoelektronenstrom in Abhängigkeit von der Gegenspannung für verschiedene Lichtwellenlängen.

In einer Auftragung der kompensierenden Gegenspannung in Abhängigkeit von der reziproken Lichtwellenlänge ergibt sich somit eine Gerade, aus deren Anstieg das Plancksche Wirkungsquantum und aus deren Schnittpunkt mit der Ordinatenachse die Austrittsarbeit bestimmt werden kann (bei Kenntnis der Elementarladung und der Lichtgeschwindigkeit). Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die von außen angelegte Spannung U von der Kontaktspannung U_K überlagert wird, wenn Kathode und Anode aus unterschiedlichen Materialien bestehen. Ursache der Kontaktspannung sind die verschiedenen Austrittsarbeiten der beiden Elektroden. Es gilt dann:

$$U_G = U + U_K \quad (4)$$

Während der Einfluss der Kontaktspannung von Millikan ausführlich diskutiert wurde, lag eine Interpretation des gekrümmten Verlaufs der Photoelektronenstrom-Gegenspannung-Kurve noch außerhalb seiner Reichweite. Dieser wird wesentlich von der Energieverteilung der Elektronen im Festkörper bestimmt, für die erst ab 1928 mit dem Bändermodell ein adäquater Zugang zur Verfügung stand. Davon ausgehend lassen sich aus einer Messung der Energieverteilung der Photoelektronen Erkenntnisse über die elektronischen Zustände im Festkörper gewinnen. Dies ist der Grundgedanke der Photoelektronenspektroskopie, für deren Entwicklung ab 1960 Kai Siegbahn den Physik-Nobelpreis des Jahres 1981 erhielt [5].

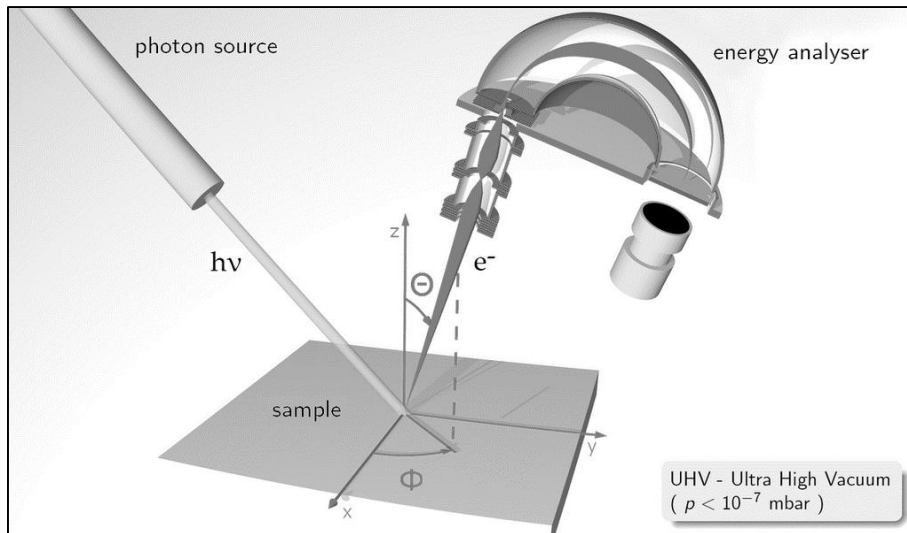


Abb. 4 Schematische Darstellung des Prinzips der winkelaufgelösten Photoelektronenspektroskopie [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:ARPESgeneral.png].

3.2 Modellfunktion für den Photoelektronenstrom

Im Folgenden wird eine Modellfunktion für die Abhängigkeit des Photoelektronenstroms von der Gegenspannung aus der Energieverteilung der Festkörperelektronen unter vereinfachenden Annahmen hergeleitet. Betrachtet wird das bis zur Fermi-Energie E_F gefüllte Leitungsband eines Metalls. Der Nullpunkt der Energieskala liege auf der Unterkante des Leitungsbandes. Die Austrittsarbeit E_A ist die Differenz von Vakuum- und Fermi-Energie.

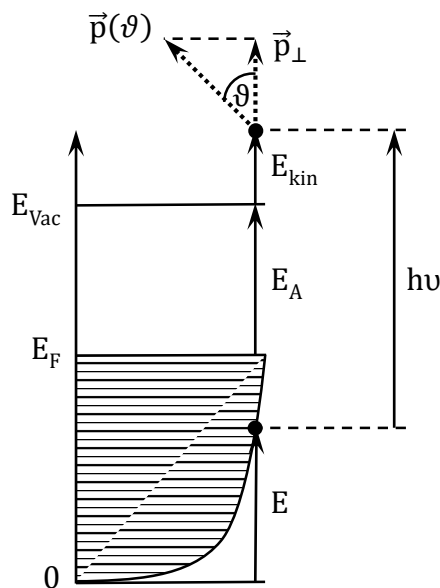


Abb. 5 Schematische Darstellung der Energieskala und des Impulses der austretenden Photoelektronen.

Wird in Einsteins Gleichung für ein Elektron, das von einem Photon der Energie $h\nu$ aus der Kathode herausgelöst wird, die Leitungsbandenergie E des Elektrons berücksichtigt, so ergibt sich für die kinetische Energie nach dem Austritt:

$$E_{kin} = h\nu - E_A - (E_F - E)$$

und für den Impulsbetrag $p = \sqrt{2mE_{kin}}$. Bei Vernachlässigung der Aufweichung der Fermi-Kante bei endlicher Temperatur haben die Elektronen, die bei der Fermi-Energie herausgelöst werden, die höchste kinetische Energie und den maximalen Impulsbetrag:

$$p_{max} = \sqrt{2m(h\nu - E_A)}$$

Damit ein Photoelektron die Gegenspannung $U_G = U + U_K$ überwindet und die Anode erreicht, muss – wenn von parallelen, unendlich ausgedehnten Elektroden ausgegangen wird – die Komponente seines Impulses senkrecht zur Kathodenoberfläche \vec{p}_\perp die Bedingung $p_\perp^2/2m > qU_G$ erfüllen, ihr Betrag muss also den Minimalwert

$$p_{min} = \sqrt{2mqU_G}$$

übersteigen. Für einen gegebenen Impulsbetrag p ist das der Fall, wenn der Winkel zur Oberflächennormalen, unter dem das Elektron austritt, kleiner ist als ϑ_{max} mit:

$$\cos \vartheta_{max} = \frac{p_{min}}{p}$$

Ist \dot{N}_{pe} der Fluss der aus der Kathode herausgelösten Photoelektronen, so ergibt sich der Strom an der Anode I aus der Integration über die Photoelektronen, die die genannten Bedingungen für den Impuls erfüllen:

$$I = q \int_{p_\perp=p_{min}}^{p_\perp=p_{max}} d\dot{N}_{pe}(\vec{p}) = q \int_{p_\perp=p_{min}}^{p_\perp=p_{max}} \frac{d\dot{N}_{pe}(\vec{p})}{d\vec{p}} d\vec{p}$$

Unter der Annahme einer isotropen Impulsverteilung kann zu Kugelkoordinaten übergegangen werden:

$$I = q \int_{p_{min}}^{p_{max}} p^2 dp \int_0^{\vartheta_{max}} \sin \vartheta d\vartheta \int_0^{2\pi} d\varphi \frac{d\dot{N}_{pe}(\vec{p})}{d\vec{p}}$$

$$I = 2\pi q \int_{p_{min}}^{p_{max}} p^2 (1 - \cos \vartheta_{max}) \frac{d\dot{N}_{pe}(\vec{p})}{d\vec{p}} dp$$

Ebenfalls unter der Annahme der Isotropie lässt sich die Impulsverteilung der Photoelektronen durch nochmalige Winkelintegration über die Halbkugel mit der Mantelfläche $2\pi p^2$ auf die Impulsbetragsverteilung zurückführen:

$$\int_0^{\pi/2} \sin \vartheta d\vartheta \int_0^{2\pi} d\varphi p^2 \frac{d\dot{N}_{pe}(\vec{p})}{d\vec{p}} = \frac{d\dot{N}_{pe}(p)}{dp}$$

$$2\pi p^2 \frac{d\dot{N}_{pe}(\vec{p})}{d\vec{p}} = \frac{d\dot{N}_{pe}(p)}{dp}$$

Damit folgt:

$$I = q \int_{p_{min}}^{p_{max}} \left(1 - \frac{p_{min}}{p}\right) \frac{d\dot{N}_{Pe}(p)}{dp} dp$$

Die Impulsbetragsverteilung ergibt sich aus der Energieverteilung:

$$\frac{d\dot{N}_{Pe}(p)}{dp} = \frac{d\dot{N}_{Pe}(p)}{dE_{kin}} \frac{dE_{kin}}{dp} = \frac{d\dot{N}_{Pe}(p)}{dE_{kin}} \frac{p}{m}$$

Wird davon ausgegangen, dass die Energieverteilung der Photoelektronen proportional zur Energieverteilung der Leitungsbandelektronen $dN(E)/dE$ ist, so gilt:

$$\frac{d\dot{N}_{Pe}(p)}{dp} = x \dot{N}_{Ph} \frac{dN(E)}{dE} \frac{p}{m}$$

wobei x die Wahrscheinlichkeit beschreibt, mit der ein Photon aus dem auf die Kathode auftreffenden Photonenfluss \dot{N}_{Ph} ein Photoelektron erzeugt.

Somit wird der Anteil der aus der Kathode herausgelösten Elektronen, die die Anode erreichen, – und damit der Photoelektronenstrom in Abhängigkeit von der Gegenspannung bei einer bestimmten Beleuchtung – unter den gemachten Annahmen von der Verteilung des Impulsbetrages der Photoelektronen bestimmt. Diese kann auf die Energieverteilung der Leitungsbandelektronen zurückgeführt werden, welche das Produkt aus Fermi-Dirac-Verteilung $f(E)$ und Zustandsdichte $D(E)$ ist. Damit und mit der bereits eingeführten Vereinfachung $f(E) = 1$ ergibt sich:

$$I = \frac{q}{m} x \dot{N}_{Ph} \int_{p_{min}}^{p_{max}} (p - p_{min}) D(E) dp$$

Das Integral lässt sich u. a. für die folgenden beiden Annahmen über die Zustandsdichte analytisch lösen:

1. $D(E) = \text{const.}$
2. $D(E) \propto \sqrt{E}$

Daraus ergibt sich eine Gleichung für den Photoelektronenstrom in Abhängigkeit von der Gegenspannung.

3.3 Literatur

- [1] P. Lenard: Ueber die lichtelektrische Wirkung. Annalen der Physik 313 (1902) 149.
- [2] A. Einstein: Ueber einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichts betreffenden heuristischen Gesichtspunkt. Annalen der Physik 322 (1905) 132.
- [3] R. A. Millikan: A Direct Photoelectric Determination of Planck's "h". Physical Review 7 (1916) 355.
- [4] R. G. Keesing: Einstein, Millikan and the Photoelectric Effect. Fusion Newsletters 4 (2001).

[5] K. Siegbahn: Electron Spectroscopy for Atoms, Molecules and Condensed Matter. Nobel Lecture (1981).

Vertiefende Erläuterungen zum Photoeffekt finden sich in allen Lehrbüchern der Festkörperphysik sowie in R. Gross: Vorlesungsskript Physik III, Kapitel 10. (2003) https://www.wmi.badw.de/teaching/Lecturenotes/Physik3/Gross_Physik_III_Kap_10.pdf

4. Hinweise zum Versuch

Das Licht einer Quecksilber-Gasentladungslampe wird von einem Monochromator spektral zerlegt und fällt auf die Kathode eines modifizierten Photoelektronenvervielfachers (im Folgenden: Photomultiplier). Dessen Ausgangsstrom wird mittels eines Messverstärkers in eine proportionale Ausgangsspannung umgewandelt, die mithilfe eines AD/DA-Wandlers computergestützt aufgenommen werden kann. Die Gegenspannung wird mittels eines Trennverstärkers angelegt, der gleichzeitig die Hochspannung für den Photomultiplier liefert. Der Gegenspannungsausgang kann mithilfe des AD/DA-Wandlers vom Computer gesteuert werden.

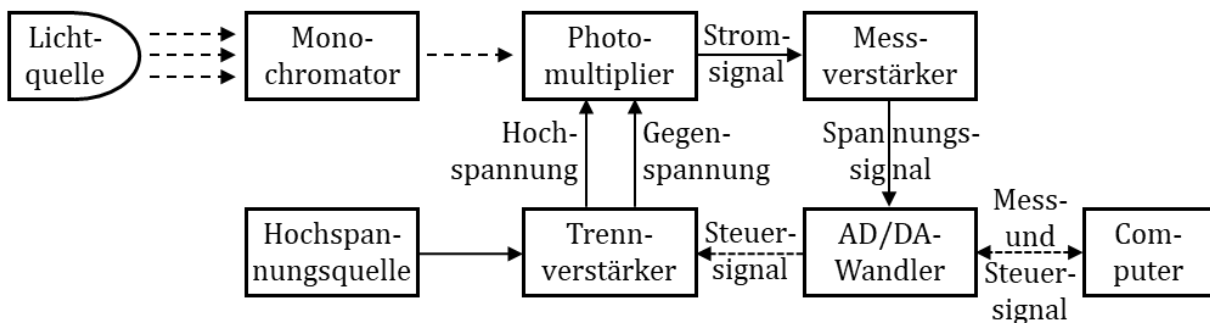


Abb. 6 Blockschaltbild des Versuchsaufbaus

4.1 Zu den Geräten

Lichtquelle

Die Quecksilber-Gasentladungslampe wird über eine Vorschaltdrossel direkt mit 230 V Netzspannung betrieben, wodurch die Lichtintensität und somit auch das Messsignal mit 100 Hz pulsieren. Letzteres wird nach dem Messverstärker (s. u.) mittels einer zweistufigen RC-Sieb-kette geglättet.

Vorsicht! Die Lampe wird im Betrieb sehr heiß.

Monochromator

Bei dem Monochromator handelt es sich um einen historischen Prismen-Monochromator, der in den 1920er Jahren von der Firma Carl Zeiss in Jena hergestellt wurde. Das Gerät ist ein Einfach-Monochromator und mit einem Flintglasprisma ausgerüstet. Die Drehung des Prismas zur Einstellung der Wellenlänge erfolgt durch eine Trommel, die eine spiralförmige Nut mit Winkelskala enthält.

Der ursprüngliche, manuelle Antrieb wurde durch einen Stellmotor ersetzt. Mit der Motorachse ist über eine Rutschkupplung ein Potentiometer verbunden, das in einen Spannungsteiler geschaltet ist, so dass der Spannungsabfall über dem Potentiometer

ein Maß für den Drehwinkel des Stellmotors ist. Überschreitet der Betrag des Spannungsabfalls am Potentiometer 9,8 V, so wird die Verbindung zur Motorachse unterbrochen und eine vorhergehende Kalibrierung wird hinfällig.

Achtung! Der Drehwinkel der Trommel darf den Bereich zwischen 0° und 15° nicht verlassen.

Der zulässige Bereich für die Spannung am Stellmotor ist ±8 V.

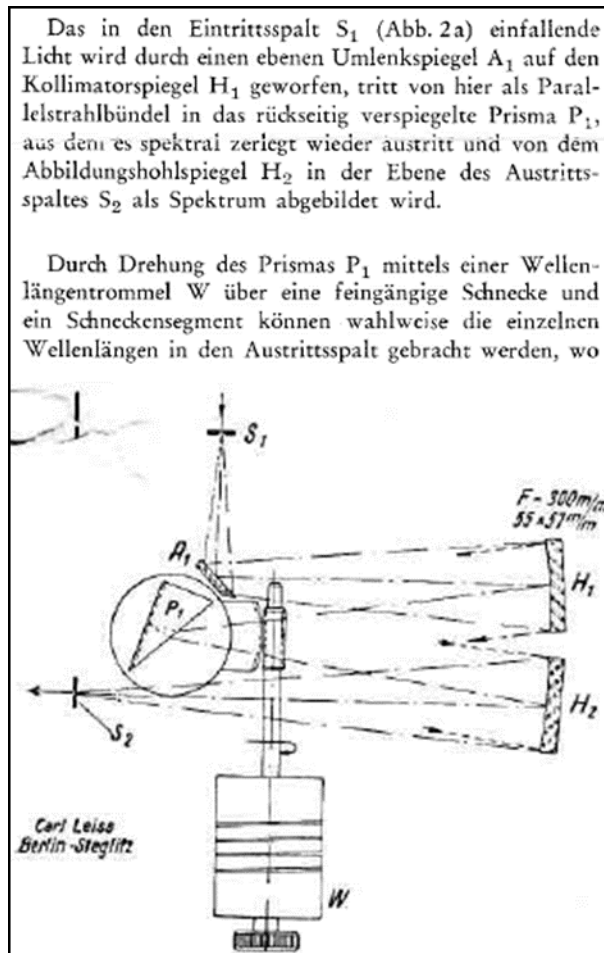


Abb. 7 Aufbau und Funktion des Prismen-Monochromators [Auszug aus der Gerätebeschreibung des Herstellers].

Die Gerätebeschreibung des Herstellers enthält eine graphische Darstellung der spektralen Durchlässigkeit der verwendeten Prismen, die in digitalisierter Form vorliegt. Die Kurven beginnen jedoch erst bei 420 nm; für den sich anschließenden kurzwelligen Bereich kann die empirische Formel

$$\text{spektrale Durchlässigkeit} = 16,25 \% + 9,07 \% \cdot \arctan\left(\frac{\lambda/\text{nm} - 401,2}{20}\right)$$

verwendet werden.

Entfernung und Winkel der Anordnung Lichtquelle – Monochromator sowie die Breiten von Eingangs- und Ausgangsspalt des Monochromators sind so zu optimieren, dass scharfe Spektrallinien mit hoher Intensität auf den Photomultiplier abgebildet werden.

Photomultiplier

Der Photoelektronenvervielfacher mit der Typbezeichnung M10FQS29 wurde in den 1970er Jahren im Werk für Fernsehelektronik Berlin hergestellt und enthält ein UV-durchlässiges Quarz-Eintrittsfenster, das auf der Innenseite mit einer Antimon-Caesium-Legierung beschichtet ist. Dieses Material ist aufgrund seiner niedrigen Austrittsarbeit von ca. 1,2 eV für die Erzeugung von Photoelektronen geeignet und bildet die sogenannte Photokathode.

Die Elektronenvervielfachung wird mithilfe von zehn Dynoden erreicht, an die über eine parallele Widerstandskette eine Hochspannung aufgeteilt wird, so dass zwischen benachbarten Dynoden ein elektrisches Feld die Elektronen beschleunigt. Die Dynoden sind mit einer Aluminium-Magnesium-Legierung beschichtet, von der je auftreffendem Elektron ca. vier Sekundärelektronen erzeugt werden. Diese und weitere Einzelheiten können der Dokumentation des Herstellers entnommen werden, darunter eine graphische Darstellung der spektralen Empfindlichkeit (Bild 9), die in digitalisierter Form vorliegt.

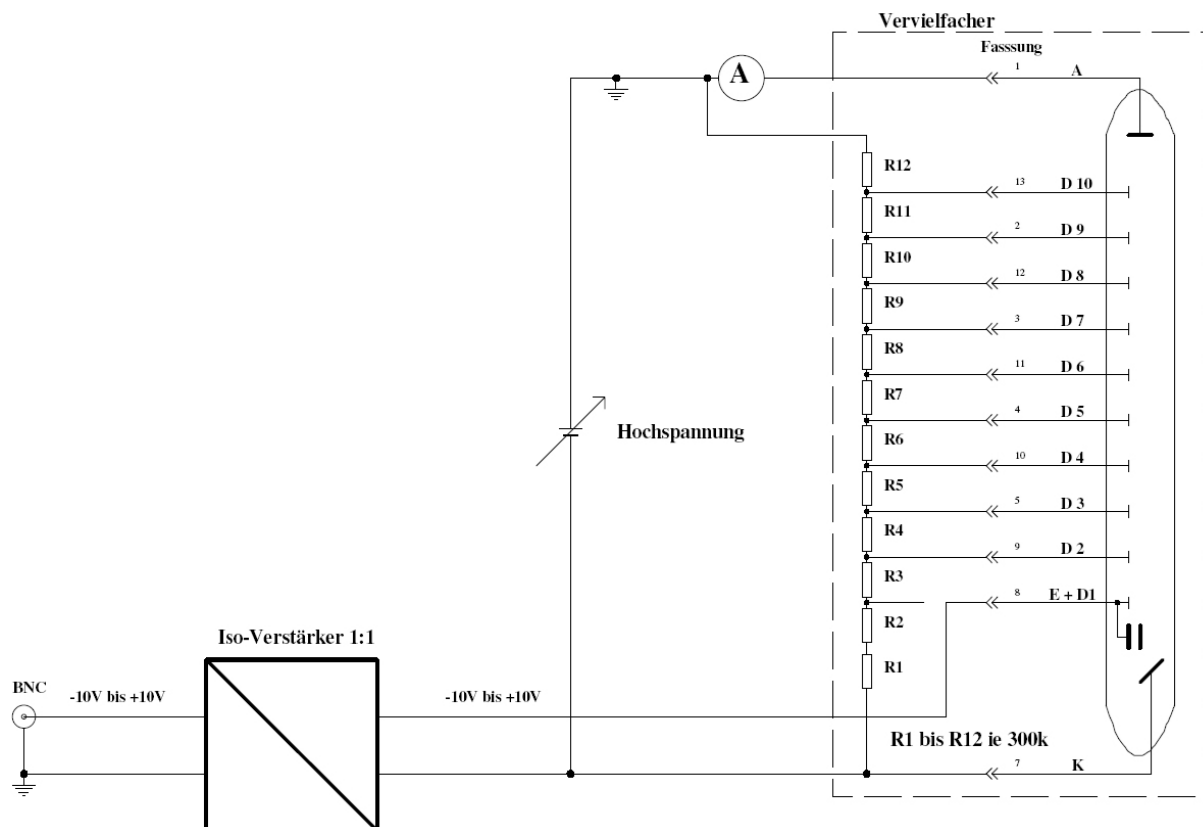


Abb. 8 Beschaltung des Photomultipliers.

Für den Versuch wurde der Photomultiplier modifiziert, indem die erste Dynode von der Hochspannung abgetrennt wurde, damit über einen Trennverstärker (wegen des gemeinsamen Bezugs auf die Kathode) die Gegenspannung angelegt werden kann. Die Größe der Gegenspannung wird durch Anlegen einer gleich großen Spannung am Steuereingang des Trennverstärkers eingestellt.

Vorsicht! Hochspannung! Überprüfen Sie vor dem Einschalten auf einwandfreie Verbindungen zwischen Hochspannungsquelle, Trennverstärker und Photomultiplier. Manipulieren Sie diese Verbindungen nicht.

Achtung! Die Hochspannung darf nur eingeschaltet werden, wenn das Monochromatorgehäuse geschlossen ist und auch auf andere Weise kein Streulicht den Photomultiplier erreichen kann, da dieser sonst überlastet und beschädigt werden kann.

Vor dem Ausschalten der Hochspannung sollte diese auf ca. 0,5 kV verringert werden, damit beim nächsten Einschaltvorgang nicht die volle Hochspannung anliegt. Dadurch wird die Belastung der versorgten Geräte reduziert und deren Lebensdauer verlängert. Nach dem Einschalten ist die Hochspannung auf 1,0 kV einzustellen.

Der zulässige Spannungsbereich des Steuereingangs des Trennverstärkers ist ± 10 V.

Messverstärker

Der Messverstärker ist so in Anordnung geschaltet, dass er eine zum Ausgangsstrom des Photomultipliers proportionale, negative Ausgangsspannung (Ⓢ) erzeugt. Deren Wert in Volt ergibt sich als Quotient aus dem Eingangsstrom (ⓐ) und der eingestellten Verstärkung (Ⓢ unter „A“). Der Betrag der Ausgangsspannung sollte im Linearitätsbereich des Messverstärkers zwischen 0,3 und 3 V liegen. Die Ausgangsspannung wird, wie oben erwähnt, mittels einer zweistufigen RC-Siebkette geglättet.

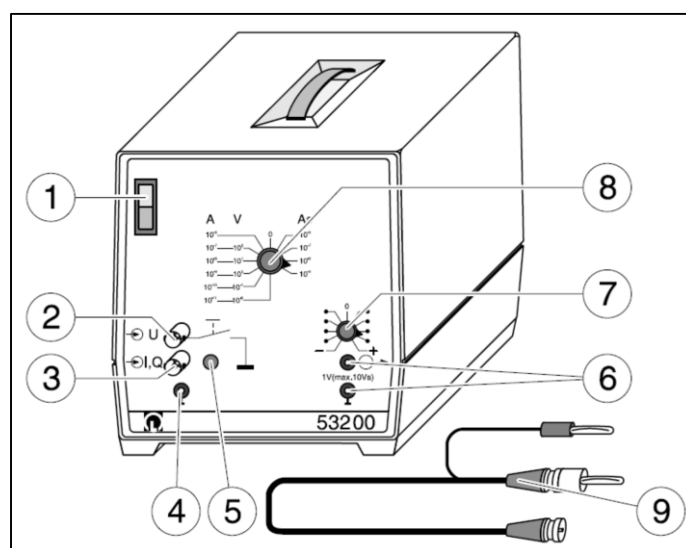


Abb. 9 Bedienelemente des Messverstärkers [Abbildung aus der Bedienungsanleitung des Herstellers].

Der Messverstärker sollte zu Beginn des Versuchs angeschaltet werden (①), um warmlaufen zu können. Vor der Messung sollte der Nullpunkt der Ausgangsspannung justiert werden (⑦), indem der Eingang mit der dafür vorgesehenen Taste (⑤) auf Masse gelegt wird.

AD/DA-Wandler

Zur digitalen Erfassung der Messsignale stehen zwei Optionen zur Verfügung.

Der Datenlogger DS1M12 digitalisiert Spannungssignale auf zwei Kanälen mit einer Auflösung von 12 bit und einer Datenrate von 1 MSample/s. Er wird über USB mit dem Computer verbunden; die Datenaufnahme erfolgt mit der Software „EasyLogger“. Die Maximalwerte für beide Kanäle sollten jeweils so gewählt werden, dass die Auflösung möglichst gut ausgenutzt wird.

Am Vielkanal-AD/DA-Wandler USB-6211 sind in der vorliegenden Konfiguration vier analoge Eingänge (AI) und zwei analoge Ausgänge (AO) beschalten. Die Eingangssignale werden mit 16 bit Auflösung und 250 kSamples/s digitalisiert; die Ausgänge liefern maximal ± 10 V. Das Gerät wird über USB mit dem Computer verbunden; zur Ansteuerung sind LabView-VI's vorhanden, die in eigenen Messprogrammen verwendet werden können. Als Ausgangspunkt für die Programmierung kann das folgende Programmbeispiel verwendet werden.

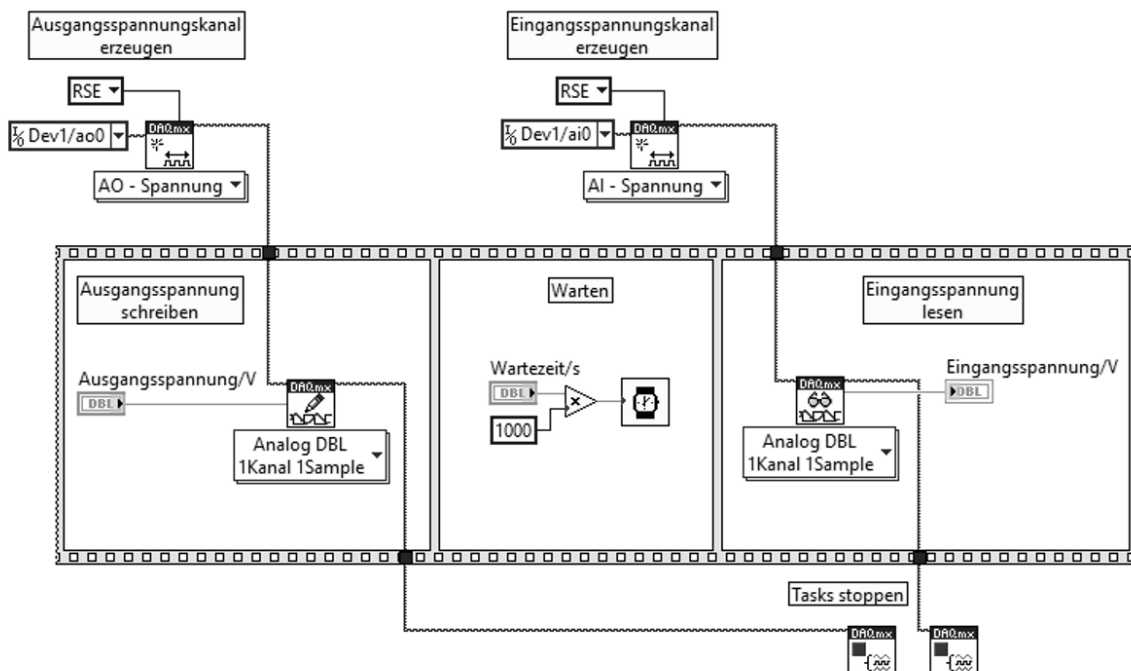


Abb. 10 Beispielprogramm zur Ansteuerung des AD/DA-Wandlers USB 6211. Mithilfe der entsprechenden Geräte-VI's erzeugt das Programm Kanäle für Eingangs- und Ausgangsspannung, gibt die Ausgangsspannung aus, liest nach einer Wartezeit die Eingangsspannung und stoppt anschließend beide Kanäle.

4.2 Zu den Aufgaben

Zu Aufgabe 1

Zu messen sind das Ausgangssignal des Messverstärkers als Maß für den Photoelektronenstrom und die Potentiometerspannung als Maß für die Wellenlänge. Für einen Überblick kann das Spektrum schnell durchfahren werden (zulässige Bereiche für Drehwinkel, Potentiometer- und Motorspannung beachten); zur detaillierten Aufnahme des Spektrums sollte eine geringe Drehgeschwindigkeit gewählt werden (Motorspannung ca. 2 V).

Zur Wellenlängen-Kalibrierung sind die gefundenen Spektrallinien solchen aus der Literatur zuzuordnen (z. B. aus der im Internet frei zugänglichen NIST Atomic Spectra Database). Die Bereiche des Spektrums zwischen den Linien sind durch geeignete Funktionen zu interpolieren. Anschließend ist das Spektrum mit der spektralen Durchlässigkeit des Monochromators und der spektralen Empfindlichkeit des Photomultipliers zu korrigieren. Geben Sie das korrigierte Spektrum in Form von positiven, relativen Intensitäten wieder. Der Vergleich mit der Literatur ergibt keine genaue Übereinstimmung, da insbesondere die relativen Linienintensitäten vom Quecksilber-Partialdruck abhängen.

Zu Aufgabe 2

Zu messen ist der zum Photoelektronenstrom proportionale Ausgangsstrom des Photomultipliers in Abhängigkeit von der Gegenspannung bei Beleuchtung des Photomultipliers mit den einzelnen Spektrallinien. Achten Sie auf eine dichte Verteilung der Messpunkte über alle Bereiche der aufgenommenen Kurve.

Die Gegenspannung lässt sich manuell mit einem Labornetzteil anlegen; alternativ kann hierfür ein Analogausgang des AD/DA-Wandlers verwendet werden. Im letzteren Fall kann gleichzeitig das Messsignal auf einem der Eingänge und somit die gesamte Messkurve automatisiert aufgenommen werden. Dazu muss ein einfaches LabView-Programm erstellt oder, wenn bereits für Aufgabe 1 verwendet, modifiziert werden.

Vor der Bestimmung des Planckschen Wirkungsquantums muss eine Korrektur der Messkurven vorgenommen werden, da das Messsignal im Bereich hoher (negativer) Gegenspannungen nur langsam und annähernd linear abfällt. Geben Sie an, welche Ursache für dieses Verhalten verantwortlich ist. Ziehen Sie einen linearen Fit des entsprechenden Bereichs von den Messdaten ab und stellen Sie die korrigierte Messkurve in Form von positiven Stromwerten dar.

Aus den korrigierten Messkurven soll das Plancksche Wirkungsquantum auf drei verschiedene Weisen bestimmt werden.

1. Millikans Methode: Verwenden Sie den Wert der Gegenspannung, bei der der Photoelektronenstrom verschwindet. Entwickeln Sie hierfür ein geeignetes Kriterium aus der Messgenauigkeit.
2. Klassische Methode: Verwenden Sie den Schnittpunkt eines linearen Fits im Bereich niedriger Gegenspannungen mit der Abszissenachse.
3. Modellfunktion mit $D(E) = \text{const.}$: Fitten Sie den Krümmungsbereich der Messkurven mit der für den Fall konstanter Zustandsdichte hergeleiteten Funktion.

Zusatzaufgabe. Modellfunktion mit $D(E) \propto \sqrt{E}$: Fitten Sie den Krümmungsbereich unter Verwendung der mit der Zustandsdichte quasifreier Elektronen hergeleiteten Funktion. Die Integration des in Abschnitt 3.2 hergeleiteten Zusammenhangs führt in diesem Fall auf einen umfangreichen Ausdruck, der sich durch eine Taylor-Entwicklung vereinfachen lässt. Überlegen Sie dazu, wie sich p_{min} und p_{max} im Krümmungsbereich verhalten.

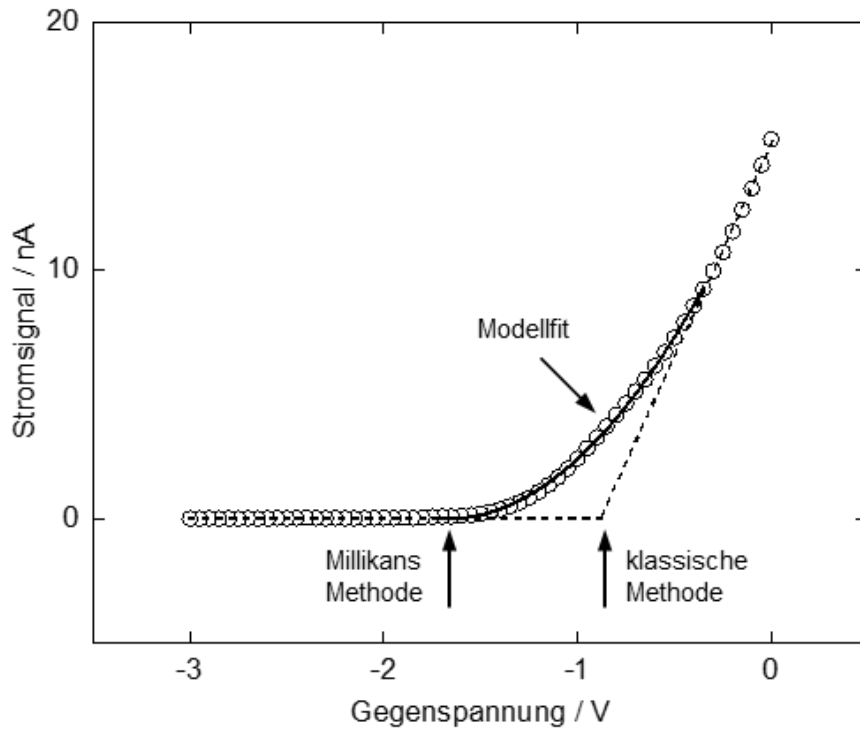


Abb. 11 Verschiedene Ansätze zur Bestimmung des Planckschen Wirkungsquantums mit der Gegenspannungsmethode.

Erläutern Sie kurz die wesentlichen Schritte der Herleitung der Modellfunktion, geben Sie die gemachten Annahmen wieder und diskutieren Sie deren Anwendbarkeit.

Aus einer Auftragung der Fitparameter bzw. der Werte der Gegenspannungen über die reziproke Wellenlänge lassen sich das Plancksche Wirkungsquantum, die Austrittsarbeit und die Kontaktspannung bestimmen. Geben Sie für die ermittelten Werte Fehlerabschätzungen an. Vergleichen und diskutieren Sie die Ergebnisse. Entsprechen sie den Erwartungen?