



Martin-Luther-Universität  
Halle-Wittenberg  
Institut für Physik

## Fortgeschrittenen- Praktikum

Stand der Anleitung:  
28.03.2024



# Versuch B02: Photoeffekt

## 1. Aufgaben

1. Untersuchen Sie das Linienspektrum einer Quecksilber-Gasentladungslampe.
  - a) Nehmen Sie das Lampenspektrum mittels Prismenmonochromator und Photomultiplier (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 Photomultiplier. 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 Photomultiplier 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 führt man die von Einstein verwendete Größe  $\beta$  zurück?

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 wird mithilfe der Gegenspannungsmethode das Plancksche Wirkungsquantum bestimmt?

Welche Methoden existieren noch zur Bestimmung des Planckschen Wirkungsquantums?

Worin besteht der Grundgedanke der Photoelektronenspektroskopie?

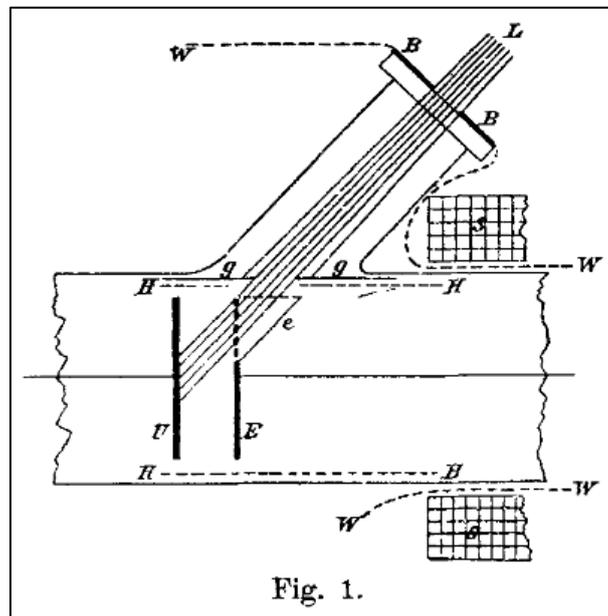
## 3. Grundlagen

### 3.1 Äußerer Photoeffekt

Durch die Bestrahlung eines Festkörpers mit Licht werden Elektronen herausgelöst. Dieser Vorgang wird als äußerer photoelektrischer Effekt - kurz „Photoeffekt“ - bezeichnet und die austretenden Ladungsträger als Photoelektronen. 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 vom bestrahltem Material abhängt, 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 Elektronen, die aus Elektroden austreten und „Kathodenstrahlen“ genannt werden. Er diskreditierte sich jedoch später nachhaltig durch sein Eintreten für eine rassistische „Deutsche Physik“ und seine antisemitisch motivierte Ablehnung von Albert Einsteins Relativitätstheorie.



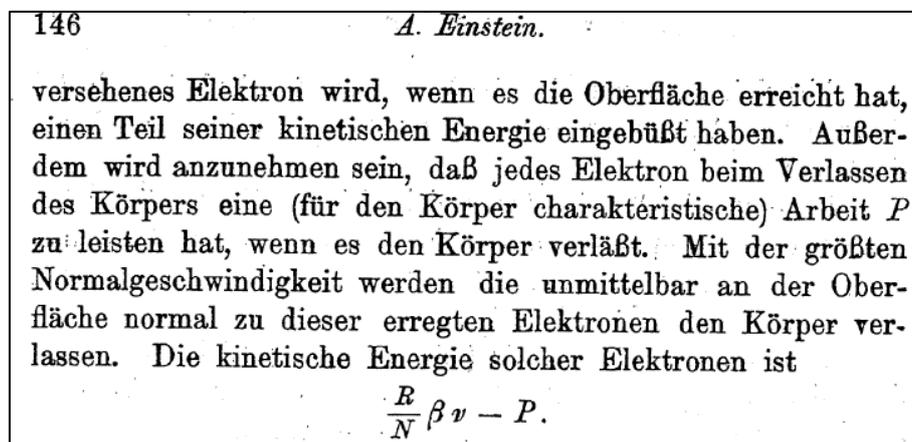
**Abb. 1** Versuchsanordnung von Lenard aus [1]. U ist die beleuchtete Kathode und E die Anode.

Einstein lieferte 1905 die Erklärung 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 Geschwindigkeit ausbreiten, die von ihrer Energie unabhängig ist. In Anlehnung an Max Plancks Theorie der Wärmestrahlung nannte er sie „Lichtquanten“. Die Energie  $E_{Ph}$  der Lichtquanten, die man später Photonen nannte, hängt über das Plancksche Wirkungsquantum  $h$  von der Frequenz  $\nu$  ab und damit über die Lichtgeschwindigkeit  $c$  von der Wellenlänge  $\lambda$ :

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

Um Elektronen aus der Materialoberfläche herauszulösen ist eine Mindestenergie, die Austrittsarbeit  $E_A$ , erforderlich. Die darüber hinausgehende Energie der Photonen verbleibt bei den Elektronen als kinetische Energie  $E_{kin}$ :

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



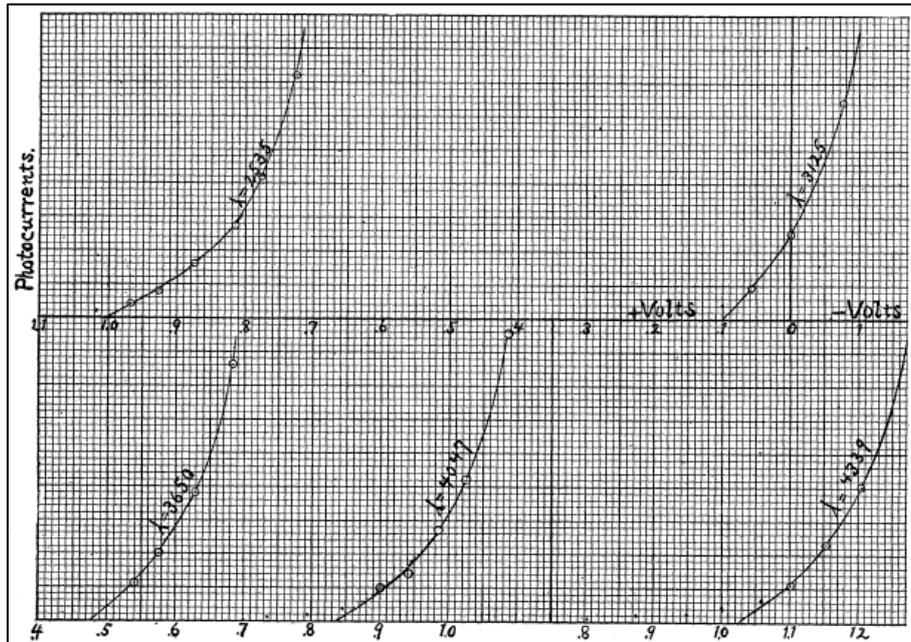
**Abb. 2** Auszug aus Einsteins Erklärung des Photoeffekts [2]. Das Plancksche Wirkungsquantum wird hier in der Form  $\frac{R}{N}\beta$  wiedergegeben ( $R$  ist die Gaskonstante,  $N$  die Avogadro-Zahl),  $\nu = \frac{c}{\lambda}$  ist die Frequenz der Lichtquanten und  $P$  die Austrittsarbeit.

Robert Millikan veröffentlichte 1916 die Ergebnisse einer genauen Messung mithilfe der Gegenspannungsmethode, die bereits von Lenard verwendet wurde [3]. Er 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. Die komplexen Details des Effekts, die experimentelle Ausführung des Versuchs und die Auswertung der Daten werden aber nach wie vor erforscht [4].

Bei der Gegenspannungsmethode wird der beleuchteten Kathode eine Anode gegenübergestellt, so dass zwischen den beiden Elektroden der Photoelektronenstrom gemessen werden kann. Wird nun eine Gegenspannung  $U_G$  zwischen Kathode und Anode angelegt, so muss die kinetische Energie der Elektronen größer sein als der Energie-

verlust im elektrischen Gegenfeld zwischen Kathode und Anode. 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:

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

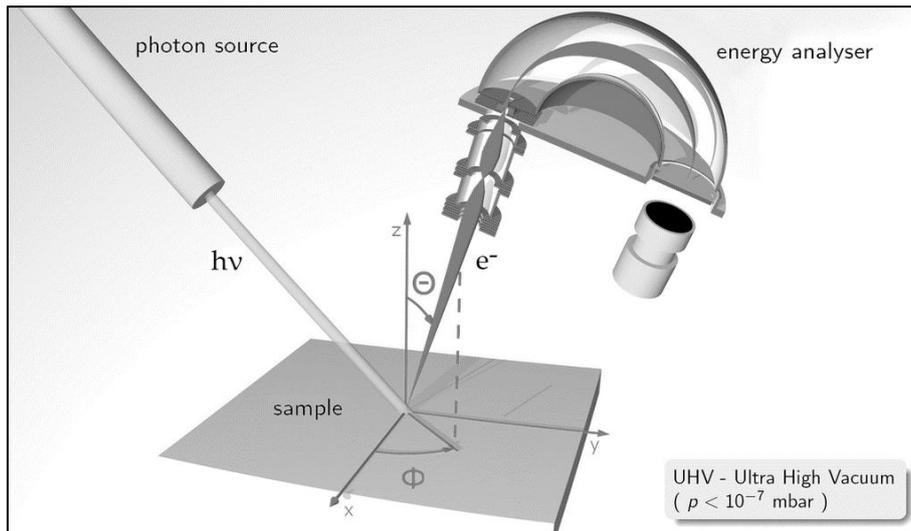


**Abb. 3** Diagramm aus Millikans Arbeit zum Photoeffekt [3]. Dargestellt ist der Photoelektronenstrom in Abhängigkeit von der Gegenspannung für 5 Lichtwellenlängen.

Trägt man die kompensierenden Gegenspannung gegen die reziproke Lichtwellenlänge auf, erhält man 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 ist der Unterschied der Austrittsarbeiten der beiden Elektroden. Es gilt dann:

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

Während der Einfluss der Kontaktspannung von Millikan ausführlich diskutiert wurde, konnte der gekrümmte Verlauf der Photoelektronenstrom-Gegenspannung-Kurve noch nicht erklärt werden. Dieser Verlauf wird wesentlich von der Energieverteilung der besetzten Elektronenzustände im Festkörper bestimmt, die erst ab 1928 mit dem Bändermodell adäquat theoretisch beschrieben wurde. Einen experimentellen Zugang zur Bandstruktur von Festkörpern erhält man aus Energie- und Winkelverteilung von Photoelektronen, der winkelaufgelösten Photoelektronenspektroskopie (Abb. 4). Für deren Entwicklung ab 1960 erhielt im Jahr 1981 Kai Siegbahn den Physik-Nobelpreis [5].

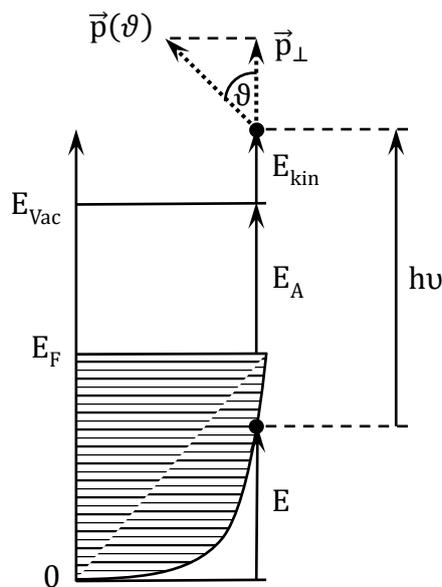


**Abb. 4** Prinzip der winkelaufgelösten Photoelektronenspektroskopie

[<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. Für die Herleitung wird der Nullpunkt der Energieskala nicht auf die Fermi-Energie gelegt, sondern auf die Unterkante des Leitungsbandes. Die Austrittsarbeit  $E_A$  ist die Differenz von Vakuum- und Fermi-Energie.



**Abb. 5** Schematische Darstellung der Energien und des Impulses der 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  $\vartheta_{max}$  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 Elektronen, die aus der Kathode herausgelöst werden und 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 führt man auf die Energieverteilung der Leitungsbandelektronen zurück, die 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

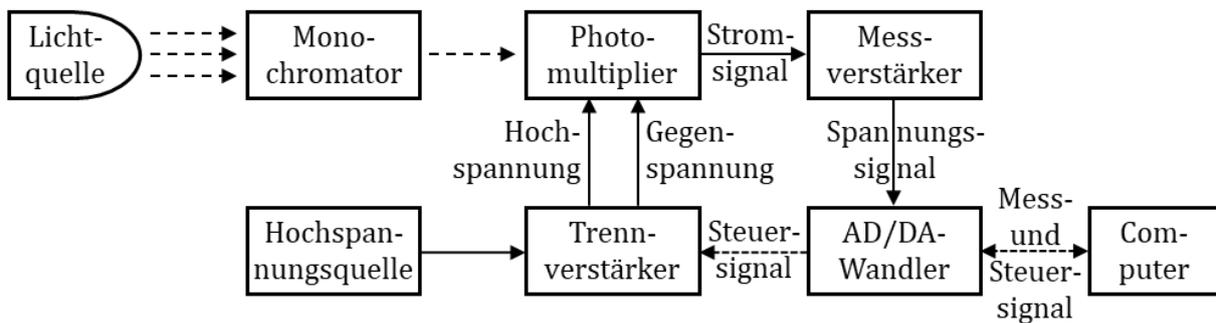
- [1] P. Lenard: Ueber die lichtelektrische Wirkung. Annalen der Physik **313** (1902) 149.
- [2] A. Einstein: Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichts betreffenden heuristischen Gesichtspunkt. Annalen der Physik **322** (1905) 132.
- [3] R. A. Millikan: A Direct Photoelectric Determination of Planck's "h". Physical Review **7** (1916) 355.
- [4] R. G. Keesing: The measurement of Planck's constant using the visible photoelectric effect. Eur. J. Phys. **2** (1981) 139-149.

[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](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 Photomultiplier. Dessen Ausgangsstrom wird mittels eines Messverstärkers in eine proportionale Ausgangsspannung umgewandelt, die mithilfe eines AD/DA-Wandlers computergestützt aufgenommen wird. Die Gegenspannung wird mittels eines Trennverstärkers angelegt, der gleichzeitig die Hochspannung für den Photomultiplier liefert. Der Gegenspannungsausgang wird mithilfe des AD/DA-Wandlers vom Computer gesteuert.



**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.

Nach dem Ausschalten muss die Lampe ca. 5 Minuten abkühlen, bevor sie wieder eingeschaltet werden kann.

**Achtung!** Die Lampe wird im Betrieb sehr heiß, das Gehäuse entsprechend.

#### Monochromator

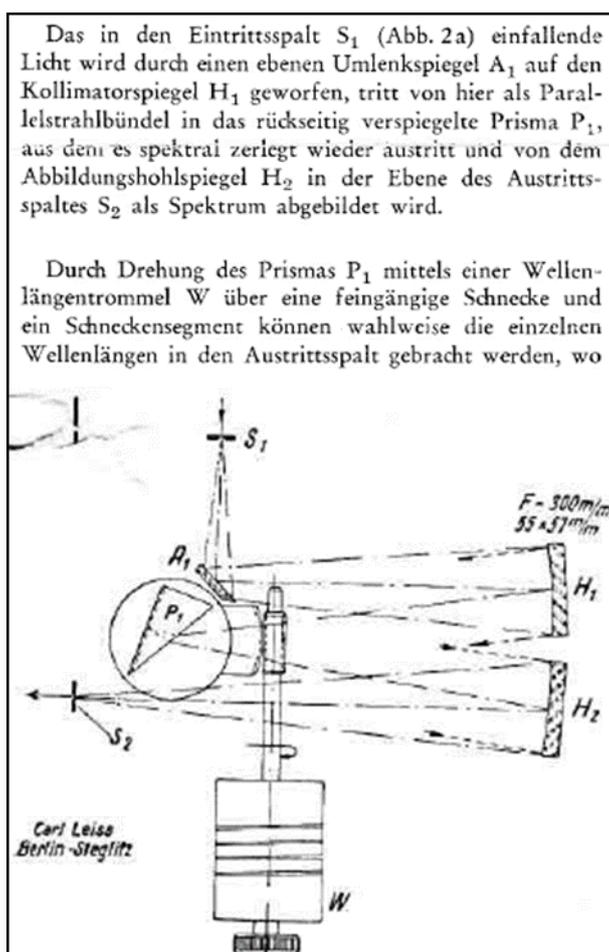
Bei dem Monochromator handelt es sich um einen Prismen-Monochromator, der in den 1920er Jahren von der Firma Carl Zeiss in Jena hergestellt wurde. Das Gerät ist ein Einfach-Monochromator mit einem Prisma aus Flintglas. Die Drehung des Prismas zur Einstellung der Wellenlänge erfolgt durch eine Trommel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

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.

Die maximal zulässige Spannung am Stellmotor ist 8 V, die minimal nutzbare 2,5 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 des verwendeten Prismas. Die Kurve beginnt jedoch erst bei 420 nm. Für den anschließenden kurzwelligen Bereich wird die empirische Formel verwendet:

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

Die Kombination der zwei Kurven liegt in digitalisierter Form vor.

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 und die Messbereiche des Messverstärkers und des AD/DA-Wandlers nicht überschreiten.

### Photomultiplier

Der Photomultiplier 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 der Halbleiterverbindung Caesiumantimonid ( $\text{Cs}_3\text{Sb}$ ) beschichtet ist. Dieses Material ist aufgrund seiner niedrigen Austrittsarbeit von ca. 1,2 eV für die Erzeugung von Photoelektronen geeignet und bildet die Photokathode.

Die Elektronenvervielfachung wird mithilfe von zehn Dynoden erreicht, an die über eine 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 pro auftreffendem Elektron ca. vier Sekundärelektronen erzeugt werden. Diese und weitere Einzelheiten können der Dokumentation des Herstellers entnommen werden. Die Dokumentation enthält auch eine graphische Darstellung der spektralen Empfindlichkeit, die in einem Projektversuch korrigiert wurde. Die korrigierte Kurve liegt ebenfalls in digitalisierter Form vor.

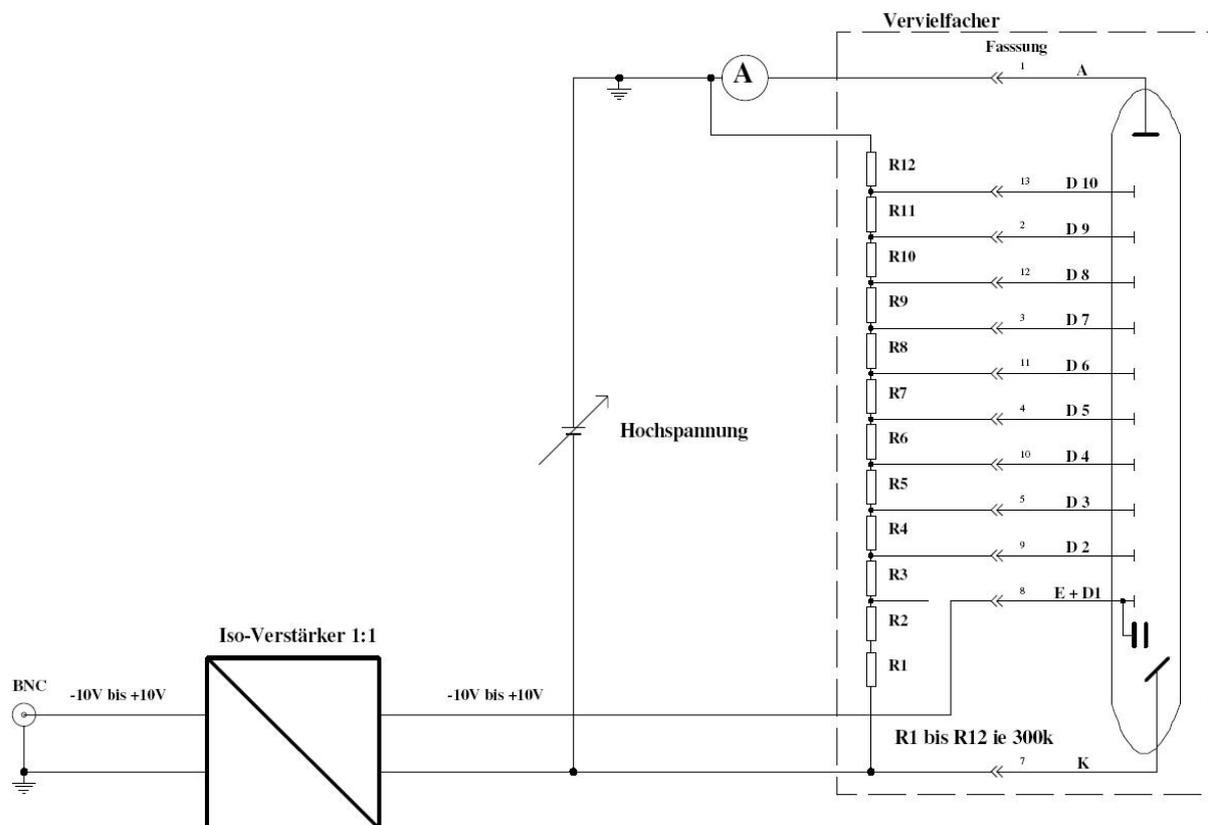


Abb. 8 Beschaltung des Photomultipliers.

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. 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.

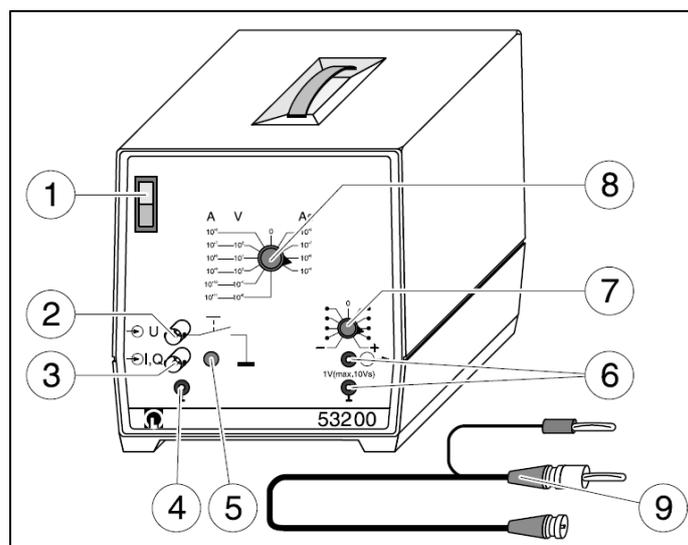
**Achtung!** Die Hochspannung darf nur eingeschaltet werden, wenn das Monochromatorgehäuse geschlossen ist und auch auf andere Weise kein Streulicht den Photomultiplier erreicht, da dieser sonst überlastet und beschädigt wird.

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  $\pm 10$  V.

### Messverstärker

Der Messverstärker dient als Strom/Spannungswandler, der den Ausgangsstrom des Photomultipliers in eine proportionale, negative Ausgangsspannung (Ⓢ) umsetzt. Die Ausgangsspannung in Volt ergibt sich als Quotient aus dem Eingangsstrom (Ⓢ) und der eingestellten Verstärkung (Ⓢ unter „A“). Der Betrag der Ausgangsspannung sollte im linearen Bereich 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 (ⓐ), damit er warm läuft. Vor der Messung wird der Nullpunkt der Ausgangsspannung justiert (ⓑ), indem der Eingang mit der dafür vorgesehenen Taste (ⓒ) auf Masse gelegt wird.

### **AD/DA-Wandler**

Zur digitalen Erfassung der Messsignale stehen zwei Optionen zur Verfügung.

Das Spektrum der Quecksilber-Gasentladungslampe wird mit dem Datenlogger DS1M12 aufgenommen. Er digitalisiert Spannungssignale auf zwei Kanälen (Ausgangsspannungen des Messverstärkers und des Potentiometers für die Drehung) 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) beschaltet. Die Eingangssignale werden mit 16 bit Auflösung und 250 kSamples/s digitalisiert; die Ausgänge liefern maximal  $\pm 10$  V. Das Gerät wird über USB mit dem Computer verbunden; zur Ansteuerung muss entweder ein LabView- oder ein Python-Programm erstellt werden, wofür jeweils Beispielprogramme als Ausgangspunkt zur Verfügung stehen.

## **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 wird das Spektrum schnell durchfahren (zulässige Bereiche für Drehwinkel, Potentiometer- und Motorspannung beachten); die Aufnahme des finalen Spektrums erfolgt mit möglichst geringer Drehgeschwindigkeit (Motorspannung ca. 2,5 V).

Zur Wellenlängen-Kalibrierung sind die Spektrallinien im Spektrum solchen aus der Literatur zuzuordnen (siehe 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.

Für die automatische Aufnahme der Kurve wird der Analogausgang des AD/DA-Wandlers für die Gegenspannung und ein Eingang für das Mess-Signal verwendet. Ein entsprechendes LabView-Programm liegt vor und muss allenfalls leicht 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.

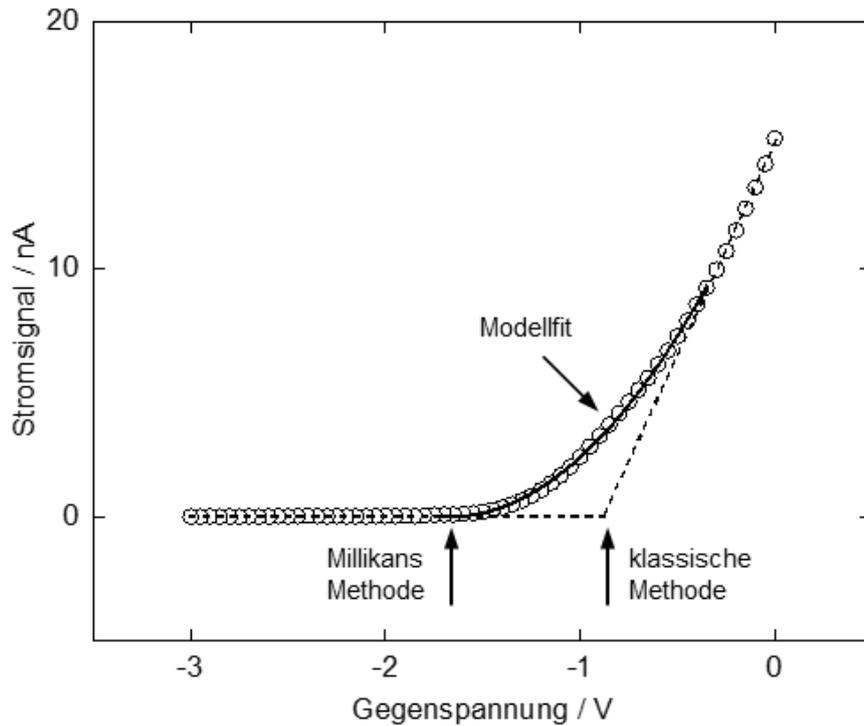
Aus den korrigierten Messkurven soll das Plancksche Wirkungsquantum auf drei verschiedene Weisen bestimmt werden (siehe Abb. 10).

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. 10** 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 bestimmt man das Plancksche Wirkungsquantum, die Austrittsarbeit und die Kontaktspannung. Geben Sie für die ermittelten Werte Fehlerabschätzungen an. Vergleichen und diskutieren Sie die Ergebnisse. Entsprechen sie den Erwartungen?