

Versuch AP7
Bestimmung des Planckschen Wirkungsquantums

6.2015 / AP3-Ch, 4.97/7.06

I. Zielsetzung des Versuchs

In diesem Versuch wird eine Photozelle (mit Meßverstärker) mit verschiedenen Spektrallinien einer Quecksilberdampfampe beleuchtet, um einen Vergleich zwischen klassischer Theorie und Quantentheorie durchzuführen. Außerdem wird das Verhältnis h/e und hieraus die *Plancksche Konstante* h bestimmt.

In ergänzenden Versuchsteilen können Sie dann umgekehrt aus der Stoppspannung die Wellenlänge des Lichts verschiedenfarbiger Leuchtdioden bestimmen.

Außerdem schätzen Sie die Quantenausbeute der Photozelle und die Lichtleistung der Quecksilber-Spektrallinien unter Verwendung einer Halbleiter-Photodiode ab.

II. Vorkenntnisse

Quantennatur des Lichtes, Welle-Teilchen-Dualismus und Verständnis des Photoeffekts im Teilchenbild, Energie eines Photons, Einstein'sche Gleichung, Einfluß von Intensität und Wellenlänge des Lichts auf den Photoeffekt, Gegenfeldmethoden, Kontaktpotential, Austrittsarbeit von Elektronen, Aufbau einer Photozelle.

Allgemeines Verständnis der Funktionsweise von Halbleiter-Photodiode und Leuchtdiode. Begriff der Strahlungsleistung (Lichtleistung) pro Fläche.

Literatur:

GERTHSEN: Physik, Kap. 8.1.2 (bei 14. Aufl.)

FINKELNBURG: Einführung in die Atomphysik II, 7, IV, 2

BERGMANN-SCHAEFER: Band III, VII; 1 – 6

ALONSO-FINN: Band III, S. 11 – 14

POHL: III, 11. Aufl., Kap. 147 – 149

III. Theorie zum Versuch

1) Einführung

Die Emission und Absorption von Licht war früh ein Forschungsgebiet von Max Planck. Bei dem Versuch, eine Theorie zu formulieren, die die Spektralverteilung von emittiertem Licht auf der Grundlage des klassischen Wellenmodells erklärt, geriet er in erhebliche Schwierigkeiten. Die klassische Theorie (das Rayleigh-Jeans-Gesetz) sagt voraus, daß die Lichtmenge, die von einem schwarzen Körper emittiert wird, dramatisch ansteigen würde, wenn die Wellenlänge kürzer wird. Demgegenüber zeigt das Experiment, daß die Energie gegen Null geht. Diese Diskrepanz wurde bekannt als die „Ultraviolett-Katastrophe“.

Experimentelle Daten für die Lichtstrahlung eines heißen glühenden Körpers zeigten, daß das Intensitätsmaximum des emittierten Lichts außerdem erheblich abweicht vom klassisch vorausgesagten Wert (Wiensches Verschiebungsgesetz). Um nun die Theorie mit den Laborergebnissen in Einklang zu bringen, war Planck gezwungen, ein neues Modell für die Natur des Lichts zu entwickeln, das *Quantenmodell*. In diesem Modell wird Licht in Form kleiner diskreter Energiepakete emittiert, den *Quanten*.

2) Die Quantentheorie von Planck

In den letzten Jahren vor 1900 dachten viele Physiker, daß sie alle Grundlagen des Universums erklärt und alle Naturgesetze entdeckt hätten. Aber als die Wissenschaftler weiter forschten, tauchten in einigen Forschungsgebieten Ungereimtheiten auf, die sich nicht einfach erklären ließen.

Im Jahre 1901 veröffentlichte Planck sein Strahlungsgesetz. In diesem Gesetz stellte er fest, daß ein Oszillator oder ein ähnliches physikalisches System nur einen diskreten Satz an möglichen Energiewerten oder Energieniveaus hat, und daß Energien zwischen diesen Werten niemals auftreten.

Planck stellte weiter fest, daß die Emission oder Absorption von Strahlung mit Übergängen oder Sprüngen zwischen zwei Energieniveaus verbunden ist. Der Energieverlust oder -gewinn des Oszillators wird emittiert oder absorbiert als ein Quant der Strahlungsenergie, dessen Größe durch die Gleichung beschrieben wird:

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

wobei E die Strahlungsenergie, ν die Frequenz der Strahlung und h eine fundamentale Naturkonstante ist, die als *Plancksche Konstante* bekannt wurde.

Die Plancksche Konstante definiert also das Verhältnis zwischen Energie und Frequenz der Lichtquanten und wurde so von zentraler Bedeutung in der quantenmechanischen Betrachtung subatomarer Vorgänge. Für die Einführung der Quantentheorie des Lichts erhielt Planck im Jahre 1918 den Nobelpreis.

3) Der photoelektrische Effekt

Bei der photoelektrischen Emission fällt Licht auf ein Material und verursacht die Emission von Elektronen. Das klassische *Wellenmodell* sagt voraus, daß mit zunehmender *Intensität* des einfallenden Lichts die Amplitude und damit auch die Energie der Welle ansteigen würde. Das würde dann bewirken, daß energiereichere Photoelektronen emittiert werden.

Das neue *Quantenmodell* jedoch sagt voraus, daß eine höhere *Frequenz* des Lichts zu energiereicheren Photoelektronen führt, unabhängig von der Intensität, während eine größere *Intensität* lediglich die *Anzahl* der emittierten Elektronen (den Photostrom) erhöht.

In den ersten Jahren nach 1900 fanden verschiedene Forscher, daß die kinetische Energie der Photoelektronen von der Wellenlänge oder Frequenz abhängig war und unabhängig von der Intensität, während die Stärke des Photostroms oder die Anzahl der Elektronen von der Lichtintensität abhing — eben so, wie es das Quantenmodell vorhersagt.

Einstein verwendete Plancks Theorie und beschrieb den photoelektrischen Effekt mit den Begriffen des Quantenmodells in seiner berühmten Gleichung, für die er 1921 den Nobelpreis erhielt:

$$E = h\nu = E_{kin,max} + W_0, \quad (2)$$

wobei $E_{kin,max}$ die maximale kinetische Energie der emittierten Photoelektronen ist und W_0 die Energie, die erforderlich ist, um sie von der Materialoberfläche zu lösen (die Auslösearbeit). E ist die Energie, die durch den Lichtquant, also das Photon, zugeführt wird.

4) Das h/e-Experiment

Ein Photon mit der Energie $h\nu$ trifft auf ein Elektron in der Kathodenfläche einer Vakuumröhre. Das Elektron benötigt mindestens den Anteil W_0 der Photonenergie, um die Kathode zu verlassen, und es bleibt ihm maximal die Energie $E_{kin,max}$ als kinetische Energie.

Normalerweise erreichen die emittierten Elektronen die Anode der Röhre und können als Photostrom nachgewiesen werden. Legt man jedoch eine Gegenspannung U zwischen Anode und Kathode, so kann der Photostrom gestoppt werden. Die kinetische Energie $E_{kin,max}$ läßt sich bestimmen, wenn der Minimalwert der Gegenspannung U gemessen wird, bei dem der Photostrom verschwindet. (In unserem Versuchsaufbau wird jedoch die Stoppspannung direkt gemessen, ohne den Photostrom zu überwachen. Siehe „Technische Information“ im Anhang.)

Setzt man die kinetische Energie zur Stoppspannung U in Beziehung, so ergibt sich

$$E_{kin,max} = Ue \quad (3)$$

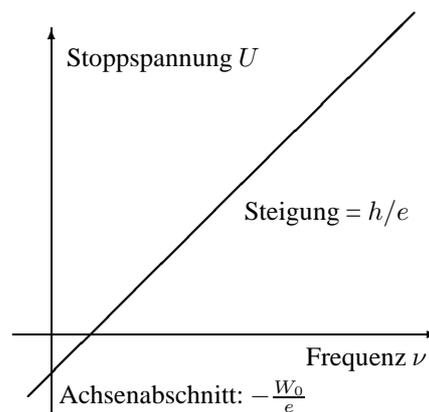
Daher folgt mit Einsteins Gleichung:

$$h\nu = Ue + W_0 \quad (4)$$

Umgestellt nach U ergibt sich:

$$U = \frac{h}{e}\nu - \frac{W_0}{e} \quad (5)$$

Wenn wir U als Funktion von ν für verschiedene Lichtfrequenzen graphisch darstellen, ergibt sich folgender Zusammenhang:



Der Achsenabschnitt auf der senkrechten (U -)Achse ist gleich $-(W_0/e)$ und die Steigung ist h/e .

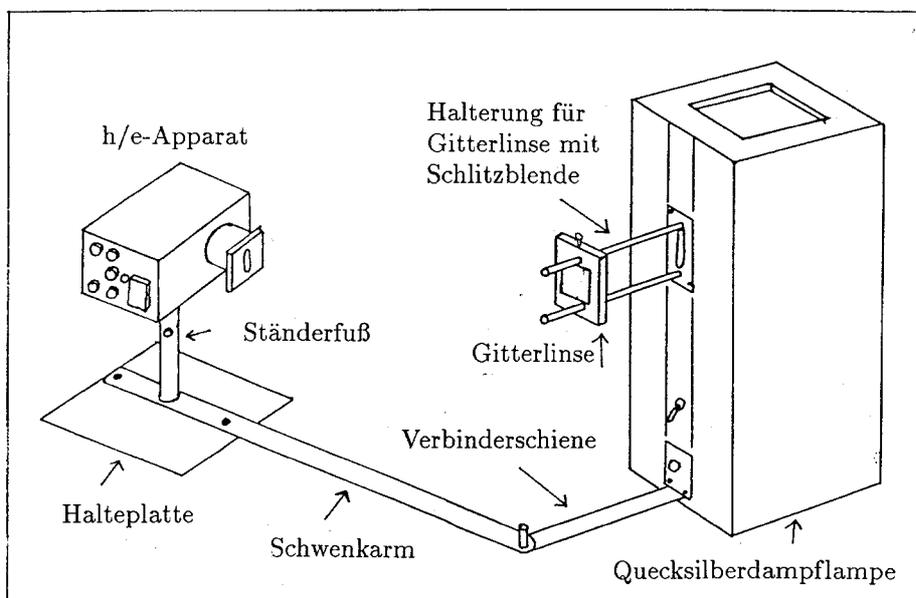
Aus der experimentellen Bestimmung von h/e läßt sich dann mit dem bekannten Wert der Elementarladung $e = 1,602 \times 10^{-19}$ C die Plancksche Konstante bestimmen.

IV. Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau zur Bestimmung des Planckschen Wirkungsquantums ist bereits teilweise vormontiert. Trotzdem sollten Sie vor Inbetriebnahme der Geräte *alle* nachfolgend genannten Montageschritte prüfen.

Die folgende Abbildung zeigt Ihnen zunächst die Bestandteile des Versuchsaufbaus.

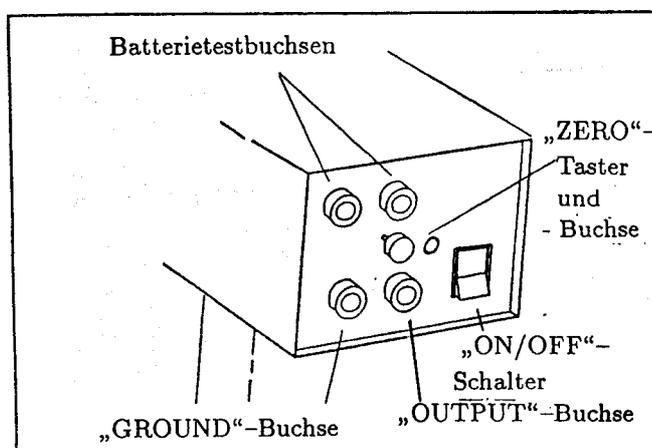
Anstelle der dargestellten Quecksilberdampf Lampe wird je nach Versuchsaufbau ein anderes Lampenmodell (Leybold) verwendet. Die Lampe steht dann hinter einem Metallschirm, an dem der Gitterlinsenhalter angebracht wird (siehe Abbildung Seite 11 im Anhang). Die Hinweise zur Ausrichtung des h/e-Apparates sind jedoch auch dort gültig!



1) Test der Batteriespannung

Obwohl der h/e-Apparat nur eine geringe Stromaufnahme hat und die Batterien entsprechend lange halten, ist es sinnvoll, vor Versuchsbeginn die Batteriespannung zu prüfen. Die entsprechenden Testbuchsen befinden sich an der Seite des Gehäuses, nahe dem Schalter „ON/OFF“. Wenn die Batteriespannungen niedriger als 6 V sind, können die Messungen fehlerhaft werden.

Zum Batterietest wird ein Voltmeter zwischen die „OUTPUT GND“-Buchse und die Batterietest-Buchse „-6 V MIN“ bzw. „+6 V MIN“ geschaltet (siehe folgende Abbildung). **Liegen die Spannungen unter diesen Minimalwerten, müssen die Batterien vor weiteren Messungen erneuert werden (siehe Anhang).**

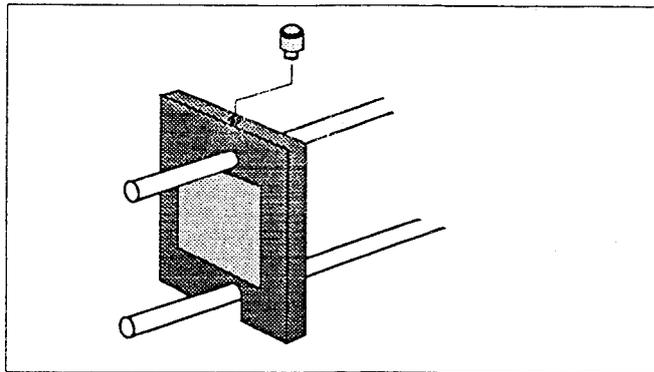


2) Vormontage des Versuchsaufbaus

1. Das Lampengehäuse hat auf zwei gegenüberliegenden Seiten Öffnungen für den Lichtaustritt. Wir arbeiten im Versuch aber nur auf einer Seite (dort wo der Netzschalter sitzt). Daher wird die Öffnung der anderen Seite (wo sich das Netzkabel befindet) mit einer schwarze Metallplatte verschlossen. Diese Platte wird von oben in das Profil am Lampengehäuse eingeschoben.

Hinweis: Das Licht der Quecksilberdampfampe enthält eine intensive UV-Strahlung, die bei längerer Einwirkung auf die Haut zu Sonnenbrand führt. Achten Sie darauf, daß kein Licht unkontrolliert in die Umgebung gelangt!

2. Auf die Gehäusesseite mit dem Netzschalter wird die Halterung für die Gitterlinse (= feines Beugungsgitter + Sammellinse) montiert. Dazu wird die Platte mit der Schlitzblende von oben in das Profil des Lampengehäuses eingeschoben und festgeklemmt, indem die beiden Rändelschrauben der Platte festgezogen werden, bis sie leicht gegen das Lampengehäuse drücken.
3. Die Gitterlinse wird auf die beiden Stäbe der Halterung aufgeschoben und mit der Rändelschraube fixiert.

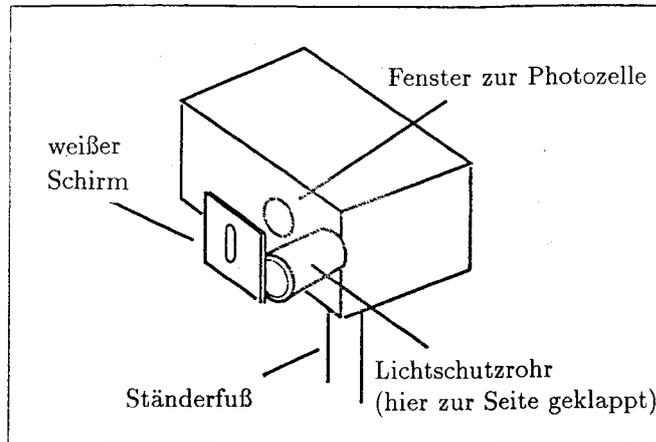


Hinweis: Das Gitter an der Linse ist so hergestellt, daß es das hellste Beugungsspektrum *nur auf einer Seite* liefert. Gegebenenfalls muß also die Gitterlinse gewendet werden.

4. Schalten Sie die Lichtquelle ein und lassen Sie sie fünf Minuten aufwärmen. Prüfen Sie die Position der Lichtquelle und der Schlitzblende, indem Sie das Licht betrachten, daß auf die Gitterlinse fällt.
5. Die Verbinderschiene wird von unten in das Profil des Lampengehäuses eingesetzt (siehe Abbildung Seite 4) und durch Anziehen der Rändelschraube befestigt.
6. Der Ständerfuß für den h/e-Apparat ist mit der Halteplatte über eine Kreuzschlitzschraube verbunden. Prüfen Sie, ob diese Verbindung fest ist.
7. Setzen Sie den h/e-Apparat in den Ständerfuß ein.
8. Schieben Sie den Schwenkarm, der sich an der Halteplatte befindet, über den Stift auf der Verbinderschiene des Lampengehäuses, so daß sich ein Drehgelenk bildet und sich der h/e-Apparat um die Lichtquelle verschieben läßt.

3) Justage des h/e-Apparates

- Verbinden Sie ein Digitalvoltmeter mit den Buchsen „OUTPUT“ und „GND“, siehe Abbildung Seite 4. Wählen Sie den 2-V- oder 20-V-Meßbereich.
- Setzen Sie den h/e-Apparat gerade (d. h. in axialer Flucht) vor die Quecksilberdampf Lampe. Verschieben Sie die Gitterlinse auf den Führungsstäben, so daß das Licht der nullten Ordnung (bläulich weiß) als heller und scharfer Streifen auf den weißen Schirm des h/e-Apparates auftrifft.



- Klappen Sie das Lichtschutzrohr zur Seite (siehe Abbildung oben). Sie sehen jetzt einen Teil der Photozelle. Sie ist mit einer weißen Folie beklebt, die oben und unten eine kleine Aussparung hat (als ca. 3×3 mm breites schwarzes Rechteck zu erkennen). Drehen Sie den h/e-Apparat solange in seinem Ständerfuß (und evtl. den Ständer um wenige Millimeter um die Lampe), bis das Licht durch den Spalt symmetrisch auf die Aussparungen (= Eintrittsfenster) der Photozelle leuchtet. Ziehen Sie danach die Rändelschraube seitlich am Ständerfuß fest.
- Verschieben Sie die Gitterlinse auf den Haltestäben, bis sich ein möglichst scharfes Bild der Blende des Lampengehäuses auf der Photozelle mit ihren Markierungen ergibt. Ziehen Sie dann die Rändelschraube an der Gitterlinse fest. Klappen Sie das Lichtschutzrohr wieder vor die Photozelle.

4) Ablauf einer Messung

- Schalten Sie den Meßverstärker des h/e-Apparates ein (Schalter auf ON). Bewegen Sie den h/e-Apparat mit der Halteplatte so um das Drehgelenk (vgl. Punkt (8)), bis daß eines der farbigen Beugungsmaxima erster Ordnung in den Schlitz des weißen Schirms (und nach der Justage in Punkt (11) somit auch in die Photozelle) fällt.

Hinweis: Der weiße Schirm am h/e-Apparat besteht aus einem speziellen, fluoreszierenden Material. Dadurch wird die ultraviolette Linie als blaue Linie sichtbar, und auch die violette Linie erscheint eher blau. Zur Linienbestimmung siehe Abbildung und Tabelle auf Seite 7.

Sie können die echten Farben sehen, wenn Sie ein Stück weißes nichtfluoreszierendes Material vor den Schirm halten. Viele Papiersorten enthalten jedoch optische Aufheller und fluoreszieren ebenfalls. Zur Not eignet sich Ihre Handfläche, obwohl auch sie ein wenig fluoresziert und die UV-Linie immer noch sichtbar ist.

Bei den Messungen ist es sehr wichtig, daß nur genau eine Farbe auf die Photozelle fällt. Benachbarte Spektrallinien dürfen sich auf keinen Fall überlappen!

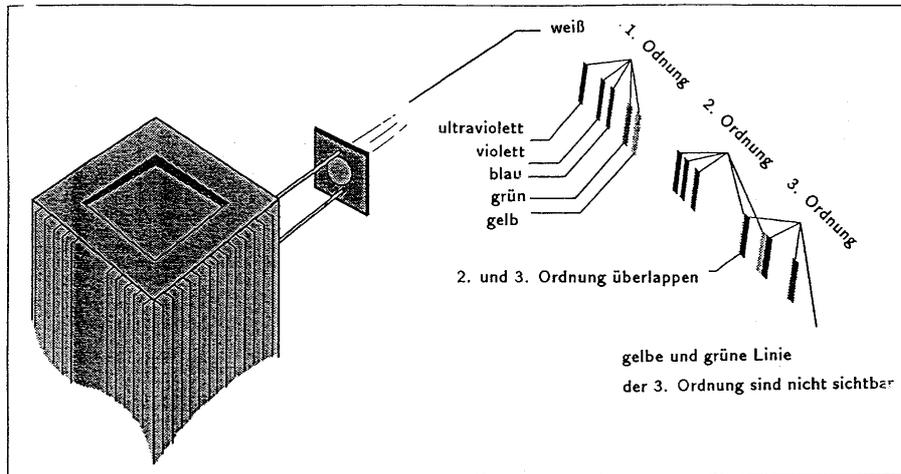
- Drücken Sie vor JEDER Messung den „ZERO“-Taster¹** an der Seite des h/e-Apparates (in der Nähe des ON/OFF-Schalters, siehe Abbildung Seite 4), um das System zu entladen und den Meßverstärker in einen definierten Anfangszustand zu bringen, damit nur das Potential der gerade eingestellten Spektrallinie gemessen wird. Beachten Sie, daß die Ausgangsspannung driftet, wenn kein Licht auf die Photozelle fällt. (Siehe auch Abschnitt „Funktionsprinzip“ im Anhang.)
- Lesen Sie die Ausgangsspannung an Ihrem Digitalvoltmeter ab, wenn sich der Spannungswert stabilisiert hat. Das kann je nach Lichtintensität bis zu einer Minute dauern. Diese Spannung ist ein direktes Maß für die Stoppspannung der Photoelektronen (zur Erklärung siehe Abschnitt „Funktionsprinzip“ im Anhang).

¹Neben dem „ZERO“-Taster befindet sich im Gehäuse eine Buchse (für 3,5-mm-Klinkenstecker). Hier kann über ein Kabel ein zweiter „ZERO“-Taster angeschlossen werden; durch diese „Fernbedienung“ kann verhindert werden, daß der h/e-Apparat beim Drücken des Gehäusetasters bewegt wird und sich Meßfehler ergeben.

5) Verwendung der Filter

Zum h/e-Apparat gehören drei Filter: ein Grünfilter, ein Gelbfilter und ein Filter mit verschiedenen Transmissionsbereichen. An den Filterrahmen sind Magnetstreifen, so daß sie leicht auf den weißen Schirm am h/e-Apparat gesetzt werden können.

Das Gelb- bzw. Grünfilter wird bei Messungen mit der gelben bzw. grünen Spektrallinie verwendet. Die Filter begrenzen den Anteil höherer Lichtfrequenzen, die sich den gelben oder grünen Linien überlagern und die Meßwerte verfälschen, wenn z. B. Umgebungslicht mit in den Apparat gelangt. Außerdem werden Anteile ultravioletten Lichts zurückgehalten, die aus Spektren höherer Ordnung stammen und die gelben und grünen Linien der Spekten niedriger Ordnung überlagern können (vgl. folgende Abbildung).



Farbe	Frequenz (Hz)	Wellenlänge (nm)
gelb	$5,18672 \times 10^{14}$	578
grün	$5,48996 \times 10^{14}$	546,074
blau	$6,87858 \times 10^{14}$	435,835
violett	$7,40858 \times 10^{14}$	404,656
ultraviolett	$8,20264 \times 10^{14}$	365,483

Alle Werte (außer für gelb) aus *Handbook of Chemistry and Physics, 46th ed.*

Die Wellenlänge für gelb wurde experimentell mit einem Gitter (600 Linien/mm) bestimmt.

Eigentlich ist die gelbe Spektrallinie ein Dublett aus 578 nm und 580 nm.

V. Versuchsprogramm

Teil 1: Vergleich zwischen Wellen- und Quantenmodell

Die Photon-Theorie des Lichts (das Quantenmodell) besagt, daß die maximale Energie $E_{kin,max}$ von Photoelektronen nur von der *Frequenz* des einfallenden Lichts abhängt und von der *Lichtintensität unabhängig ist*. Die *Energie* ist also um so höher, je höher die *Frequenz* des Lichts ist, d. h. je kürzer die Lichtwellenlänge ist.

Demgegenüber sagt das klassische Wellenmodell des Lichts voraus, daß die maximale Energie $E_{kin,max}$ der Photoelektronen von der Lichtintensität abhängt. Mit anderen Worten: je heller das Licht, desto größer die Energie.

Der folgende Versuch untersucht beide Annahmen.

1.1 Zusammenhang zwischen Maximalenergie der Photoelektronen und Lichtintensität

1. Stellen Sie den h/e-Apparat so ein, daß nur *eine* der Spektralfarben in die Öffnung der Photozelle gelangt. Wenn Sie mit der grünen oder gelben Linie arbeiten, bringen Sie das entsprechende Farbfilter an dem weißen Schirm des Apparates an.
2. Setzen Sie das variable Transmissionsfilter vor den weißen Schirm (und das Farbfilter, falls Sie eines verwenden), so daß das Licht durch den mit „100 %“ markierten Bereich fällt. Notieren Sie sich den Spannungswert, den Sie mit dem Digitalvoltmeter am h/e-Apparat messen.
Drücken Sie kurz den „ZERO“-Taster und messen Sie ungefähr die Zeit, bis sich wieder der Maximalwert der Spannung eingestellt hat (d. h. bis die Photozelle den Kondensator des Meßverstärkers wieder voll aufgeladen hat).
Wiederholen Sie diese Messung möglichst mehrmals und berechnen Sie einen Mittelwert.
3. Verschieben Sie das Transmissionsfilter, so daß der nächste Transmissionsbereich (80 %) eingestellt wird. Messen Sie erneut (möglichst *mehrmals* wie in Schritt (2)) die Spannung am Digitalvoltmeter und die Zeit, die nach Drücken des „ZERO“-Tasters zum Aufladen erforderlich ist.
4. Wiederholen Sie Schritt (3), bis alle 5 Transmissionsbereiche (100 %, 80 %, 60 %, 40 %, 20 %) gemessen worden sind.

1.2 Zusammenhang zwischen Maximalenergie der Photoelektronen und Lichtwellenlänge

1. Im Spektrum der Quecksilberdampf Lampe lassen sich leicht 5 Farben erkennen (siehe Abbildung Seite 7). Stellen Sie den h/e-Apparat so ein, daß nur eine der *gelben* Spektrallinien in die Öffnung der Photozelle fällt. Setzen Sie das Gelbfilter vor den weißen Schirm (**entfernen Sie das Transmissionsfilter aus Teil 1.1**).
2. Notieren Sie die Spannung, die das Digitalvoltmeter am h/e-Apparat mißt (also die Stoppspannung) und die Aufladezeit (für Versuchsteil 3.3, siehe Seiten 10 und 12).
3. Wiederholen Sie den Vorgang für die anderen vier Spektralfarben. Achten Sie darauf, daß Sie bei der grünen Linie das Grünfilter verwenden.

1.3 Auswertung zu Versuchsteil 1

1. Welchen Einfluß haben bei gleicher Lichtfarbe die unterschiedlichen *Lichtintensitäten* auf die Stoppspannung und die Aufladezeit (nach Drücken des „ZERO“-Tasters)?
2. Welchen Einfluß haben unterschiedliche *Lichtwellenlängen* auf die Stoppspannungen und damit auf die Maximalenergie der Photoelektronen?
3. Unterstützen die Versuchsergebnisse eher das Wellenmodell oder das Quantenmodell des Lichts?
4. Erklären Sie den leichten Rückgang der Stoppspannung, wenn (bei gleicher Farbe) die Lichtintensität reduziert wird. Dazu müssen Sie wissen, daß der Meßverstärker, der sich im Apparat zwischen Photozelle und Digitalvoltmeter befindet, einen sehr hohen Eingangswiderstand ($\approx 10^{13} \Omega$) hat. Der Widerstand ist also nicht unendlich groß, so daß immer etwas Ladung abfließen kann. Sie können das anschaulich mit einem Eimer vergleichen, der ein Loch hat und mit unterschiedlich starkem Wasserstrom gefüllt wird.

Teil 2: Bestimmung der Planck'schen Konstante h

Entsprechend dem Quantenmodell des Lichts ist die Energie der Lichtquanten direkt proportional zu ihrer Frequenz: je höher die Frequenz, desto mehr Energie hat das Quant. Bei sorgfältigem Experimentieren läßt sich der Proportionalitätsfaktor, die Planck'sche Konstante, bestimmen.

Im folgenden Versuchsteil werden Sie unterschiedliche Spektrallinien der Quecksilberdampfampe verwenden und die Maximalenergie der Photoelektronen als Funktion der Wellenlänge und Frequenz untersuchen.

2.1 Meßprogramm zu Versuchsteil 2

1. Im (Gitter-)Spektrum der Quecksilberdampfampe sehen Sie 5 Farben in (mindestens) 2 Ordnungen (siehe Abbildung Seite 7).

Die Messungen am Spektrum erster Ordnung haben Sie bereits in Versuchsteil 1 durchgeführt.

Stellen Sie nun den h/e -Apparat sorgfältig so ein, daß nur *eine* Farbe aus dem Spektrum *zweiter* Ordnung (die zweithellste Ordnung) in die Öffnung der Photozelle fällt.

2. Messen Sie für jede Farbe der zweiten Ordnung die Stoppspannung mit dem Digitalvoltmeter. Setzen Sie das Gelb- bzw. Grünfilter vor den weißen Schirm, wenn Sie die gelbe bzw. grüne Spektrallinie vermessen.

2.2 Auswertung zu Versuchsteil 2

In der Tabelle Seite 7 und der Literatur finden Sie die Wellenlänge und Frequenz für jede der Quecksilber-Spektrallinien. Stellen Sie die gemessene Stoppspannung als Funktion der Frequenz graphisch dar.

Bestimmen Sie die Steigung und den y-Achsenabschnitt. Die Ergebnisse geben Ihnen die Verhältnisse h/e und W_0/e an.

Berechnen Sie h und W_0 . Den Wert für e entnehmen Sie der Literatur (s. S. 3).

Vergleichen Sie Ihren Wert von h mit dem Literaturwert.

Diskutieren Sie Abweichungen und Meßfehler.

Teil 3: Ergänzungen zu den Versuchen

3.1 Kondensator Kapazität und Photostrom

Die Photozelle und der Eingang des Meßverstärkers im h/e -Apparat bilden einen kleinen Kondensator, der durch den Photostrom aufgeladen und durch Leckströme im Meßverstärker entladen wird (siehe Abschnitt „Funktionsprinzip“ im Anhang).

Verschließen Sie die Schlitzöffnung im weißen Schirm und betrachten Sie das Entladen des Kondensators. Schätzen Sie die Kondensator Kapazität C aus der Zeit ab, die zum **Entladen** erforderlich ist, indem Sie eine Entladekurve aufnehmen und die Halbwertszeit bestimmen; hierfür gilt:

$$t_{1/2} = \ln 2RC, \quad \text{mit} \quad R \approx 10^{13} \Omega. \quad (6)$$

Die genaue Vorgehensweise ist im Anhang auf Seite 11 beschrieben.

Lassen Sie nun wieder Licht auf die Photozelle gelangen und betrachten Sie das **Aufladen** des Kondensators. **Wenn der Aufladevorgang zu schnell abläuft, können Sie ein oder mehrere Neutralfilter (im Diarahmen, mit „Graufilter 10 %“ beschriftet) in den Strahlengang halten und so das Aufladen pro Filter um etwa den Faktor 10 verlangsamen. Drücken Sie vor der Messung den „ZERO“-Taster.** Schätzen Sie den Photostrom aus der Halbwertszeit des Aufladevorgangs ab.

3.2 Die Photozelle als Spektrometer

Es stehen Ihnen verschiedene Leuchtdioden zur Verfügung. Schließen Sie die Leuchtdioden an ein Netzgerät an (Strom etwa 20 mA, wird durch Widerstand bzw. Regler im Anschlußstecker begrenzt), beachten Sie dabei, daß Leuchtdioden — wie gewöhnliche Dioden auch — nur in einer Stromrichtung arbeiten.

Befestigen Sie die Leuchtdioden nacheinander in der 5-mm-Bohrung einer Kunststoffhalterung und schieben Sie die Halterung waagrecht so über den weißen Schirm des h/e-Apparates, daß das Licht auf die Photozelle gelangen kann. Bestimmen Sie die jeweiligen Stoppspannungen.

Die Ergebnisse aus Versuchsteil 2 ermöglichen es Ihnen, durch Messung der Stoppspannung auf die Wellenlänge des Lichts zu schließen. Vergleichen Sie mit den folgenden Wellenlängen, wie sie in den Datenblättern der Leuchtdioden genannt werden. (siehe auch Beschriftung an den Leuchtdioden):

rot = 645 nm, gelb = 583 nm, grün = 565 nm, blau = 470 nm.

Erklären Sie die Abweichungen zum Literaturwert.

3.3 Quantenausbeute der Photozelle und Lichtleistung

Nicht jedes erzeugte Photoelektron gelangt auch zur Anode, wenn — wie in unserem Versuchsaufbau — die Photozelle ohne hohe Vorspannung betrieben wird. Die Zahl der im Photostrom nachgewiesenen Photoelektronen ist viel kleiner als die Anzahl der einfallenden Lichtquanten (warum?). Schätzen Sie das Verhältnis ab zwischen der Anzahl N_{ph} der Photonen (Lichtquanten), die von der Lichtquelle ausgehend in die Photozelle einfallen zur Anzahl $N_{e,Zelle}$ der Elektronen, die von diesen Photonen in der Photozelle produziert werden und den Photostrom bewirken, also:

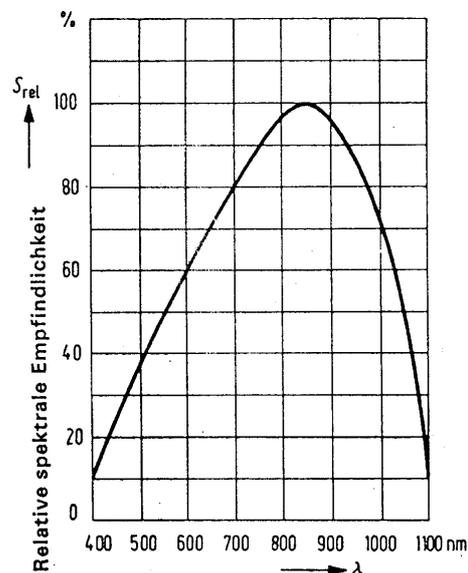
$$\text{Quantenausbeute} = \frac{N_{e,Zelle}}{N_{ph}} \quad (7)$$

Dazu verwenden Sie folgendes Verfahren:

Für diese Messung steht Ihnen eine Halbleiter-Photodiode² zur Verfügung. Eine solche Photodiode besteht aus einem kleinen Halbleiterkristall. Fällt Licht auf die strahlungsempfindliche Fläche (hier $2,75 \times 2,75$ mm groß), so werden durch sogenannten inneren Photoeffekt Ladungsträger erzeugt, es fließt ebenfalls ein Photostrom.

In der Photodiode erzeugt fast jedes einfallende Photon ein Elektron: bei einer Wellenlänge von 850 nm werden etwa 88 Elektronen pro 100 Lichtquanten erzeugt, für andere Wellenlängen ist das Verhältnis geringer.

Die folgende Abbildung zeigt die Abhängigkeit der relativen spektralen Empfindlichkeit für unseren Photodiodentyp BPW34 (100 % entsprechen 88 Elektronen pro 100 Quanten).



Schließen Sie die Photodiode an ein Digitalmultimeter an, Meßbereich $200 \mu A$. Die Polarität ist hier nicht wichtig, ignorieren Sie ein eventuelles Minuszeichen in der Anzeige. Halten Sie die Photodiode in den Strahlengang, so daß das Licht einer Spektrallinie auf die Photodiode fällt. Achten Sie darauf, daß die Photodiode etwa den gleichen Abstand von der Lichtquelle hat wie die Photozelle (warum?). Klappen Sie daher das Lichtschutzrohr zur Seite und halten Sie die Photodiode vor der Photozelle in das Licht der Spektrallinie.

Messen Sie den Photostrom für diese und die anderen Spektrallinien.

Sie können jetzt vom Photostrom der Photodiode auf die Zahl der Elektronen und daraus — je nach Wellenlänge — auf die Anzahl der Photonen (pro Zeitintervall) schließen (**siehe hierzu Anhang Seite 13**).

²Beachten Sie genau die Unterscheidung zwischen Photozelle (= Röhre im h/e-Apparat) und Photodiode (= kleiner Halbleiterkristall)!

Sie können annehmen, daß die Öffnung an der Photozelle etwa so groß ist wie die Fläche der Photodiode, d. h. beide erhalten etwa gleich viel Photonen — vorausgesetzt, beide haben den gleichen Abstand zur Lichtquelle, wie oben erwähnt. Den Photostrom der Photozelle haben Sie in Teil 3.1 abgeschätzt. Hiermit können Sie jetzt die **Quantenausbeute** der Photozelle bestimmen.

Sie haben die Anzahl der Photonen (pro Zeitintervall) bestimmt; aus der Wellenlänge und der Planckschen Konstanten können Sie die Energie jedes Photons berechnen. Bestimmen Sie die **Lichtleistung**, die mit den einzelnen Spektrallinien auf die Photozelle gelangt.

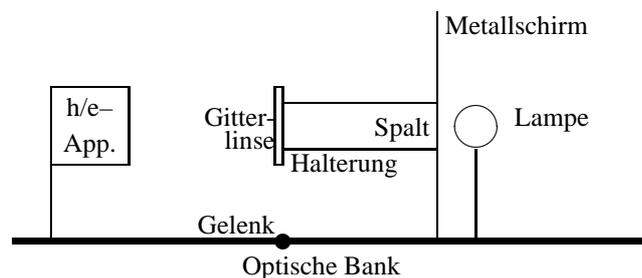
Vergessen Sie am Ende Ihre Versuche bitte nicht, den Photozellen-Apparat auszuschalten; die Batterien entladen sich sonst innerhalb weniger Tage.

VI. ANHANG

1. Optischer Aufbau für anderen Lampentyp

Neben den Original-Quecksilberdampf lampen (MAPHY/PASCO) werden je nach Versuchsaufbau auch Lampen vom Typ LEYBOLD eingesetzt. Hier werden Gitter, Linse und ein Schutzschirm (Metallschirm) zusammen mit der Lampe auf einer zweiteiligen optischen Dreikantbank aufgebaut. Der h/e-Apparat befindet sich auf einer eigenen Bank, die durch ein Drehgelenk mit der Hauptbank verbunden ist, so daß er im Spektrum verschoben werden kann. Auch bei diesem Aufbau wird eine Gitterlinse verwendet (verschiebbar auf einer Halterung), die auf der Lampenseite auch einen Spalt hat, ganz ähnlich dem MAPHY/PASCO-Aufbau. Die Halterung wird am Metallschirm angeschraubt. Die Gitterlinse besteht aus einer Sammellinse (plankonvex, $f = 100$ mm, Durchmesser 50 mm) und einem Beugungsgitter (Diarahmen, 600 Linien/mm). **Die Gitterlinse sollte so verschoben werden, daß sie sich genau über dem Drehgelenk befindet.**

Die einzelnen Elemente sind folgendermaßen zu montieren:



2. Entladekurve der Photozelle

Ein Kondensator C entlädt sich an einem Widerstand R gemäß einer Exponentialfunktion:

$$U_C(t) = U_0 e^{-\frac{t}{RC}} \quad (8)$$

Hierbei ist:

$U_C(t)$ = Spannung am Kondensator zur Zeit t

U_0 = Spannung am Kondensator zur Zeit $t = 0$

R = Widerstand (hier: **Eingangswiderstand des Meßverstärkers**,
= etwa $10^{13} \Omega$)

C = Kapazität des Kondensators (in Farad)

t = Zeit (in Sekunden)

Eine leicht zu bestimmende Größe ist die *Halbwertszeit* $t_{1/2}$, nach der sich die Kondensatorspannung halbiert hat:

$$U_C(t_{1/2}) = \frac{1}{2}U_0 \quad (\text{bzw.}) \quad U_C(2t_{1/2}) = \frac{1}{4}U_0, \quad U_C(3t_{1/2}) = \frac{1}{8}U_0 \quad \text{usw.}) \quad (9)$$

Daraus folgt:

$$e^{-\frac{t_{1/2}}{RC}} = \frac{1}{2} \quad \text{und hieraus} \quad C = \frac{t_{1/2}}{R \ln 2} \quad (10)$$

Nun gibt es in unserem Aufbau leider das Problem, daß im Meßverstärker winzige Fehlströme fließen, so daß sich der Kondensator nicht auf 0 V entlädt, sondern beim Entladen einem Wert U_f annähert:

$$U_C(t \rightarrow \infty) = U_f \quad (11)$$

Daraus folgt für unseren Aufbau als reale Entladeformel:

$$U_{Cm}(t) = U_f + U_0 e^{-\frac{t}{RC}} \quad (12)$$

Sie müssen also zur Bestimmung der Halbwertszeit den *korrigierten* Spannungswert ($U_{Cm} - U_f$) zugrundelegen:

$$[U_{Cm}(t_{1/2}) - U_f] = \frac{1}{2} [U_{Cm}(t=0) - U_f] \iff U_{Cm}(t_{1/2}) = \frac{1}{2}U_0 + U_f \quad (13)$$

und alle *gemessenen* Spannungswerte $U_{Cm}(t)$ um den Wert U_f reduzieren. Es ist sinnvoll, die Entladekurve graphisch darzustellen. Die logarithmierte Form von Gleichung 12, also:

$$\ln(U_{Cm}(t) - U_f) = \ln U_0 - \frac{t}{RC} \quad (14)$$

liefert eine Gerade mit der negativen Steigung $1/RC$. Beachten Sie, daß auf der linken Seite die *korrigierten* Werte $U_{Cm}(t) - U_f$ stehen! Bestimmen Sie die Kapazität sowohl aus der Halbwertszeit nach Formel 10 als auch über die Geradensteigung nach Formel 14 und vergleichen Sie die Ergebnisse miteinander.

3. Aufladekurve der Photozelle

Für das **Aufladen** eines Kondensators gilt allgemein:

$$U_C(t) = U_0 (1 - e^{-\frac{t}{RC}}) \quad (15)$$

Da Sie hier vor der Messung den „ZERO“-Taster gedrückt haben und daher vom Startwert 0 aus aufladen, brauchen Sie nicht weiter zu korrigieren. Auch hier gibt es eine Halbwertszeit:

$$U_C(t_{1/2}) = \frac{1}{2} \quad , \quad U_C(2t_{1/2}) = \frac{3}{4}U_0 \quad (!) \quad \text{usw.} \quad (16)$$

Schätzen Sie die Halbwertszeit beim Aufladen, d. h. wenn wieder Licht auf die Photozelle fällt. Auch für diese Halbwertszeit gilt: (Formel 10 umgestellt)

$$R_i = \frac{t_{1/2}}{C \ln 2} \quad (17)$$

Aber hier gibt es einen wichtigen Unterschied: Beim *Aufladen* ist R_i der „Innenwiderstand“ der Photozelle, für den gilt:

$$\text{Photostrom} = \frac{\text{Stoppspannung}}{\text{Innenwiderstand } R_i} \quad (18)$$

Dabei ist anzunehmen, daß R_i deutlich kleiner ist als der Widerstand R des Meßverstärkers.

Wenn der Aufladevorgang zu schnell abläuft, setzen Sie das Graufilter 20 % vor die Photozelle. Beachten Sie aber dann, daß auch der Photostrom nur noch 20 % des ursprünglichen Wertes hat!

Fazit:

- Aus der **Entladehalbwertszeit** oder der logarithmierten korrigierten **Entladekurve** und dem bekannten Wert $R = 10^{13} \Omega$ des Meßverstärkers bestimmen Sie mit Formel 10 die **Kapazität** C .
- Aus der **Aufladehalbwertszeit** und der **Kapazität** C bestimmen Sie mit Formel 17 den **Innenwiderstand** R_i .
- Mit der zugehörigen **Stoppspannung** können Sie mit Formel 18 den **Photostrom** ermitteln.

4. Bestimmung der Photonenzahl

Der Photostrom der Photodiode sei $I_{\text{ph,D}}$, das ist ein Ladungstransport

$$I_{\text{ph,D}} = \Delta Q / \Delta t, \quad (19)$$

$$\text{wobei} \quad \Delta Q = e N_{\text{e,D}} \quad (20)$$

die Zahl $N_{\text{e,D}}$ der pro Zeitintervall Δt ausgelösten Photoelektronen der Photodiode beinhaltet ($e = \text{Elementarladung}$).

Bei einer Wellenlänge von 850 nm erzeugt jedes Photon im Mittel 0,88 Elektronen in der Photodiode, so daß

$$\Delta Q = 0,88 e N_{\text{ph,D}} \quad (21)$$

$N_{\text{ph,D}}$ = Anzahl der im Zeitintervall Δt auf die Photodiode fallenden Photonen mit 850 nm.

Für andere Wellenlängen ist mit der relativen spektralen Empfindlichkeit $S_{\text{rel}}(\lambda)$ der Photodiode zu multiplizieren (siehe Abbildung Seite 10):

$$\Delta Q = 0,88 e S_{\text{rel}} N_{\text{ph,D}} \quad (22)$$

Fazit: Aus dem Photostrom der Diode

$$I_{\text{ph,D}} = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{0,88 e S_{\text{rel}} N_{\text{ph,D}}}{\Delta t} \quad (23)$$

folgt für die Anzahl der Quanten pro Zeitintervall:

$$\frac{N_{\text{ph,D}}}{\Delta t} = \frac{I_{\text{ph,D}}}{0,88 e S_{\text{rel}}} \quad (24)$$

