

## Photoeffekt (A3)

### *Ziel des Versuches*

Das plancksche Wirkungsquantum  $h$  und die Austrittsarbeit der Elektronen sollen bestimmt werden.

### *Theoretischer Hintergrund*

#### *Photoeffekt, Auslösearbeiten und Kontaktspannungen*

1888 beobachtete Hallwachs, dass bei negativ aufgeladenen Metallplatten unter Bestrahlung mit ultravioletttem Licht eine Entladung auftritt. Allgemein löst hinreichend kurzwelliges Licht aus Metalloberflächen Elektronen aus. Dieser Effekt wird *Photoeffekt* oder genauer *äußerer Photoeffekt* genannt. Es zeigte sich, dass die kinetische Energie der emittierten Elektronen mit der Frequenz des Lichtes zunimmt, nicht jedoch mit der Intensität. Dieses Phänomen spielte bei der Entwicklung der Quantenmechanik eine bedeutende Rolle, da im Rahmen der klassischen Physik eine Intensitätsabhängigkeit zu erwarten war. Einstein interpretierte dieses Phänomen 1905 als Stöße von Lichtteilchen (Photonen) mit Elektronen im Festkörper, bei denen jedes beteiligte Photon jeweils seine gesamte Energie  $hf$  an ein Elektron abgibt. Die kinetische Energie der ausgelösten Elektronen ist durch die Einstein-Gleichung

$$\frac{m}{2}v^2 = hf - e\Phi \quad (1)$$

gegeben, wobei  $e\Phi$  die Austrittsarbeit aus dem Metallverband und  $\Phi$  das vom Elektron beim Austritt aus dem Metall zu überwindende Potenzial ist. Da die Austrittsarbeit bei einem gegebenen Material in guter Näherung konstant ist, ist die kinetische Energie aller ausgelösten Elektronen in etwa gleich. Aus Gl. (1) folgt, dass unterhalb einer Grenzfrequenz ( $hf_0 < e\Phi$ ) keine Elektronen mehr ausgelöst werden können. Viele bekannte Physiker, z. B. R.A. Millikan (Physikalische Zeitschrift 17, No.11, Seite 218 (1916)), führten eine Reihe von Experimenten durch, um diese grundlegende Hypothese zu überprüfen. Einstein erhielt für die Erklärung des äußeren Photoeffekts 1921 den Nobelpreis.

Der äußere Photoeffekt wird in der Photozelle angewendet. In einer solchen evakuierten Zelle befinden sich eine großflächige Photokathode und eine Anode, die meist als Drahtschleife ausgebildet ist. Um die Empfindlichkeit zu erhöhen, ist die Photokathode zusätzlich mit einem Metall (z. B. Barium) bedampft, das eine möglichst geringe Austrittsarbeit besitzt. Licht, das auf die Photokathode fällt, löst dort – sofern die Frequenz bzw. Energie

der Photonen ausreicht – Elektronen aus, die von der Anode gesammelt und als Ladung oder bei entsprechender äußerer Beschaltung (Saugspannung) als Photostrom gemessen werden können. Der Photostrom ist dann der Lichtintensität proportional, so dass die Photozelle als Messinstrument eingesetzt werden kann.

Legt man jedoch an der Photokathode ein positives Potential an, so müssen die durch Licht ausgelösten Elektronen mit ihrer kinetischen Energie eine Brems- oder Gegenspannung  $U_g$  durchlaufen, um zur Anode (die dann per Definition eigentlich eine Kathode wäre) zu gelangen. Wird die Gegenspannung hinreichend groß gewählt, so erreichen die Elektronen die Anode nicht mehr und der Photostrom  $I_{\text{Ph}}$  wird Null. Aus dem Wert von  $U_g(I_{\text{Ph}} = 0)$  kann man für eine gewählte Lichtfrequenz  $f$  die kinetische Energie der Elektronen  $E_{\text{kin}}(f)$  bestimmen. Aus der Kenntnis der kinetischen Energien  $E_{\text{kin}}(f)$  bei unterschiedlichen Lichtfrequenzen lassen sich schließlich das plancksche Wirkungsquantum und die Austrittsarbeit bestimmen.

Viele aktuelle Physiklehrbücher hinterlassen durch eine zu stark verkürzte Darstellung des Photoeffekts leider den Eindruck, dass beim Versuch Photoeffekt neben der Bestimmung der planckschen Konstanten die Austrittsarbeit der Elektronen aus der Kathode ermittelt wird. Das ist jedoch nicht der Fall. Wenn man genauer hinschaut, ergibt sich Folgendes:

Die unterschiedlichen Metalle der beiden Elektroden (Kathode und Anode) in der evakuierten Zelle besitzen unterschiedliche Austrittsarbeiten. Die Austrittsarbeit der Kathode  $e\Phi_K$  ist im Allgemeinen kleiner als die der Anode  $e\Phi_A$ . Das vereinfachte Bänderschema beider Metalle ist in Abb. 1a gezeigt, wobei  $E_{\text{FK}}$  und  $E_{\text{FA}}$  die Fermienergien des Kathoden- bzw. des Anodenmaterials sind. Der Nullpunkt der Energie ist das Vakuumniveau (nicht im Festkörper gebundene Elektronen im Vakuum am Ort der Kathode bzw. der Anode haben die Energie Null). Es entsteht jedoch eine völlig neue Situation, wenn man beide Elektroden im Außenraum leitend miteinander verbindet (Kurzschluss:  $U_{\text{AK}} = 0$ ). Die Gesamtheit der Elektronen nimmt ein energetisches Minimum an, da sich ein einheitliches *Ferminiveau*  $E_F$  ausbildet ( $E_F = E_{\text{FK}} = E_{\text{FA}}$ ). Das führt zu einer negativen Potentialdifferenz  $U = \Phi_K - \Phi_A$  zwischen Anode und Kathode, der sogenannten Kontaktspannung (Abb. 1b). Wird nun zusätzlich eine Brems- oder Gegenspannung ( $U_g < 0$ ) angelegt, so erhöht sich der Potenzialberg noch, den ein Elektron, das durch Licht aus der Kathode ausgelöst wurde, in Richtung Anode überwinden muss (Abb. 1c).

Das eindringende Lichtquantum mit der Energie  $E = hf$  trifft auf ein Elektron an der Fermigrenze der Kathode und gibt seine gesamte Energie an dieses ab. Die Energie des abgelösten Elektrons am Ort der Kathode ist daher:

$$E_{e,K} = hf - e\Phi_K \quad . \quad (2)$$

Da das Elektron nicht mehr unter dem Einfluss der Festkörperkräfte steht, ist es frei, d. h. es besitzt seine Energie in Form von kinetischer Energie  $E_{e,K} = \frac{m}{2}v^2$ . Mit dieser Energie „läuft“ das Elektron den Potenzialberg zur Anode „hinauf“, der sich gemäß Abb. 1c aus der Summe von Kontaktspannung und Gegenspannung zusammensetzt. Am Ort der Anode angekommen

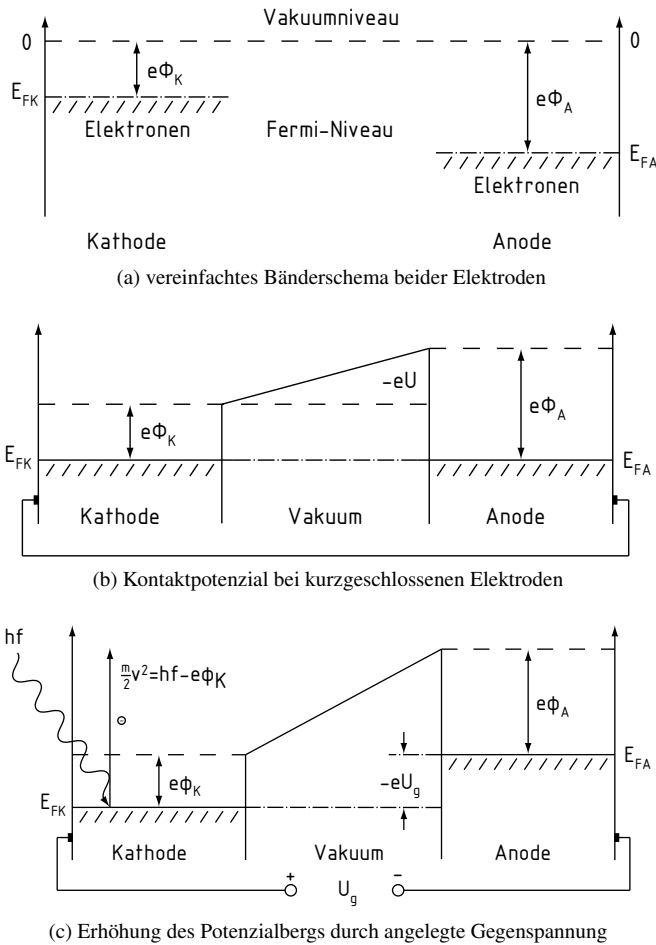


Abbildung 1: Erklärung des Potenzialbergs bei äußerer Beschaltung der Fotozelle

besitzt es nur noch die Energie

$$E_{e,A} = E_{E,k} - e(\Phi_A - \Phi_K) - eU_g \quad . \quad (3)$$

Einsetzen von Gl. (2) in (3) liefert:

$$E_{e,A} = hf - e\Phi_K - e(\Phi_A - \Phi_K) - eU_g = hf - e\Phi_A - eU_g \quad .$$

Erhöht man die Gegenspannung von Null anfangend immer weiter, so gibt es für eine gegebene Frequenz des eingestrahnten Lichts einen maximalen Spannungswert  $U_{g,max}$  von dem ab kein Elektron mehr zur Anode gelangen kann, da die kinetische Energie der Elektronen am Ort der Anode Null wird:

$$E_{e,A} = 0 = hf - e\Phi_A - eU_{g,max} \quad .$$

Daraus folgt

$$U_{g,max} = \frac{h}{e}f - \Phi_A \quad . \quad (4)$$

Trägt man nun die ermittelten Spannungswerte  $U_{g,max}(f)$  gegen die zugehörigen Frequenzen  $f$  auf, erhält man eine Gerade mit dem Anstieg  $\frac{h}{e}$ . Diese Gerade schneidet die  $f$ -Achse bei der Grenzfrequenz  $f_0 = (e/h)\Phi_A$  bzw. die  $U$ -Achse bei  $-\Phi_A$ , wobei  $e\Phi_A$  die Austrittsarbeit der Anode (!) ist.

#### *Strom-Spannungskurven zur Bestimmung von $U_{g,max}$*

Man bestimmt die Maximalspannung  $U_{g,max}$ , bei der der Photostrom Null wird am genauesten indem man den Photostrom  $I_{ph}$  als Funktion der Gegen-

spannung  $U_g$  misst. Diese Kurve wird Strom-Spannungskurve genannt. Es gibt zwei Gründe, die es schwierig machen, den  $U_{g,\max}$ -Wert direkt aus der Kurve abzulesen.

Erstens: Bei Temperaturen  $T > 0\text{ K}$  ist die Fermikante nicht mehr scharf, so dass die Elektronen etwas unterschiedliche Austrittsarbeiten haben können, womit auch die Grenzfrequenz  $f_0$  nicht mehr scharf ist. Mit anderen Worten, auch Photonen mit kleinerer Energie als  $hf_0$  können noch wenige Elektronen auslösen. Man würde daher erwarten, dass bei Raumtemperatur die Strom-Spannungskurve die  $U_g$ -Achse gar nicht mehr schneidet, sondern sich dieser nur asymptotisch nähert.

Zweitens: Trotz aller Bemühungen mittels Blenden und geeignetem Strahlengang nur die Kathode zu beleuchten, ist es nicht zu verhindern, dass durch Reflexionen innerhalb der Photozelle auch Licht auf die Anode fällt. Das dürfte eigentlich nicht stören, da das Material der Anode so gewählt ist, dass es eine größere Austrittsarbeit besitzt. Tatsächlich wird die Oberfläche der Anode jedoch durch das Kathodenmaterial ständig verunreinigt, so dass auch an der Anode Elektronen ausgelöst werden können. Die Bremsspannung  $U_g$  ist aber für diese wenigen an der Anode ausgelösten Elektronen nun eine Beschleunigungs- oder Saugspannung. Bei Bremsspannungen  $U_g > U_{g,\max}$  gelangen zwar keine Elektronen mehr von der Kathode zur Anode, aber die an der Anode ausgelösten Elektronen werden in Richtung Kathode beschleunigt. Dadurch entsteht ein geringer, sich schnell sättigender negativer Photostrom.

Als Ergebnis wird die Strom-Spannungskurve nun die  $U_g$ -Achse schneiden, wobei dieser Schnittpunkt nicht unbedingt mit dem Wert  $U_{g,\max}$  identisch sein muss. Es gibt dennoch eine Lösung, um den  $U_{g,\max}$ -Wert sehr genau zu bestimmen: Dazu nimmt man jeweils bei der gewählten Lichtfrequenz  $f$  Strom-Spannungskurven für verschiedene Intensitäten auf. Diese Kurven schneiden sich in einem gemeinsamen Punkt in der Nähe der  $U_g$ -Achse. An diesem Punkt ist dann der Photostrom von Kathode in Richtung Anode Null und der  $U_g$ -Wert ist gleich dem gesuchten Wert  $U_{g,\max}$ . In Abb. 2 ist der typische Verlauf von Strom-Spannungscharakteristiken für drei verschiedene Intensitäten gezeigt.

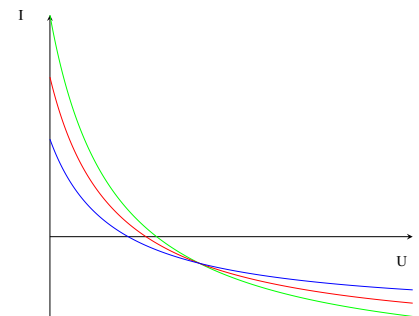


Abbildung 2: Photostrom/Gegenspannung

## Versuchsaufbau und -durchführung

### Gegenspannungsmethode

Der optische Aufbau ist in Abb. 3 gezeigt. Das Licht einer Hg-Lampe wird durch die direkt vor der Lampe stehende Blende 1 und eine Linse parallel gebündelt. (Überprüfung durch Abbildung auf einer 2 bis 3 m entfernten Wand). Das parallele Lichtbündel wird dann mit einer weiteren Linse auf die Photokathode der Photozelle fokussiert, so dass dort eine Abbildung der Punktlichtquelle (der beleuchteten Blende 1) beobachtet wird. Erst dann wird die Blende 2 eingesetzt. Ein Verändern der Blende 2 beeinflusst dann nicht die optische Abbildung, sondern dient allein der Variation der Lichtintensität.

Beim Wechseln der Interferenzfilter muss der Strahlengang mit der Schwarzglasscheibe unterbrochen werden, damit kein intensives, ungefiltertes Licht auf die Photozelle fällt. Hohe Intensitäten können der Photozelle schaden.

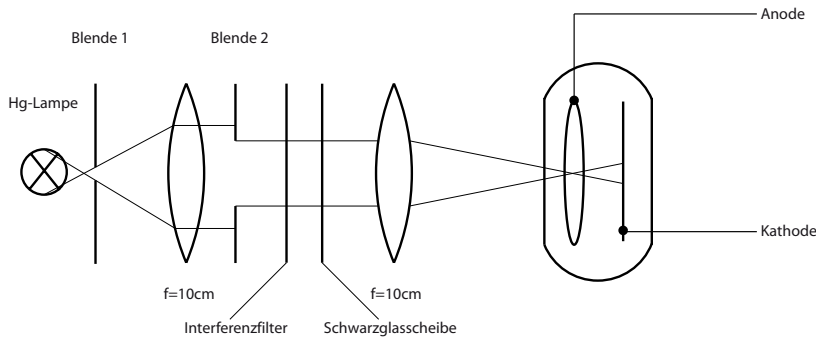


Abbildung 3: Optische Anordnung

Das gefilterte, fokussierte Licht soll höchstens  $1/3$  der Fläche der Photokathode ausleuchten. Die Größe des Lichtflecks ist mit der Blende 1 einstellbar. Es ist unbedingt darauf zu achten, dass die Ringanode nicht beleuchtet wird. Der gesamte optische Aufbau ist möglichst kompakt zu gestalten. Die optische Achse muss gerade sein und der Lichtweg darf nicht durch die Linsen „verbogen“ werden.

Wenn Sie die optimale Position aller Blenden und Linsen eingestellt haben, wechseln Sie zur Einstellung einer anderen Wellenlänge nur noch den Interferenzfilter (Unterbrechung des Strahlengangs dabei bitte nicht vergessen!), damit die Größe der beleuchteten Fläche auf der Photokathode bei allen Messungen gleich bleibt. Beachten Sie, dass mit der Blende 2 nur die Intensität, aber nicht die Größe des beleuchteten Flecks verändert wird!

Der elektrische Aufbau bei der Gegenspannungsmethode ist in Abb. 4 gezeigt. Die Messung wird mit CASSY durchgeführt. Über das POWER-CASSY kann die Gegenspannung in einer bestimmten Zeit (40 s empfohlen) von 0 V bis 4 V hochgefahren werden (siehe auch Anleitung am Experimentierplatz). Die Messung des Photostroms erfolgt über die an einem 1 GOhm-Widerstand abfallende Spannung. Da es sich um Photoströme im nA-Bereich handelt, muss ein sogenannter Elektrometerverstärker (Operationsverstärker mit äußerst hochohmigen Eingang) verwendet werden. Dieser Elektrometerverstärker wird auf das CASSY (z. B. Eingang B) aufgesteckt und wie in Abb. 4 beschaltet. Da eine Gegenspannung erzeugt werden soll, wird die Anode der Photozelle direkt mit dem Minuspol und die Kathode über den 1 GOhm-Widerstand mit dem Pluspol der POWER-CASSY Spannungsquelle verbunden. Wegen der sehr kleinen Ströme wird als Zuleitung zur Kathode ein Koaxialkabel benutzt, dessen Mantel auf Masse zu legen ist. Als Masse wird der Pluspol gewählt. Die Masse wird zusätzlich geerdet. Erdungsbuchsen finden Sie an Geräten in ihrer Nähe. Bitte berühren Sie die Photozelle nicht mit den Fingern, da Kriechströme die Folge wären und diese die Messungen verderben könnten.

### *Kondensatormethode*

Bei dieser Methode wird nur die Ladung gemessen, die entsteht, wenn durch Lichteinstrahlung von der Kathode Elektronen ausgelöst werden und diese

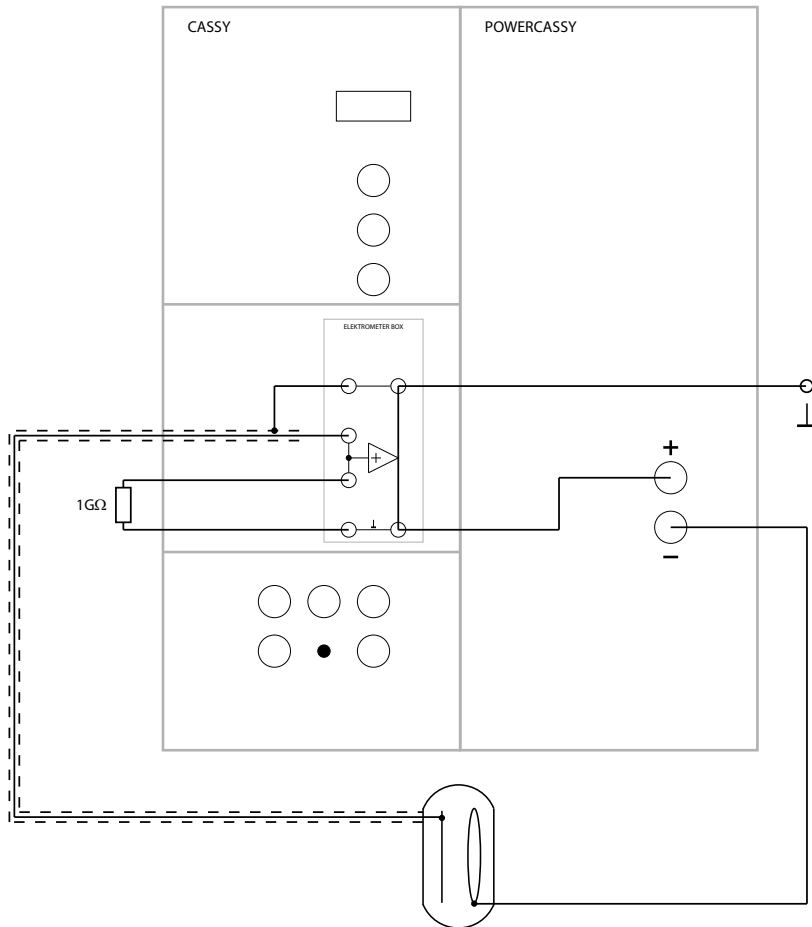


Abbildung 4: Elektrischer Aufbau bei der Gegenspannungsmethode

sich zum Teil auf der Anode sammeln. Diese Messmethode ist gegen Störeinflüsse noch empfindlicher als die Gegenspannungsmethode. Benutzen Sie daher eine möglichst hohe Intensität des gefilterten Lichts, indem Sie die Blende 2 weit öffnen. Die bei Bestrahlung entstehende Ladung wird in einem parallel zur Photozelle geschalteten Kondensator (100 pF) gesammelt und die Ladekurve mit dem CASSY-Elektrometerverstärker gemessen. Da sich die Photokathode durch das Auslösen von Elektronen positiv auflädt, entsteht nun durch Aufladen des Kondensators im Prinzip wieder eine Gegenspannung. Nach etwa 10 s stellt sich daher ein Gleichgewicht ein, das zusätzlich auch durch Leckströme des Kondensators mit beeinflusst wird. Die Schaltung ist in Abb. 5 gezeigt. Das Relais des CASSY-Messwertfassungssystems schließt vor dem Start einer neuen Messung den Kondensator kurz, um ihn zu entladen.

Benutzen Sie möglichst kurze Kabel um Störeinflüsse zu vermeiden. Für die Verbindung der Kathode mit dem Kondensator bzw. dem Elektrometerverstärker muss ein abgeschirmtes Kabel verwendet werden, dessen Mantel geerdet wird. Ebenso ist die optische Bank zu erden. Zur Vermeidung von Erdschleifen sollten alle Erdleitungen von einem Punkt ausgehen.

Die am Kondensator gemessene Spannung  $U_C$  entspricht der bei der Gegenspannungsmethode gemessenen Spannung  $U_{g,max}$  (Photostrom  $I_{Ph} = 0$ ) und ist gemäß Gl. (4) damit ein Maß für die Größe  $(h/e)f - \Phi_A$ .

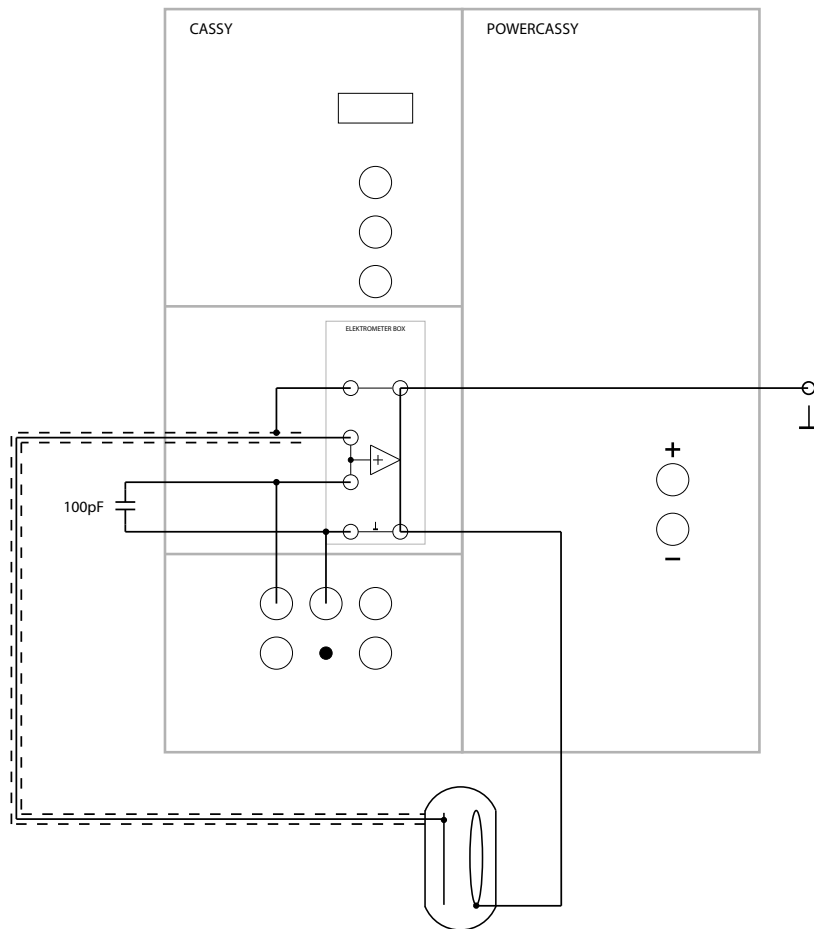


Abbildung 5: Elektrischer Aufbau bei der Kondensatormethode

### Aufgabenstellung

1. Messen Sie für die angegebenen Wellenlängen der Hg-Linien (366 nm, 405 nm, 436 nm, 546 nm, 578 nm) den Photostrom in Abhängigkeit von der Gegenspannung (Strom-Spannungskurven) für jeweils drei Intensitäten. Fertigen Sie für jede Wellenlänge eine grafische Darstellung mit drei bei unterschiedlichen Intensitäten gemessenen Kurven an.
2. Bestimmen Sie für jede Wellenlänge aus den Schnittpunkten der drei Kurven den Wert  $U_{g,max}$ .
3. Stellen Sie Ihre Werte  $U_{g,max}$  als Funktion der Lichtfrequenz  $f$  grafisch dar und bestimmen Sie aus dem Anstieg und den Achsenschnittpunkten gemäß Gl. (1) das plancksche Wirkungsquantum und die Austrittsarbeit  $e\Phi_A$  der Elektronen aus der Anode.
4. Beschreiben Sie, wie die Strom-Spannungskurve für die umgekehrte Polung an den Elektroden aussehen könnte, d. h., wenn keine Bremsspannung sondern eine Beschleunigungsspannung angelegt wird.
5. Für die angegebenen Wellenlängen (366 nm, 405 nm, 436 nm, 546 nm) sind die Ladekurven des Kondensators aufzunehmen. Tragen Sie  $U_C$  gegen die Lichtfrequenz  $f$  auf und ermitteln Sie hier aus Anstieg und Achsenabschnitt das plancksche Wirkungsquantum und die Austrittsarbeit aus der Anode.