

TU Ilmenau	Physikalisches Grundpraktikum	Versuch A3
Institut für Physik	Photoeffekt	Seite 1

1. Aufgabenstellung

- 1.1.** Für verschiedene Lichtwellenlängen und -intensitäten sind die Photostrom-Anodenspannungskennlinien einer Vakuum-Photozelle aufzunehmen.
- 1.2.** Aus den gefundenen Bremsspannungen für vollständige Unterdrückung des Photostroms sind das Plancksche Wirkungsquantum h , die Grenzwellenlänge λ_G sowie die Auslösearbeit W_A des Materials der Photozelle zu bestimmen.

Literatur:	Schenk, W. Kremer, F. (Hrsg.)	Physikalisches Praktikum Vieweg + Teubner Verlag Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 13. Auflage 2011, S. 321-324
	Walcher, W.	Praktikum der Physik B. G. Teubner Stuttgart Leipzig Wiesbaden 8. Auflage 2004, S. 316-319
	Stroppe, H.	Physik für Studenten der Natur- und Technikwissenschaften Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag 11. Auflage 1999, S. 414-417

2. Grundlagen

Bereits Ende des 19. Jahrhunderts wurde entdeckt, dass mit Licht bestrahlte Metalloberflächen unter bestimmten Bedingungen Elektronen emittieren können (*Heinrich Hertz 1886, Wilhelm Hallwachs 1888*). Im Widerspruch zur klassischen Wellentheorie, wonach mit höher werdender Strahlungsintensität (entsprechend höheren elektrischen Feldstärken) die Elektronen zu stärkeren Schwingungen angeregt werden und mehr Energie erhalten können, tritt der so genannte äußere lichtelektrische Effekt, abhängig vom bestrahlten Metall, erst ab einer bestimmten Grenzfrequenz f_G der Lichtwelle auf. Eine Untersuchung der kinetischen Energie E_{kin} der Elektronen zeigt darüber hinaus, dass diese nicht von der Intensität, sondern nur von der Frequenz f des eingestrahlteten Lichtes abhängt.

Albert Einstein gelang 1905 die Erklärung des Photoeffektes, indem er Licht Quanteneigenschaften zuschrieb. Danach besitzen die Photonen eine Energie

$$E_{ph} = hf \quad (1)$$

(h - Plancksches Wirkungsquantum), die sie bei einer Wechselwirkung mit Elektronen vollständig übertragen. Reicht diese Energie aus, die notwendige Austrittsarbeit aus dem Metall aufzubringen, tritt der Photoeffekt auf.

Die herausgelösten Elektronen haben aber nicht ein und dieselbe Geschwindigkeit, sondern gehorchen einer bestimmten Energieverteilung, zu deren Deutung ein tieferes Verständnis für elektronische Vorgänge im Festkörper notwendig ist. Während in einem Atom Elektronen nur ganz bestimmte diskrete Energien annehmen können, halten sie sich innerhalb atomarer Verbände in so genannten Energiebändern auf. Von besonderer Bedeutung für die elektronischen Eigenschaften der Metalle ist das energetisch höchst gelegene Leitungsband, das

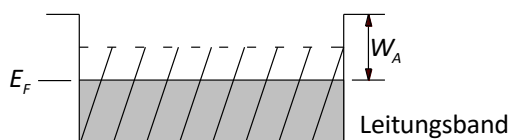


Abb. 1: Leitungselektronen im Potentialtopf

energetisch höchst gelegene Leitungsband, das

TU Ilmenau	Physikalisches Grundpraktikum	Versuch A3
Institut für Physik	Photoeffekt	Seite 2

auch bei $T \approx 0K$ teilweise mit Elektronen besetzt ist. Das oberste im Grundzustand ($T = 0K$) noch besetzte Energieniveau nennt man Fermi-Niveau E_F . Von hier aus ist mindestens die Austrittsarbeit W_A aufzubringen, um ein Elektron aus dem Festkörper zu entfernen (Abb. 1).

Photonen einer monochromatischen Lichtquelle können, sofern sie nach Gl. (1) über genügend Energie verfügen, aus allen Niveaus des Leitungsbandes Elektronen herauslösen. Die experimentell beobachtbare Energieverteilung der Photoelektronen hängt dabei außer von E_{ph} auch von der Dichte der Zustände im Band und ihrer (temperaturabhängigen) Besetzungswahrscheinlichkeit ab. Das Auftreten von Elektronen mit Energien $E > E_F$ ist bei Raumtemperatur wegen $E - E_F \ll k_B T \approx 25 meV$ gegen übliche Werte der Austrittsarbeit vernachlässigbar (k_B - Boltzmannkonstante).

Im Experiment wird die kinetische Energie indirekt durch ein bremsendes elektrisches Feld bestimmt, gegen das die Elektronen anlaufen müssen. Hierzu schaltet man die elektronenemittierende Metalloberfläche (Kathode, geringe Austrittsarbeit) mit einer negativ vorgespannten Anode (hohe Austrittsarbeit, einstellbare Bremsspannung U_B) zusammen und misst den Photostrom als Funktion von U_B . Elektronen erreichen die Anode gerade dann noch, wenn für sie die Energiebilanz

$$E_{kin} = eU_B \quad (2)$$

(e - Elementarladung) gegeben ist, energieärmere kehren schon vorher um und tragen nicht zum Stromfluss bei. Für Elektronen, die aus dem Fermi-Niveau herausgelöst werden, gilt im ersten Fall:

$$E_{kin} = eU_B = hf - W_A \quad (3)$$

Man misst zweckmäßigerweise für mehrere Lichtfrequenzen f (bzw. Wellenlängen λ) den Photostrom als Funktion der angelegten Bremsspannung und bestimmt denjenigen Wert $U_{B,0}$, bei dem dieser gerade verschwindet. Eine grafische Darstellung $U_{B,0}(f)$ liefert dann Messpunkte längs einer Geraden, deren Anstieg h/e ist.

Das Absolutglied W_A in Gl. (3) stellt jedoch nicht, wie man es erwarten würde, die Austrittsarbeit des Kathodenmaterials dar. Zur Messung des Photostroms werden nämlich zwei Metalle mit unterschiedlicher Austrittsarbeit elektrisch in Kontakt gebracht (Abb. 2a). Dies führt zu Ausgleichsströmen zwischen ihnen, bis sich die Fermi-Niveaus beider Materialien angeglichen haben. In der Folge ist im gewählten Beispiel die Kathode gegenüber der Anode positiv geladen und Elektronen müssen, um zur Anode zu gelangen, noch einen zusätzlichen Potentialberg $W_{A,A} - W_{A,K} = eU_K$ überwinden (U_K - Kontaktspannung, Abb. 2b).

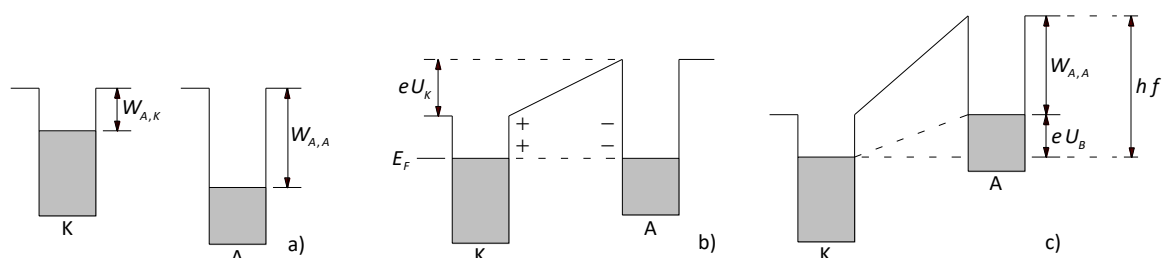


Abb. 2: Energetische Verhältnisse zwischen Metallen unterschiedlicher Austrittsarbeit

TU Ilmenau	Physikalisches Grundpraktikum	Versuch A3
Institut für Physik	Photoeffekt	Seite 3

Ist darüber hinaus eine bremsende Gegenspannung U_B wirksam, erhöht sich die benötigte kinetische Energie für Elektronen, die von der Fermi-Energie der Kathode zur Anode gelangen sollen, auf $E_{kin} = eU_B + W_{A,A}$ (Abb. 2c). Im Falle des verschwindenden Photostroms erhält man somit anstelle (3):

$$eU_{B,0} = hf - W_{A,A}, \quad (4)$$

kann also nur die Austrittsarbeit des Anodenmaterials bestimmen.

3. Messanleitung

Kernstück des Versuchsaufbaus ist eine Vakuum-Photozelle, eingebaut in einem weitestgehend lichtdichten Gehäuse mit einschwenkbaren Filtern zur Selektierung bestimmter Lichtwellenlängen. Als Kathodenmaterial dient Kalium auf oxidiertes Silberunterlage, die Anode besteht aus Platin und ist ringförmig so ausgebildet, dass sie vom eintretenden Licht nicht direkt getroffen wird.

Man beginnt zunächst mit der Überprüfung des dargestellten Strahlengangs durch die optischen Komponenten:

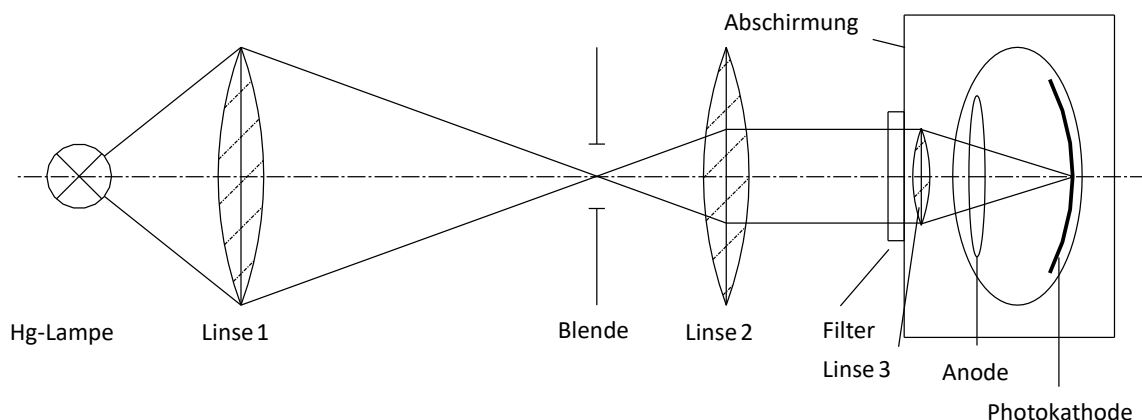


Abb. 3: Strahlengang zur Beleuchtung der Photozelle

- Das Entladungsrohr einer Quecksilber-Hochdrucklampe wird mit Linse 1 (Kondensator) so auf eine zunächst geschlossene Irisblende abgebildet, dass sich ein scharfes Zwischenbild der Lichtquelle ergibt.
- Linse 2 bildet die Blendenöffnung nach Unendlich ab und garantiert so einen weitestgehend parallelen Strahlengang bis zur Photozelle. Diese Bedingung ist näherungsweise erfüllt, wenn nach Entfernen des Photozellegehäuses aus dem Strahlengang das Blendenbild an der in Richtung optische Achse nächsten Wand scharf erscheint.
- Die Irisblende wird wieder voll geöffnet und das Gehäuse mit der Photozelle so auf der optischen Schiene positioniert, dass das Bild des Randes von Linse 1 auf dem Filterhalter scharf zu sehen ist und etwa den Durchmesser der Filteröffnungen hat.

Die Seitenabschirmung der Photozelle lässt sich nach Lösen der Rändelschrauben leicht entfernen und erlaubt eine Kontrolle der Ausleuchtung der Photokathode. Die Öffnungen der Filterhalter und eine eingebaute Linse 3 sind so bemessen, dass eine direkte Beleuchtung der ringförmigen Anode verhindert wird und das Bild der Lichtquelle (Lichtbogen) auf der Photokathode erscheint. Sollte dennoch die

TU Ilmenau	Physikalisches Grundpraktikum	Versuch A3
Institut für Physik	Photoeffekt	Seite 4

Anode bestrahlt werden (Schatten auf der Kathode), ist die Ausrichtung der Photozelle und aller anderen optischen Elemente auf der optischen Achse (Höhe, seitliche Justage) zu kontrollieren und ggf. zu korrigieren.

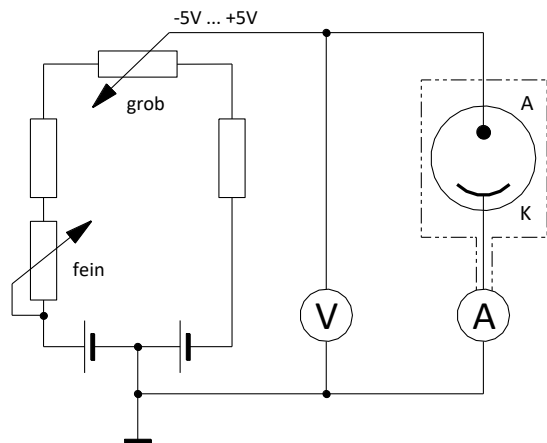


Abb. 3: Prinzipschaltbild

Der Aufbau der elektrischen Messschaltung erfolgt entsprechend nebenstehender Abbildung. Die regelbare Spannungsquelle ist in einem separaten Gehäuse untergebracht und erlaubt das Einstellen der Spannungen U_B mit einer Genauigkeit im mV-Bereich (Spannungsmessbereich: $2V =$). Das Strommessgerät (Picoamperemeter MV 40) arbeitet mit aktiven Bauelementen und hält die Photokathode auf Bezugspotential (Masse).

Die Messungen bestehen in der Aufnahme vollständiger Strom-Spannungs-Kennlinien für jedes der vor die Photozelle geschwenkten Filter. Die zugehörigen Lichtwellenlängen sind am Wechsler aufgedruckt. In Hinblick auf die spätere Versuchsauswertung empfiehlt es sich, die negative Bremsspannung U_B dabei in äquidistanten Schritten zu verändern.

Für $\lambda = 436\text{nm}$ ist die Messung vergleichend bei reduzierter Beleuchtungsintensität zu wiederholen. Der Durchmesser der Irisblende wird hierzu so verkleinert, dass, verglichen mit voller Beleuchtung, etwa der halbe Photostrom fließt.

Messparameter: $U_B = 0V \dots U_{B,0}$ in Schritten von $-0,05V$ bei $\lambda = 546\text{nm}$, sonst $-0,1V$

Das analog anzeigende Picoamperemeter ist sehr empfindlich. Stellen Sie den Messbereich, solange Sie die Größe des Photostroms nicht kennen, auf 300nA . Empfindlichster einzustellender Strommessbereich in der Nähe von $U_{B,0}$ ist 1nA ! Achten Sie auch auf die Polaritätsanzeige neben dem Zeigerinstrument.

Die Messreihe wird jeweils beendet, wenn ein Vorzeichenumschlag des Photostroms erfolgt ist. Dieses bisher nicht erwähnte Phänomen hat seine Ursache in einem schwachen Photostrom der vom Streulicht der Kathode beleuchteten Platin-Anode. Ermöglicht wird dieser durch Restgasatome in der Photozelle oder Kontaminationen mit Kathodenmaterial, welche die Austrittsarbeit der Anode herabsetzen.

4. Auswertung

Alle gemessenen Strom-Spannungs-Kennlinien sind in einem gemeinsamen Diagramm darzustellen. Bei sorgfältiger Versuchsdurchführung liefert das Durchzeichnen einer Messkurve mittels kubischer Splines (Praktikumsprogramm *PhysPract*) eine gute Grafik. Möglich ist auch eine nichtlineare Regression durch Ausgleichsparabeln. Man erkennt am Kurvenverlauf die Schwierigkeit der Bestimmung von $U_{B,0}$: Die Graphen schmiegen sich flach an die Spannungsachse an (große Messunsicherheit für $U_{B,0}$), darüber hinaus sind die sichtbaren Nulldurchgänge vom auftretenden Anodenstrom überlagert.

TU Ilmenau	Physikalisches Grundpraktikum	Versuch A3
Institut für Physik	Photoeffekt	Seite 5

Aus beiden Gründen kommt für die weitere Versuchsauswertung eine so genannte Wurzelmethode zur Anwendung. Man kann zeigen (Böhm, Scharmann 1992, s. u.), dass aufgrund der Geschwindigkeitsverteilung der emittierten Photoelektronen bei den experimentell realisierten Bedingungen ein parabolischer Zusammenhang zwischen Photostrom und Bremsspannung besteht.

Trägt man daher die Quadratwurzel der normierten positiven Photoströme über der Bremsspannung in einem Diagramm $\sqrt{\frac{I(U_B)}{I_0(U_B=0)}}$ über U_B auf, so erhält man nach linearer Regression Geradengleichungen, die eine genauere Bestimmung des Abszissenabschnitts zulassen. Wenn für diese Ausgleichsrechnung das Praktikumsprogramm *PhysPract* verwendet wird, sind die interessierenden Unsicherheiten auch mit angegeben.

In einem weiteren Diagramm erfolgt gemäß Gl. (3) die Darstellung $U_{B,0}(f)$ über der Frequenz f . Auch hier kann eine Ausgleichsgerade gezeichnet werden, aus deren Parameter die Bestimmung folgender gesuchter Größen möglich ist:

- Quotient der Naturkonstanten h/e und daraus bei bekannt vorausgesetzter Elementarladung e das Plancksche Wirkungsquantum h
- Grenzfrequenz f_G der Photozelle, die hierzu gehörende Lichtwellenlänge ist mit anzugeben
- Austrittsarbeit $W_{A,A}$ des Anodenmaterial bei den Versuchsbedingungen, der Wert ist in Elektronenvolt (eV) anzugeben

Bei Darstellung mit dem Praktikumsprogramm muss zur realistischeren Bestimmung der Unsicherheiten das Optionshäkchen „Standard“ neben der angegebenen Messabweichung abgewählt werden. Danach trägt man den Mittelwert der Unsicherheiten für $U_{B,0}$ aus den zugehörigen Geradendarstellungen ein und berechnet die Ausgleichsgerade neu.

Der gewonnene Wert für die Naturkonstante h ist einschließlich seiner Unsicherheit anzugeben und mit dem Tabellenwert zu vergleichen. Bei möglicherweise größeren Abweichungen sind Ursachen zu diskutieren.