

UNIVERSITÄT ZU KÖLN

MATHEMATISCH–NATURWISSENSCHAFTLICHE FAKULTÄT



PRAKTIKUM B

11. JUNI 2024

B1.4

Photoelektrischer Effekt

CATHERINE TRAN
CARLO KLEEFISCH
OLIVER FILLA

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
2	Theoretische Grundlagen	4
2.1	Physikalische Grundlagen	4
2.1.1	Elektrische Felder	4
2.1.2	Spannung	4
2.1.3	Transmission von Licht	4
2.1.4	Austrittsarbeit	5
2.1.5	Kontaktspannung	5
2.1.6	Photoeffekt	6
2.2	Elektrotechnik	7
2.2.1	Funktionsweise einer Photozelle	7
2.2.2	stromfreie Spannungsmessung	7
2.2.3	Kontaktspannung	8
3	Durchführung	9
3.1	Bestimmung von h/e	9
3.1.1	Gegenspannungsmethode	9
3.1.2	direkte Messmethode	9
3.2	Photostrom	9
3.2.1	Photoströme	9
3.2.2	Intensität	10
3.3	Untersuchung von LEDs mit der Photozelle	10
4	Auswertung	11
5	Fazit	12
6	Literatur	13

1 Einleitung

Der photoelektrische Effekt beschreibt die Auslösung von Elektronen aus einem Material, das mit Licht einer bestimmten Frequenz bestrahlt wird. Diese Elektronen haben nach dem Austritt eine kinetische Energie, die von der Frequenz des Lichts abhängt.

Die Energie der Elektronen hängt jedoch nicht von der Intensität des Lichtes ab. Dadurch kann nicht jede elektromagnetische Strahlung für den Photoeffekt verwendet werden. Die Intensität bestimmt stattdessen die Anzahl der Elektronen, die in einer bestimmten Zeit ausgelöst werden und einen Photostrom bilden.

Dieses Phänomen war bereits im 19. Jahrhundert beobachtet worden, konnte jedoch nicht erklärt werden. Ohne die Quantenphysik nahm man an, dass die Energie des Lichts von seiner Amplitude und Intensität abhängt, ähnlich wie bei makroskopischen Wellen. Dies stand jedoch im Widerspruch zum beobachteten Photoeffekt.

ALBERT EINSTEIN erklärte diesen Effekt im Jahr 1905 durch seine Lichtquantenhypothese. Nach dieser besteht das Licht einer Frequenz ν aus Quanten mit der Energie $h\nu$. Damit ist der fehlende Zusammenhang von Lichtintensität und kinetischer Energie der Elektronen erklärbar.

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Physikalische Grundlagen

2.1.1 Elektrische Felder

Das elektrische Feld ist ein Vektorfeld, welches jedem Punkt im Raum den Vektor der elektrischen Feldstärke \vec{E} zuordnet. Diese beschreibt die Coulomb-Kraft \vec{F}_C , die auf eine Ladung Q an diesem Ort wirkt.

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_C}{Q} \quad (2.1)$$

Feldlinien werden als Darstellungsmittel verwendet und liegen tangential an der Feldstärke \vec{E} . Feldlinien beginnen in positiven und enden in negativen Ladungen.

2.1.2 Spannung

Um eine elektrische Ladung von einem Ort A zu einem Ort B zu bewegen, muss elektrische Arbeit W_{AB} aufgebracht werden. Sie hängt von der Feldstärke ab.

Die *elektrische Spannung* beschreibt diese Arbeit unabhängig von der zu verschiebenden Ladung Q . [2]

$$U_{AB} = \frac{W_{AB}}{Q} \quad (2.2)$$

2.1.3 Transmission von Licht

Wie jede Welle kann auch Licht ein Medium durchdringen. Der *Transmissionsgrad* T eines Mediums beschreibt, welcher Anteil von einfallender Strahlung transmittiert wird. Er ist der Quotient aus der Beleuchtungsstärke vor dem Medium I_0 sowie hinter demselben I . [2]

$$T = \frac{I}{I_0} \quad (2.3)$$

Der Transmissionsgrad eines Mediums hängt im Allgemeinen von der betrachteten Wellenlänge ab. Es gibt verschiedene Filter, um die Strahlungsintensität zu reduzieren.

Ein *Farbfilter* lässt nur Licht einer bestimmten Wellenlänge hindurch. Für diese Wellenlänge beträgt der Transmissionsgrad näherungsweise 1, für alle anderen Wellenlängen 0.

Im Unterschied dazu lässt ein *Graufilter* oder Neutralfilter alle Wellenlängen in gleicher Stärke hindurch. Der Transmissionsgrad ist damit idealerweise unabhängig von der Wellenlänge.

2.1.4 Austrittsarbeit

Die Austrittsarbeit W_A ist die Energiedifferenz zwischen Fermi-Niveau E_F in einem Material und dem Vakuumniveau mit $E_{\text{pot}}(\infty) = 0$, das dem elektrischen Potential in unendlicher Entfernung entspricht. Da die Fermi-Niveaus materialabhängig sind, trifft dies auch auf die Austrittsarbeit zu. [1]

$$W_A = E_{\text{pot}}(\infty) - E_F \quad (2.4)$$

$$W_A = -E_F \quad (2.5)$$

Das einfachste quantenmechanische Erklärungsmodell ist der Potentialkasten, der in Abbildung 1 dargestellt ist.

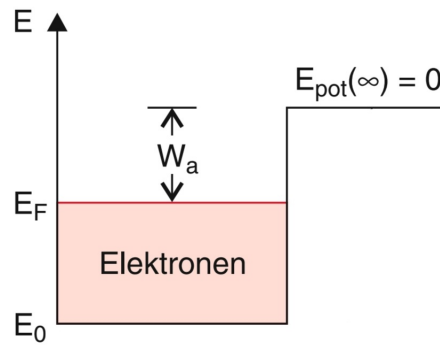


Abbildung 1: Austrittsarbeit W_a aus einem Potentialkasten [1]

2.1.5 Kontaktspannung

Berühren sich zwei unterschiedliche Metalle mit verschiedenen Austrittsarbeiten, so entsteht eine Spannung an der Kontaktstelle.

Diese *Kontaktspannung* U_K wird durch Elektronen verursacht, die von dem Metall mit der geringeren Austrittsarbeit W_1 in das mit der höheren Austrittsarbeit W_2 übergehen. Dadurch kommt es zu einem Ladungsungleichgewicht. Dieser Prozess endet in einem Gleichgewichtszustand, wenn U_K der Differenz der Fermi-Niveaus ΔE_F entspricht.

$$\Delta E_F = e \cdot (\Phi_2 - \Phi_1) \quad (2.6)$$

$$= e \cdot U_K \quad (2.7)$$

$$\Delta E_F = W_2 - W_1 \quad (2.8)$$

$$\Rightarrow U_K = \frac{W_2 - W_1}{e} \quad (2.9)$$

Betrachtet man die Elektronen im Metall als Elektronengas, dann gilt die Boltzmann-Verteilung. Die Kontaktspannung lässt sich aus dem Verhältnis der Elektronenzahldichten n_1 und n_2 bestimmen. Dabei finden die Boltzmann-Konstante k_B , die Temperatur T in Kelvin und die Elementarladung e Verwendung.

$$U_K = \frac{k_B T}{e} \ln\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \quad (2.10)$$

Aufgrund der dichten Gase muss korrekterweise die Fermi-Verteilung verwendet werden. [2] Dies wird jedoch in diesem Versuch vernachlässigt.

2.1.6 Photoeffekt

Der *äußere photoelektrische Effekt* beschreibt das Auslösen von Elektronen aus einer Materialoberfläche unter Bestrahlung mit elektromagnetischen Wellen. Dazu muss die Strahlung eine Grenzfrequenz ν_g aufweisen, deren Energie der Austrittsarbeit entspricht.

Ein Lichtquant mit einer Frequenz ν besitzt eine Energie $h\nu$, die durch das Planck'sche Wirkungsquantum h beschrieben wird. Aufgrund der Energieerhaltung erhält jedes herausgelöste Elektron eine maximale kinetische Energie E_{\max} .

$$E_{\max} = h\nu - W_A \quad (2.11)$$

$$= \frac{1}{2} m_e v^2 \quad (2.12)$$

$$h = 4.135 \cdot 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s} \quad (2.13)$$

Die Grenzfrequenz ν_g kann durch die Austrittsarbeit W_A bestimmt werden.

$$\nu_g = \frac{W_A}{h} \quad (2.14)$$

Der Photoeffekt hängt vollständig von der Frequenz ab, nicht von der Intensität der Strahlung. Bei hoher Intensität werden in einem Zeitrahmen mehr Elektronen herausgelöst. Beträgt die Frequenz weniger als die Grenzfrequenz, findet unabhängig von der Intensität kein äußerer Photoeffekt statt.

Die Austrittsarbeit liegt in der Größenordnung Elektronenvolt, beispielsweise 2.1 eV (Barium) oder 4.91 eV (Nickel). [1] Daher kann Licht im sichtbaren und ultravioletten Spektrum den äußeren Photoeffekt auslösen.

Im *inneren Photoeffekt* werden Elektronen nicht aus dem Material gelöst, sondern aus dem Valenzband in das Leitungsband angeregt. Dieser Prozess kann in Halbleitermaterialien stattfinden.

2.2 Elektrotechnik

2.2.1 Funktionsweise einer Photozelle

Eine Photozelle besteht aus einer Photokathode und einer Anode in einem Glaskolben, siehe Abbildung 2.

Fällt Licht auf die Photokathode, so werden durch den Photoeffekt Elektronen aus der Kathode gelöst. Einige dieser sogenannten *Photoelektronen* treffen auf die Anode. Dadurch entsteht ein elektrisches Feld zwischen den Elektroden.

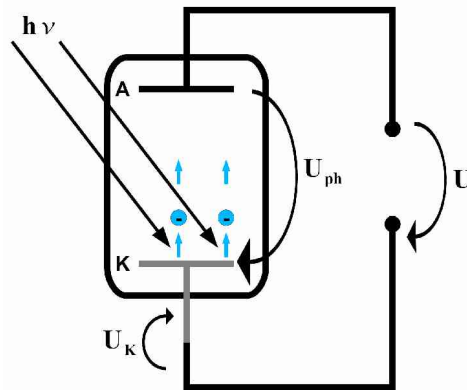


Abbildung 2: Darstellung einer Photozelle mit Kathode K und Anode A [3]

Die Photoelektronen können auf ihrem Weg zur Anode abgebremst werden, indem eine externe Spannung an den Elektroden angelegt wird. Hierbei muss an der Anode eine negative Spannung angelegt werden.

Die *Stoppspannung* $U_{\text{Ph},0}$ ist die minimale Spannung, die alle Photoelektronen abbremsst. Sie hängt von der Energie des Lichts $h\nu$ mit Frequenz ν und der Austrittsarbeit $W_A(K)$ der Kathode ab. [2]

$$e \cdot U_{\text{Ph},0} = h \cdot \nu - W_A(K) \quad (2.15)$$

2.2.2 stromfreie Spannungsmessung

Bei stromfreier Spannungsmessung wird die Spannung gemessen, ohne dass Strom durch das Messgerät fließt. Sie wird mittels eines Elektrometers durchgeführt.

Es gibt verschiedene Arten von Elektrometern, die alle nach dem gleichen Prinzip funktionieren. Eine elektrische Ladung ist an einer Art Zeiger angebracht, der sich in einem Kondensator befindet. Wird eine Spannung an den Kondensator angelegt, wird der Zeiger aufgrund des entstehenden elektrischen Feldes ausgelenkt. Eine passend angebrachte Skala ermöglicht die Bestimmung der Spannung anhand der Auslenkung des Zeigers [2].

Eine solche stromfreie Spannungsmessung wird in diesem Versuch verwendet.

2.2.3 Kontaktspannung

3 Durchführung

Zunächst wird das System genullt, d.h. es wird so eingestellt, dass die Gegenspannung U bei Kurzschluss der Photozelle 0 V ist.

3.1 Bestimmung von h/e

Der Widerstand des Elektrometers wurde auf $10^{13} \Omega$ eingestellt.

Filter	Farbe	λ [nm]
1	UV	366
2	Violett	405
3	Blau	436
4	Grün	546
5	Gelb	578

Tabelle 1: Eigenschaften der Interferenzfilter mit $\Delta\lambda = \pm 7\text{nm}$

3.1.1 Gegenspannungsmethode

Die Zeitkonstante wurde auf 0.3 s und der Messverstärker auf 10 eingestellt.

Filter	Farbe	U_0 [V]
1	UV	1.769
2	Violett	1.434
3	Blau	1.232
4	Grün	0.705
5	Gelb	0.645

Tabelle 2: Messergebnisse nach der Gegenspannungsmethode mit $\Delta U_0 = \pm 1\text{ mV}$

3.1.2 direkte Messmethode

Schon während der Messung fiel die große Ähnlichkeit der Messwerte mit denen aus der vorherigen Messung auf. Dass die Werte eher minimal kleiner sind liegt vermutlich an einem reduzierten Rauschen aus der Umgebung, da die nicht-abgeschirmten Kabel des Aufbaus noch weiter von der Photozelle entfernt waren.

3.2 Photostrom

3.2.1 Photoströme

Bei der Messung der Photoströme trat ein Nullpunktsfehler von 1 mV auf. Der Messverstärker wurde auf 10^4 gestellt, die Zeitkonstante auf 0.3 s. Der Photostrom wurde indirekt über einen Widerstand $R = 10\text{ k}\Omega$ gemessen.

Filter	Farbe	U [V]
1	UV	1.770
2	Violett	1.434
3	Blau	1.232
4	Grün	0.696
5	Gelb	0.635

Tabelle 3: Messergebnisse nach der direkten Methode mit $\Delta U_0 = \pm 1 \text{ mV}$

λ [nm]	Transmissionsgrad T [%]					
	1	2	3	4	5	6
436	68	48	33	28	20	14
546	67	46	31	23	16	11

Tabelle 4: Eigenschaften der Graufilter mit $\Delta T = 1 \%$

Filter	Farbe	Photostrom U_{Ph} [V]						
		ohne	1	2	3	4	5	6
3	Blau	1.777	1.486	1.067	0.807	0.655	0.440	0.338
4	Grün	0.608	0.536	0.357	0.265	0.190	0.126	0.090

Tabelle 5: Messungen der Photoströme über mit $\Delta U_{\text{Ph}} = 1 \text{ mV}$

3.2.2 Intensität

Ohne den Graufilter wurde eine Photospannung von $U_0 = 0.688 \pm 0.001 \text{ V}$ gemessen, mit Graufilter 6 eine von $U'_0 = 0.693 \pm 0.001 \text{ V}$. Aufgrund dieser Abweichungen sollte der Fehler auf zumindest $\pm 3 \text{ mV}$ erhöht werden.

3.3 Untersuchung von LEDs mit der Photozelle

Bezeichnung	U_0 [V]
blue	1.047
verde	0.891
true green	0.807

Tabelle 6: Messungen der LEDs mit $\Delta U_0 = 1 \text{ mV}$

4 Auswertung

5 Fazit

6 Literatur

- [1] W. Demtröder, “Experimentalphysik 3”, 5. Auflage, Springer Verlag, DOI 10.1007/978-3-662-49094-5
- [2] D. Meschede, “Gerthsen Physik”, 25. Auflage, Springer Verlag, DOI 10.1007/978-3-662-45977-5
- [3] Universität zu Köln, “B1.4: Photoeffekt: Bestimmung von h/e ”, Juli 2008, Online verfügbar unter https://teaching.astro.uni-koeln.de/sites/default/files/praktikum_b/Anleitung_1.4.pdf, Abruf am 10.04.2024