

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	Energiemessung	9
3.1.1	Gegenspannungsmethode	9
3.1.2	direkte Methode	10
3.2	Photostrom	10
3.2.1	Photostrom	11
3.2.2	Intensität	11
3.3	Leuchtdioden	12
4	Auswertung	13
4.1	Bestimmung von h/e	13
4.1.1	Gegenspannungsmethode	13
4.1.2	direkte Messmethode	13
4.2	Photostrom	13
4.2.1	Photoströme	13
4.2.2	Intensität	13
4.3	Untersuchung von Leuchtdioden mit der Photozelle	14
5	Fazit	15
6	Literatur	16

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.

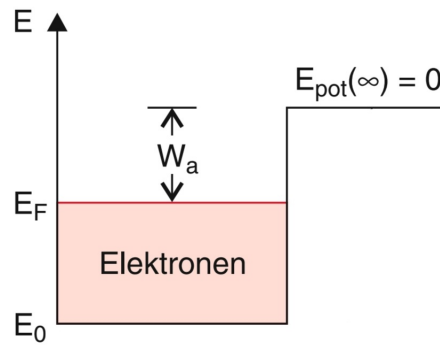


Abbildung 1: Austrittsarbeit W_a aus einem Potentialkasten [1]

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.

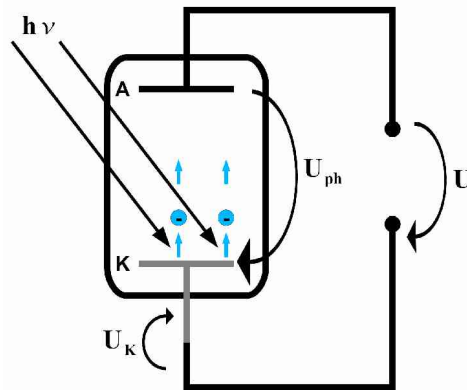


Abbildung 2: Darstellung einer Photozelle mit Kathode K und Anode A [3]

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

Eine Photozelle bildet das zentrale Element des Versuchs. Sie wird an einem Messverstärker angeschlossen, der das Signal verstärkt und zum Voltmeter leitet. Als Strahlungsquelle dient eine Quecksilberdampflampe, die nach 10 min ihre Betriebstemperatur erreicht hat.

Zunächst wird die Energie der Elektronen mit zwei verschiedenen Methoden gemessen, um $\frac{h}{e}$ zu bestimmen. Daraufhin wird die Abhängigkeit des Photostroms von der einfallenden Intensität untersucht. Schließlich werden Leuchtdioden als Strahlungsquellen verwendet, um deren Wellenlängen zu bestimmen.

Am Messverstärker können die Verstärkung und eine Zeitkonstante eingestellt werden. Letztere glättet die Messwerte, indem die Werte über die eingestellte Zeit gemittelt werden. Nach jeder Änderung des Versuchsaufbaus muss der Nullpunkt des Messverstärkers korrekt justiert werden.

3.1 Energiemessung

Es gibt zwei verschiedene Methoden, die Energie der herausgelösten Elektronen zu messen. Entweder wird die Stoppspannung oder die Spannung an der Photozelle gemessen. Ersteres bezeichnet man als Gegenspannungsmethode, letzteres als direkte Methode. Beide Methoden werden in den folgenden Abschnitten 3.1.1 bzw. 3.1.2 beschrieben.

Zur Bestimmung von $\frac{h}{e}$ und zur Vermessung der LEDs gibt 5 verschiedene Interferenzfilter, die jeweils auf eine andere Wellenlänge aus dem ultravioletten und sichtbaren Spektrum filtern. Da die Wellenlänge proportional zu der Energie des Lichts ist, wird ein linearer Zusammenhang mit der Steigung $\frac{h}{e}$ zwischen Wellenlänge und Spannung gemessen. Die Eigenschaften der Filter sind in Tabelle 1 dargestellt.

Dabei ist der Messverstärker auf den Modus “Elektrometer” eingestellt. Weiterhin wird der Innenwiderstand $10^{13} \Omega$ verwendet, um den Photostrom möglichst zu stoppen. Der Messverstärker wird mit 10-facher Verstärkung und der Zeitkonstante 0.3 s verwendet.

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

Bei der Gegenspannungsmethode wird die Stoppspannung gemessen, bei der der Photostrom verschwindet. Der Schaltplan ist in Abbildung 3 zu sehen. Anschließend wird das

Gegenspannungsmodul an die Photozelle angeschlossen.

Vor jeder Messung muss der Nullpunkt korrekt justiert werden. Dann wird Gegenspannung langsam von 0 V erhöht, bis der Spannungsabfall am Elektrometer verschwindet. Die angezeigte Gegenspannung ist die Stoppspannung U_0 .

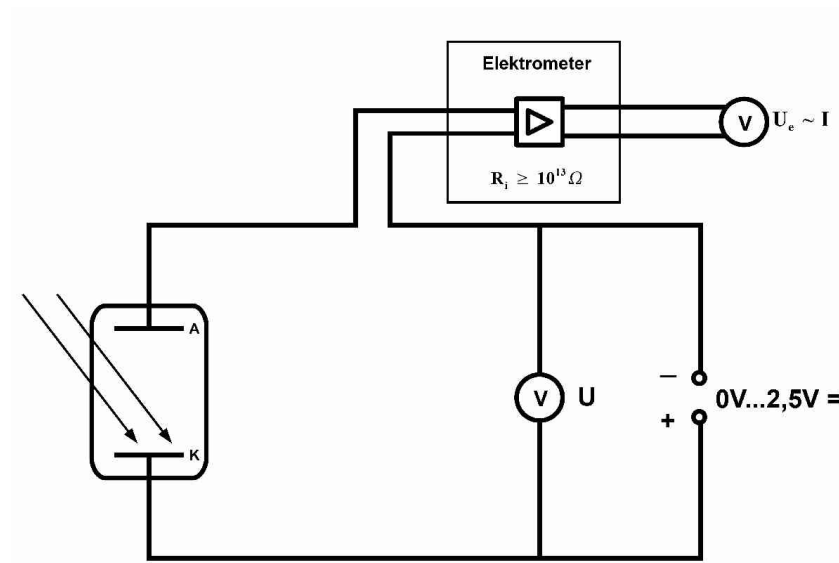


Abbildung 3: Schaltplan der Gegenspannungsmethode

3.1.2 direkte Methode

Anstatt der Gegenspannung kann auch die Spannung an der Photozelle direkt gemessen werden. Dazu wird die Zelle mit dem Elektrometer verbunden. Wie bei der Gegenspannungsmethode ist der Messverstärker als “Elektrometer” eingestellt, der Innenwiderstand beträgt auch hier $10^{13} \Omega$.

Anders als bei der Gegenspannungsmethode muss die Photozelle bei der direkten Methode vor jeder Messung entladen werden, um die Spannung zurückzusetzen. Zu diesem Zweck besitzt sie einen Kurzschlusschalter.

3.2 Photostrom

Zur Messung des Photostroms wird der Messverstärker auf “Low Drift”. Der Innenwiderstand wird auf $10 \text{ k}\Omega$ heruntergeregelt, um einen Photostrom zu ermöglichen. Die Messung des Stroms erfolgt indirekt über eine Spannung, dazu wird ein Widerstand $R = 10 \text{ k}\Omega$ benutzt.

Die Zeitkonstante wird wie bei den vorherigen Messungen in Abschnitt 3.1 als 0.3 s eingestellt, der Messverstärker dagegen auf 10^4 -fache Verstärkung erhöht. Da der Photostrom schwach ist, muss das Signal deutlich mehr verstärkt werden.

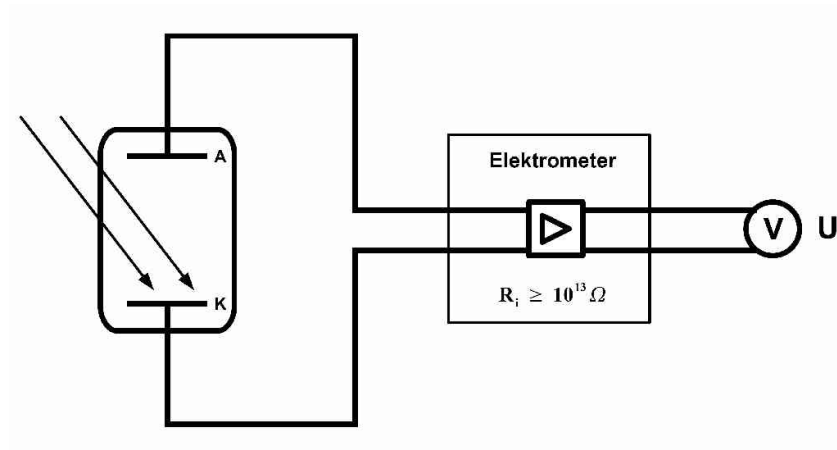


Abbildung 4: Schaltplan der direkten Methode

Für diesen Versuchsteil wird die direkte Methode verwendet, der Schaltplan ist in Abbildung 5 zu sehen. Die gemessene Spannung U_e ist durch Ohm'sche Gesetz proportional zu dem Photostrom I_{Ph} .

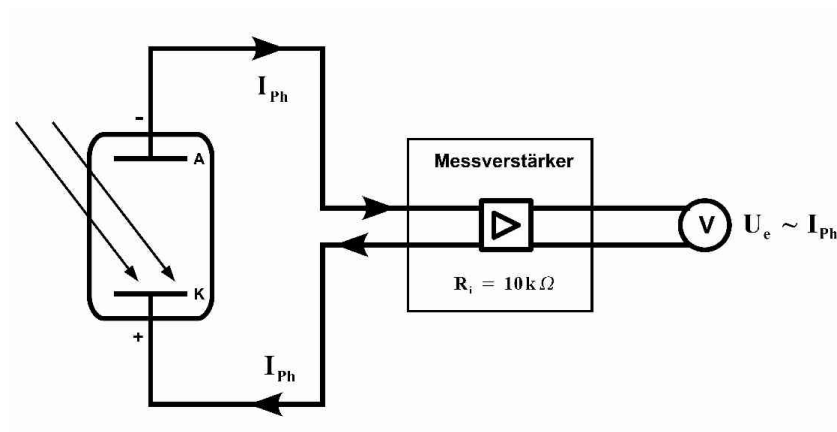


Abbildung 5: Schaltplan der Photostrommessung

3.2.1 Photostrom

Zur Messung des Photostroms werden abwechselnd der blaue und der grüne Interferenzfilter verwendet, zusammen mit einem von 6 Graufiltern. Die Eigenschaften der Graufilter sind in Tabelle 2 dargestellt, die der Interferenzfilter in Tabelle 1 in Abschnitt 3.1. Die Graufilter sind zwischen Interferenzfilter und Photozellegehäuse positioniert.

3.2.2 Intensität

Die direkte Messmethode aus Abschnitt 3.1.2 wird zudem dazu verwendet, die Abhängigkeit des Photostroms von der Intensität zu messen. Dabei wird die Stoppspannung

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

mit dem grünen Interferenzfilter je einmal mit und ohne Graufilter 1 gemessen. Dieser wird vor den Interferenzfilter gehalten, ohne befestigt zu werden.

3.3 Leuchtdioden

Zuletzt sollen die Wellenlängen von drei verschiedenen Leuchtdioden bestimmt werden.

Die jeweilige Leuchtdiode wird auf das Photozellengehäuse gesteckt und mit $I = 100\text{ mA}$ betrieben. Dann wurde die Spannung mit der direkten Methode bestimmt, die in Abschnitt 3.1.2 beschrieben ist.

Für die Messungen werden Leuchtdioden mit den Farbbezeichnungen “blue”, “verde” und “true green” verwendet. Der Schaltplan ist in Abbildung 6 ersichtlich.

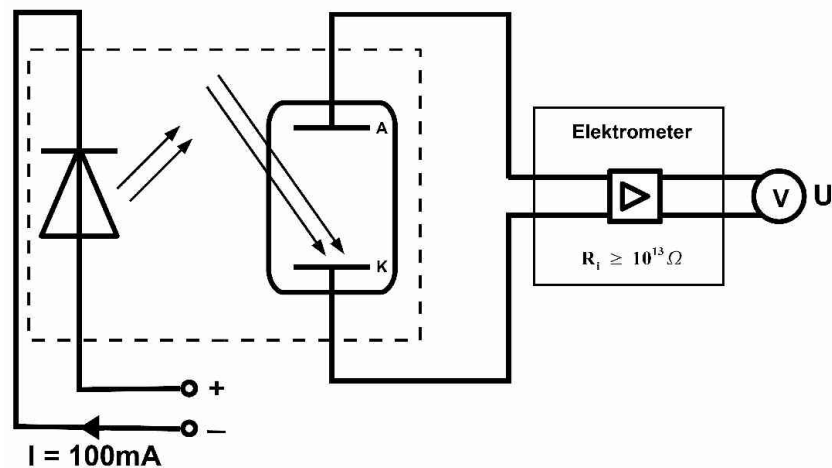


Abbildung 6: Schaltplan der Messungen mit LEDs

4 Auswertung

4.1 Bestimmung von h/e

4.1.1 Gegenspannungsmethode

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 3: Messergebnisse nach der Gegenspannungsmethode mit $\Delta U_0 = \pm 1$ mV

4.1.2 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.

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 4: Messergebnisse nach der direkten Methode mit $\Delta U_0 = \pm 1$ mV

4.2 Photostrom

4.2.1 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 $R = 10$ k Ω gemessen.

4.2.2 Intensität

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

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 $\Delta U_{\text{Ph}} = 1 \text{ mV}$

4.3 Untersuchung von Leuchtdioden mit der Photozelle

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

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

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