

# Universität zu Köln

## Institut für Astrophysik

### Versuchsprotokoll

#### B1.4: Photoeffekt. Bestimmung von $h/e$

Autoren: Jesco Talies<sup>1</sup>  
Timon Danowski<sup>2</sup>  
Durchgefuehrt am: 7.01.2021  
Betreuer: Marcel Bast

<sup>1</sup> jtalies@mail.uni-koeln.de, Matrikel-Nr.: 7348338

<sup>2</sup> tdanowsk@mail.uni-koeln.de, Matrikel-Nr.: 7348629

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Theoretische Grundlagen</b>	<b>1</b>
2.1	Überblick . . . . .	1
2.2	Austrittsarbeit . . . . .	1
2.3	Kontaktspannung . . . . .	1
2.4	Photoeffekt . . . . .	2
2.5	Elektrisches Feld und Spannung . . . . .	2
2.6	Funktionsweise einer Photozelle . . . . .	2
2.7	Stromfreie Spannungsmessung . . . . .	3
2.8	Transmissionsgrad . . . . .	3
2.9	Farbfilter . . . . .	3
2.10	Graufilter . . . . .	3
<b>3</b>	<b>Auswertung</b>	<b>4</b>
3.1	Aufbau . . . . .	4
3.2	Bestimmung von $h/e$ . . . . .	4
3.2.1	Gegenspannungsmethode . . . . .	5
3.2.2	Direkte Messung . . . . .	6
3.2.3	Vergleich . . . . .	7
3.3	Intensität und Photostrom . . . . .	7
3.4	Untersuchung von LEDs mit der Photozelle . . . . .	9
<b>4</b>	<b>Diskussion</b>	<b>9</b>
4.1	Zu Bestimmung von $h/e$ . . . . .	9
4.2	Zu Intensität und Photostrom . . . . .	9
4.3	Zu Untersuchung von LEDs mit der Photozelle . . . . .	10

# 1 Einleitung

In diesem Versuch wird das Verhältnis Plancksche Wirkungsquantum/Elementar Ladung über den äußeren photoelektrischen Effekt näher bestimmt. Die Erklärung des Photoeffekts leitete den Wellen-Teilchen-Dualismus des Lichts ein und brachte Albert Einstein den Nobelpreis ein. Es wird ein Phänomen betrachtet, was sich zur Zeit der ersten Durchführung des Experiments nicht erklären ließ, da man ausschließlich von Licht als Welle dachte. Die Stoppspannung in der Photozelle bleibt gleich, bei sinkender Intensität des Lichts.

Nach Einstein soll nun das Licht als Quant der Energie  $h\nu$  betrachtet werden und daraus wird das Verhältnis  $\frac{h}{e}$  bestimmt.

## 2 Theoretische Grundlagen

### 2.1 Überblick

Um das bereits angesprochene Wirkungsquantum zu messen nutzt man den Photoeffekt, bei dem Photonen mit ausreichend hoher Energie bei Kollision mit Elektronen eines Metalls ein solches aus der Oberfläche löst. Die Energie eines Photons ist dabei direkt proportional zu seiner Frequenz d.h. der Wellenlänge des verwendeten Lichts:

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

Die kinetische Energie des rausgelösten Elektrons ergibt sich damit über die Austrittsarbeit  $W_A$  des Elektrons und der Energie des Photons:

$$E_{kin} = h \cdot \nu - W_A \quad (2)$$

Bestrahlt man nun eine Photozelle mit Licht bekannter Wellenlänge kann durch die Messung der Stoppspannung der Photozelle auf das Verhältnis  $h/e$  geschlossen werden.

$$U_0 = \frac{h \cdot \nu}{e} - \frac{W_A}{e} \quad (3)$$

Im Folgenden soll nun noch einmal die Physik der aufgeführten Formeln näher erläutert werden.

### 2.2 Austrittsarbeit

Die Austrittsarbeit  $W_A$  ist die Energie, die mindestens aufzubringen ist um ein Elektron aus der Oberfläche eines Festkörpers zu lösen. Sie unterscheidet sich von der Bindungsenergie, da die Austrittsarbeit anders als die Bindungsenergie nicht für jedes Elektron bzw. jede Bindungsschale definiert ist, sondern für das jeweilige Element. Sie beschreibt die generelle minimale Energie zum auslösen eines Elektrons. In der Regel liegt die Austrittsarbeit bei einigen eV.

### 2.3 Kontaktspannung

Da wir bei sowohl der Anode als auch der Kathode eine Verbindung von zwei verschiedenen Stoffen haben, die Verbindung zwischen Anode bzw. Kathode und dem Leiter, kommt es an den Kontaktflächen zu einer sogenannten Kontaktspannung. Diese Spannung rührt daher, dass zwei verschiedene Leiter aus verschiedenen Materialien auch verschiedene Austrittsarbeiten besitzen. Da jedoch im Gleichgewicht die Fermi-Level beider Leiter gleich sein sollten, kommt es zu einem Elektronenfluss vom Leiter mit niedrigerer Austrittsarbeit (hier hauptsächlich der Kathode) zum Leiter mit höherer Austrittsarbeit. Im Gleichgewicht ist dies die Kontaktspannung.

In unserem Experiment ist die Kontaktspannung besonders dadurch relevant, dass unsere Stoppspannung um eben diese verschoben wird. Wir gehen jedoch lediglich von einer Kontaktspannung an der Kathode aus, da die der Anode durch die Bedingung

$$W_A(A) > W_A(K) \quad (4)$$

verhältnismäßig klein ausfällt.

## 2.4 Photoeffekt

Um die Energie von Photonen näher zu messen macht man sich meist den äußeren photoelektrischen Effekt zu nutze. Stößt ein Photon mit mehr Energie, d.h. mit einer ausreichend hohen Frequenz, auf eine Metalloberfläche so kann dieses durch Abgabe seiner Energie das äußerste Elektron des getroffenen Atoms herauslösen. Da die Photonen bei diesem Prozess vollständig absorbiert werden, kommt es meist nicht nur zur Auslösung eines Elektrons, sondern auch zu seiner Beschleunigung, da ein losgelöstes Elektron nach dem Stoß die Energie

$$E_{kin} = E_{photon} - W_A = h \cdot \nu - W_A \quad (5)$$

besitzt.

## 2.5 Elektrisches Feld und Spannung

Ein geladener Körper baut in seiner Umgebung ein elektrisches Feld auf. Das elektrische Feld hat an jedem Punkt einen Betrag und eine Richtung, es ist also ein Vektorfeld. Auf eine Ladung  $q_0$ , welche sich in dem elektrischen Feld am Punkt P befindet, wirkt die elektrische Kraft  $F_e$ . Diese ist proportional zur Ladung. Es gilt:

$$F_e = q_0 E \Leftrightarrow E = \frac{F_e}{q_0} \quad (6)$$

wobei E das elektrische Feld am Punkt P ist. Damit man eine elektrische Ladung in einem Feld verschieben kann, muss Arbeit W verrichtet werden, gemäß:

$$W(r_1, r_2) = - \int_{r_1}^{r_2} F_e dr = - \int_{r_1}^{r_2} E \cdot q_0 dr \quad (7)$$

mit  $r_1$  Startpunkt und  $r_2$  Endpunkt. Dieses Integral wird als Spannung U zwischen den Punkten  $r_1$  und  $r_2$  bezeichnet. Man definiert:

$$U(r_1, r_2) = - \int_{r_1}^{r_2} E dr \quad (8)$$

und erhält als Energie  $\Delta E$ , welche die Ladung  $q_0$  aufnimmt, wenn sie sich von  $r_1$  nach  $r_2$  bewegt:

$$\Delta E = W(r_1, r_2) = q_0 U(r_1, r_2) \quad (9)$$

Wenn diese Energie  $\Delta E$  unabhängig vom Weg zwischen  $r_1$  und  $r_2$  ist, so hat das elektrische Feld ein eindeutiges Potential  $U(r)$ . Die Spannung  $U(r_1, r_2)$  kann man somit auch schreiben, als:

$$U(r_1, r_2) = U(r_1) - U(r_2) \quad (10)$$

## 2.6 Funktionsweise einer Photozelle

Eine Photozelle besteht aus zwei Elektroden, einer Kathode und einer Anode. Die Kathode wird mit Licht bestrahlt. Photonen mit genügend Energie können Elektronen mit dem Photoeffekt aus der Kathode lösen. Die gelösten Elektronen bewegen sich weg von der Kathode und einige treffen auf die Anode, welche sich auflädt. Dies passiert solange, bis das elektrische Feld zwischen der Anode und Kathode zu groß ist, als dass die Elektronen mit der größten Energie dieses überwinden könnten (2). Diesen Zustand bezeichnet man als Sättigung.

## 2.7 Stromfreie Spannungsmessung

Um die kinetische Energie der rausgelösten Elektronen näher zu bestimmen wird in diesem Experiment unter anderem auf eine stromfreie Spannungsmessung zurückgegriffen. Bei diesem Prozess wird die Aufladung der Anode durch eine extern angelegte Gegenspannung bzw. das daraus resultierende Gegenfeld verhindert, wodurch ein Stromfluss unterbunden wird. Nähert man sich nun experimentell der minimalen Spannung bei der kein Elektron die Anode erreicht, d.h. bei der der Stromfluss unterbunden wird ( $I=0$ ), so entspricht die Gegenspannung der maximalen kinetischen Energie der rausgelösten Elektronen.

$$E_{kin} = e \cdot U \Leftrightarrow E_{kin}/e = U \quad (11)$$

## 2.8 Transmissionsgrad

Die im Experiment verwendeten Filter unterscheiden sich in ihrem sogenannten Transmissionsgrad. Dieser Transmissionsgrad gibt das Verhältnis der Strahlungsintensität vor und hinter dem Filter an. Er beschreibt den Grad der Abschwächung der Strahlung.

$$T = \frac{I}{I_0} \quad (12)$$

## 2.9 Farbfilter

Ein Farbfilter dient als Filter für die jeweilige Farbe, so lässt beispielsweise ein Blaufilter lediglich blaues Licht durch und ein Rotfilter nur rotes. Dabei wird meist eingefärbtes Glas oder Kunststoff verwendet.

## 2.10 Graufilter

Anders als ein Farbfilter soll ein Graufilter keinesfalls eine einzelne Wellenlänge bzw. ein ausgewähltes Spektrum herausfiltern. Die Homogenität eines Graufilters sorgt für eine gleichmäßige Abschwächung aller Wellenlängen.

### 3 Auswertung

#### 3.1 Aufbau

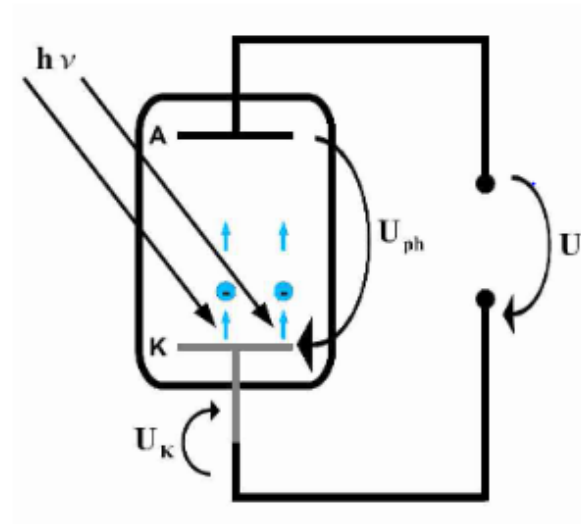


Abbildung 1: Aufbau

Aus einer Quecksilberdampfampe werden Photonen emittiert in Richtung der Kathode. Dort werden die Elektronen mittels des Photoeffekts rausgelöst und in Richtung der Anode beschleunigt. Zwischen Anode und Kathode liegt eine sogenannte Stoppspannung an, welche verhindert, dass Photonen jeder Energie auf die Anode treffen. Die auftreffenden Photonen werden mit Hilfe eines Schaltkreises detektiert.

#### 3.2 Bestimmung von $h/e$

Um nun  $h/e$  näher zu bestimmen wurden sowohl über die Gegenspannungsmethode als auch über die direkte Messmethode für 5 verschiedene Wellenlängen, welche durch Vorhalten eines Interferenzfilters vor der Quecksilberdampfampe erzeugt wurden, die jeweiligen Stoppspannungen gemessen. Aus der Formel

$$U_0 = U_{ph,0} - U_K = \frac{h}{e} \cdot \frac{c}{\lambda} - \frac{W_A(A)}{e} \quad (13)$$

geht nun hervor, dass nach einer Geradenanpassung unserer Messwerte die Steigung der Geraden, dem Verhältnis  $\frac{h}{e}$  entspricht und  $-\frac{W_A(A)}{e}$  dem y-Achsenabschnitt. Hier kann angenommen werden, dass  $W_A(A) \geq W_A(K)$  d.h.

$$eU_{ph,0} = h\nu - W_A(K) \quad (14)$$

daraus resultiert eine Kontaktspannung  $U_K$  um die, die Stoppspannung gegenüber der äußeren Spannung verschoben ist. Diese Kontaktspannung ist eine Folge der materialabhängigen Austrittsarbeiten der Anode und Kathode, deren Differenz sich beschreiben lässt als  $U_K$ . Für die Spannung zwischen den beiden Materialien gilt

$$U_K = \frac{W_A(A) - W_A(K)}{e} \quad (15)$$

sodass Gleichung 13 folgt.

### 3.2.1 Gegenspannungsmethode

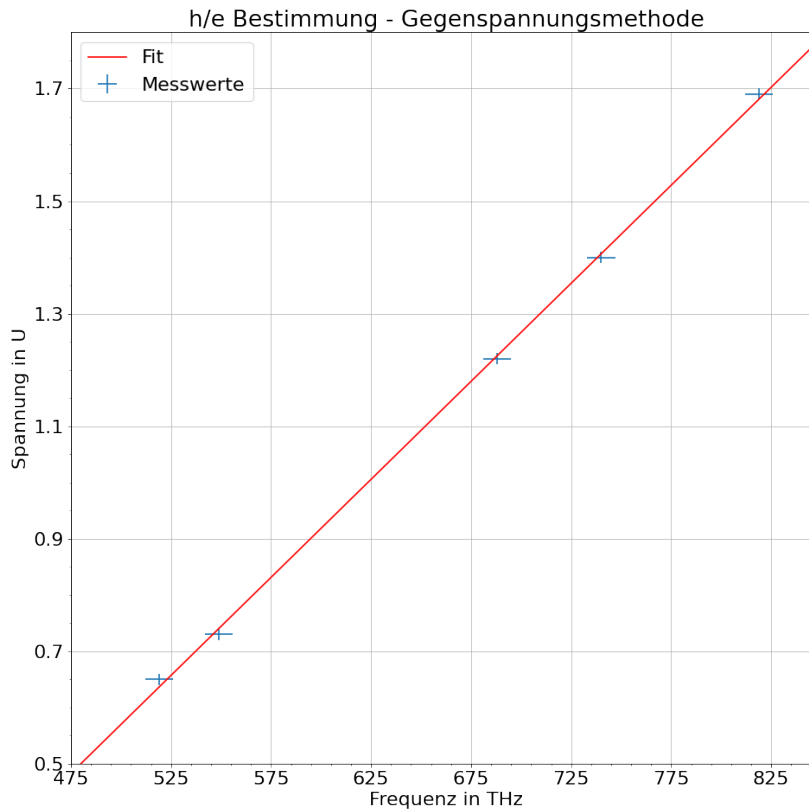
Für die Messung mit Gegenspannung ergaben sich folgende Messwerte

Filter	$\lambda$ [nm]	$\Delta\lambda$ [nm]	$\nu$ [THz]	$\Delta\nu$ [THz]	$U_0$ [V]	$\Delta U_0$ [V]
1	366	7	819	16	1,69	0,01
2	405	7	740	13	1,40	0,01
3	436	7	688	11	1,22	0,01
4	546	7	549	7	0,73	0,01
5	578	7	519	6	0,65	0,01

wobei dir wir die Frequenz  $\nu$  und den Fehler wie folgt berechnet haben:

$$\nu = \frac{c}{\lambda} \quad (16)$$

$$\Delta\nu = \frac{c}{\lambda^2} \cdot \Delta\lambda \quad (17)$$



**Abbildung 2:** h/e Bestimmung Gegenspannungsmethode

Aus der Geradenanpassung ging eine Geradensteigung von

$$\frac{h}{e} = (3,48 \pm 0,05) \cdot 10^{-15} \text{Vs} \quad (18)$$

und ein Ordinatenabschnitt von

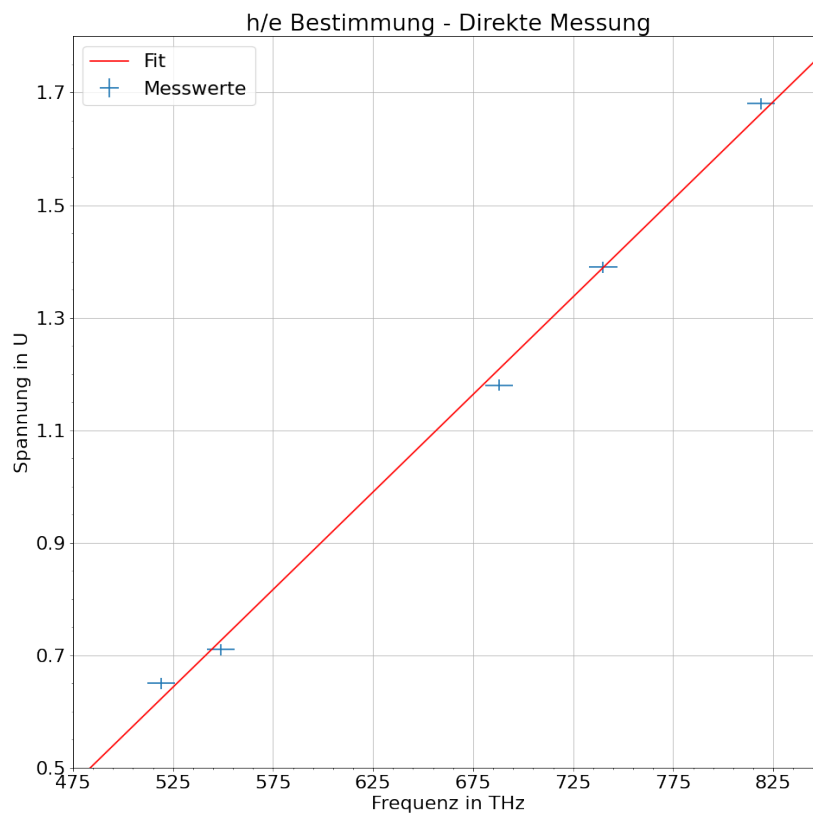
$$\frac{W_A(A)}{e} = (1.17 \pm 0,03)V \quad (19)$$

hervor.

### 3.2.2 Direkte Messung

Über die direkte Messung ergaben sich folgende Messwerte

Filter	$\lambda$ [nm]	$\Delta\lambda$ [nm]	$\nu$ [THz]	$\Delta\nu$ [THz]	$U_0$ [V]	$\Delta U_0$ [V]
1	366	7	819	16	1,68	0,01
2	405	7	740	13	1,39	0,01
3	436	7	688	11	1,18	0,01
4	546	7	549	7	0,71	0,01
5	578	7	519	6	0,65	0,01



**Abbildung 3:** h/e Bestimmung Direkte Messung

Aus der Geradenanpassung ging eine Geradensteigung von

$$\frac{h}{e} = (3,47 \pm 0,11) \cdot 10^{-15} \text{Vs} \quad (20)$$

und ein Ordinatenabschnitt von

$$\frac{W_A(A)}{e} = (1,18 \pm 0,07) \text{V} \quad (21)$$

hervor.



### 3.2.3 Vergleich

Beide Methoden liefern uns sehr ähnliche Ergebnisse,

Methode	$h/e$	$W_A(A)/e$
Gegenspannung	$3,48 \pm 0,05$	$1,17 \pm 0,03$
Direkt	$3,47 \pm 0,11$	$1,18 \pm 0,07$
Literatur	4,14	weder $h$ noch $e$ sind fehlerbehaftet

jedoch liefert keine der beiden Methoden ein Ergebnis in welchem der Literaturwert<sup>1</sup> liegt. Dennoch lässt sich zur Genauigkeit beider Methoden eine Aussage treffen, da bei der direkten Messmethode nur sehr geringe Ströme fließen, dies ist zum Teil auch notwendig, da wir für die Auswertung unserer Messdaten eine stromfreie Spannungsmessung annehmen, d.h. wir erwarten, dass die gemessenen Ströme gegen 0 gehen. Dennoch ist für kleine Ströme ( $R = 10^{13}\Omega$  und  $U = (0 - 2)V \Rightarrow I \approx 10^{-13}A$ ) die Messung über ein Messgerät bereits eine Herausforderung und kann zu einem starken Problem führen, sobald durch leichte Erschütterungen oder Störfelder diese minimalen Ströme beeinflusst werden. Da jedoch in dieser Durchführung beide Methoden vergleichbar genaue Ergebnisse liefern lässt sich die Abweichung vom Literaturwert auf einen konzeptionellen Fehler zurückzuführen.

### 3.3 Intensität und Photostrom

In diesem Versuchsteil soll der Zusammenhang zwischen Intensität und Photostrom näher untersucht werden, dafür werden bei bekannter Wellenlänge durch Anwendung verschiedener Graufilter mit verschiedenen Transmissionsgraden die Intensitäten variiert.

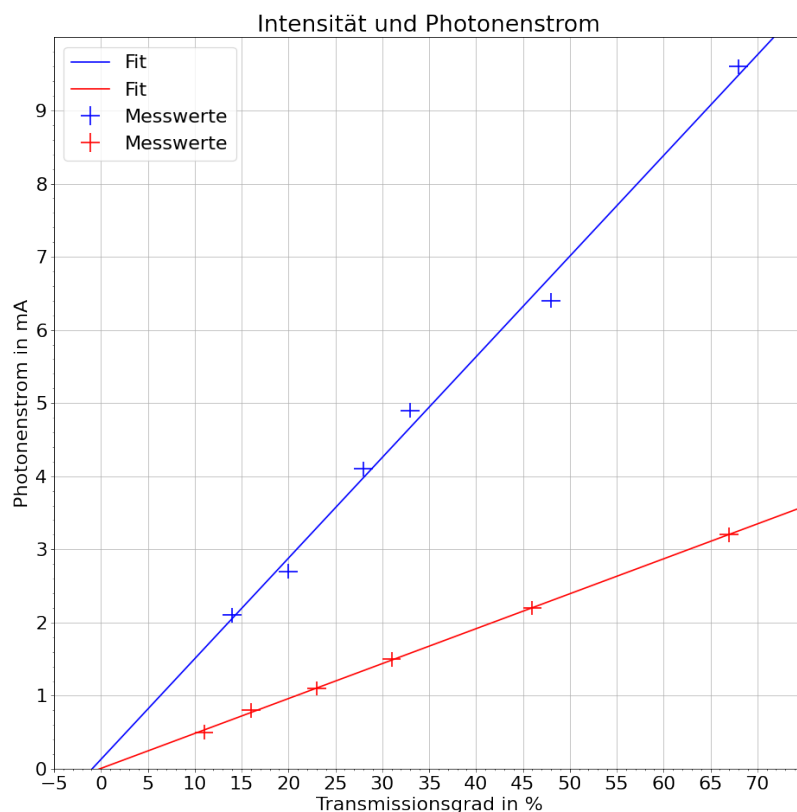
Dafür wird die Schaltung der direkten Messung um einen Messverstärker erweitert, welcher den Widerstand auf ca.  $10^4\Omega$  reduziert, wodurch Ströme im mA Bereich messbar sind.

Die Messung ergab folgende Werte:

$\lambda = 436\text{nm}$				
Filter	T [%]	$\Delta T$ [%]	I [ $10^{-9}A$ ]	$\Delta I$ [ $10^{-9}A$ ]
1	68	1	9,6	0,1
2	48	1	6,4	0,1
3	33	1	4,9	0,1
4	28	1	4,1	0,1
5	20	1	2,7	0,1
6	14	1	2,1	0,1

$\lambda = 546\text{nm}$				
Filter	T [%]	$\Delta T$ [%]	I [ $10^{-9}A$ ]	$\Delta I$ [ $10^{-9}A$ ]
1	67	1	3,2	0,1
2	46	1	2,2	0,1
3	31	1	1,5	0,1
4	23	1	1,1	0,1
5	16	1	0,8	0,1
6	11	1	0,5	0,1

<sup>1</sup><http://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?h>



**Abbildung 4:** Intensität und Photonenstrom

Bei beiden Messungen ist deutlich der lineare Zusammenhang zwischen Transmissionsgrad und Photostrom zu erkennen. Auch fällt auf, dass das Licht mit der kleineren Wellenlänge höhere Photoströme erzeugt. Dies liegt nicht an der höheren Energie der Photonen, sondern an der höheren Intensität des Lichts. Die unterschiedliche Intensität hängt von der Wahl der Filter ab. Die unterschiedliche Steigung der beiden Linien resultiert aus den unterschiedlichen maximal Intensitäten der Quelle. Da die maximal Intensität der blauen Linie größer ist, als die der roten, ist damit auch die Steigung der Blauen größer als die der roten Linie.

Eine weitere interessante Beobachtung ist das Eintreten des Photoeffekts selbst bei den niedrigsten Intensitäten, woraus folgt, dass das Eintreten des Photoeffekts unabhängig von der Intensität ist. Jedoch steigt die Anzahl der Ereignisse mit der Intensität, was auf die Teilchennatur und die höhere Teilchenzahl bei höherer Intensität zurückzuführen ist.

Vergleicht man die Stoppspannung des Aufbaus für 2 verschiedene Transmissionsgrade erhält man folgende Messwerte:

Filter	Transmissionsgrad [%]	Stoppspannung [V]
0	100	$0,72 \pm 0,01$
1	$67 \pm 1$	$0,72 \pm 0,01$

Man kann direkt aus der Tabelle entnehmen, dass die Energie der transmittierten Photonen nicht beeinträchtigt wird, lediglich die Anzahl wird reduziert. Die kinetische Energie eines Elektrons hängt also nur von der Wellenlänge des Lichts ab, nicht jedoch von dessen Intensität. Dieses Erkenntnis widerspricht der ursprünglichen Annahme, dass die Intensität des Lichts proportional

zur Energie ist.

### 3.4 Untersuchung von LEDs mit der Photozelle

Eine praktische Anwendung der oben untersuchten physikalischen Phänomene ist beispielsweise die Bestimmung von Wellenlängen unbekannter Lichtquellen. Hierfür haben wir für 3 LEDs die Stoppspannung bestimmt. Diese gibt bei den LEDs jedoch nur die obere Grenze des ca. 30 nm breiten Spektrums an, da erst dann eine vollständig stromfreie Messung zustande kommt.

Die Messung der drei Dioden ergab folgende Spannungen:

LED	$U_0$ [V]	$\Delta U_0$ [V]
1	0,99	0,01
2	0,86	0,01
3	0,80	0,01

Mit den aus dem ersten Abschnitt gewonnenen Daten lässt sich nun über

$$U_0 = \frac{h}{e} \cdot \nu - \frac{W_A}{e} \Leftrightarrow \nu = \frac{U_0 + b}{a} \quad (22)$$

Mit Hilfe der Beziehungen  $\lambda = \frac{c}{\nu}$  und  $\Delta\lambda = \frac{c}{\nu^2} \Delta\nu$  lässt sich die zugehörige Wellenlänge bestimmen.

$$\lambda = \frac{c \cdot a}{U_0 + b} \quad (23)$$

mit

$$\Delta\lambda = \sqrt{\left(\frac{\Delta a \cdot c}{(U_0 + b)}\right)^2 + \left(\frac{\Delta b \cdot a \cdot c}{(U_0 + b)^2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta U_0 \cdot a \cdot c}{(U_0 + b)^2}\right)^2} \quad (24)$$

mit  $a = (3,48 \pm 0,05) \cdot 10^{-15} \text{Vs}$  und  $b = (1,17 \pm 0,03) \text{V}$

LED	$\lambda$ [nm]	$\Delta\lambda$ [nm]	Literaturwert
1	483	13	450-500 (Blau)
2	514	15	500-570 (Grün)
3	530	16	500-570 (Grün)

Literaturwerte für die Farben wurden von dieser Tabelle<sup>2</sup> entnommen. Allen LEDs konnte eine Farbe zugewiesen werden die im Fehlerbereich liegen. Die bestimmten Wellenlängen sind mit einer Aufspaltung von etwa 20nm im üblichen Bereich für LED Licht.

## 4 Diskussion

### 4.1 Zu Bestimmung von $h/e$

Der Literaturwert stimmt nicht mit unseren ermittelten Werten überein. Begründet könnte diese Diskrepanz mit der empfindlichen Messapparatur, welche schon durch kleine Stöße ausschlaggebende Veränderungen zeigt.

### 4.2 Zu Intensität und Photostrom

Anhand der oben abgebildeten Diagramme erkennt man sehr gut die Proportionalität zwischen Photostrom und Intensität des Lichts. Auch ist, wie zu erwarten, die Stoppspannung der beiden Messungen gleich. Somit konnten wir in diesem Versuchsteil nachweisen, dass die maximale kinetische Energie der rausgelösten Elektronen unabhängig von der Intensität des einfallenden Lichts ist.

<sup>2</sup><https://de.wikipedia.org/wiki/Leuchtdiode>

### **4.3 Zu Untersuchung von LEDs mit der Photozelle**

Die bestimmten Wellenlängen der verwendeten LEDs stimmen gut mit den Literaturwerten überein. Damit konnte jeder LED eine Farbe zugewiesen werden.