



## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Theorie</b>	<b>3</b>
1.1	Einführung . . . . .	3
1.2	Der photoelektrische Effekt . . . . .	3
1.3	Das h/e-Experiment . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Aufbau und Vorbereitung</b>	<b>5</b>
2.1	Test der Batteriespannung . . . . .	5
2.2	Vormontage des Versuchsaufbaus . . . . .	6
2.3	Justage des h/e-Apparates . . . . .	7
2.4	Ablauf einer Messung . . . . .	7
2.5	Verwendung der Filter . . . . .	8
<b>3</b>	<b>Versuchsprogramm</b>	<b>8</b>
3.1	Bestimmung der Planckschen Konstante . . . . .	8
3.1.1	Messprogramm . . . . .	8
3.2	Auswertung . . . . .	9
3.3	Abschätzung des Photostroms; Quantenausbeute der Photozelle und Lichtleistung	9
3.3.1	Kondensatorkapazität und Photostrom . . . . .	9
3.3.2	Die Photozelle als Spektrometer . . . . .	9
3.3.3	Quantenausbeute der Photozelle und Lichtleistung . . . . .	10
<b>4</b>	<b>Funktion des h/e-Apparates</b>	<b>11</b>
<b>5</b>	<b>Fehlerrechnung</b>	<b>12</b>
5.1	Planckschens Wirkungsquantum . . . . .	12
5.2	Wellenlänge der LEDs . . . . .	12
5.3	Quantenausbeute . . . . .	12
5.4	Lichtleistung/Strahlungsleistung . . . . .	13
<b>6</b>	<b>Auswertung</b>	<b>14</b>
6.1	Überprüfung des Wellenmodells . . . . .	14
6.2	Bestimmung des Planckschen Wirkungsquantums und der Austrittsarbeit . . . . .	14
6.3	Die Photozelle als Spektrometer . . . . .	16
6.4	Bestimmung der Quantenausbeute und Lichtleistung . . . . .	17
6.4.1	Photonenstrom . . . . .	17
6.4.2	Kondensatorkapazität/Elektronenstrom . . . . .	17
6.4.3	Quantenausbeute . . . . .	17
6.4.4	Lichtleistung/Strahlungsleistung . . . . .	17

<b>7 Zusammenfassung</b>	<b>18</b>
--------------------------	-----------

<b>8 Anhang</b>	<b>19</b>
-----------------	-----------

## Abbildungsverzeichnis

1	.....	8
2	Stoppspannung in Abhängigkeit von der Intensität .....	14
3	Messreihe 1 .....	15
4	Messreihe 2 .....	15
5	Vermessung der LEDs .....	16

## Tabellenverzeichnis

1	Lichtleistung .....	17
2	1 Messreihe .....	19
3	2 Messreihe .....	19
4	Stoppspannung und Intensität .....	19
5	LEDs .....	19
6	Photodiode Ausbeute .....	20

## Zielsetzung des Versuchs

Hauptziel des Versuches ist die Überprüfung des Wellenmodells und der Planckschen Theorie. Im Rahmen dieser Überprüfung wird das Plancksche Wirkungsquantum, die Quantenausbeute der Verwendeten Photozelle und die Lichtleistung der Quecksilberdampfampe, mithilfe des Photoelektrischen Effekts und einer Photozelle, bestimmt. Außerdem wird überprüft ob die Photozelle als Spektrometer verwendet werden kann.

## Geräte

- Netzteil
- Diverse LEDs
- Quecksilberdampfampe
- $h/e$ -Apparat
- Photodiode
- Gitterlinse
- Volt- und Amperemeter
- Diverse Halterungen

# 1 Theorie

## 1.1 Einführung

Max Planck entdeckte, dass die Emission oder Absorption von Strahlung mit Übergängen bzw. Sprüngen zwischen zwei Energieniveaus verbunden ist. Der Energieverlust oder -gewinn des Oszillator wird emittiert oder absorbiert als ein Quant der Strahlungsenergie, dessen Größe durch folgende Gleichung beschrieben wird:

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

- E ist die Strahlungsenergie
- $\nu$  ist die Frequenz der Strahlung
- h ist eine fundamentale Naturkonstante, welche später als Plancksche Konstante bekannt wurde.

## 1.2 Der photoelektrische Effekt

Bei der photoelektrischen Emission wird durch den Einfall von Licht auf ein Material die Emission von Elektronen verursacht.

Dort sagt das klassische Wellenmodell voraus, dass mit zunehmender Intensität des einfallenden Lichts die Amplitude und damit auch die Energie der Wellen ansteigen würde. Das würde bewirken, dass energiereiche Photoelektronen emittiert werden.

Das Quantenmodell sagt jedoch voraus, dass unabhängig von der Intensität eine höhere Frequenz des Lichts zu energiereichen Photoelektronen führt, während eine größere Intensität lediglich eine größere Anzahl an Elektronen (Photostrom) zur Folge hat. In den ersten Jahren nach 1900 hat sich das Quantenmodell bei vielen Forschern bestätigt.

Einstein verwendete Plancks Theorie und beschrieb den photoelektrischen Effekt mit den Begriffen des Quantenmodells:

$$E = h\nu = E_{kin,max} + W_0 \quad (2)$$

- $E_{kin,max}$  ist die maximale kinetische Energie der emittierenden Photoelektronen und
- $W_0$  ist die Energie, die erforderlich ist um sie von der Materialoberfläche zu lösen
- E ist die Energie, die durch den Lichtquant zugeführt wird

## 1.3 Das h/e-Experiment

Ein Photon mit der Energie  $h\nu$  trifft auf ein Elektron in der Kathodenfläche einer Vakuumröhre. Das Elektron benötigt nun mindestens den Anteil  $W_0$  der Photoenergie um die Kathode zu verlassen und dabei bleibt ihm maximal die Energie  $E_{kin,max}$  als kinetische Energie.

Im Normalfall erreichen die so emittierten Elektronen die Anodenröhre und können so als Photostrom nachgewiesen werden. Legt man nun aber eine Gegenspannung  $U$  zwischen Anode und Kathode an, so kann der Photostrom gestoppt werden. Damit lässt sich die kinetische Energie  $E_{kin,max}$  bestimmen, indem der Minimalwert der Spannung  $U$  gemessen wird, bei dem der Photostrom verschwindet. Im verwendeten Versuchsaufbau wird allerdings die Stoppspannung direkt gemessen, ohne den Photostrom zu überwachen.

Setzt man die Kinetische Energie zur Stoppspannung  $U$  in Beziehung, so ergibt sich:

$$E_{kin,max} = Ue \quad (3)$$

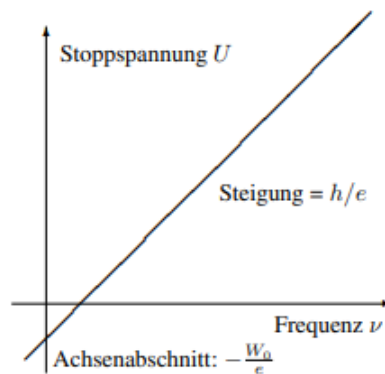
Daher folgt mit Einsteins Gleichung:

$$h\nu = Ue + W_0 \quad (4)$$

Nach  $U$  umgestellt ergibt sich:

$$U = \frac{h}{e}\nu - \frac{W_0}{e} \quad (5)$$

Wenn wir  $U$  als Funktion von  $\nu$  für verschiedene Lichtfrequenzen graphisch darstellen, ergibt sich folgender Zusammenhang:



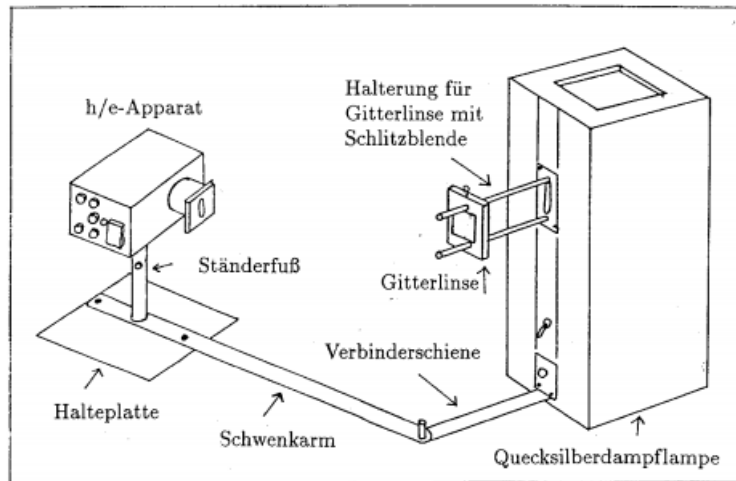
Aus der Experimentellen Bestimmung von  $h/e$  und dem bekannten Wert der Elementarladung lässt sich dann die Plancksche Konstante bestimmen.

Zur Bestimmung der Frequenz in Abhängigkeit Stoppspannung kommt folgende Formel zustande:

$$\nu = (U + W_0/e) \cdot e/h \quad (6)$$

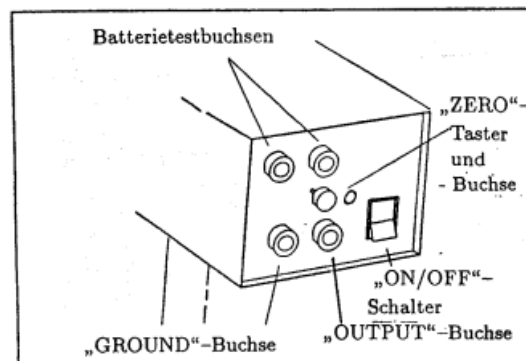
## 2 Aufbau und Vorbereitung

Der Versuch zur Bestimmung des Planckschen Wirkungsquantum ist größtenteils vormontiert. Trotzdem Sollten vor Inbetriebnahme einige Montageschritte überprüft werden.



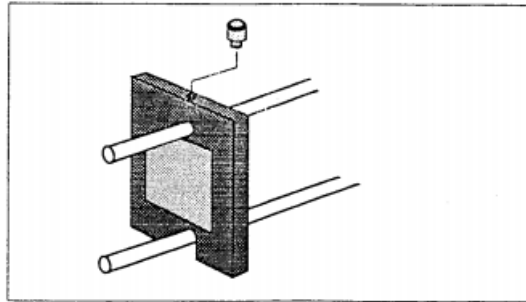
### 2.1 Test der Batteriespannung

Obwohl der h/e-Apparat nur eine geringe Energieaufnahme hat, ist es sinnvoll vor Versuchsbeginn die Batteriespannung zu überprüfen. Die Entsprechenden Buchsen Befinden sich an der Seite des Gehäuses. Bei Batteriespannungen unter 6 V können die Messungen fehlerhaft werden.



## 2.2 Vormontage des Versuchsaufbaus

1. Das Lampengehäuse hat auf zwei gegenüberliegenden Seiten Öffnungen für den Lichtaustritt. Wir Arbeiten im Versuch aber nur auf einer Seite.  
Daher wird die andere Seite mit einer Metallplatte Verschlussen.
2. Auf der geöffneten Gehäuseseite wird die Halterung für die Gitterlinse montiert.  
Dazu wird eine Platte mit Schlitzblende in die Öffnung des Gehäuses eingeschoben und fixiert.
3. Die Gitterlinse wird auf die Stäbe der Halterung geschoben und Fixiert.

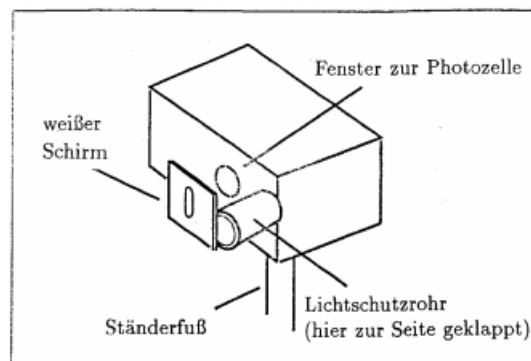


Hinweis: Das Gitter an der Linse ist so hergestellt, dass es das Hellste Spektrum auf einer Seite liefert. Gegebenenfalls muss die Gitterlinse also gewendet werden.

4. Die Lichtquelle wird eingeschaltet und 5-10 Minuten aufwärmen gelassen.  
Währenddessen kann überprüft werden ob das Licht der Schlitzblende auf die Gitterlinse fällt.
5. Die Verbinderschiene wird unten in das Profil des Lampengehäuses eingesetzt und befestigt.
6. Die Verbindung des h/e-Apparates mit der Halteplatte wird überprüft.
7. Der h/e Apparat wird in den Ständerfuß eingesetzt.
8. Der Schwenkarm der Halteplatte wird mit der Verbindungsschiene des Lampengehäuses verbunden so, dass dort ein Drehgelenk entsteht und sich der h/e-Aparat um die Lichtquelle bewegen lässt.

## 2.3 Justage des h/e-Apparates

9. Ein Digitalvoltmeter wird mit den Buchsen OUTPUT und "GND" verbunden und nach Bedarf auf den 2-V- oder 20-V-Messbereich.
10. Der h/e-Apparat wird gerade (d.h. in axialer Flucht) vor die Quecksilberdampf Lampe gesetzt. Die Gitterlinse wird auf den Führungsstäben so verschoben, dass das Licht der Nullten Ordnung als heller scharfer Streifen auf den weißen Schirm des h/e-Apparates trifft.



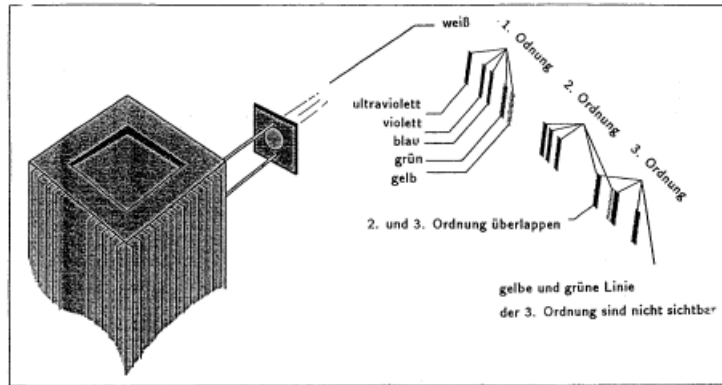
11. Nach Wegklappen des Lichtschutzrohrs wird ein Teil der Photozelle sichtbar. Durch Schwenken des h/e-Apparates kann er so ausgerichtet werden, dass das Licht durch den Spalt symmetrisch auf die Markierungen der Photozelle leuchtet. Das Lichtschutzrohr wird wieder vor die Photozelle geklappt.

## 2.4 Ablauf einer Messung

12. Schalten Sie den Messverstärker des h/e-Apparates ein und bewegen Sie ihn so um das Drehgelenk, dass ein farbiges Beugungsmaximum erster Ordnung in den Schlitz fällt. Dabei wird auf dem weißen Schirm des h/e-Apparates die ultraviolette Linie als blau sichtbar.
13. Drücken Sie vor jeder Messung den SZEROTaster, um das System zu entladen und den Messverstärker in den definierten Anfangszustand zu bringen, damit nur das Potential der gerade eingestellten Spektrallinie gemessen wird.
14. Lesen Sie die Ausgangsspannung an Ihrem Digitalvoltmeter ab, wenn der Spannungswert sich stabilisiert hat. Die angegebene Spannung ist ein direktes Maß für die Stoppspannung der Photoelektronen.

## 2.5 Verwendung der Filter

Dem h/e-Apparat liegen drei Filter bei, ein Grünfilter, ein Gelbfilter und ein Filter mit verschiedenen Transmissionsbereichen. Der Gelb-bzw. Grünfilter wird bei Messungen mit der Gelben bzw. Grünen Spektrallinie verwendet um den Anteil höherer Lichtfrequenzen zu begrenzen, welche sich mit dem gelben oder grünen Licht überlagern und die Messwerte verfälschen könnten.



Die Ordnung der Spektrallinien

Abbildung 1

Farbe	Frequenz (Hz)	Wellenlänge (nm)
gelb	$5,18672 \times 10^{14}$	578
grün	$5,48996 \times 10^{14}$	546,074
blau	$6,87858 \times 10^{14}$	435,835
violett	$7,40858 \times 10^{14}$	404,656
ultraviolett	$8,20264 \times 10^{14}$	365,483

## 3 Versuchsprogramm

### 3.1 Bestimmung der Planckschen Konstante

#### 3.1.1 Messprogramm

1. Richten sie den h/e-Apparat so aus, dass nur eine Farbe aus dem Spektrum erster Ordnung in die Öffnung der Photozelle fällt.
  2. Messen sie für jede Farbe der ersten Ordnung die Stoppspannung mit dem Digitalvoltmeter. Für die Vermessung der Gelben bzw. Grünen Spektrallinie setzten sie einen Gelb bzw. Grünfilter vor die Öffnung des h/e-Apparates.
  3. Wiederholen sie 2. auch für die Farben zweiter Ordnung.
  4. Benutzen sie den Transmissionsfilter um die Abhängigkeit der Stoppspannung von der Intensität zu messen.
- Außerdem wird mithilfe dieser Messung die Akuratheit des Wellenmodells überprüft.



## 3.2 Auswertung

Aus dem aus der Tabelle in Abbildung 1 gewonnenen Literaturwert und den durchgeführten Messreihen können sie nun die Stoppspannung als Funktion der Frequenz darstellen und daraus  $h$  und  $\Phi_0/e$  berechnen. Der Wert für  $e$  kann ebenfalls der Literatur entnommen werden.

## 3.3 Abschätzung des Photostroms; Quantenausbeute der Photozelle und Lichtleistung

### 3.3.1 Kondensatorkapazität und Photostrom

Die Photozelle und der Eingang des Messverstärkers bilden zusammen einen kleinen Kondensator der Durch den Photostrom geladen und durch Leckströme entladen wird. Verschließen sie die Schlitzöffnung des h/e-Apparates und Schätzen sie die Kondensatorkapazität aus der Zeit ab, die zum Entladen erforderlich ist, indem sie eine Entladekurve aufnehmen und die Halbwertszeit bestimmen. Es gilt:

$$t_{1/2} = \ln 2 RC, \quad \text{mit} \quad R \approx 10^{13} \Omega \quad (7)$$

Betrachten sie nun das Aufladen des Kondensator nachdem er mit dem SZERO" Taster genullt wurde und die Abdeckung des Schlitzes entfernt wurde. Da dieser Vorgang sehr schnell verläuft kann es hilfreich sein, einen oder mehrere Neutralfilter in den Strahlengang zu halten um das Aufladen ein wenig zu verlangsamen. Nun kann der Photostrom aus der Halbwertszeit abgeschätzt werden indem zuerst die Ladung auf dem Kondensator zur Halbwertszeit bestimmt wird:

$$Q_{1/2} = C \cdot U_{1/2} \quad (8)$$

Nun wird Die Ladung pro Sekunde approximiert als auch der Elektronenstrom

$$I_Q = \frac{Q_{1/2}}{t_{1/2}} \quad (9)$$

$$I_e = \frac{I_Q}{e} \quad (10)$$

Zuletzt wird die Quantenausbeute benutzt um den Photostrom zu ermitteln

### 3.3.2 Die Photozelle als Spektrometer

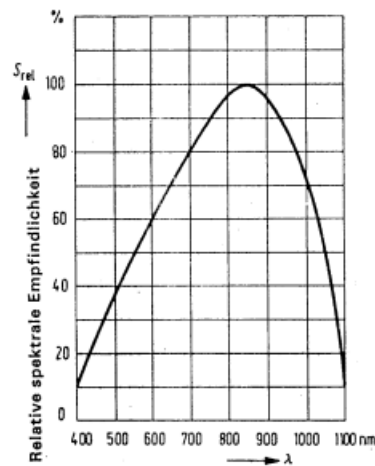
Zur Verfügung stehen einiger Leuchtdioden die durch ein Netzgerät betrieben werden. mit einer Halterung können diese direkt vor der Öffnung des h/e-Apparates platziert werden. Nach bestimmen der Jeweiligen Stoppspannungen lässt sich daraus auf die Wellenlänge des Gemessenen Lichts schließen.

### 3.3.3 Quantenausbeute der Photozelle und Lichtleistung

Nicht jedes erzeugte Photoelektron gelangt auch zur Anode wenn die Photozelle ohne Vorspannung betrieben wird. Wegen der fehlenden Vorspannung streuen die Elektronen so, dass nur ein Bruchteil der Emittierten Elektronen die Anode erreichen. Aufgrund dieser streuenden Elektronen ist die Zahl der im Photostrom nachgewiesenen Photoelektronen signifikant kleiner als die Anzahl der einfallenden Lichtquanten. Die Quantenausbeute lässt sich also aus der Anzahl der Photonen  $N_{ph}$ , die von der Lichtquelle in die Photozelle einfallen und der Anzahl der Elektronen  $N_{e,Zelle}$  die von den Photonen in der Photozelle produziert werden und den Photostrom bewirken, berechnen:

$$\text{Quantenausbeute} = \frac{N_{e,Zelle}}{N_{ph}} \quad (11)$$

Dazu wird eine Halbleiter-Photodiode verwendet, in welcher fast jedes einfallende Photon ein Elektron erzeugt. (In folgender Abbildung: 100% entsprechen 88 Elektronen pro 100 Quanten)



Schließen sie die Photodiode an ein Digitalmultimeter an und stellen sie einen Messbereich von  $200\mu A$  ein. Klappen sie das Lichtschutzrohr zur Seite und halten sie die Photodiode hinter dem Öffnungsschlitz in den Strahlengang einer Spektrallinie um die Messung mit der Photodiode möglichst unter dem selben Abstand und so auch dem selben Photoneneinfall wie dem der Photozelle durchzuführen ( $1/r^2$ -Gesetz). Messen sie den Photostrom für diese und die Anderen Spektrallinien.

Aus dem Photostrom kann man nun auf die Zahl der Elektronen und von dieser aus, je nach Wellenlänge, auf die Anzahl der Photonen (pro Zeitintervall) schließen.

Es ist anzunehmen, dass die Öffnung der Photozelle von der Fläche her der der Photodiode entspricht und das so auch beide die selbe Menge an Photonen erhalten, vorausgesetzt sie befinden sich im selben Abstand zur Lichtquelle.

Aus dem im Vorhinein bestimmten Photostrom der Photozelle und dem nun bestimmten Photostrom der Photodiode lässt sich nun die Quantenausbeute der Photozelle ermitteln.

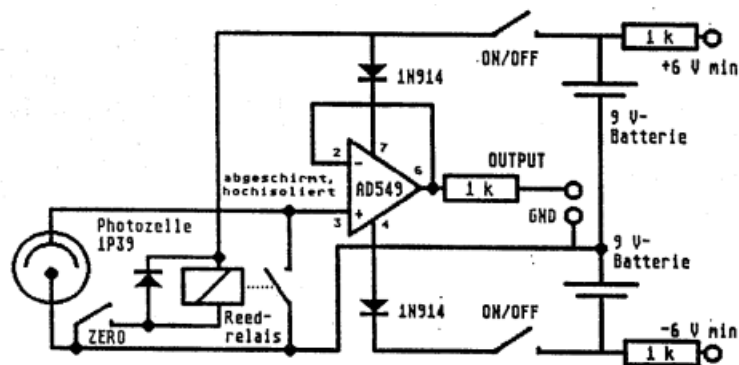
Außerdem kann nun auch aus der Anzahl der Photonen (pro Zeitintervall) und der im vorhinein bestimmten Energie eines Photons (siehe (1)) die Lichtleistung ermittelt werden, die mit den einzelnen Spektrallinien auf die Photozelle gelangt:  $\Phi = h * \nu * \frac{N_{ph}}{\text{sekunde}}$

## 4 Funktion des h/e-Apparates

Im Experiment fällt monochromatisches Licht auf die Kathodenfläche einer Vakuumphotozelle, die eine geringe Austrittsarbeit  $W_0$  hat. Die Photoelektronen werden aus der Kathode herausgelöst und an der Anode gesammelt. Der Photostrom selbst und der Eingang des Messverstärkers im h/e-Apparat bilden einen kleinen Kondensator, der durch den Photostrom aufgeladen wird. Erreicht die Spannung im Kondensator die Stoppspannung der Photoelektronen so geht der Photostrom gegen Null und die Spannung zwischen Anode und Kathode bleibt konstant. Dieser Endwert der Spannung zwischen Anode und Kathode entspricht folglich der Stoppspannung der Photoelektronen.

Um die Stoppspannung messen zu können ist die Anode mit einem Messverstärker im h/e-Apparat verbunden. Dieser hat eine ultrahohe Eingangsimpedanz von über  $10^{13}\Omega$  und einen Verstärkungsfaktor von 1 (also  $U_{ein} = U_{aus}$ ). Der Ausgang des Verstärker ist mit den Buchsen am Gehäuse verbunden an denen dann die Spannung mit einem Digitalvoltmeter gemessen werden kann.

Durch die ultrahohe Eingangsimpedanz kann es relativ lange dauern bis der Kondensator sich vollständig entladen hat. Zu diesem Zweck ist der Taster SZERO" vorhanden mit dem sich der Kondensator schnell entladen lässt. Der Taster ist über ein Reedrelais von der Photozelle getrennt, damit keine Störungen beim berühren des Tasters auf die Photozelle gelangen. Die zur Reedrelaisspule parallelgeschaltete Diode dämpft hohe Stör-Induktionsspannungen, die beim Zusammenbruch des Magnetfeldes (Loslassen des Tasters) entstehen könnten.



## 5 Fehlerrechnung

Die Fehler der Spannung belaufen sich nach Angaben des Herstellers des Multimeter auf 0.5% des maximal messbaren Wertes.<sup>1</sup>

Für Messungen bis maximal 2V ergibt sich somit ein Fehler von  $2\text{ V} \cdot 0.005 = 0.01\text{ V}$ .

Für Messungen bis maximal 20V ergibt sich somit ein Fehler von  $20\text{ V} \cdot 0.005 = 0.1\text{ V}$ .

Die Fehler des Stromes, welche zur Bestimmung der Quantenausbeute benötigt wird, ist geschätzt auf  $0.05\text{ }\mu\text{A}$ .

### 5.1 Planckschens Wirkungsquantum

Im folgenden beschreibt  $m$  die Steigung und  $b$  den Y-Achsenabschnitt der gefitteten Gerade bzg. des Planckschen Wirkungsquantum. Zudem wird die Elementarladung als fehlerfrei angenommen.

$$\Delta h = \frac{\Delta m}{e} \quad (12)$$

$$\Delta \frac{W_0}{e} = \Delta b \quad (13)$$

Zur finalen Berechnung des Planckschen Wirkungsquantum werden zuerst die gewichteten Mittelwerte aus den Werten für das Plancksche Wirkungsquantum gebildet, welche sich aus den Geraden ergeben. Diese werden erneut gewichtet und gemittelt um den finalen Wert zu bestimmen. Der Fehler eines gewichteten Mittelwerts ergibt sich folgendermaßen, wobei  $m$  der gewichtete Mittelwerte ist und  $g$  die Gewichtung des entsprechenden Werts für das Plancksche Wirkungsquantum:

$$g = \frac{1}{(\Delta h)^2} \quad (14)$$

$$\Delta m = \sqrt{\frac{\sum_i g_i \Delta h_i}{(\sum_i g_i) - 1}} \quad (15)$$

Die finale Berechnung von  $W_0/e$  erfolgt gleichermaßen.

### 5.2 Wellenlänge der LEDs

Um die Wellenlänge der LEDs zu bestimmen wird die Gleichung 6 verwendet. Anschließend wird die Lichtgeschwindigkeit durch diese Geteilt. Die Lichtgeschwindigkeit und Elementarladung werden fehlerfrei angenommen.

$$\Delta \nu = \sqrt{\left(\frac{e\Delta U}{h}\right)^2 + \left(\frac{e\Delta(W_0/e)}{h}\right)^2 + \left(\frac{e(W_0/e + U)\Delta h}{h^2}\right)^2} \quad (16)$$

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

### 5.3 Quantenausbeute

Im folgenden beschreibt  $I_e$  den Elektronenstrom,  $I_p$  den Photonenstrom und  $Qa$  die Quantenausbeute.

$$\Delta I_e = \frac{\Delta I}{e} \quad (18)$$

---

<sup>1</sup><https://www.reichelt.de/multimeter-digital-1999-counts-temperaturmessung-peaktech-2005-p135491.html>

Die Ablesegenauigkeit der relativen spektralen Empfindlichkeit wird auf 2.5% geschätzt. Die Quantenausbeute der Photodiode besitzt somit einen Fehler von 0.022.

$$\Delta I_p = \sqrt{\left(\frac{\Delta I_e}{Qa}\right)^2 + \left(\frac{I_e \cdot \Delta Qa}{Qa^2}\right)^2} \quad (19)$$

Für die Halbwertszeit der Entladung  $t_{1/2}$  wird 1s als der Fehler geschätzt. Für den Fehler der Kapazität folgt:

$$\Delta C = \frac{\Delta t_{1/2}}{\ln(2)R} \quad (20)$$

Da die Offsetspannung sehr stark driftet, wird der Fehler als 0.1V angenommen.

Der Fehler der Spannung zur Halbwertszeit wird ebenfalls mit 0.1V angenommen.

Zudem wird die Abweichung der Halbwertszeit  $t_{1/2}$ , für das Laden, mit 0.5s geschätzt. Somit kann nun der Fehler für den fließenden Strom ( $I = \frac{CU_{1/2}}{t_{1/2}}$ ) bestimmt werden:

$$\Delta I = \sqrt{\left(\frac{\Delta CU_{1/2}}{t_{1/2}}\right)^2 + \left(\frac{C\Delta U_{1/2}}{t_{1/2}}\right)^2 + \left(\frac{C \times U_{1/2}\Delta t_{1/2}}{t_{1/2}^2}\right)^2} \quad (21)$$

Der finale Fehler der Quantenausbeute unter Berücksichtigung der Intensitätsfilter (Wobei  $i$  die resultierende Durchlässigkeit der beiden Filter beschreibt  $i = 10\% \cdot 20\%$ ) beläuft sich auf:

$$\Delta Qa = \sqrt{\left(\frac{\Delta I_e I_p}{i}\right)^2 + \left(\frac{I_e \Delta I_p}{i}\right)^2} \quad (22)$$

## 5.4 Lichtleistung/Strahlungsleistung

Die Lichtleistung  $\Phi$  besitzt den Fehler:

$$\Delta \Phi = \sqrt{(\Delta h I_p \nu)^2 + (h \Delta I_p \nu)^2} \quad (23)$$

## 6 Auswertung

### 6.1 Überprüfung des Wellenmodells

Um das klassische Wellenmodell, welches bis 1900 verwendet wurde, zu testen, wird die Abhängigkeit der Stoppspannung von der Lichtintensität überprüft. Nach dem Wellenmodell würde ein Abfall der Lichtintensität zu einer signifikanten Senkung der Stoppspannung führen.

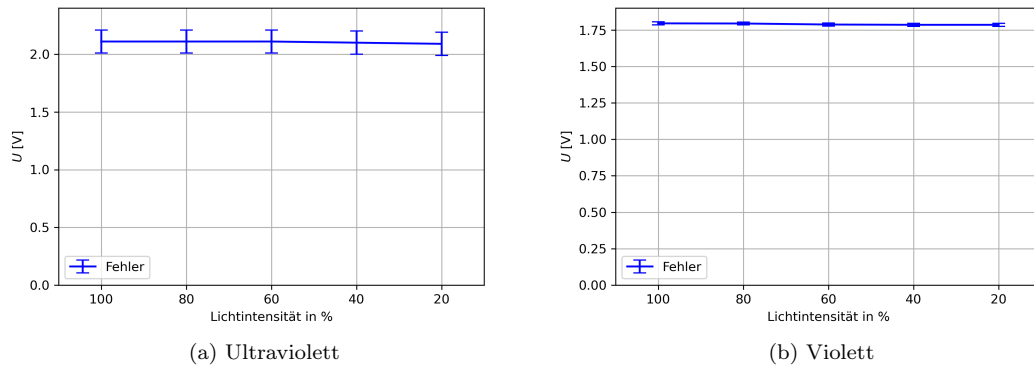


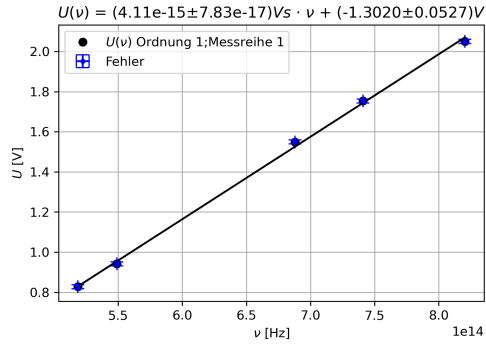
Abbildung 2: Stoppspannung in Abhängigkeit von der Intensität

Wie jedoch deutlich in den Graphen der Ultraviolett- und Violettspektren zu erkennen ist, liegt der Abfall im Promille Bereich und ist nicht signifikant. Die Energie der Photoelektronen/Photonen kann somit nicht von der Intensität des einfallenden Lichtes abhängen.

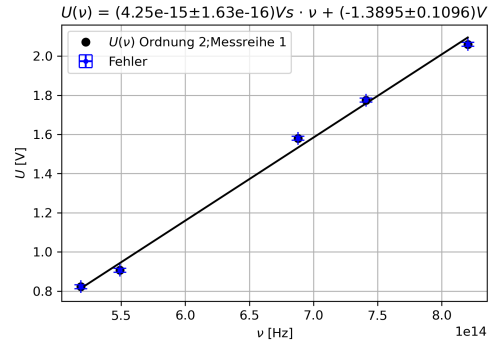
### 6.2 Bestimmung des Planckschen Wirkungsquantums und der Austrittsarbeit

Um nun die Theorie von Planck zu überprüfen, wird nach einem Zusammenhang zwischen der Stoppspannung und Frequenz gesucht. Die Steigung dieses linearen Zusammenhang beschreibt, nach Multiplikation mit  $e^2$ , das Plancksche Wirkungsquantum  $h$ , während der Ordinatenabschnitt die Austrittsarbeit in eV angibt.

<sup>2</sup><https://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?e>



(a)  $h=6.308 \text{ Js} \cdot 10^{-34} \quad W_0/e=1.264V$

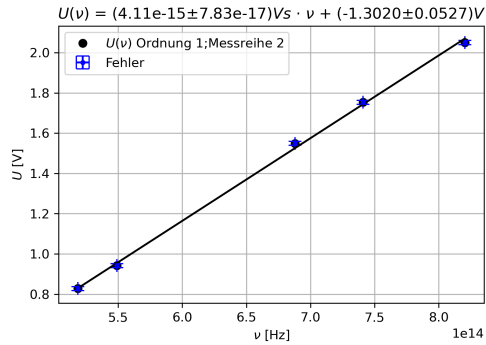


(b)  $h=6.348 \text{ Js} \cdot 10^{-34} \quad W_0/e=1.268V$

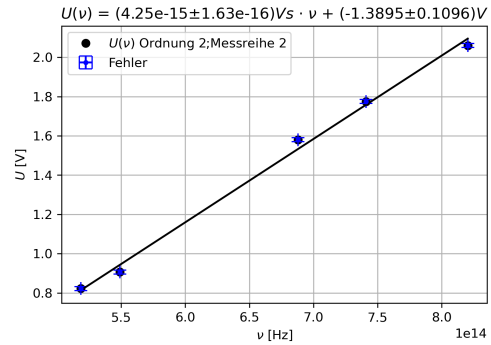
Abbildung 3: Messreihe 1

Nach der gewichteten Mittelung von  $h$  und  $W_0/e$  ergeben sich die folgenden Werte aus der ersten Messreihe:

$$h_1 = 6.312 \pm 0.101 \text{ Js} \quad (W_0/e)_1 = 1.265 \pm 0.042 V$$



(a)  $h=6.585 \text{ Js} \cdot 10^{-34} \quad W_0/e=1.301V$



(b)  $h=6.806 \text{ Js} \cdot 10^{-34} \quad W_0/e=1.389V$

Abbildung 4: Messreihe 2

Nach der gewichteten Mittelung von  $h$  und  $W_0/e$  ergeben sich die folgenden Werte aus der zweiten Messreihe:

$$h_2 = 6.626 \pm 0.159 \text{ Js} \quad (W_0/e)_2 = 1.318 \pm 0.067 V$$

Um nun das Plancksche Wirkungsquantum und die Austrittsarbeit in eV final zu bestimmen werden die Ergebnisse aus den Messreihen erneut gewichtet Gemittelt:

$$h = 6.401 \pm 0.159 \text{ J s} \quad (W_0/e) = 1.280 \pm 0.050 \text{ V}$$

Der durch dieses Messverfahren bestimmte Wert für  $h$  weicht somit um nur 3.508% von dem Literaturwert<sup>3</sup> ab.

Diese Abweichung, sowie die geringe Senkung der Stoppspannung beim Überprüfen des Wellenmodells, sind wahrscheinlich zurückzuführen auf den geringen, aber signifikanten, Leckstrom welcher trotz des hohen Widerstandes fließt.

### 6.3 Die Photozelle als Spektrometer

Um nun das selbstbestimmte Plancksche Wirkungsquantum zu überprüfen, werden die Wellenlängen von LEDs gemessen und mit den angegebenen Wellenlängen verglichen.

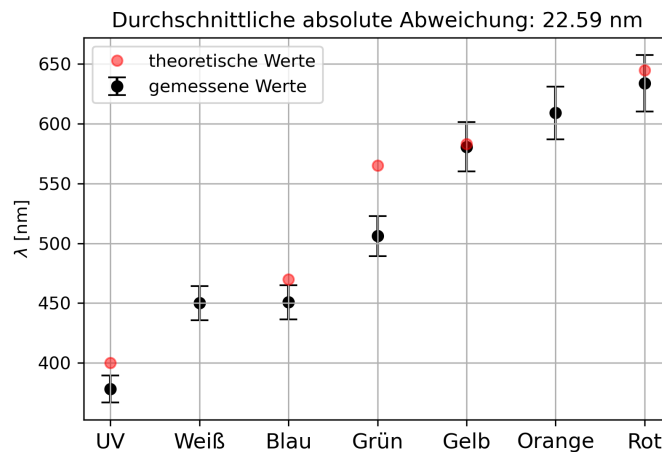


Abbildung 5: Vermessung der LEDs

Der Vergleich zeigt das für alle Farben, bis auf Grün, eine akkurate Bestimmung der Wellenlänge geglückt ist. Eine mögliche Erklärung für die Abweichung von Grün ist ,dass eventuell kürzere Wellenlängen der zweiten Ordnung mit auf die Photozelle gelangt sind.

Zudem zeigt der Graph, dass in der weißen LED das Licht mit der kleinsten Wellenlänge blau ist. Dies stimmt in der Tat mit den meisten herkömmlichen weißen LEDs überein, welche aus blauen, grünen und roten LEDs bestehen.

<sup>3</sup><https://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?h>



## 6.4 Bestimmung der Quantenausbeute und Lichtleistung

### 6.4.1 Photonenstrom

Um die Quantenausbeute der Photozelle zu bestimmen muss zuerst der ankommende Photonenstrom bestimmt werden. Dies geschieht indem der gemessene Strom der Photodiode zuerst in einen Elektronenstrom umgerechnet wird und dann mithilfe der abgelesenen Quantenausbeute in den Photonenstrom. Für Violett, welches die Farbe ist für welche später der Elektronenstrom bestimmt wird, ist der resultierende Photonenstrom  $36.05 \pm 8.07$  (Quanten/s)  $\cdot 10^{12}$ .

### 6.4.2 Kondensatorkapazität/Elektronenstrom

Zur Berechnung der Quantenausbeute wird nun der Elektronenstrom benötigt. Er wird bestimmt in dem die Ladung pro Sekunde abgeschätzt wird mit der die Photozelle, welche ebenfalls ein Kondensator ist, geladen wird. Die Kapazität der Photozelle ist  $1.009 \pm 1.443$  pF und die Zeit, die benötigt ist, bis der Kondensator zur Hälfte geladen ist, beträgt ca. 1s. Dies ergibt einen Elektronenstrom von  $6.24 \pm 3.31$  (Elektronen/s)  $\cdot 10^6$

### 6.4.3 Quantenausbeute

Die Quantenausbeute lässt sich nun bestimmen als

$$\text{Quantenausbeute} = \frac{0.173 \pm 0.099 \text{ Elektronen}}{10^6 \text{ Photonen}}$$

Dieser Wert muss nun jedoch noch angepasst werden um für die geringere Intensität zu kompensieren. Es ergibt sich somit eine Finale Quantenausbeute von:

$$\text{Quantenausbeute}_{\text{Final}} = \frac{8.65 \pm 4.97 \text{ Elektronen}}{10^6 \text{ Photonen}}$$

Wie in der Durchführung beschrieben ist dieser Wert wesentlich kleiner als der der Photodiode. Zudem entspricht dieser Wert der Größenordnung von  $10^{-6}$  welche Herr Kind als zu erwartend beschrieb.

### 6.4.4 Lichtleistung/Strahlungsleistung

Die Strahlungsleistung der Quecksilberdampf Lampe wird ermittelt basierend auf dem gemessenen Photonenstrom der Photodiode. Ihre Berechnung erfolgt nach folgender Formel:

$$\Phi = h * \nu * \frac{N_{ph}}{\text{sekunde}}$$

. Das Ergebnis dieser Rechnung ist:

Tabelle 1: Lichtleistung

	Ultraviolett	Violett	Blau	Grün	Gelb
$\Phi$ [ $\mu$ W]	$24.20 \pm 10.57$	$17.09 \pm 3.85$	$21.23 \pm 2.81$	$6.646 \pm 0.49$	$7.364 \pm 0.43$

Ein (linearer) Zusammenhang kann aus diesen Messwerten nicht gefolgert werden.

## 7 Zusammenfassung

Das Plancksche Quantenmodell wurde experimentell nachgewiesen und das klassische Wellenmodell dementsprechend experimentell widerlegt. Das Plancksche Wirkungsquantum wurde als  $h=6.401 \pm 0.159 \text{ J s}$  bestimmt und besitzt somit lediglich eine Abweichung von 3.508% zum Literaturwert. Die Austrittsarbeit, welche das Elektron verrichten muss, um sich zu lösen, beträgt bei der Photozelle  $1.280 \pm 0.050 \text{ eV}$ .  $h$  wurde zudem überprüft, indem die Wellenlänge von bekannten LEDs nachgerechnet wurde. Das Resultat zeigt ebenfalls nur eine leicht Abweichung zum theoretischen Wert.

Im Weiteren wurde die Quantenausbeute als  $(8.65 \pm 4.97) \cdot 10^{-6}$  Elektronen pro Photonen bestimmt. Ein solch niedriger Wert bestätigt die Theorie, dass die Photoelektronen stark streuen und nur ein Bruchteil von der Anode aufgefangen wird. Basierend auf dem ermittelten Photonenstrom und dem bestimmten  $h$  wurde ebenfalls die Lichtleistung ermittelt.

## 8 Anhang

Tabelle 2: 1 Messreihe

$\nu$ [ $10^{-14}\text{Hz}$ ]	Ord 1 U [V]	Ord 2 U [V]
8.2026	$1.9560 \pm 0.0100$	$1.9510 \pm 0.0100$
7.4086	$1.6540 \pm 0.0100$	$1.6760 \pm 0.0100$
6.8786	$1.4590 \pm 0.0100$	$1.5080 \pm 0.0100$
5.4900	$0.8870 \pm 0.0100$	$0.8660 \pm 0.0100$
5.1867	$0.7790 \pm 0.0100$	$0.7990 \pm 0.0100$

Tabelle 3: 2 Messreihe

$\nu$ [ $10^{-14}\text{Hz}$ ]	Ord 1 U [V]	Ord 2 U [V]
8.2026	$2.0500 \pm 0.0100$	$2.0600 \pm 0.0100$
7.4086	$1.7530 \pm 0.0100$	$1.7750 \pm 0.0100$
6.8786	$1.5490 \pm 0.0100$	$1.5800 \pm 0.0100$
5.4900	$0.9420 \pm 0.0100$	$0.9060 \pm 0.0100$
5.1867	$0.8280 \pm 0.0100$	$0.8220 \pm 0.0100$

Tabelle 4: Stoppspannung und Intensität

Lichtintensität in %	Ultraviolett	Violett
100	$2.1100 \pm 0.1000$	$1.7950 \pm 0.0100$
80	$2.1100 \pm 0.1000$	$1.7940 \pm 0.0100$
60	$2.1100 \pm 0.1000$	$1.7870 \pm 0.0100$
40	$2.1000 \pm 0.1000$	$1.7850 \pm 0.0100$
20	$2.0900 \pm 0.1000$	$1.7850 \pm 0.0100$

Tabelle 5: LEDs

Farbe	$\lambda_{mess}$ [nm]	$\lambda_{theo}$ [nm]
Ultraviolett	$378.2972 \pm 11.2969$	400.0000
Weiß	$450.0809 \pm 14.2538$	-
Blau	$450.7584 \pm 14.2834$	470.0000
Grün	$506.1905 \pm 16.8134$	565.0000
Gelb	$580.8061 \pm 20.5750$	583.0000
Orange	$609.1622 \pm 22.1153$	-
Rot	$633.9887 \pm 23.5151$	645.0000

Tabelle 6: Photodiode Ausbeute

Farbe	Strom [ $A10^{-6}$ ]	Ele. Strom $[(1/s)*10^{12}]$	Qausbeute	Pho. Strom $[1/s*10^{-12}]$
Ultraviolett	$0.3900 \pm 0.05$	$2.4342 \pm 0.3121$	$5.2800 \pm 2.2$	$46.1021 \pm 20.0979$
Violett	$0.6100 \pm 0.05$	$3.8073 \pm 0.3121$	$10.5600 \pm 2.2$	$36.0542 \pm 8.0717$
Blau	$1.3600 \pm 0.05$	$8.4885 \pm 0.3121$	$17.6000 \pm 2.2$	$48.2298 \pm 6.2841$
Grün	$1.2000 \pm 0.05$	$7.4898 \pm 0.3121$	$39.6000 \pm 2.2$	$18.9137 \pm 1.3134$
Gelb	$1.7200 \pm 0.05$	$10.7354 \pm 0.3121$	$48.4000 \pm 2.2$	$22.1806 \pm 1.1968$