

ALBERT-LUDWIGS-UNIVERSITÄT FREIBURG  
PHYSIKLABOR FÜR ANFÄNGER\*INNEN, TEIL 2  
WINTERSEMESTER 2021/22

VERSUCH 81 AM 29.03.2022

## Photoeffekt

Gruppe 211:  
30.03.2022

Assistent:

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Ziel des Versuchs</b>	<b>2</b>
<b>2 Aufbau und Durchführung</b>	<b>2</b>
<b>3 Auswertung und Fehleranalyse</b>	<b>3</b>
3.1 Kennlinien für verschiedenen Intensitäten . . . . .	3
3.2 Kennlinie bei verschiedenen Dioden und Bestimmung der Grenzspannungen . . .	4
3.3 Spektren der Leuchtdioden . . . . .	7
3.4 Bestimmung des Planck'schen Wirkungsquantums . . . . .	9
<b>4 Diskussion der Ergebnisse</b>	<b>11</b>
4.1 Vergleich mit der Theorie . . . . .	11
4.2 Zusammenstellung der Ergebnisse . . . . .	12
4.3 Fehlerdiskussion . . . . .	12
4.4 Verbesserte Messmethoden . . . . .	13
<b>5 Literatur</b>	<b>15</b>
<b>6 Anhang</b>	<b>16</b>
6.1 Grafiken . . . . .	16
6.2 Laborbuch . . . . .	20
6.3 Tabellenverzeichnis . . . . .	24
6.4 Abbildungsverzeichnis . . . . .	24

## 1 Ziel des Versuchs

In den folgenden Versuchsteilen soll das Verhalten einer Photozelle untersucht und das Planck'sche Wirkungsquantum bestimmt werden. Hierfür wird zunächst der Photostrom in Abhängigkeit von der an der Photozelle angelegten Spannung bei variierten Lichtintensitäten betrachtet. Anschließend wird diese Strom-Spannungs-Kennlinie für verschiedene Leuchtdioden aufgenommen. Danach wird die Frequenz der Leuchtdioden ermittelt und in einem nächsten Schritt die maximale kinetische Energie der ausgelösten Elektronen gegen die Frequenzen aufgetragen. Aus der sich so ergebenden Geraden kann nun das Planck'sche Wirkungsquantum ermittelt werden.

## 2 Aufbau und Durchführung

Um die oben genannten Ziele zu erreichen, wird die in [Abbildung 1](#) dargestellte, stromrichtige Schaltung verwendet. Zunächst wurde eine spannungsrichtige Schaltung verwendet, was zu Problemen führte, die in der Fehlerdiskussion erläutert werden. Während allen Versuchsteilen wird der Raum abgedunkelt. Die verwendeten LEDs emittieren rotes, grünes, violettes und UV-Licht.

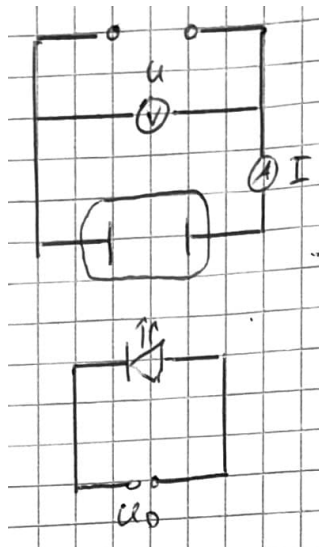


Abb. 1: Skizze des Versuchsaufbaus aus dem Laborbuch (siehe [Abbildung 17](#)) mit allen relevanten Bauteilen für die Messung. In der oberen Schaltung wird stromrichtig der Strom  $I$  am Ampèremeter und die Spannung  $U$  am Voltmeter gemessen. In der unteren Schaltung wird eine LED betrieben, die in Richtung der Photozelle leuchtet.

Es werden die Spannungen  $U$  und Ströme  $I$  an der Photozelle mit digitalen Multimetern gemessen. Die Unsicherheiten auf diese Größen bei den verwendeten Messbereichen werden mit den Angaben aus [\[1\]](#) bestimmt.

Zuerst wird die Helligkeit der verwendeten, grünen Leuchtdiode mit der an ihr angelegten Spannung  $U_D$  variiert. Die Ableseunsicherheit wird hierbei aufgrund der analogen Skala auf dem Netzgerät mit Dreiecksverteilung mit Formeln aus [\[2\]](#) ermittelt.

Anschließend werden unterschiedliche Leuchtdioden verwendet und erneut der Strom und die Spannung gemessen. Die Lichtintensität wird dabei so abgeschätzt, dass die Ströme in einem gut messbaren Bereich liegen. Das heißt die Ströme sollten nicht zu klein sein.

Zuletzt werden die Spektren der verwendeten LEDs mithilfe eines Spektrometers untersucht und mit der Software „OceanView“ ausgelesen. Das Spektrometer wird dabei möglichst bewegungslos in die Halterung der LED geklemmt.

### 3 Auswertung und Fehleranalyse

#### 3.1 Kennlinien für verschiedenen Intensitäten

Zunächst wird der Photostrom  $I(U)$  in Abhängigkeit von der an der Photozelle angelegten Spannung  $U$  bei unterschiedlichen Intensitäten untersucht. Durch die Photonen der Frequenz  $\nu$ , die die LED aussendet, werden Elektronen aus der Kathode der Photozelle ausgelöst. Mit der angelegten Spannung  $U$  werden die Elektronen beschleunigt oder abgebremst. Gelangen Elektronen auf die Anode, so fließt ein Strom. Wie viele Elektronen auf die andere Seite gelangen, hängt zum einen davon ab, wie stark sie durch  $U$  beschleunigt oder abgebremst werden, da je nachdem wie hoch  $U$  ist, Elektronen, die zum Beispiel durch Stöße an Energie verlieren, nicht bis zur Anode gelangen. Zum anderen können nur so viele Elektronen auf die andere Seite gelangen, wie ausgelöst werden. Dies hängt allein von der Anzahl an Photonen, also der Intensität des Lichtes, ab. Ist die Spannung so hoch, dass alle ausgelösten Elektronen die Anode erreichen, kann der Strom also nicht weiter ansteigen. Es wird also erwartet, dass bei zu kleinen Spannungen kein Strom fließt, dieser dann ab einer gewissen Grenzspannung  $U_g$  linear ansteigt und bei hohen Spannungen zu einem Plateau abflacht. Für höhere Intensitäten wird dieser Verlauf steiler und erreicht erst bei höheren Spannungen ein höhergelegenes Plateau [3].

Um diesen Zusammenhang zu bestätigen wird zunächst eine geringe Lichtintensität untersucht. Die Spannung an der grünen LED beträgt bei der ersten Messung:

$$U_D = (1,5 \pm 0,2) \text{ V.}$$

Die fließenden Ströme  $I$  sind in [Abbildung 2](#) gegen die angelegten Spannungen aufgetragen.

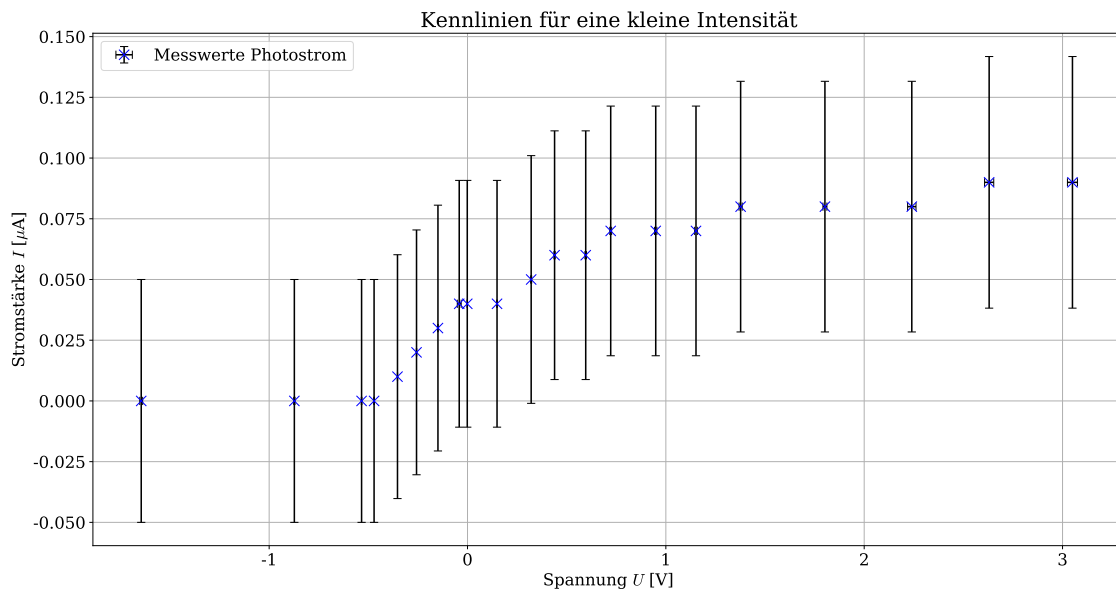


Abb. 2: Aufgetragen ist die  $I$ - $U$ -Kennlinie für eine kleine Intensität der grünen LED. Dabei ist die Stromstärke  $I$  in  $\mu\text{A}$  gegen die Spannung  $U$  in V aufgetragen.

Man sieht, dass alle Ströme unter  $0,1 \mu\text{A}$  liegen, was der Größenordnung ihrer Unsicherheiten entspricht. Trotzdem ist zu beobachten, dass bis zu einer Grenzspannung  $U_g$  keine Ströme fließen. Anschließend sieht man einen annähernd linearen Anstieg, der für große Spannungen abflacht.

Die Spannung an der Leuchtdiode wird auf

$$U_D = (2,5 \pm 0,2) \text{ V}$$

erhöht und erneut die gemessene  $I(U)$ -Kennlinie in [Abbildung 3](#) dargestellt.

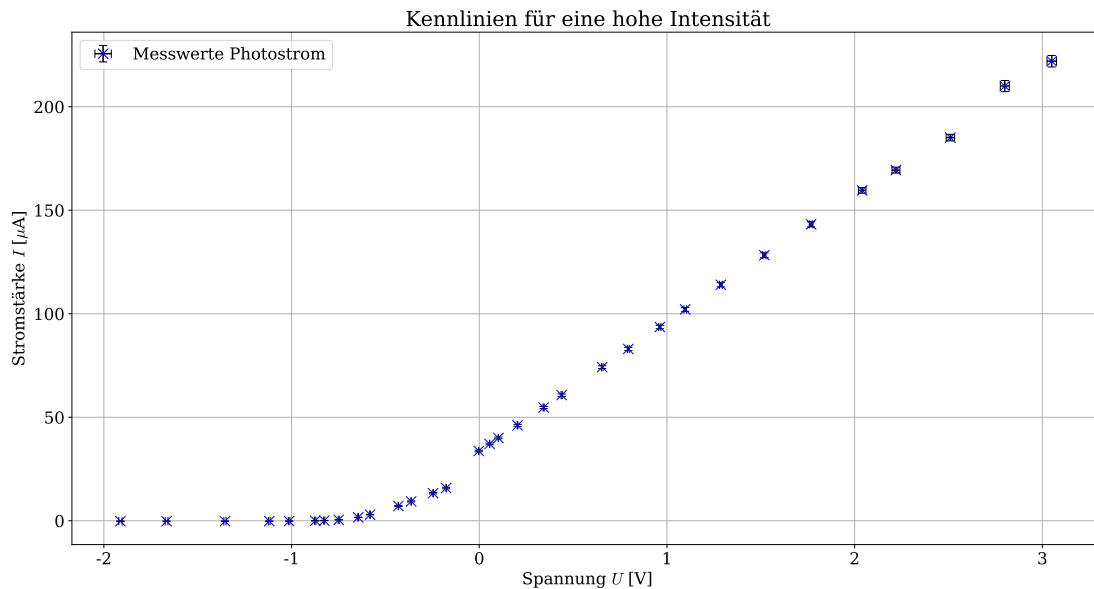


Abb. 3: Aufgetragen ist die  $I$ - $U$ -Kennlinie für eine hohe Intensität der grünen LED. Dabei ist die Stromstärke  $I$  in  $\mu\text{A}$  gegen die Spannung  $U$  in V aufgetragen.

Auch hier ist zu erkennen, dass für große negative Spannungen der Strom nahezu konstant Null ist. Allerdings kommen auch negative Ströme  $I$  vor, wie im Laborbuch in [Abbildung 18](#) im Anhang dokumentiert. Anschließend steigt die Stromstärke näherungsweise linear an. Ein Abflachen der Steigung kann bei den durch das Netzgerät realisierbaren Spannungen nicht beobachtet werden. Es fällt jedoch auf, dass bei einer Spannung von etwa 0 V ein Sprung in den Messwerten vorliegt. Dieser tritt auch in den folgenden Messreihen immer dann auf, wenn der Messbereich des Ampèremeters von  $20 \mu\text{A}$  auf  $200 \mu\text{A}$  umgeschaltet wird.

In der Fehlerdiskussion werden die beobachteten Verläufe mit der erwarteten Theorie verglichen und Abweichungen diskutiert.

### 3.2 Kennlinie bei verschiedenen Dioden und Bestimmung der Grenzspannungen

Die Energie, die beim Auslösen der Elektronen an diese übertragen wird, hängt von der Frequenz  $\nu$  und damit der Energie der Photonen und der Auslösearbeit  $W_a$  ab. Können sich die Elektronen ohne Stöße geradlinig von der Kathode Richtung Anode bewegen, haben sie die maximal mögliche kinetische Energie  $E_{\text{kin, max}}$ . Für diese gilt:

$$E_{\text{kin, max}} = h\nu - W_a, \quad (1)$$

wobei  $h$  das Planck'sche Wirkungsquantum ist.

Müssen die Elektronen auf dem Weg von Kathode zu Anode eine gleich große, elektrische Energiedifferenz  $E_{\text{el}} = E_{\text{kin, max}}$  überwinden, so gelangen sie gerade nicht mehr an die Kathode und

es fließt kein Strom mehr. Die dabei angelegte Grenzspannung  $U_g$  soll nun für Licht unterschiedlicher Frequenzen  $\nu$  ermittelt werden.

Es werden für eine grüne, rote, violette und ultraviolette LED die Strom-Spannungs-Kennlinien aufgenommen. Es wird dabei versucht die Lichtintensität so zu regulieren, dass die Ströme nicht zu klein sind, damit sie mit größerer Messgenauigkeit bestimmt werden können. Die verwendeten LED-Spannungen  $U_D$  sind im Laborbuch in [Abbildung 18](#) bis [Abbildung 20](#) im Anhang zu finden. Die gemessenen Ströme  $I(U)$  aller LEDs sind in [Abbildung 4](#) dargestellt.

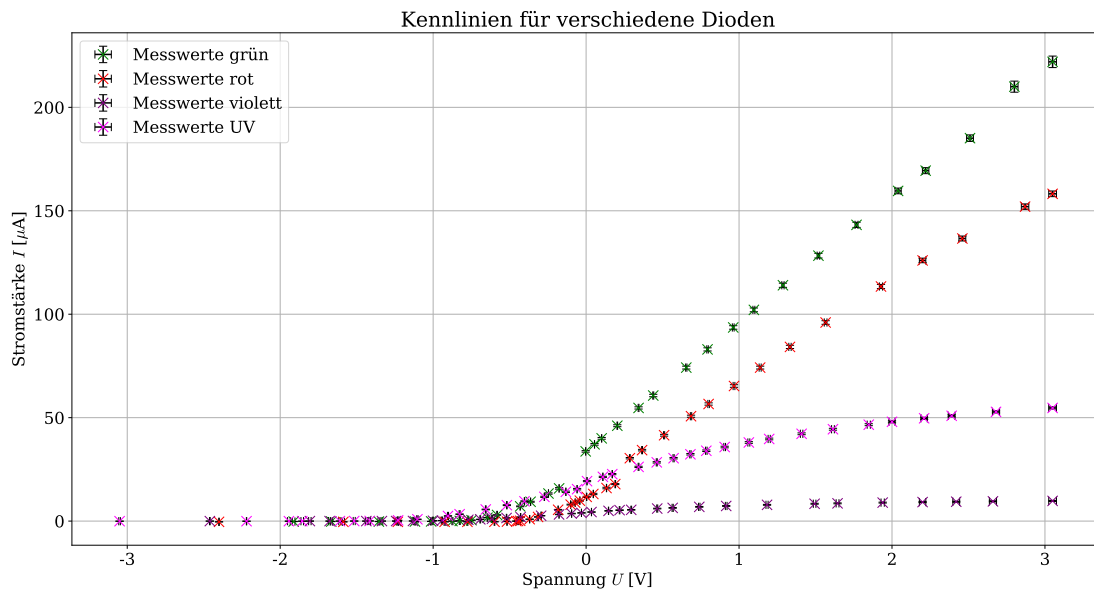


Abb. 4: Aufgetragen sind die  $I$ - $U$ -Kennlinien für vier verschiedene LEDs. Dabei ist die Stromstärke  $I$  in  $\mu\text{A}$  gegen die Spannung  $U$  in V aufgetragen. Die grüne LED ist grün, die rote LED rot, die violette LED violett und die LED im UV-Bereich in fuchsia dargestellt.

Wie bereits in [Unterabschnitt 3.1](#) erwähnt, sind immer beim Umschalten des Ampèremetermessbereichs Sprünge in den Kennlinien zu sehen. Bei der Versuchsdurchführung ist zu erkennen, dass bei der violetten und ultravioletten LED die Lichtintensität bei gleicher LED-Spannung  $U_D$  kleiner ist als bei rot und grün. Die LED-Spannung  $U_D$  wird deswegen für die ultraviolette LED erhöht. Trotzdem sind die Ströme  $I$  für die violette und ultraviolette LED wesentlich geringer.

Die Grenzspannung  $U_g$  wird exemplarisch bei der grünen LED bestimmt. Hierfür wird eine gewichtete lineare Regression mit Formeln aus [\[4\]](#) der Messwerte im Bereich des linearen Anstiegs vorgenommen. Die daraus resultierende Ausgleichsgerade mit Konfidenzband ist in [Abbildung 5](#) zusammen mit den Messwerten dargestellt.

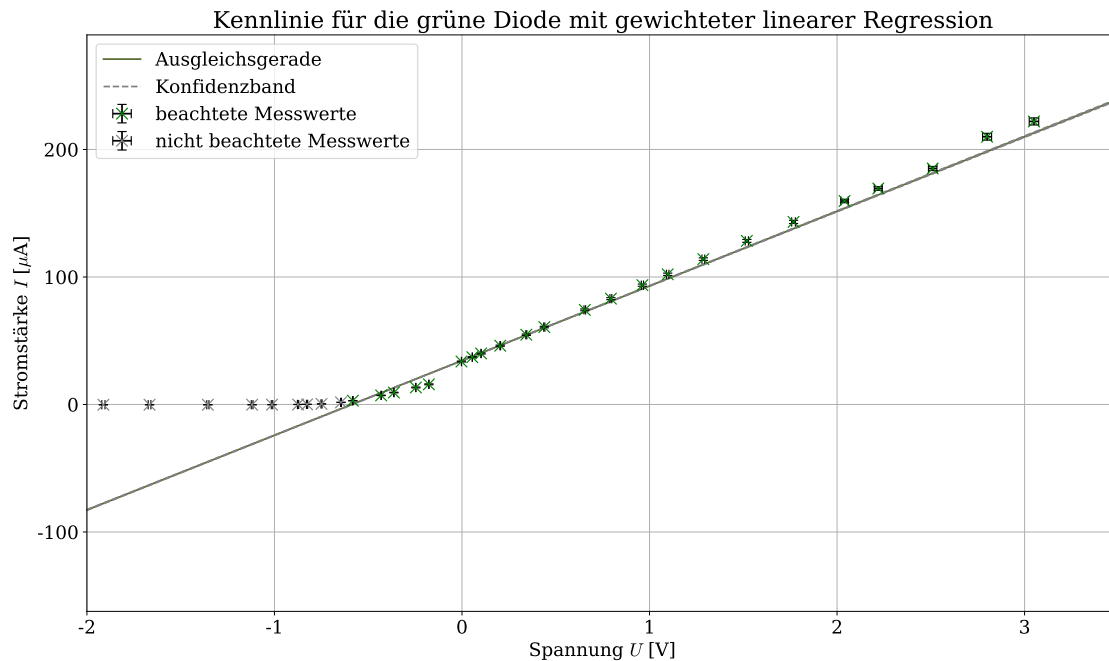


Abb. 5: Aufgetragen ist die  $I$ - $U$ -Kennlinie für die grüne LED. Dabei ist die Stromstärke  $I$  in  $\mu\text{A}$  gegen die Spannung  $U$  in V aufgetragen. Zusätzlich ist eine gewichtete lineare Regression mit einem  $1\sigma$ -Konfidenzband dargestellt. Es werden dabei nur die grün markierten Werte berücksichtigt und die grauen werden vernachlässigt.

Für die Steigung  $b$  und den  $y$ -Achsenabschnitt  $a$  der Ausgleichsgeraden ergeben sich folgende Werte:

$$b_{\text{grün}} = (58,56 \pm 0,15) \mu\text{A V}^{-1},$$

$$a_{\text{grün}} = (43,40 \pm 0,09) \mu\text{A}.$$

Die Grenzspannung  $U_g$  entspricht der Nullstelle der Ausgleichsgeraden und wird wie folgt ermittelt:

$$I(U) = b \cdot U + a \stackrel{!}{=} 0 \quad (2)$$

$$\Leftrightarrow U_g = -\frac{a}{b} \quad (3)$$

Für die Unsicherheit ergibt sich durch Fehlerfortpflanzung mit Formeln aus [2]:

$$\Delta U_g = \sqrt{\left(-\frac{\Delta a}{b}\right)^2 + \left(\frac{a \cdot \Delta b}{b^2}\right)^2}. \quad (4)$$

Daraus ergibt sich folgender Wert für die Grenzspannung bei der grünen LED:

$$U_{g, \text{grün}} = (-0,587 \pm 0,002) \text{ V}.$$

Für die Leuchtdioden anderer Frequenzen  $\nu$  wird analog vorgegangen. Die entsprechenden Graphiken sind im Anhang in [Abbildung 9](#) bis [Abbildung 11](#) zu finden. Zu beachten ist, dass beim ultravioletten Licht der Sprung in der Kennlinie so groß ist, dass hier nur zwei getrennte lineare Regressionen vor und nach dem Sprung sinnvoll erscheinen. Aus den sich daraus ergebenden

Werten und Unsicherheiten werden die Mittelwerte als Bestwert verwendet. Die Grenzspannungen  $U_g$  für rotes, violettes und ultraviolettes Licht betragen:

$$\begin{aligned} U_{g, \text{rot}} &= (-0,350 \pm 0,006) \text{ V}, \\ U_{g, \text{violett}} &= (-0,874 \pm 0,017) \text{ V}, \\ U_{g, \text{UV}} &= (-1,153 \pm 0,019) \text{ V}. \end{aligned}$$

Ob das gewählte Vorgehen für die Bestimmung der Grenzspannungen sinnvoll ist, wird in der Fehlerdiskussion aufgegriffen.

### 3.3 Spektren der Leuchtdioden

Um aus den bereits ermittelten Grenzspannungen das Planck'sche Wirkungsquantum zu bestimmen, werden noch die genauen Frequenzen des ausgestrahlten Lichtes der verwendeten LEDs untersucht. Hierfür wird das Spektrum jeder Leuchtdiode aufgenommen. Es werden für jede Farbe 100 Spektren gemessen und für jeden Messpunkt der Mittelwert und die Standardabweichung bestimmt. Diese ergeben das verwendete Spektrum mit Unsicherheiten. Die erhaltenen Spektren sind in [Abbildung 6](#) dargestellt.

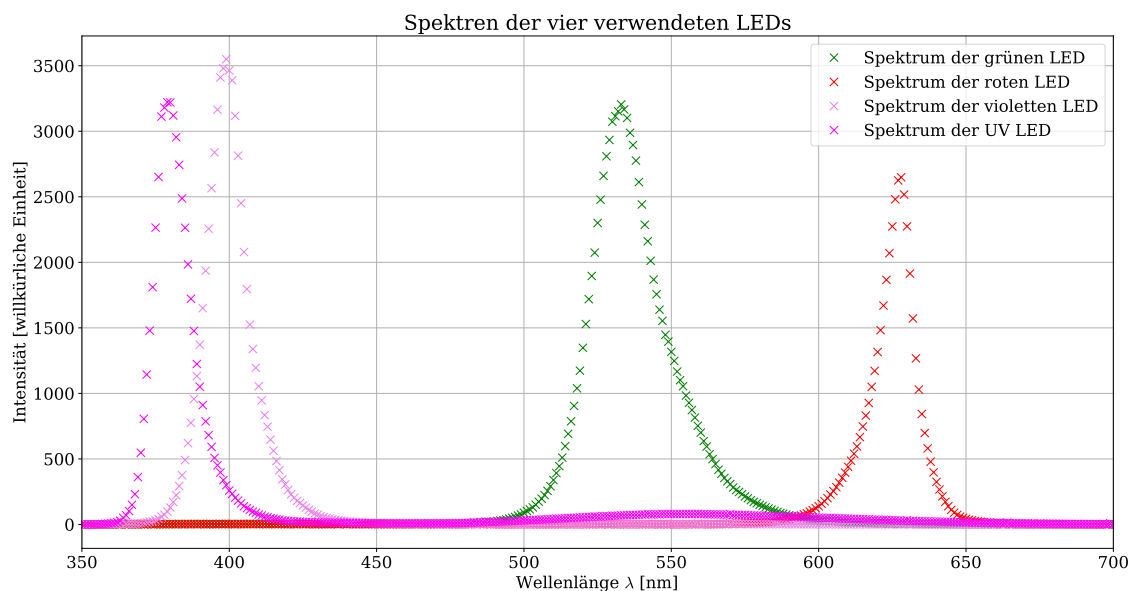


Abb. 6: Aufgetragen sind die Spektren für die vier LEDs. Dabei ist die Intensität in willkürlichen Einheiten gegen die Wellenlänge  $\lambda$  in nm aufgetragen. Das Spektrum der grünen LED ist grün, das der roten LED rot, das der violette LED violett und das der LED im UV-Bereich in fuchsia dargestellt. Auf die Darstellung der Unsicherheiten wird aus Gründen der Übersichtlichkeit verzichtet.

Man sieht, dass alle Spektren ein Maximum, das näherungsweise gaußverteilt ist, aufweisen. Eine Ausnahme bildet das ultraviolette Licht, welches ein kleines Nebenmaximum im sichtbaren Bereich besitzt. Dieses ist jedoch weit weniger intensiv als das Hauptmaximum und wird deswegen vernachlässigt. Um die zentrale Wellenlänge der LEDs zu bestimmen, wird durch numerische  $\chi^2$ -Minimierung [4] eine nicht normierte Gaußfunktion an die Messwerte angepasst. Die zu bestimmenden Parameter sind dabei der Mittelwert  $\mu$  und die Standardabweichung  $\sigma$ . Dieses Vorgehen wird exemplarisch bei der violetten LED durchgeführt.



In [Abbildung 7](#) sind das Spektrum der violetten Leuchtdiode mit der angepassten Gaußfunktion dargestellt.

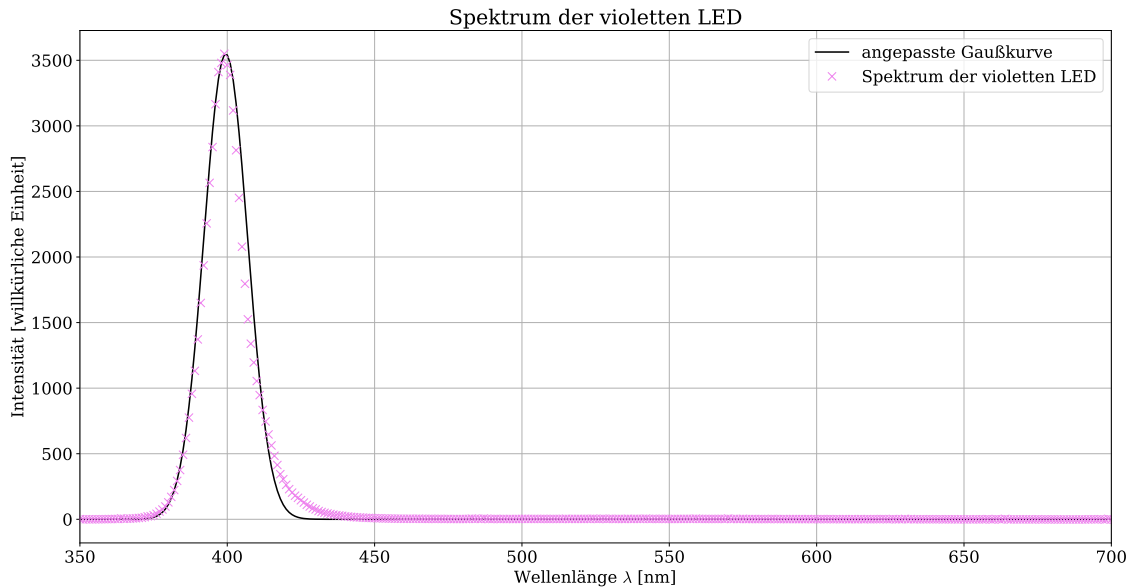


Abb. 7: Aufgetragen ist das Spektrum der violetten LED. Dabei ist die Intensität in willkürlichen Einheiten gegen die Wellenlänge  $\lambda$  in nm aufgetragen. Zusätzlich ist eine Anpassung an eine Gaußkurve eingezeichnet.

Es ist zu erkennen, dass die Gaußkurve eine akzeptable Näherung darstellt, auch wenn das Spektrum auf der rechten Seite des Peaks etwas flacher verläuft. Für die Wellenlänge  $\lambda$  und die spektrale Breite  $\delta\lambda$  werden der Mittelwert und die Standardabweichung verwendet:

$$\lambda_{\text{violett}} = \mu \pm \sigma = (399 \pm 7) \text{ nm.}$$

Hieraus kann nun noch die Frequenz  $\nu$  mit der Lichtgeschwindigkeit  $c$  [5] und die spektrale Breite  $\delta\nu$  aus Fehlerfortpflanzung [2] wie folgt berechnet werden:

$$\nu = \frac{c}{\lambda}, \quad (5)$$

$$\delta\nu = \frac{c \cdot \Delta\lambda}{\lambda^2}. \quad (6)$$

So ergibt sich folgende Frequenz der violetten LED:

$$\nu_{\text{violett}} = (7,50 \pm 0,14) \cdot 10^{14} \text{ Hz.}$$

Für die anderen Leuchtdioden wird analog vorgegangen. Die entsprechenden Schaubilder sind im Anhang in [Abbildung 12](#) bis [Abbildung 14](#) zu sehen. Es ergeben sich folgende Werte für die Frequenzen  $\nu$ :

$$\nu_{\text{grün}} = (5,60 \pm 0,13) \cdot 10^{14} \text{ Hz,}$$

$$\nu_{\text{rot}} = (4,79 \pm 0,05) \cdot 10^{14} \text{ Hz,}$$

$$\nu_{\text{UV}} = (7,87 \pm 0,13) \cdot 10^{14} \text{ Hz.}$$

### 3.4 Bestimmung des Planck'schen Wirkungsquantums

Aus [Gleichung 1](#) und der Grenzspannung  $U_g$  können nun das Planck'sche Wirkungsquantum  $h$  und die Auslösearbeit  $W_a$  bestimmt werden. Bei der Grenzspannung ist die elektrische Energiedifferenz zwischen Kathode und Anode gleich groß wie die maximale kinetische Energie  $E_{\text{kin, max}}$  der ausgelösten Elektronen. Da das elektrische Feld zwischen Kathode und Anode näherungsweise homogen ist, folgt:

$$\begin{aligned} E_{\text{el}} &= E_{\text{kin, max}} \\ \Rightarrow -e \cdot U_g &= h\nu - W_a. \end{aligned} \quad (7)$$

Hierbei ist  $e$  die Elementarladung, deren Wert aus [\[5\]](#) genommen wird. Um das Planck'sche Wirkungsquantum zu bestimmen wird  $-eU_g$  gegen die Frequenz  $\nu$  aufgetragen. Für die elektrische Energie und ihre Unsicherheiten gilt dabei:

$$E_{\text{el}} = -eU, \quad (8)$$

$$\Delta E_{\text{el}} = |e \cdot \Delta U|. \quad (9)$$

Es ergeben sich folgende Werte für die Grenzenergie, also der elektrischen Energie bei angelegter Grenzspannung:

$$\begin{aligned} E_{g, \text{ grün}} &= (0,941 \pm 0,003) \cdot 10^{-19} \text{ J}, \\ E_{g, \text{ rot}} &= (0,560 \pm 0,009) \cdot 10^{-19} \text{ J}, \\ E_{g, \text{ violett}} &= (1,40 \pm 0,03) \cdot 10^{-19} \text{ J}, \\ E_{g, \text{ UV}} &= (1,153 \pm 0,019) \cdot 10^{-19} \text{ J}. \end{aligned}$$

Diese Werte werden nun gegen die Frequenz  $\nu$  aufgetragen und mithilfe einer linearen Regression eine Ausgleichsgerade bestimmt. Diese wird nicht gewichtet, da die dominierenden Fehler die Unsicherheiten auf die Frequenzen sind und die mit gewichteter linearer Regression entstehenden Konfidenzbänder die Streuung der Werte um die Gerade deutlich unterschätzen. Auf die Sinnhaftigkeit dieses Vorgehens wird in der Fehlerdiskussion näher eingegangen. Die lineare Regression ist in [Abbildung 8](#) mit den Messwerten aufgetragen.

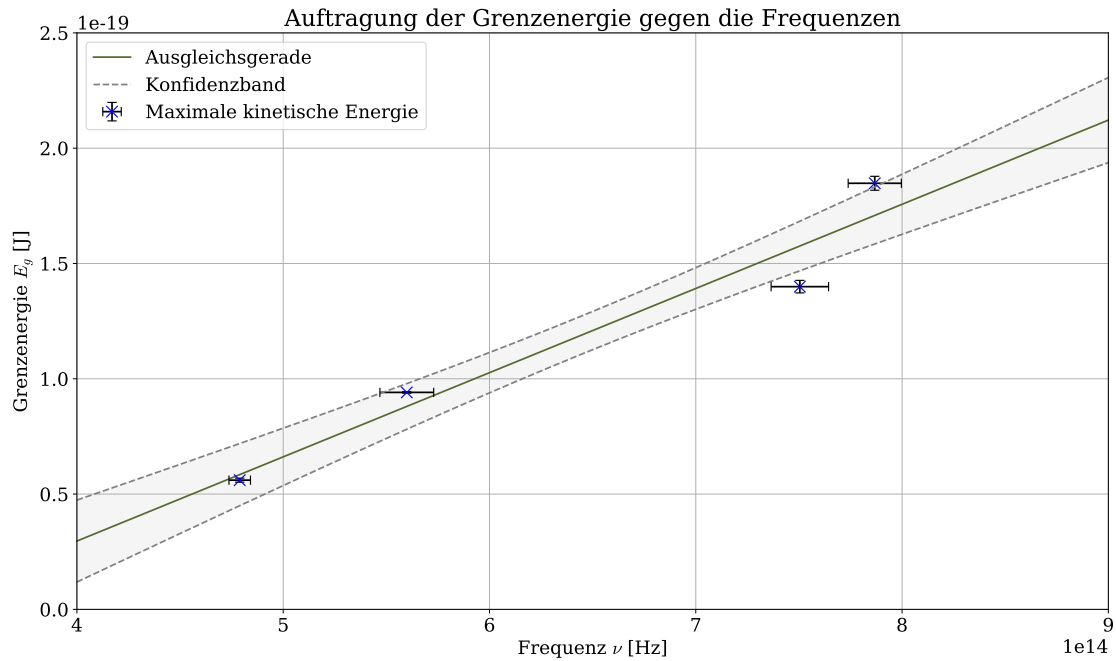


Abb. 8: Aufgetragen sind die aus linearer Regression bestimmten Grenzenergien  $E_g$  in  $10^{-19}$  J gegen die Frequenz  $\nu$  in  $10^{14}$  Hz. Zusätzlich ist eine ungewichtete lineare Regression mit einem  $1\sigma$ -Konfidenzband eingezeichnet.

Aus der zugrundeliegenden Theorie folgt, dass die Steigung  $h$  und der  $y$ -Achsenabschnitt  $-W_a$  entspricht. Aus der linearen Regression ergeben sich somit folgende Werte für das Planck'sche Wirkungsquantum  $h$  und die Austrittsarbeit  $W_a$ :

$$W_a = (1,2 \pm 0,4) \cdot 10^{-19} \text{ J},$$

$$h = (3,7 \pm 0,6) \cdot 10^{-34} \text{ J s}.$$

Auf die Verträglichkeit von  $h$  mit dem Literaturwert wird in der Fehlerdiskussion näher eingegangen.

## 4 Diskussion der Ergebnisse

### 4.1 Vergleich mit der Theorie

Im ersten Versuchsteil entsprechen die beobachteten Verläufe beide ungefähr der Theorie. Während der lineare Bereich bei der Kennlinie mit kleiner Intensität schon sehr schnell in ein Plateau übergeht, da schon früh alle ausgelösten Elektronen die Anode erreichen, ist bei der Kennlinie mit höherer Intensität der lineare Bereich deutlich größer. Dies lässt sich dadurch erklären, dass bei hoher Intensität auch deutlich mehr Elektronen ausgelöst werden und damit eine deutlich höhere Spannung anliegen muss, um den Plateau-Bereich zu erreichen. Zudem ist bei beiden Verläufen zu erkennen, dass ab einer bestimmten Gegenspannung, der Grenzspannung, kein Strom mehr fließt. Es kann jedoch nicht genau beurteilt werden, ob diese Spannung überall gleich ist, da nur zwei Messreihen durchgeführt wurden. Auffällig und nicht mit der Theorie verträglich ist der bereits mehrfach erwähnte Sprung in den Messwerten. Auf diese Fehlerquelle bei der Auswertung soll in der Fehlerdiskussion näher eingegangen werden.

Auch die Kennlinien bei verschiedenen Dioden weisen das gleiche Verhalten auf: Für die Dioden, bei denen hohe Intensitäten verwendet wurden, ergibt sich ein großer linearer Bereich, während besonders UV und violette Licht durch die kleineren Intensitäten eine Abflachung zum Plateau-Bereich zeigen. Alle Verläufe besitzen eine Gegenspannung, ab der keine Elektronen mehr fließen. Auch hier sind jedoch Sprünge im Verlauf erkennbar, die bei der Umstellung des Messgeräts auftreten.

Ein Vergleich der gemessenen Wellenlängen lässt sich mit Werten anstellen, mit denen die LEDs beschriftet sind. Diese Werte befinden sich in der dritten Spalte von [Tabelle 1](#). Um die Verträglichkeit zu untersuchen wird mit Formeln aus [\[2\]](#) ein  $t$ -Wert berechnet, wobei ein  $t$ -Wert von unter zwei auf eine gute, ein  $t$ -Wert von über zwei auf eine schlechte Verträglichkeit hindeutet. Auch diese Werte sind in [Tabelle 1](#) zu finden.

Tab. 1: Angegeben sind die gemessenen zentralen Wellenlängen mit ihrer spektralen Breite sowie die auf der LED angegebenen Werte und der jeweilige  $t$ -Wert.

LED	zentrale Wellenlänge mit spektraler Breite	angegebener Wert	$t$ -Wert
grün	$(535 \pm 12)$ nm	525 nm	0,84
rot	$(626 \pm 7)$ nm	625 nm	0,14
violett	$(399 \pm 7)$ nm	400 nm	0,07
UV	$(381 \pm 6)$ nm	380 nm	0,17

Alle Werte sind sehr gut mit den angegebenen Werten verträglich, die Messung der Wellenlängen mithilfe des USB-Spektrometers ist also wahrscheinlich als Fehlerquelle für weitere Versuchsteile auszuschließen.

Auch der ermittelte Wert für das Planck'sche Wirkungsquantum  $h = (3,7 \pm 0,6) \cdot 10^{-34}$  J s soll nun mit dem Literaturwert verglichen werden. Als Literaturwert wird folgender Wert aus der Versuchsbeschreibung [\[3\]](#) verwendet:

$$h_{\text{Lit}} = 6,626\,070\,15 \cdot 10^{-34} \text{ J s.}$$

Auch hierbei soll ein  $t$ -Wert für die Verträglichkeit ermittelt werden:

$$t_h = 4,8.$$

Dieser Wert spricht für eine eher schlechte Verträglichkeit, was auch erwartbar ist, da der Literaturwert fast doppelt so groß ist, wie der gemessene Wert. Gründe für die schlechte Verträglichkeit werden in der Fehlerdiskussion erörtert. Ein Vergleich der Austrittsarbeit mit einem Literaturwert ist nicht möglich, da nicht bekannt ist, welches Material in der Photozelle verwendet wird.

## 4.2 Zusammenstellung der Ergebnisse

In einem ersten Versuchsteil konnten zwei Kennlinien für unterschiedliche Intensitäten gemessen und der aus der Theorie erwartete Verlauf mit einer Grenzspannung, einem linearen Bereich und einem anschließenden Plateau bestätigt werden. Es konnte außerdem beobachtet werden, dass für größere Intensitäten ein deutlich größerer Strom bei gleicher Spannung fließt.

In dem darauffolgenden Versuchsteil konnten mithilfe von linearer Regression die Grenzspannungen  $U_g$  für die vier verwendeten Spannungen und daraus die Energien  $E_g = |eU_g|$  bestimmt werden. Danach konnte mithilfe eines USB-Spektrometers die zentrale Frequenz  $\nu$  der jeweiligen LED bestimmt und der Fehler darauf aus der spektralen Breite  $\delta\nu$  abgeschätzt werden. Alle so bestimmten Werte sind in [Tabelle 2](#) zusammengestellt.

Tab. 2: Zusammengestellt sind die gemessenen Frequenzen  $\nu$  mit ihren spektralen Breiten  $\delta\nu$  sowie die Grenzspannungen  $U_g$  und Grenzenergien  $E_g$ .

LED	zentrale Frequenz mit spektraler Breite	Grenzspannung $ U_g $	Grenzenergie $E_g$
grün	$(5,60 \pm 0,13) \cdot 10^{14}$ Hz	$(0,587 \pm 0,002)$ V	$(0,941 \pm 0,003) \cdot 10^{-19}$ J
rot	$(4,79 \pm 0,05) \cdot 10^{14}$ Hz	$(0,350 \pm 0,006)$ V	$(0,560 \pm 0,009) \cdot 10^{-19}$ J
violett	$(7,50 \pm 0,14) \cdot 10^{14}$ Hz	$(0,874 \pm 0,017)$ V	$(1,40 \pm 0,03) \cdot 10^{-19}$ J
UV	$(7,87 \pm 0,13) \cdot 10^{14}$ Hz	$(1,153 \pm 0,019)$ V	$(1,85 \pm 0,03) \cdot 10^{-19}$ J

Durch Auftragung der Energien  $E_g$  gegen die Frequenzen  $\nu$  kann in einem letzten Schritt die Austrittsenergie  $W_a$  und das Planck'sche Wirkungsquantum  $h$  bestimmt werden, wobei folgende Werte ermittelt werden:

$$W_a = (1,2 \pm 0,4) \cdot 10^{-19} \text{ J},$$

$$h = (3,7 \pm 0,6) \text{ Js}.$$

Ein Vergleich von  $h$  mit einem Literaturwert ergibt einen  $t$ -Wert von  $t = 4,8$ , was auf eine eher schlechte Verträglichkeit hindeutet.

## 4.3 Fehlerdiskussion

Ein erstes Problem bei der Versuchsdurchführung ergibt sich bereits bei der ersten Messreihe für die Messung der Kennlinien für verschiedene Intensitäten. Da es möglich ist, entweder stromrichtig oder spannungsrichtig zu messen, kann es passieren, dass bei der Verwendung der falschen Schaltung ein großer systematischer Fehler auftritt. Die spannungsrichtige Schaltung ist in [Abbildung 15](#) im Anhang zu sehen. Durch das Auftreten negativer Ströme auch bei negativer Spannung, was sich nur durch die Verwendung der spannungsrichtigen Schaltung erklären lässt, konnte nach einer ersten Messreihe dieser Fehler bemerkt und dadurch umgangen werden. Durch den hohen Widerstand der Photozelle kann es bei spannungsrichtigen Schaltungen vorkommen, dass trotz des großen Innenwiderstands des Voltmeters durch dieses ein Strom fließt, der die Messreihe verfälscht. Besonders durch die extrem kleinen Ströme, die in diesem Versuch gemessen werden müssen, bietet sich diese Schaltung also nicht an.

Aufgrund von Zeitproblemen, die dadurch zustande kommen, dass zunächst die falsche Schaltung verwendet wurde, konnten für den ersten Versuchsteil nur zwei Messreihen durchgeführt werden. Eine Aufnahme weiterer Messreihen und dadurch weiterer Kennlinien wäre sinnvoll, da nur zwei verschiedene Kennlinien nicht besonders aussagekräftig sind. Dadurch, dass nur eine sehr hohe und eine sehr kleine Intensität vermessen wurden, lässt sich auch nur über diese Grenzfälle etwas aussagen. Erschwerend kommt hinzu, dass bei der kleinen Intensität die Werte in einem Bereich liegen, bei dem die Fehler in derselben Größenordnung liegen wie die Werte selbst. Diese Messreihe ist dadurch fast unbrauchbar.

Ein Problem bei der Auswertung der Kennlinien stellen die Sprünge in den Messreihen dar. Grund für diese Sprünge ist vermutlich das Umstellen der Messbereiche auf dem Ampèremeter, da durch dieses Umstellen gleichzeitig auch der Innenwiderstand des Geräts variiert. Da jedoch die genaue Ursache unklar ist und die Sprünge die Linearität der Messwerte unterbrechen, gestaltet sich eine Auswertung insgesamt schwieriger, da unklar ist, welche Werte bei der linearen Regression zu berücksichtigen sind. Die bestimmten Grenzspannungen können daher systematische Abweichungen haben, die sich auch auf die weiteren Auswertungsteile auswirken.

Eine weitere Schwierigkeit bei der Auswertung ergibt sich durch die niedrigen Intensitäten bei violettem und ultraviolettem Licht. Eine hohe Intensität eignet sich hier besser, da dadurch ein klarer linearer Bereich für die Regression in der Kennlinie auftritt. Dass die hier verwendeten Intensitäten recht klein sind, liegt unter anderem daran, dass versucht wurde, bei jeder Messung an der Diode die gleiche Spannung anzulegen, was jedoch augenscheinlich nicht zu einer gleichen Intensität führt.

Ein letzter zu diskutierender, wichtiger Punkt ist die mit  $t = 4,8$  relativ große Unverträglichkeit des ermittelten Werts für das Planck'sche Wirkungsquantum mit dem Literaturwert. Die wichtigste Fehlerquelle bei der Bestimmung von  $h$  ist dabei sicherlich, dass für die lineare Regression, die zur Bestimmung dieses Wertes verwendet wird, nur vier Werte zur Verfügung stehen. Eine lineare Regression mit zwei Parametern ist eigentlich erst bei einer deutliche längeren Messreihe sinnvoll. Da jedoch durch die Austrittsarbeit ein Offset bei den Messwerten entsteht, muss auch bei wenigen Messwerte die lineare Regression verwendet werden.

Während als möglicher weiterer Grund für diese Unverträglichkeit eine falsche Bestimmung der Frequenzen ausgeschlossen werden kann, ist es durchaus realistisch, dass es bei der Bestimmung der Grenzspannungen und damit der Energien zu größeren Ungenauigkeiten kommt. Hauptgrund hierbei ist wie bereits erwähnt, dass aufgrund des Sprunges und der zu kleinen Intensitäten bei violettem und ultraviolettem Licht die für die lineare Regression verwendeten Werten zunächst ausgesucht werden mussten. Es ist dadurch gut möglich, dass nicht die richtige Nullstelle getroffen wurde. Vergleicht man die, durch lineare Regression bestimmten, Nullstellen mit den im Laborbuch als Nulldurchgang gemessenen Spannungen, fällt auf, dass alle errechneten Werte sich deutlich von den gemessenen Werten unterscheiden. Ermittelt man den Wert für  $h$  aus den erwähnten Nulldurchgängen (siehe [Abbildung 16](#) im Anhang) ergibt sich mit  $h = (5,8 \pm 0,6) \text{ Js}$  ein deutlich verträglicherer Wert ( $t = 1,4$ ). Ob dieses Vorgehen jedoch sinnvoller ist, ist fraglich, da auch diese Nulldurchgänge nicht mit höchster Genauigkeit ermittelt werden konnten. Dies liegt unter anderem daran, dass sich, im Gegensatz zur linearen Regression, statistische Unsicherheiten nicht herausmitteln können.

Die Verwendung einer ungewichteten linearen Regression scheint bei der Bestimmung von  $h$  berechtigt zu sein. Die Ungenauigkeiten auf die Energien sind vermutlich zu klein abgeschätzt, da die Bestimmung der Grenzspannungen aus der linearen Regression fehlerbehafteter war, als so zu vermuten ist. Bei einer gewichteten linearen Regression würde insbesondere der Messwert der roten Diode deutlich zu sehr gewichtet, da dort durch die Wahl eines sehr linearen Bereichs, bei der Bestimmung des Wertes, der  $y$ -Fehler deutlich zu klein geschätzt wird. Auch die geringe Anzahl an Werten und die eindeutige Dominanz der  $x$ -Fehler würde eine gewichtete lineare Regression nicht wirklich rechtfertigen. Wie in [Abbildung 8](#) zu erkennen, ergibt sich durch die ungewichtete Regression ein deutlich realistischerer Fehler. Sinnvoll wäre vielleicht eine Regression unter Berücksichtigung beider Fehler wie in [\[6\]](#) beschreiben oder nur der  $x$ -Fehler, was jedoch aus Zeitgründen nicht durchgeführt wurde.

#### 4.4 Verbesserte Messmethoden

Um eine adäquate Intensität der Dioden für die  $I$ - $U$ -Kennlinienmessung zu nutzen, wäre es sinnvoll im ersten Versuchsteil mehr Kennlinien bei unterschiedlichen Intensitäten aufzuneh-

men. Dadurch könnte man vermeiden Messreihen mit hohen relativen Fehlern, beziehungsweise Messreihen mit zu hohen Intensitäten aufzunehmen, wodurch unter Umständen unerwünschte Effekte auftreten. Diese möglichen Verzerrungen bei hohen Intensitäten können jedoch nur ausgeschlossen werden, wenn man auch einige mittlere Intensitäten als Vergleichswerte aufnimmt.

Eine weitere Verbesserung der  $I$ - $U$ -Kennlinienmessung wäre, das Ampèremeter nur in einer Einstellung zu belassen, da bei der Messung beobachtet werden konnte, dass nach Wechseln des Ampèremetermessbereichs der Verlauf einen Knick macht. Dabei besitzt die Kennlinie vor dem Knick eine andere Steigung als nach dem Knick, wodurch auch die Extrapolation auf die Nullstelle unterschiedliche Werte für die Grenzspannung liefert. Durch einen einheitlichen Messbereich könnte man somit gegebenenfalls einen lineareren Verlauf der Messwerte erzielen und man müsste sich nicht mehr für eine lineare Regression der Werte vor beziehungsweise nach dem Knick entscheiden, wodurch man einen exakteren Wert für die Grenzspannung erhalten würde. Hierdurch würden zwar weniger Nachkommstellen ermittelt, da im niedrigen Strombereich allerdings sowieso eine große Messunsicherheit vorliegt, sind diese Verluste bei der Messgenauigkeit zu verkraften.

Eine Möglichkeit die Spektralmessung der einzelnen Dioden zu optimieren ist, eine Halterung für das USB-Spektrometer zu nutzen, um dieses fest einzuspannen. Hiermit könnte man verhindern, dass durch Erschütterungen oder Verrutschen des Spektrometers Messfehler auftreten.

Zur Optimierung der Bestimmung des Planck'schen Wirkungsquantums wäre es sinnvoll zusätzliche Grenzenergien bei weiteren Dioden aufzunehmen. Dabei könnte man auch Dioden im infraroten Bereich nutzen, um einen größeren Bereich an Wellenlängen abzudecken. Dadurch hätte auch der Wert des Planck'schen Wirkungsquantums eine höhere Aussagekraft, da eine lineare Regression bei vier Werten nur wenig sinnvoll ist.

## Literatur

- [1] Uni-Trend Technology (dong guan) limited: *Model UT51-55: Operating Manual*, S.5f
- [2] Dr. Christof Bartels, Dr. Lukas Bruder, Dr. Thomas Pfohl: *Datenanalyse Teil A - Skript zur Vorlesung am 06.09.2021*, (Freiburg im Breisgau, 2021/22)
- [3] Paul A. Tipler, Gene Mosca: *Physik für Studierende der Naturwissenschaften und Technik*, 8. Auflage, (Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum, 2019), 32.1 „Wellen und Teilchen“, bis einschließlich 32.2 „Der photoelektrische Effekt“
- [4] Dr. Christof Bartels, Dr. Lukas Bruder, Dr. Thomas Pfohl: *Datenanalyse Teil B - Skript zur Vorlesung am 28.02.2022*, (Freiburg im Breisgau, 2021/22)
- [5] BIPM: *The International System of Units (SI): Defining constants* <https://www.bipm.org/en/measurement-units/si-defining-constants> (aufgerufen am: 30.03.2022)
- [6] Dr. Christof Bartels, Dr. Lukas Bruder, Dr. Thomas Pfohl: *Versuch 81 - Photoeffekt, Versuchsbeschreibung des Physiklabors für Anfänger\*innen*, (Freiburg im Breisgau, 2022)



## 6 Anhang

### 6.1 Grafiken

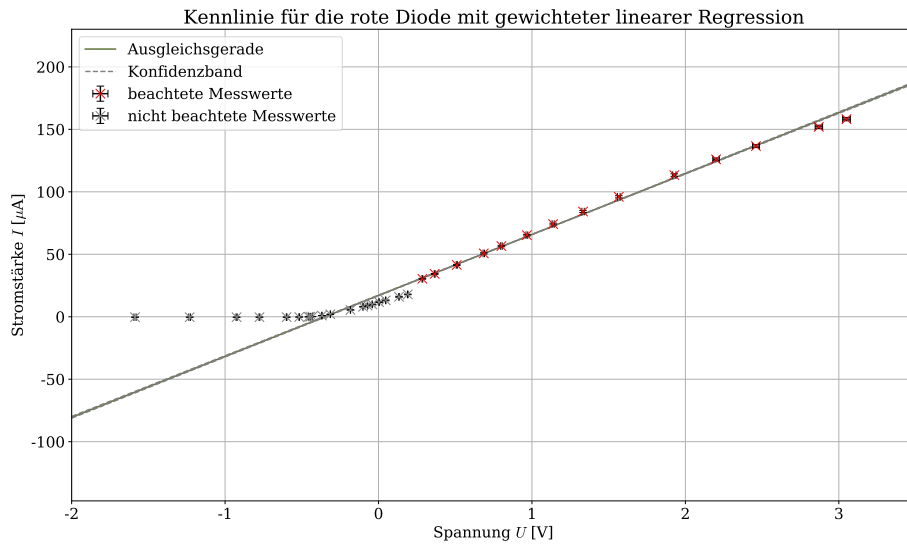


Abb. 9: Aufgetragen ist die  $I$ - $U$ -Kennlinie für die rote LED. Dabei ist die Stromstärke  $I$  in  $\mu\text{A}$  gegen die Spannung  $U$  in V aufgetragen. Zusätzlich ist eine gewichtete lineare Regression mit einem  $1\sigma$ -Konfidenzband dargestellt. Es werden dabei nur die rot markierten Werte berücksichtigt und die grauen werden vernachlässigt.

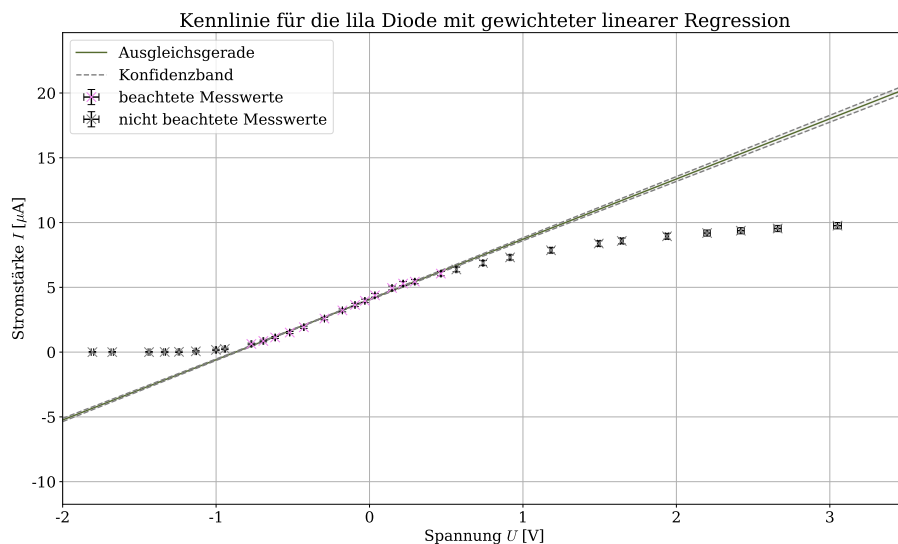


Abb. 10: Aufgetragen ist die  $I$ - $U$ -Kennlinie für die violette LED. Dabei ist die Stromstärke  $I$  in  $\mu\text{A}$  gegen die Spannung  $U$  in V aufgetragen. Zusätzlich ist eine gewichtete lineare Regression mit einem  $1\sigma$ -Konfidenzband dargestellt. Es werden dabei nur die violett markierten Werte berücksichtigt und die grauen werden vernachlässigt.

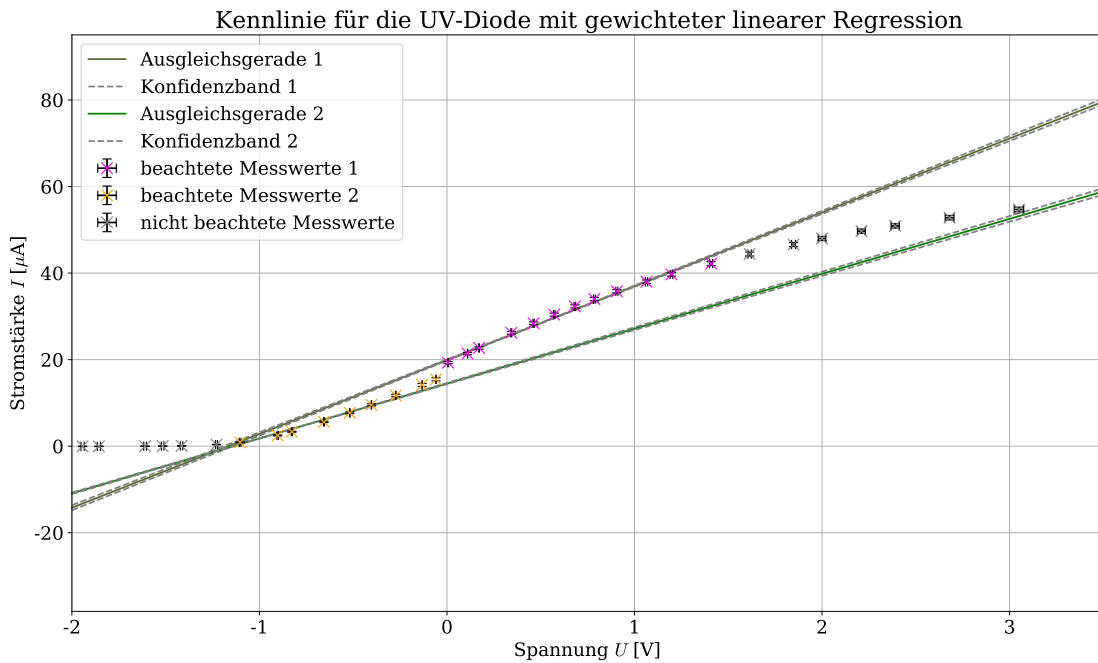


Abb. 11: Aufgetragen ist die  $I$ - $U$ -Kennlinie für die LED im UV-Bereich. Dabei ist die Stromstärke  $I$  in  $\mu\text{A}$  gegen die Spannung  $U$  in V aufgetragen. Zusätzlich sind zwei gewichtete lineare Regression mit einem  $1\sigma$ -Konfidenzband dargestellt. Für die erste Regression werden dabei nur die fuchsia markierten Werte und für die zweite Regression nur die orange markierten Werte berücksichtigt.

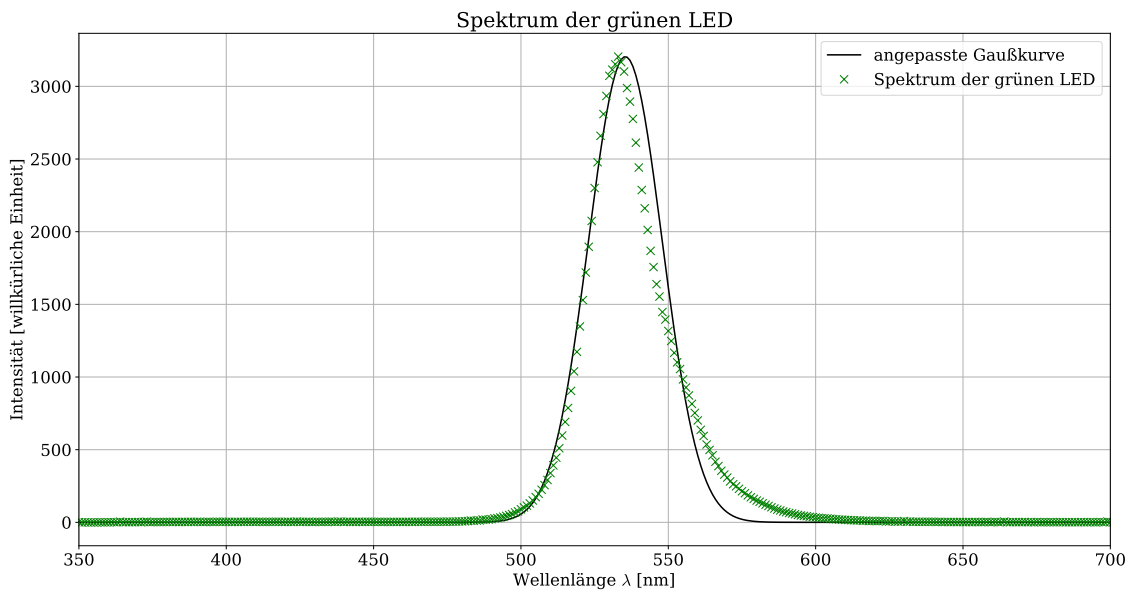


Abb. 12: Aufgetragen ist das Spektrum der grünen LED. Dabei ist die Intensität in willkürlichen Einheiten gegen die Wellenlänge  $\lambda$  in nm aufgetragen. Zusätzlich ist eine Anpassung an eine Gaußkurve eingezeichnet.

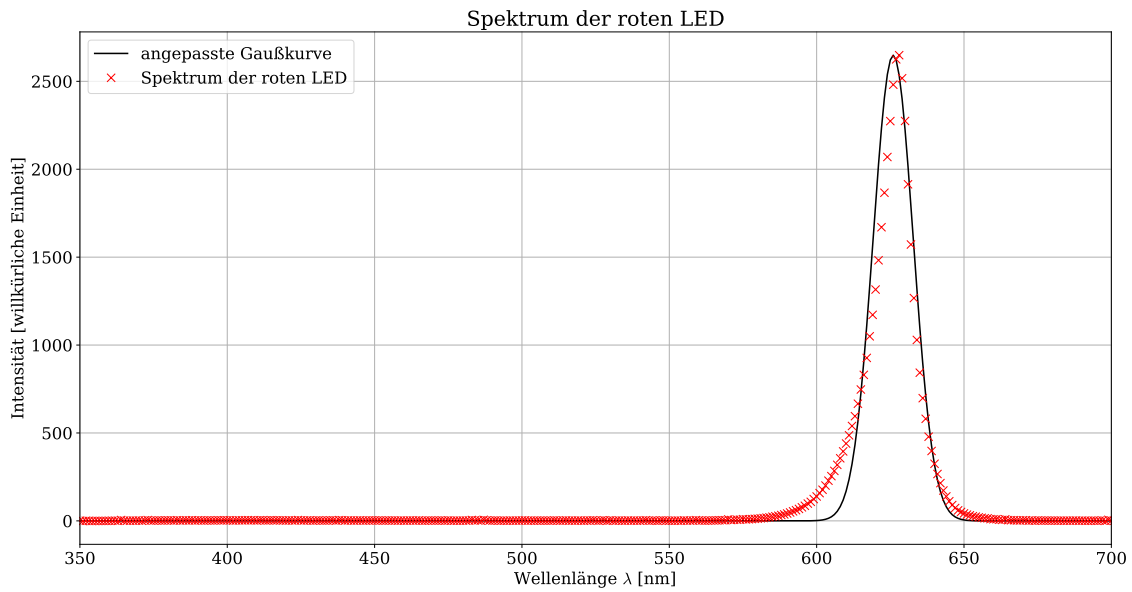


Abb. 13: Aufgetragen ist das Spektrum der roten LED. Dabei ist die Intensität in willkürlichen Einheiten gegen die Wellenlänge  $\lambda$  in nm aufgetragen. Zusätzlich ist eine Anpassung an eine Gaußkurve eingezeichnet.

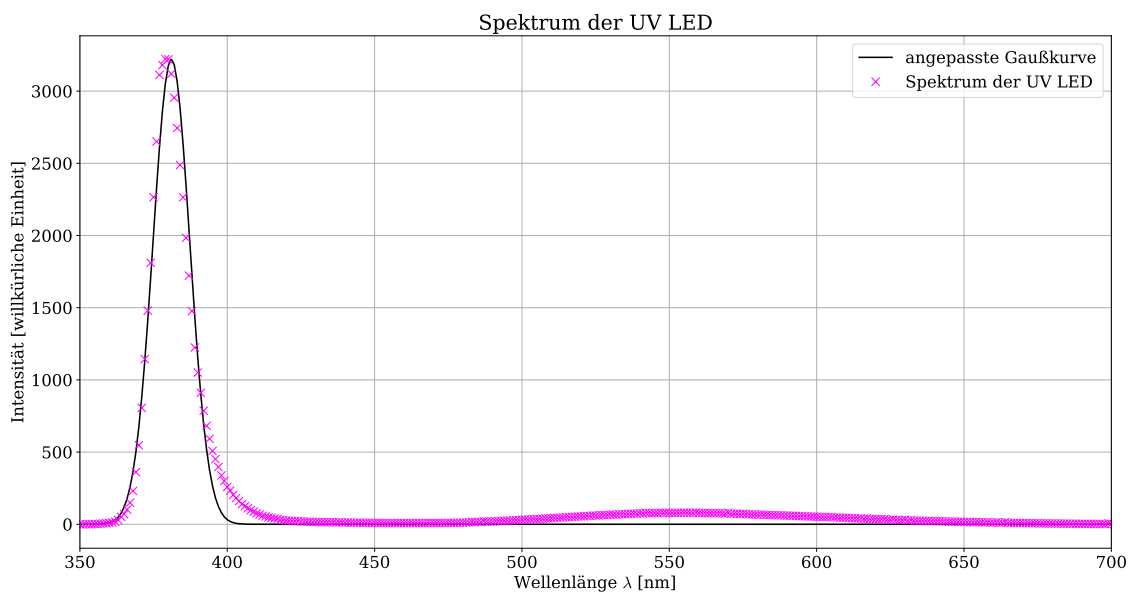


Abb. 14: Aufgetragen ist das Spektrum der LED im UV-Bereich. Dabei ist die Intensität in willkürlichen Einheiten gegen die Wellenlänge  $\lambda$  in nm aufgetragen. Zusätzlich ist eine Anpassung an eine Gaußkurve eingezeichnet.

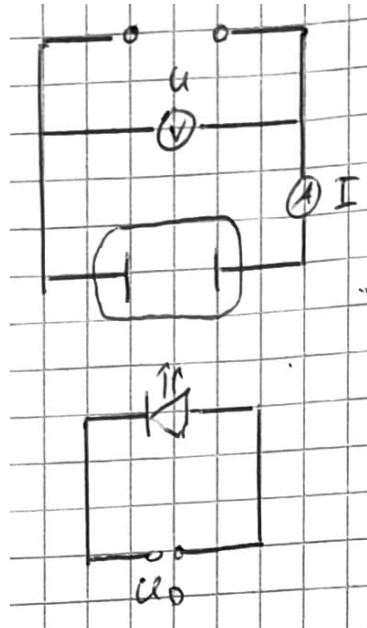


Abb. 15: Skizze des Versuchsaufbaus aus [Abbildung 17](#) mit allen relevanten Größen für die Messung. In der oberen Schaltung wird spannungsrichtig der Strom  $I$  am Ampèremeter und die Spannung  $U$  am Voltmeter gemessen. In der unteren Schaltung wird eine LED betrieben, die in Richtung der Photozelle leuchtet.

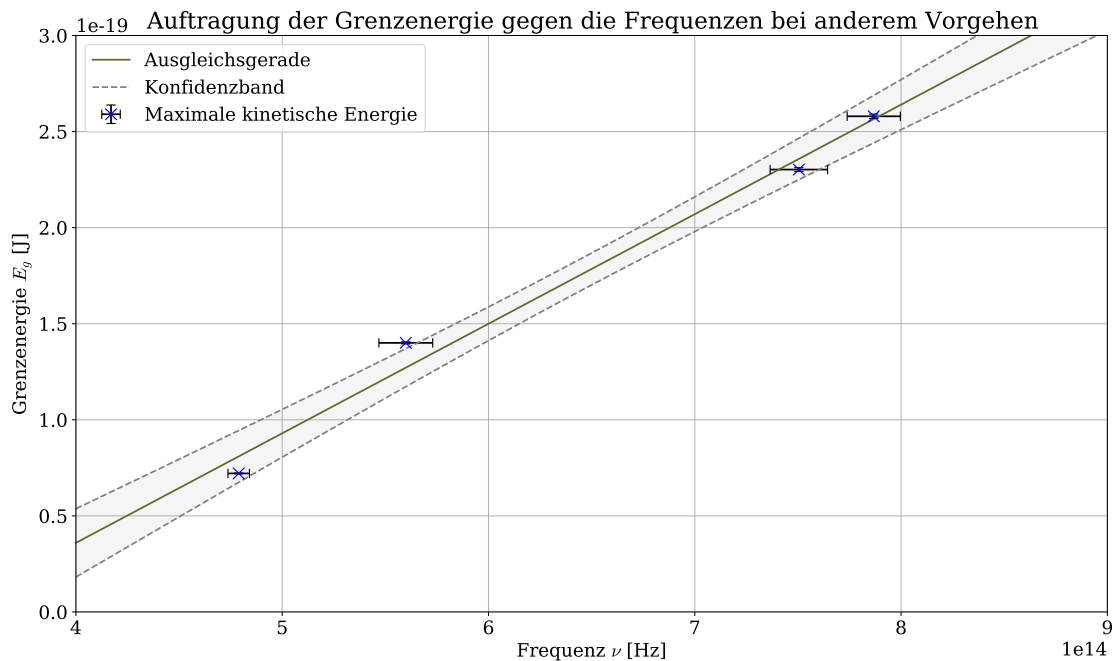


Abb. 16: Aufgetragen sind die durch Messungen bestimmten Grenzeenergien  $E_g$  in  $10^{-19}$  J gegen die Frequenz  $\nu$  in  $10^{14}$  Hz. Zusätzlich ist eine ungewichtete lineare Regression mit einem  $1\sigma$ -Konfidenzband eingezeichnet.

## 6.2 Laborbuch

290322

### Versuch 81 - Photoeffekt

1) Versuchsaufbau

1.1

Schaltung 1

Schaltung 2

1.2

LED Spektrometer  
Steckbrett

Verwendete LEDs:

- rot:  $\lambda_r = 625\text{nm}$
- grün:  $\lambda_g = 525\text{nm}$
- violett:  $\lambda_v = 400\text{nm}$
- blau:  $\lambda_e = 380\text{nm}$

Netzgerät mit analogem Skala

• Raum bei allen Messungen abgedunkelt

2) Messung

2.1 grüne Diode • Messunsicherheit Multimeter siehe Datenblatt

Diodenspannung $U_D$ in V mit $\Delta U_D = \frac{0,5}{10} \text{V}$	Photostrom $I$ in $\mu\text{A}$	Spannung $U$ in V	Messbereich $I$	Messbereich $U$
2	0,13	-0,0033	20 $\mu\text{A}$	200mV
	0,14	0,0315		
	0,16	0,0939		
	0,18	0,1648		
	0,19	0,1985		
	0,21	0,275		2V
	0,23	0,407		
	0,25	0,490		
	0,27	0,571		
	0,29	0,697		
	0,30	0,783		
	0,32	0,892		
	0,34	1,038		
	0,36	1,205		
	0,38	1,354		
	0,41	1,620		
	0,43	1,798		
	0,46	1,986		
	0,48	2,18		20V
	0,50	2,40		
	0,53	2,62		
	0,55	2,86		
	0,57	3,04		
	0,13	-0,0002		200mV
	0,13	-0,0002		
	0,10	-0,0238		

Abb. 17: Laborbuch, Seite 1

$U_D$ in V mit $\Delta U_D = \frac{0,5}{\sqrt{6}} V$	$I$ in $\mu A$	$U$ in V	Messbereich I	Messbereich U
	0,09	-0,1070		
	0,07	-0,1494		
	0,05	-0,1969		
	0,04	-0,227		2V
	0,02	-0,295		
	0,01	-0,311		
	0,00	-0,333		
2. Schaltung				
1,5	0,04	-0,0012	20 $\mu A$	200 mV
	0,04	+0,1489		2V
	0,05	+0,321		
	0,06	0,439		
	0,06	0,596		
	0,07	0,722		
	0,07	0,949		
	0,07	1,152		
	0,08	1,377		
	0,08	1,802		
	0,08	2,24		20V
	0,09	3,05		
	0,09	2,24		
	0,09	2,63		
	0,04	-0,0417		200 mV
	0,03	-0,1490		
	0,02	-0,257		2V
	0,01	-0,353		
	0,00	-0,471		
	0,00	-0,534		
	0,00	-0,873		
	0,00	-1,645		
<del>2,5</del>	33,7	-0,0027	200 $\mu A$	200 mV
	37,1	0,0551		
	40,0	0,1018		
	46,1	0,204		2V
	54,7	0,343		
	60,7	0,439		
	74,2	0,655		
	83,0	0,794		
	93,6	0,962		
	102,1	1,097		
	104,0	1,287		
	128,3	1,519		
	143,2	1,768		
	159,6	2,04		20V
	169,4	2,22		
	185,1	2,51		
	210	2,80	2 mA	
	222	3,05		
	15,81	-0,1764	20 $\mu A$	200 mV
	13,33	-0,246		2V
	9,35	-0,363		
	7,13	-0,431		

Abb. 18: Laborbuch, Seite 2

$U_p$ in V, $U_p = \frac{9,5}{10^3} U$	$I$ in $\mu A$	$U$ in V	$f$ Resb.I	Resb.U	$U_p$ in V, $U_p = \frac{9,5}{10^3} U$	$I$ in $\mu A$	$U$ in V	Ab.I	Ab.U
2,96	-0,582				7,31	0,916			
1,66	-0,645				7,86	1,183			
0,45	-0,749				8,38	1,494			
0,10	-0,826				8,58	1,644			
0,00	-0,874				8,94	1,939			
-0,15	-1,013				9,19	2,20		20V	
-0,19	-1,119				9,37	2,42			
-0,21	-1,355				9,54	2,66			
-0,21	-1,666				9,76	3,05			
-0,21	-1,912				3,96	-0,002		200mV	
					3,64	-0,0546			
					3,22	-0,1768			
<u>rote LED</u>					2,59	-0,294		2V	
2,5	11,70	0,0038	20 $\mu A$	200mV	1,92	-0,428			
	13,11	0,0471			1,51	-0,520			
	15,98	0,1335			1,13	-0,615			
	17,88	0,1907	200 $\mu A$	2V	0,86	-0,692			
	30,4	0,286			0,63	-0,770			
	34,3	0,366			0,25	-0,943			
	41,5	0,510			0,17	-1,001			
	50,7	0,686			0,06	-1,132			
	56,6	0,801			0,02	-1,242			
	65,3	0,967			0,01	-1,336			
	74,2	1,138			0,00	-1,457			
	84,2	1,333			0,00	-1,627			
	96,0	1,566			0,00	-1,806			
	113,4	1,928			-0,01	-2,46		20V	
	126,0	2,20		20V					
	136,6	2,46							
	152,0	2,87			<u>blaue LED</u>				
	158,2	3,05			3,0	19,3	0,0060	20 $\mu A$	200mV
	8,92	-0,0713	20 $\mu A$	200mV	21,4	0,1097			
	9,88	-0,0609			22,7	0,1210			
	2,97	-0,1009			26,2	0,343		2V	
	5,48	-0,1828			28,4	0,462			
	2,00	-0,314		2V	30,4	0,572			
	0,92	-0,369			32,3	0,682			
	0,15	-0,431			34,0	0,786			
	0,04	-0,445			35,8	0,906			
	-0,02	-0,456			38,0	1,064			
	-0,23	-0,517			39,7	1,197			
	-0,32	-0,599			42,2	1,409			
	-0,34	-0,776			44,4	1,614			
	-0,35	-0,925			46,6	1,848			
	-0,35	-1,231			48,0	2,00		20V	
	-0,36	-1,587			49,7	2,21			
	-0,36	-2,40		20V	50,9	2,39			
					52,8	2,68			
					54,7	3,05			
<u>violette LED</u>								20 $\mu A$	200mV
2,5	4,38	0,0352	20 $\mu A$	200mV					
	4,95	0,1467			15,44	-0,0588			
	5,29	0,219		2V	14,15	-0,133			
	(5,62	0,296)	stark geschaltet		11,72	-0,273		2V	
	5,44	0,295			9,55	-0,403			
	6,06	0,465			7,70	-0,518			
	6,38	0,566			5,62	-0,656			
	6,88	0,740			3,24	-0,827			

Abb. 19: Laborbuch, Seite 3

$\Delta U_{\text{b}} = \frac{0,5}{100} U$	$I_{\text{in}} / \text{mA}$	$U_{\text{in}} / \text{V}$	$U_{\text{A. b.}}$	$U_{\text{A. b.}}$
	2,68	-0,505		
	0,88	-1,103		
	0,37	-1,229		
	0,07	-1,415		
	0,02	-1,516		
	0,00	-1,610		
	-0,04	-1,856		
	-0,04	-1,943		ZDV
	-0,05	-2,22		
	-0,05	-3,05		

2. 2100x Spektrum für jede Farbe gespeichert

- Intensität so eingestellt, dass Peak in Messbereich

29.3.22  
Sll

Abb. 20: Laborbuch, Seite 4



## Tabellenverzeichnis

1	Vergleich der gemessenen und angegebenen Wellenlängen der LEDs . . . . .	11
2	Zusammenstellung der Ergebnisse . . . . .	12

## Abbildungsverzeichnis

1	Stromrichtiger Versuchsaufbau . . . . .	2
2	$I$ - $U$ -Kennlinie für eine kleine Intensität der grünen LED . . . . .	3
3	$I$ - $U$ -Kennlinie für eine hohe Intensität der grünen LED . . . . .	4
4	$I$ - $U$ -Kennlinien für verschiedene Dioden . . . . .	5
5	$I$ - $U$ -Kennlinie für die grüne Diode mit linearer Regression . . . . .	6
6	Spektrien der vier verwendeten LEDs . . . . .	7
7	Spektrum der violetten LED mit Anpassung an eine Gaußkurve . . . . .	8
8	Aus linearer Regression bestimmte Grenzenergien gegen die Frequenzen . . . . .	10
9	$I$ - $U$ -Kennlinie für die rote Diode mit linearer Regression . . . . .	16
10	$I$ - $U$ -Kennlinie für die violette Diode mit linearer Regression . . . . .	16
11	$I$ - $U$ -Kennlinie für die Diode im UV-Bereich mit linearer Regression . . . . .	17
12	Spektrum der grünen LED mit Anpassung an eine Gaußkurve . . . . .	17
13	Spektrum der roten LED mit Anpassung an eine Gaußkurve . . . . .	18
14	Spektrum der LED im UV-Bereich mit Anpassung an eine Gaußkurve . . . . .	18
15	Spannungsrichtiger Versuchsaufbau . . . . .	19
16	Durch Messungen bestimmte Grenzenergien gegen die Frequenzen . . . . .	19
17	Laborbuch, Seite 1 . . . . .	20
18	Laborbuch, Seite 2 . . . . .	21
19	Laborbuch, Seite 3 . . . . .	22
20	Laborbuch, Seite 4 . . . . .	23