

Inhaltsverzeichnis

1	Ziele des Versuchs	2
2	Aufbau und Durchführung	2
3	Auswertung und Fehleranalyse	3
3.1	Kennlinien für verschiedene Intensitäten	3
3.2	Kennlinien für verschiedene Leuchtdioden	6
3.3	Bestimmung der LED-Wellenlängen	9
3.4	Berechnung des Planck'schen Wirkungsquantums	11
4	Diskussion der Ergebnisse	13
4.1	Angabe und Diskussion der Endergebnisse	13
4.2	Diskussion der verwendeten Messmethoden	14
4.3	Verbesserte Messmethoden	15
A	Anhang	16
	Abbildungsverzeichnis	16
	Tabellenverzeichnis	16
	Literaturverzeichnis	17
A.1	Farbspektren mit Gauß-Anpassungen	18
A.2	Messprotokoll	19

1 Ziele des Versuchs

In diesem Versuch wird der äußere Photoeffekt untersucht. Aus den Kennlinien der Photozelle für Beleuchtung mit Leuchtdioden unterschiedlicher Intensitäten und Wellenlängen lassen sich Grenzspannungen bestimmen. Aus diesen und den Spektren der Leuchtdioden wird das Planck'sche Wirkungsquantum berechnet. ✓

2 Aufbau und Durchführung

Für das Experiment standen Leuchtdioden mit Wellenlängen im Bereich von 380 nm bis 658 nm, eine Fotozelle (Hamamatsu R727), ein Spektrometer mit Laptop (Ocean Optics Red Tide USB650), zwei Netzgeräte, zwei Multimeter (Uni-T UT51), sowie ein Steckbrett und Bananenstecker zur Verfügung. Die Leuchtdioden waren jeweils mit einem Gleichstrom-Netzgerät (max. 20 V, 500 mA) verbunden und wurden so auf das Steckbrett gesteckt, dass sie in möglichst geringem Abstand frontal auf die Photozelle einstrahlten. Letztere wurde mit dem zweiten Netzgerät (auch Gleichstrom, max. 10 V, 200 mA) und den beiden Multimetern derart verschalten, dass eine stromrichtige Messung erfolgte, wobei jeweils ein Multimeter als Ampere- beziehungsweise Voltmeter fungierte. Dieser grundlegende Aufbau ist in [Abbildung 1](#) dargestellt. ✓

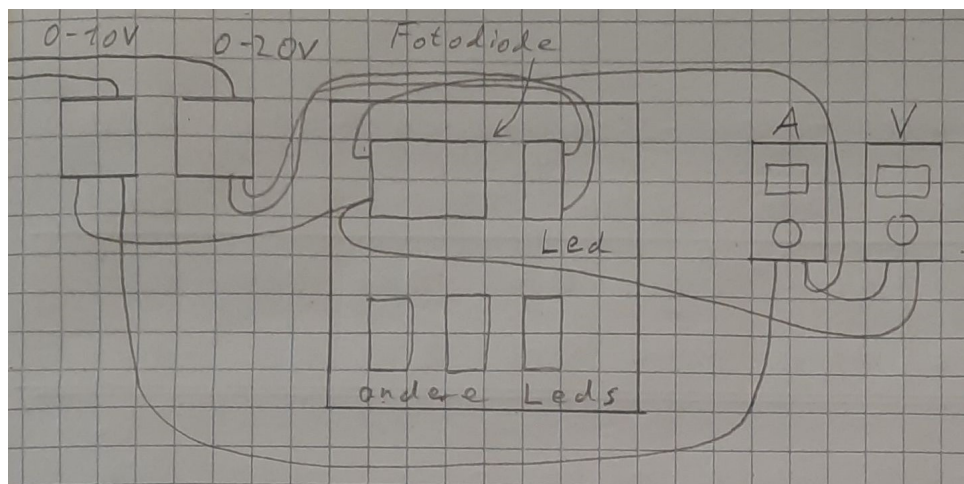


Abbildung 1: Dargestellt ist der grundlegende Versuchsaufbau. Eine unmittelbar vor der Photozelle auf dem Steckbrett platzierte Leuchtdiode ist mit dem einen Netzgerät verbunden. Das andere liefert die Gegenspannung für die Photozelle. Über dieser werden mit Multimetern stromrichtig Strom und Spannung gemessen.

Zunächst wurden drei Messreihen für eine Leuchtdiode mit einer Wellenlänge von 530 nm durchgeführt, zwischen welchen die Leuchtintensität der Diode verändert wurde. Innerhalb der Messreihen wurden Messwerte für Stromstärke und Spannung an der Photozelle bei verschiedenen Zieh- und Gegenspannungen notiert. Eine Ziehspannung liegt hierbei so an der Photozelle an, dass aus der Kathode herausgeschlagene Elektronen durch diese weiter zur Anode beschleunigt werden. Eine Gegenspannung bewirkt das Gegenteil, diese sorgt für ein Gegenfeld und bremst die Elektronen, sie wirkt dem Photoeffekt entgegen.

Das Wechseln von Zieh- zu Gegenspannung erfolgte durch Umpolen am Netzgerät, die Messwerte unterscheiden sich durch ihr Vorzeichen. Der Spannungsbereich wurde so ausgewählt, dass die Spannung ausgehend von einer Spannung von -5 V (Ziehspannung) so lange erhöht wurde, bis diese den Photoeffekt, der mittels der Stromstärke gemessen wurde, auslöschte. Aus den Messdaten können in der Auswertung Kennlinien der LED für die verschiedenen Intensitäten aufgetragen werden. Es wird untersucht, welche Auswirkung die Intensität auf den Photoeffekt hat. ✓

Daraufhin wurden Messreihen für verschiedene Leuchtdioden aufgenommen. Hierbei wurde für jede Diode eine sinnvolle konstante Intensität ausgewählt, bei welcher der Photoeffekt deutlich messbar war. Genau wie zuvor wurden Werte für Stromstärke und Spannung an der Photozelle aufgenommen, zwischen welchen die Gegen- beziehungsweise Ziehspannung variiert wurde. Aus diesen Messdaten können abermals Kennlinien aufgetragen werden. Es wird ausgewertet, welchen Einfluss die Wellenlänge des Lichts auf den Photoeffekt hat. Insbesondere werden die sogenannten Grenzspannungen und damit die Elektronenenergien bestimmt. ✓

Um die Wellenlängen der Leuchtdioden exakt zu bestimmen, wurde deren emittiertes Licht mit dem Spektrometer untersucht. Die an den daran angeschlossenen Computer übermittelten Spektren wurden mit der Mess-Software Ocean-View aufgenommen und gespeichert. Aus diesen können die zentralen Frequenzen und die zugehörigen spektralen Breiten der LEDs bestimmt werden. ✓

Durch Kombination der bis dahin erhaltenen Erkenntnisse berechnet sich aus den maximalen kinetischen Energien der Elektronen ein Wert für das Planck'sche Wirkungsquantum. Der theoretisch erwartete Zusammenhang ist hierbei durch die Einstein'sche photoelektrische Gleichung aus [1] auf Seite 5 gegeben durch

$$E_g = h \frac{c}{\lambda} - W_{\text{abl}} , \quad (1)$$

wobei W_{abl} die zum Herauslösen der Elektronen charakteristische Ablöseenergie des in der Photozelle vorliegenden Materials ist. ✓

3 Auswertung und Fehleranalyse

3.1 Kennlinien für verschiedene Intensitäten

In Versuchsteil 1 soll zunächst der Einfluss verschiedener Intensitäten auf den Photostrom I untersucht werden. Hierfür wurde eine grüne LED mit $\lambda = 530\text{ nm}$ ausgewählt und drei Messreihen für verschiedene Intensitäten, also für verschiedene Spannungen des an der Leuchtdiode angeschlossenen Netzgeräts durchgeführt. Die Intensitäten wurden hierbei durch Spannungen von 2 V , $2,5\text{ V}$ und 3 V gewählt. Für diese verschiedenen Intensitäten wurden die in der Photozelle registrierten Photoströme für verschiedene Zieh- und Gegenspannungen U mit zwei digitalen Multimetern gemessen, wobei die Spannungsmessung im 20 V Messbereich, die Stromstärkemessung dahingegen in den verschiedenen Bereichen $20\text{ }\mu\text{A}$, $200\text{ }\mu\text{A}$ und 2 mA erfolgte. Nach [2] sind die Unsicherheiten der Messwerte in diesen

Bereichen gegeben durch

$$\begin{aligned}
 \Delta U &= \pm(0,5\% + 1 \text{ digit}) && \text{für } 20 \text{ V} \\
 \Delta I &= \pm(2\% + 5 \text{ digit}) && \text{für } 20 \mu\text{A} \\
 \Delta I &= \pm(0,8\% + 1 \text{ digit}) && \text{für } 200 \mu\text{A und } 2 \text{ mA.}
 \end{aligned} \tag{2}$$

Die Messwerte für die drei verschiedenen Intensitäten sind [Abbildung 9](#) zu entnehmen. Der Versuchsaufbau wurde dabei so gewählt, dass negative Spannungen einer Ziehspannung und positive Spannungen einer Gegenspannung entsprachen. ✓

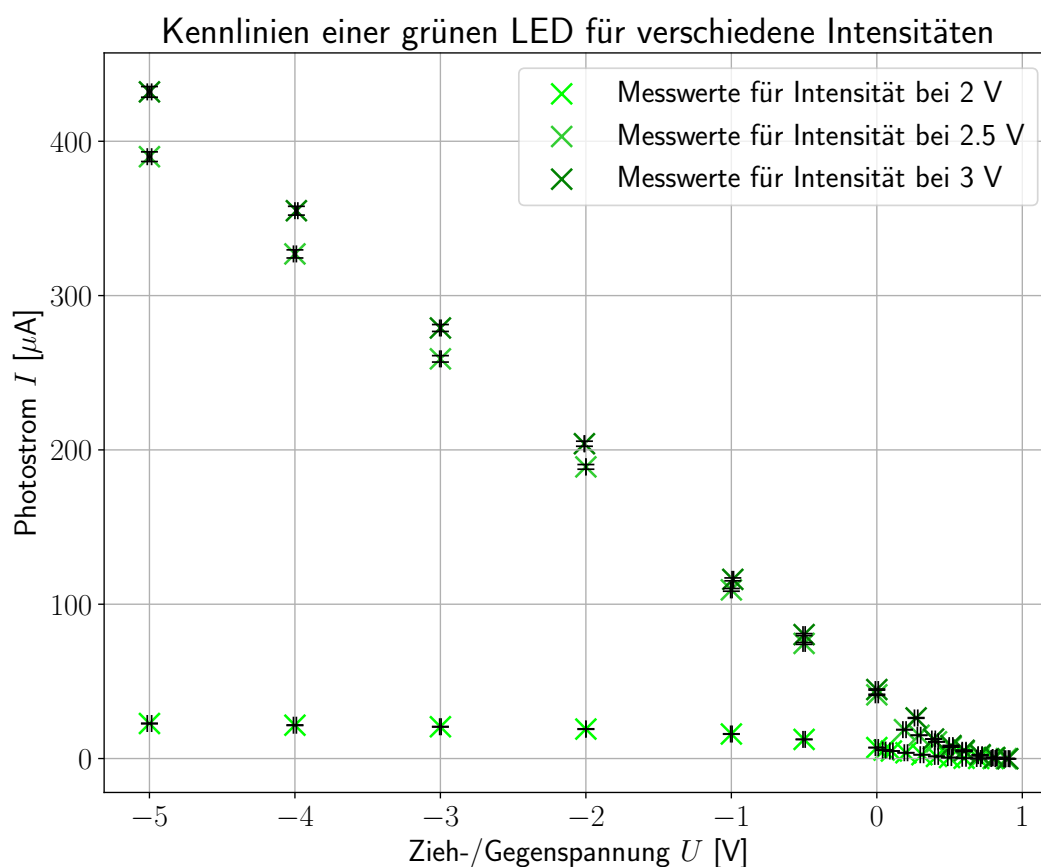


Abbildung 2: Sichtbar sind die in [Abbildung 9](#) gemessenen Photoströme I in Abhängigkeit der eingestellten Zieh- bzw. Gegenspannungen U bei einer Beleuchtung der Photozelle mit einer LED von $\lambda = 530 \text{ nm}$ sowie deren Unsicherheiten. Dabei sind die Kennlinien für drei verschiedene Intensitäten durch Anlegen einer Netzspannung von 2 V, 2,5 V und 3 V an der Leuchtdiode sichtbar. Es ist zu erkennen, dass höhere Intensitäten zu größeren Strömen führen.

In [Abbildung 2](#) sind die aus den Messwerten erhaltenen Kennlinien für die drei verschiedenen Intensitäten sowie deren Unsicherheiten sichtbar. Da für die späteren Versuchsteile zur Untersuchung der Elektronenenergie beim Photoeffekt vor allem der Verlauf des Photostroms bei Gegenspannungen relevant ist, wurden im positiven Spannungsbereich vermehrt Messwerte aufgenommen. Da die Gegenspannungen deutlich kleiner ausfallen als

der Messbereich der Ziehspannungen, wurden zur Übersichtlichkeit in [Abbildung 3](#) die Kennlinien nochmals für einen Bereich ab $-0,5\text{ V}$ dargestellt.

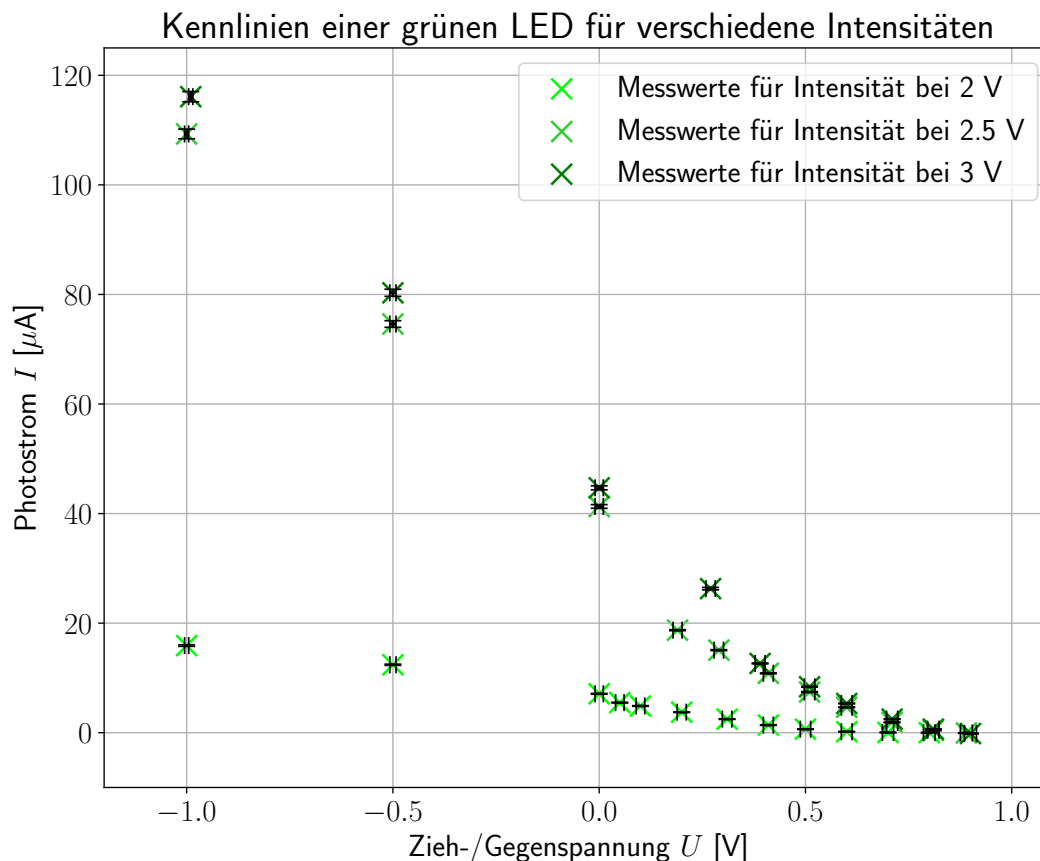


Abbildung 3: Sichtbar sind die in [Abbildung 9](#) gemessenen Fotoströme I in Abhängigkeit der eingestellten Gegenspannungen U bei einer Beleuchtung der Photozelle mit einer LED von $\lambda = 530\text{ nm}$ sowie deren Unsicherheiten. Dabei sind die Kennlinien für drei verschiedene Intensitäten durch Anlegen einer Netzspannung von 2 V , $2,5\text{ V}$ und 3 V an der Leuchtdiode hier im Bereich der, im Vergleich zu den Ziehspannungen betragsmäßig deutlich kleineren, positiven Gegenspannungen sichtbar. Es ist zu erkennen, dass die Grenzspannung, bei der kein Strom mehr registriert wird, für jede Kennlinie näherungsweise gleich, also unabhängig von der Intensität, ist.

Betrachtet man die verschiedenen Kennlinien, so ist deutlich zu erkennen, dass bei stärkerer Intensität der LED der gemessene Photostrom größer ist. Dies deckt sich mit der theoretischen Erwartung, da die Anzahl der herausgelösten Photoelektronen proportional zur Intensität zunimmt, wodurch ein größerer Strom zu erwarten ist. Insbesondere ist hier zu erkennen, dass die Kennlinie der kleinsten Intensität bei 2 V im Bereich der Ziehspannungen nur eine sehr geringe Steigung aufweist, also bei genügend großen Ziehspannungen nahezu konstant ist. Hier wird ein Sättigungsniveau erreicht, das ebenfalls theoretisch dadurch zu erklären ist, dass alle durch das Licht ausgelösten Elektronen nun die Anode erreichen und somit zum Photostrom beitragen. Bei den Kennlinien der höheren Intensitäten nimmt der Photostrom dahingegen noch näherungsweise linear zu für Ziehspannungen im Bereich

bis zu -5 V . Die gewählten Ziehspannungen sind hier also noch zu gering, um die entsprechenden Sättigungsniveaus zu erreichen, welche damit einen größeren Wert besitzen. Die höheren Sättigungsniveaus bei großen Intensitäten bestätigen nochmals die Theorie, dass bei hoher Intensität mehr Elektronen ausgelöst und damit höhere Photoströme registriert werden. ✓

Betrachtet man in [Abbildung 3](#) die Kennlinien im Bereich der Gegenspannungen genauer, so ist hier zu erkennen, dass alle Kennlinien nahezu die gleiche Nullstelle, also dieselbe Grenzspannung, bei ungefähr $0,8\text{ V}$ besitzen, unabhängig von der Intensität des Lichts. Da die Grenzspannung gerade der Spannung entspricht, die die Elektronen vollständig abbremst, sodass sie nicht mehr zur Anode gelangen, wird also hier ebenfalls die Vermutung bestätigt, dass die kinetische Energie der Elektronen beim Photoeffekt keinesfalls von der Intensität, sondern lediglich von der Wellenlänge des verwendeten Lichts abhängt. ✓

3.2 Kennlinien für verschiedene Leuchtdioden

Die Auswirkungen von Licht verschiedener Wellenlängen beim Photoeffekt wurden in Versuchsteil 2 mit Hilfe unterschiedlicher Leuchtdioden untersucht. Hierfür wurden, neben der in Versuchsteil 1 genannten LED, sieben weitere Leuchtdioden verschiedener Wellenlängen über den gesamten Bereich des sichtbaren Spektrums bis hin zu einer LED mit ultravioletter Strahlung verwendet. Die Photozelle wurde dabei mit Licht der LEDs relativ hoher Intensität durch eine an den Lampen anliegende Netzspannung im Bereich von 2 V bis 3 V bestrahlt.

Wie bereits zuvor, wurden die Photoströme I bei entsprechend eingestellten Zieh- und Gegenspannungen U mit Hilfe digitaler Multimeter gemessen, wobei ebenfalls die oben genannten Messbereich auftraten. Die Unsicherheiten der Messwerte ergeben sich daher wiederholt durch [Gleichung \(2\)](#). Die Messwerte sind [Abbildung 9](#) und [Abbildung 10](#) zu entnehmen.

In [Abbildung 4](#) sind die entsprechenden Kennlinien der LEDs verschiedener Wellenlängen sichtbar, wobei anstelle der Photoströme I deren Wurzel \sqrt{I} gegen die Zieh- bzw. Gegenspannungen U aufgetragen wurden. Negative Spannungen entsprechen hier wieder einer Ziehspannung, positive dahingegen einer Gegenspannung. Die Unsicherheiten für \sqrt{I} berechnen sich hierbei über Gauß'sche Fehlerfortpflanzung durch

$$\Delta\sqrt{I} = \frac{\Delta I}{2\sqrt{I}} \quad (3)$$

mit ΔI wie in [Gleichung \(2\)](#). Sie sind ebenfalls in [Abbildung 4](#) sichtbar. ✓

Für die Untersuchung des Photoeffekts sind auch hier wieder die Bereiche der Gegenspannungen der Kennlinien relevant zur Untersuchung der kinetischen Energien der Photoelektronen. In [Abbildung 5](#) sind daher die Messwerte mitsamt Unsicherheiten im Bereich der Gegenspannungen sichtbar.

Die Spannungen, bei denen die Kennlinien gerade ihre Nullstellen haben, also kein Photostrom mehr vorliegt, entsprechen auch hier gerade wieder den Grenzspannungen U_g , bei denen die Elektronen so stark abgebremst werden, dass sie nicht mehr an der Anode

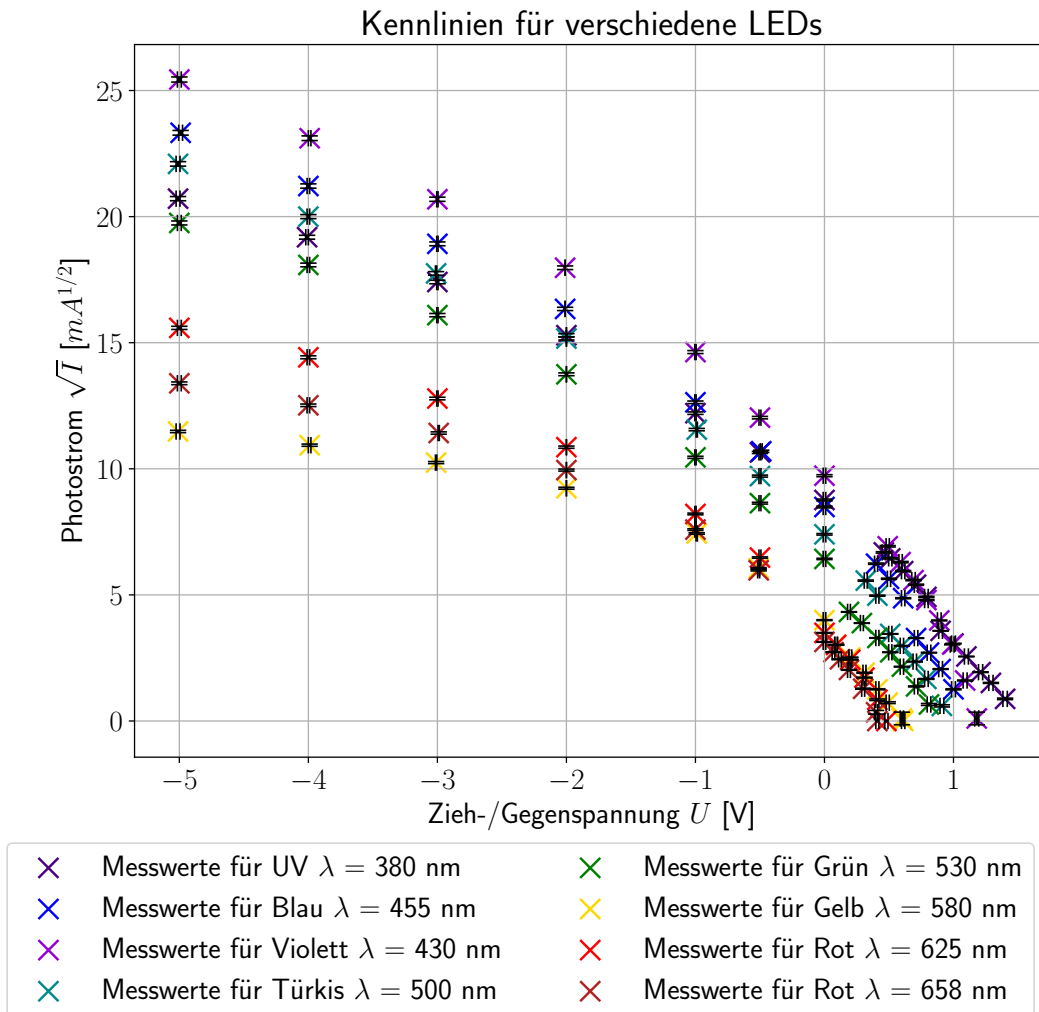


Abbildung 4: Sichtbar sind die aus [Abbildung 10](#) und [Abbildung 11](#) erhaltenen Werte \sqrt{I} der Fotoströme I in Abhängigkeit der eingestellten Gegen- und Ziehspannungen U bei einer Beleuchtung der Photozelle mit Leuchtdioden verschiedener Wellenlängen λ sowie deren Unsicherheiten. Negative Spannungen entsprechen einer Ziehspannung, positive Werte einer Gegenspannung. Es ist zu erkennen, dass die Grenzspannungen bei denen kein Fotostrom mehr gemessen wird, also die Nullstellen der Kennlinien, mit größerer Wellenlänge abnehmen.

ankommen. Die schnellsten durch das entsprechende Licht beim Photoeffekt herausgelösten Elektronen besitzen daher also gerade eine maximale kinetische Energie von

$$E_g = |eU_g| \quad (4) \quad \checkmark$$

Es ist in den Abbildungen deutlich zu erkennen, dass die Grenzspannungen von der Wellenlänge des verwendeten Lichts abhängen. Je größer die Wellenlänge ist, desto kleiner ist die Grenzspannung U_g bei der kein Fotostrom mehr gemessen werden konnte. Nach dem Ergebnis aus Versuchsteil 1 spielen die Intensitäten des unterschiedlichen Lichts hier dahingegen keine Rolle bei der Bestimmung der Grenzspannung. Die experimentellen Beobachtungen decken sich daher mit der theoretischen Erwartung, dass lediglich die

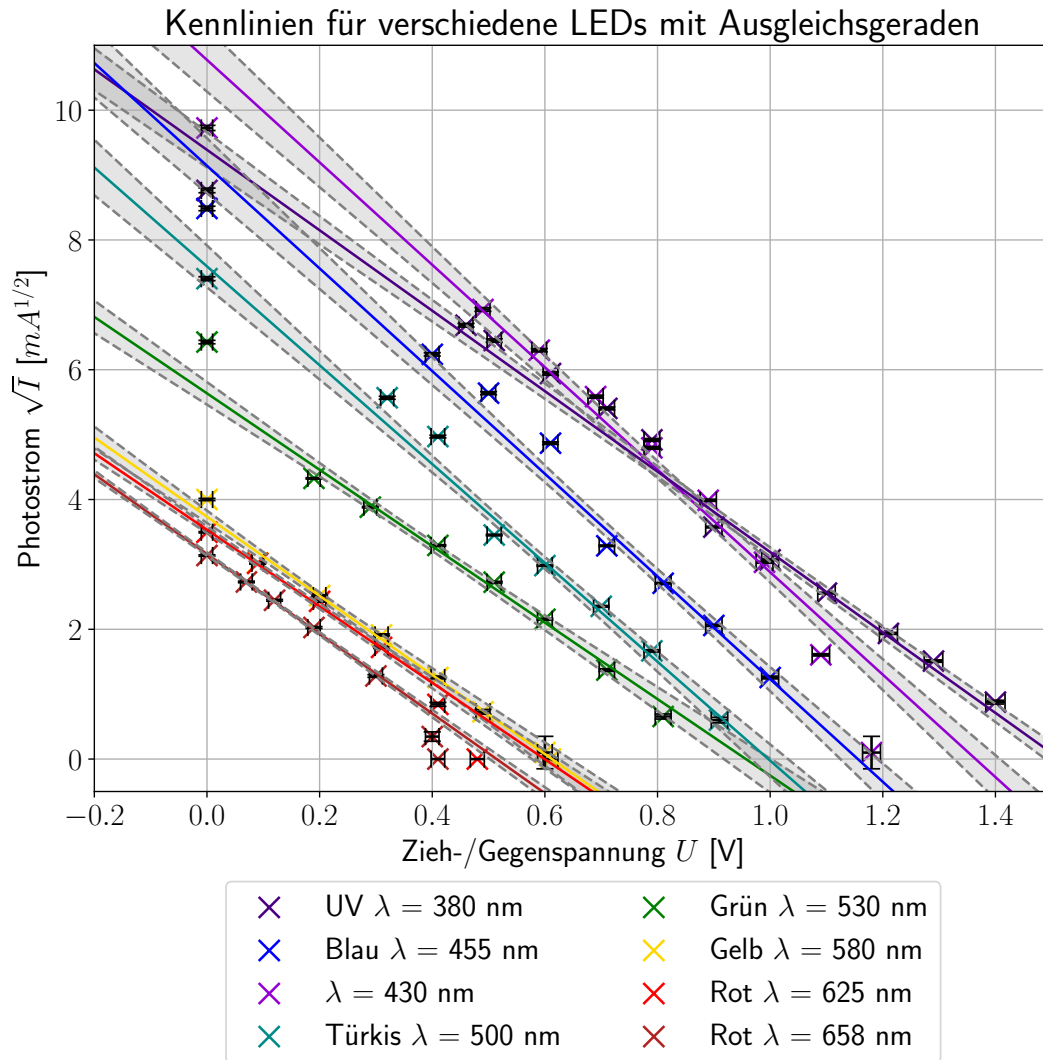


Abbildung 5: Sichtbar sind die aus [Abbildung 10](#) und [Abbildung 11](#) erhaltenen Werte \sqrt{I} der Fotoströme I in Abhängigkeit der eingestellten Gegen- und Ziehspannungen U bei einer Beleuchtung der Photozelle mit Leuchtdioden verschiedener Wellenlängen λ sowie deren Unsicherheiten im Messbereich der Gegenspannungen. Außerdem sind die für jede Kennlinie erhaltenen Ausgleichsgeraden der Form $\sqrt{I} = a + b \cdot U$ mit den in [Tabelle 1](#) gegebenen Parameterwerten mitsamt ihrer Konfidenzbänder sichtbar. Mit den Ausgleichsgeraden können nach [Gleichung \(5\)](#) die in [Tabelle 1](#) sichtbaren Grenzspannungen für die verschiedenen Wellenlängen berechnet werden.

Photonenenergie $E_{\text{ph}} = h \cdot \frac{c}{\lambda}$ und damit die Wellenlänge des Lichts eine Auswirkung auf die Energie der Photoelektronen hat, nicht aber die Intensität. In [Abbildung 4](#) ist außerdem zu erkennen, dass der Verlauf der Kennlinien bei Auftragung von \sqrt{I} für die einzelnen LEDs im Bereich der Gegenspannungen näherungsweise linear ist. Mit Hilfe der gewichteten linearen Regression, wie in [\[3\]](#) auf Seite 13 gegeben, können daher durch eine lineare Anpassung der Form $\sqrt{I} = a + b \cdot U$ die Nullstellen, also die Grenzspannungen für verschiedene Wellenlängen bestimmt werden.

In [Tabelle 1](#) sind die aus der Regression berechneten Parameter a und b für die unterschiedlichen Wellenlängen des Lichts der Leuchtdioden sichtbar. Die entsprechenden Ausgleichsgeraden mitsamt ihrer Konfidenzbänder sind ebenfalls in [Abbildung 5](#) dargestellt. Aus den Anpassungen lassen sich die verschiedenen Grenzspannungen U_g berechnen durch

$$0 \stackrel{!}{=} \sqrt{I} = a + b \cdot U_g \Leftrightarrow U_g = \frac{-a}{b} . \quad (5)$$

Die Unsicherheiten ergeben sich durch Gauß'sche Fehlerfortpflanzung über

$$\Delta U_g = \sqrt{\left(\frac{-\Delta a}{b}\right)^2 + \left(\frac{a}{b^2} \Delta b\right)^2} . \quad (6)$$

Sowohl die aus diesen Zusammenhängen erhaltenen Grenzspannungen mitsamt deren Unsicherheiten, als auch die entsprechenden maximalen kinetischen Energien E_g der Photoelektronen durch [Gleichung \(4\)](#) gegeben, sind ebenfalls in [Tabelle 1](#) sichtbar. Da die Grenzenergien in eV angegeben wurden, stimmt ihr Betrag gerade mit dem der berechneten Grenzspannungen überein. Auch hier wird die bereits in den Abbildungen gewonnene Erkenntnis, dass die maximale kinetische Energie der Photoelektronen bei zunehmender Wellenlänge geringer ist, anhand der berechneten Werte für die Energiebeträge bestätigt. ✓

$\lambda[\text{nm}]$	$a[\text{mA}^{1/2}]$	$b[\text{mA}^{1/2}\text{V}^{-1}]$	$U_g[\text{V}]$ bzw. $E_g[\text{eV}]$
380	$9,4 \pm 0,3$	$-6,2 \pm 0,3$	$1,51 \pm 0,08$
455	$9,1 \pm 0,4$	$-7,9 \pm 0,6$	$1,16 \pm 0,10$
430	$10,8 \pm 0,5$	$-7,9 \pm 0,6$	$1,36 \pm 0,11$
500	$7,6 \pm 0,3$	$-7,6 \pm 0,5$	$1,00 \pm 0,08$
530	$5,64 \pm 0,17$	$-5,9 \pm 0,4$	$0,96 \pm 0,07$
580	$3,73 \pm 0,09$	$-6,1 \pm 0,4$	$0,61 \pm 0,04$
625	$3,53 \pm 0,05$	$-5,9 \pm 0,3$	$0,60 \pm 0,03$
658	$3,16 \pm 0,02$	$-6,14 \pm 0,18$	$0,514 \pm 0,016$

Tabelle 1: Sichtbar sind die für verschiedene Wellenlängen λ der Leuchtdioden erhaltenen Parameter a und b der durch gewichtete lineare Regression berechneten Ausgleichsgeraden $\sqrt{I} = a + b \cdot U$ aus den Werten \sqrt{I} der Photoströme im Bereich der Gegenspannungen U . Aus [Gleichung \(5\)](#) lässt sich mit den Ausgleichsgeraden die Grenzspannung U_g abhängig von der Wellenlänge berechnen. Diese Grenzspannungen mitsamt der durch [Gleichung \(6\)](#) gegebenen Unsicherheiten sind ebenfalls sichtbar. Die ebenfalls genannten Grenzenergien E_g nach [Gleichung \(4\)](#) entsprechen in eV gerade betragsmäßig den Grenzspannungen.

3.3 Bestimmung der LED-Wellenlängen

Um nun die Ergebnisse für die Grenzspannungen quantitativ mit der Vorhersage vergleichen zu können, werden die Emissionsspektren der LEDs genauer untersucht. Hierfür wurde, wie im Aufbau beschrieben, jedes LED-Spektrum mit einem digitalen Spektrometer untersucht. Dieses wurde mit der Messsoftware ausgelesen und die Daten direkt exportiert. Somit ergeben sich die in [Abbildung 6](#) sichtbaren Lichtspektren der 8 verwendeten LEDs.

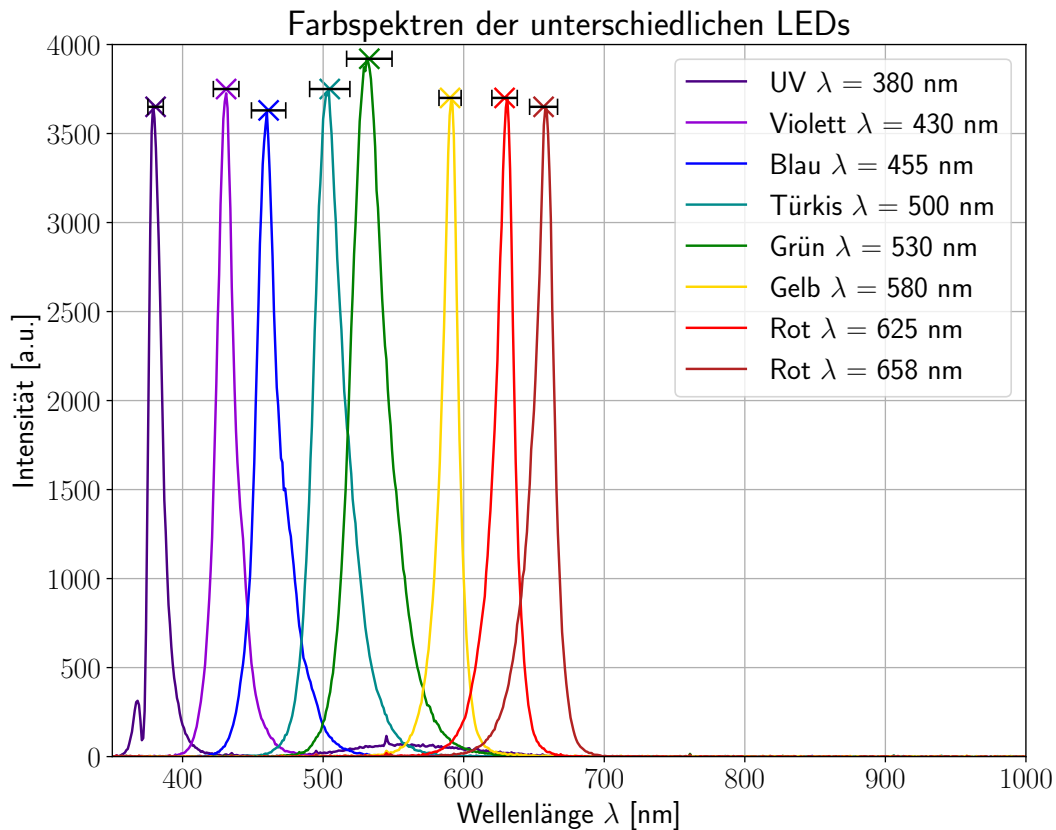


Abbildung 6: Darstellung der Spektren der 8 verwendeten LEDs. Die Intensität ist gegen die jeweilige Wellenlänge aufgetragen. In der Legende sind die Farben der LEDs zusammen mit den nominellen Wellenlängen aufgelistet. Die zentralen Wellenlängen λ_{\max} und die Unsicherheiten $\Delta\lambda_{\max}$ wurden mit Hilfe von Gauß-Anpassungen an die Messwerte ermittelt. Die zentralen Wellenlängen ergeben sich dabei aus der Position des Maximums, die spektralen Breiten aus der Halbwertsbreite der verwendeten Anpassungen. Die Messwerte mit den entsprechenden Gauß-Anpassungen sind nochmals in [Abbildung 8](#) im Anhang dargestellt. Die berechneten Werte für die Wellenlängen und spektralen Breiten sind in [Tabelle 2](#) zusammen mit den nominellen zentralen Wellenlängen aufgetragen.

Es ist deutlich zu erkennen, dass die Emissionsspektren der LEDs in den meisten Fällen recht scharf abgegrenzt sind. Die Peaks bei den zentralen Wellenlängen sind immer deutlich zu erkennen. Allerdings sieht man zum Beispiel sehr stark bei der ultravioletten LED, dass es teilweise auch Nebenpeaks gibt. Auf diese wird in der Diskussion genauer eingegangen. Um aus den Daten die zentralen Wellenlängen mit Unsicherheiten zu bestimmen, wurde an jedem Intensitätsverlauf eine Gauß-Anpassung durchgeführt, da bei den Peaks näherungsweise von Gauß-Kurven ausgegangen werden kann.

Eine Anpassung mit `scipy.optimize.curve_fit` der Form

$$I(\lambda) = a \cdot \exp\left(-\frac{(\lambda - \lambda_{\max.})^2}{2\sigma^2}\right) \quad (7)$$

ergibt die in [Abbildung 8](#) sichtbaren Verläufe. Es ist deutlich zu erkennen, dass diese bis

auf die maximale Intensität gut zu den Messwerten passen. Da die maximale Intensität hier nicht relevant ist, sondern nur die Position des Maximums sowie die Halbwertsbreite, ist dies nicht weiter relevant.

Die Bestwerte für λ_{\max} ergeben die zentralen Wellenlängen. Für die Unsicherheit $\Delta\lambda_{\max}$ wurde die Halbwertsbreite gewählt, da diese dem Frequenzbereich entspricht, der aufgrund seiner Intensität noch signifikant zum Photoeffekt beitragen kann. ✓

in [Tabelle 2](#) sind die somit erhaltenen zentralen Wellenlängen mit Unsicherheiten und die nominellen Wellenlängen der LEDs angegeben. Auch wurde für den nächsten Versuchsteil bereits die Frequenz der zentralen Wellenlänge mit ihrer Unsicherheit nach Gauß'scher Fehlerfortpflanzung aus

$$\nu_{\max} = \frac{c}{\lambda_{\max}}$$

$$\Delta\nu_{\max} = \left| \frac{c}{\lambda_{\max}^2} \Delta\lambda_{\max} \right| \quad (8)$$

berechnet.

Hierbei ist c die Lichtgeschwindigkeit nach [\[4\]](#).

Lichtfarbe	$\lambda_{\text{nom.}}$ [nm]	$\lambda_{\text{max.}}$ [nm]	$\Delta\lambda_{\text{max.}}$ [nm]	$\nu_{\text{max.}}$ [10^{14} Hz]	$\Delta\nu_{\text{max.}}$ [10^{14} Hz]
UV	380	381	6	7,87	0,11
Violett	430	431	9	6,96	0,15
Blau	455	461	12	6,50	0,17
Türkis	500	505	14	5,94	0,17
Grün	530	533	16	5,63	0,17
Gelb	580	590	8	5,08	0,07
Rot	625	629	9	4,77	0,07
Rot	658	657	10	4,56	0,07

Tabelle 2: Auflistung der zentralen Wellenlängen und Frequenzen. Diese wurden wie oben beschrieben aus Gauß-Anpassungen, bzw. nach [Gleichung \(8\)](#) ermittelt. Die Unsicherheiten ergeben sich aus den Halbwertsbreiten, bzw. einer Gauß'schen Fehlerfortpflanzung nach [Gleichung \(8\)](#). Zudem sind die nominellen Wellenlängen der LEDs aufgelistet um einen quantitativen Vergleich zu ermöglichen.

Es ist deutlich zu erkennen, dass die nominellen Wellenlängen in den meisten Fällen gut mit den ermittelten Wellenlängen übereinstimmen. Nur die Wellenlänge der gelben LED weist eine Abweichung auf, die außerhalb der $1\text{-}\sigma$ -Standardabweichung liegt. Innerhalb einer $2\text{-}\sigma$ -Standardabweichung ist diese jedoch gut mit dem nominellen Wert verträglich. ✓

3.4 Berechnung des Planck'schen Wirkungsquantums

Mit den Ergebnissen der vorangegangenen Berechnungen, kann nun der Zusammenhang zwischen den Grenzenergien aus [Tabelle 1](#) und den Frequenzen der jeweiligen LEDs aus [Tabelle 2](#) untersucht werden. Hierzu sind die Grenzenergien in [Abbildung 7](#) gegen die zugehörigen Frequenzen aufgetragen.

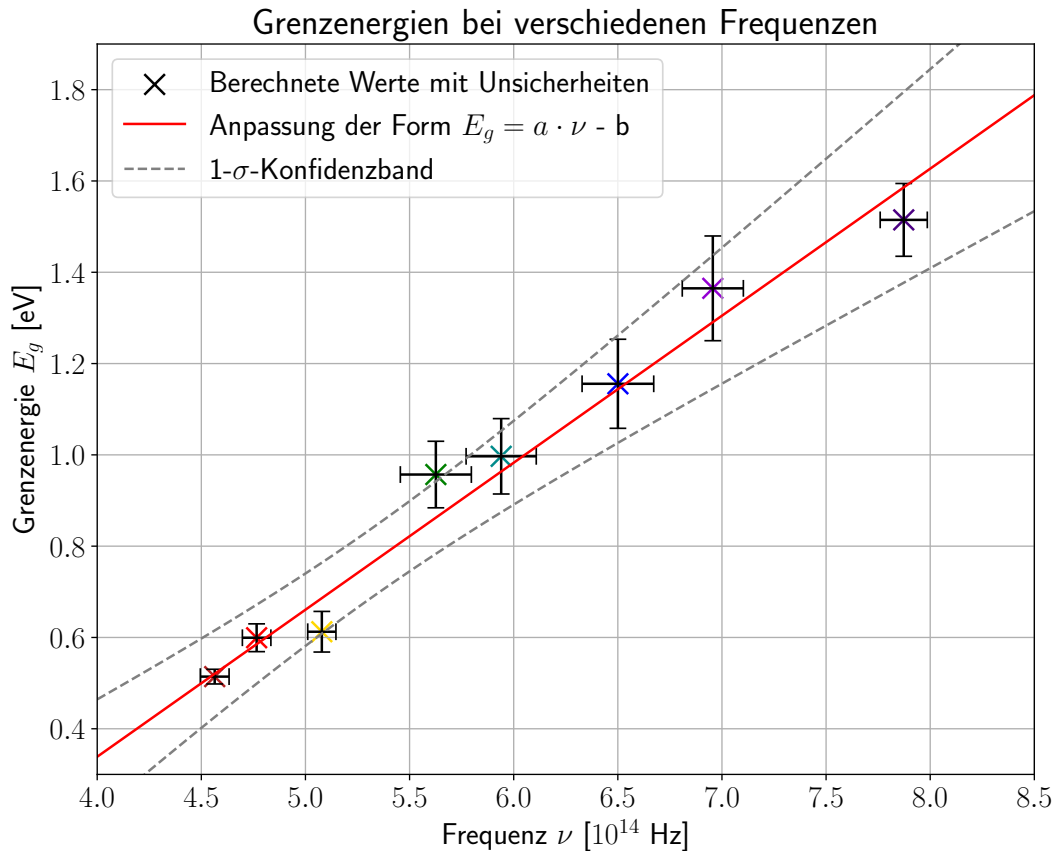


Abbildung 7: Auftragung der verschiedenen mit [Gleichung \(4\)](#) ermittelten Grenzenergien gegen die jeweiligen in [Gleichung \(8\)](#) berechneten zentralen Frequenzen der LEDs. Die dargestellte Anpassung wurde mit einer linearen Regression unter Berücksichtigung der x- und y-Unsicherheiten der Messwerte mit *scipy.odr* durchgeführt und ist in [Gleichung \(9\)](#) zu finden. Das dazugehörige $1\text{-}\sigma$ -Konfidenzband ist ebenfalls der Abbildung zu entnehmen.

Wie nach der Einstein'schen photoelektrischen Gleichung aus [Gleichung \(1\)](#) erwartet, ist ein linearer Verlauf der Werte erkennbar. Um den Zusammenhang genauer zu untersuchen, wurde eine lineare Regression unter Berücksichtigung der x- und y-Unsicherheiten durchgeführt. Dies ist hier wichtig, da die Regression nur über wenige Werte durchgeführt werden kann und die Unsicherheiten der Frequenzen und Grenzenergien stark schwanken. Die so berechnete lineare Regression ergibt sich zu

$$E_g(\nu) = a \cdot \nu - b \quad (9)$$

mit

$$a = (32 \pm 8) \cdot 10^{-16} \text{ eV s} \quad (9a)$$

$$b = (1,0 \pm 0,4) \text{ eV} . \quad (9b)$$

Man erkennt deutlich, dass die berechneten Werte mit ihren Unsicherheiten gut zu dem linearen Verlauf passen und allesamt innerhalb des $1\text{-}\sigma$ -Konfidenzbandes liegen. Dies

bescheinigt auch ein reduzierter χ^2 -Test, der $\chi^2_\nu = 1,03$ ergibt. Es gibt also nur kleinere Abweichungen vom Verlauf.

Nach der theoretischen Vorhersage entspricht die Steigung der Ausgleichsgeraden dem Planck'schen Wirkungsquantum, welches damit bestimmt werden konnte zu

$$h = a = (32 \pm 8) \cdot 10^{-16} \text{ eV s} .$$

In der Literatur ist dieses als

$$h_{\text{lit}} = 41,356\,676\,969\,2 \cdot 10^{-16} \text{ eV s}$$

angegeben (siehe [5]). Um die beiden Werte miteinander vergleichen zu können, wird ein t-Test durchgeführt, der

$$t = 1,2$$

ergibt. Da $t < 2$ ist, ist das Messergebnis also gut mit dem Literaturwert verträglich.

Der y-Achsenabschnitt entspricht nach der Theorie der Auslösearbeit der Elektronen aus der Kathode. Vergleicht man diese mit bekannten Auslösearbeiten verschiedener Metalle nach [6], kann man daher auf das Material der Kathode schließen.

Von den in [6] genannten Materialien, kämen für das Kathodenmaterial somit Bariumoxid ($W_{\text{A,BaO}} = 1,0 \text{ eV}$), Strontiumoxid ($W_{\text{A,SrO}} = 1,0 \text{ eV}$) und eventuell Cäsium ($W_{\text{A,Cs}} = 1,7 \text{ eV}$ bis $2,14 \text{ eV}$) oder Barium ($W_{\text{A,Ba}} = 1,8 \text{ eV}$ bis $2,52 \text{ eV}$) in Frage.

Da das tatsächliche Material aber nicht bekannt ist, handelt es sich hierbei allerdings nur um Vermutungen. ↳ S6 Cs ✓

4 Diskussion der Ergebnisse

4.1 Angabe und Diskussion der Endergebnisse

Im ersten Versuchsteil konnte gezeigt werden, dass die Lichtintensität keinen Einfluss auf die Grenzspannung hat. Also hängt auch die maximale kinetische Energie der Photoelektronen nicht von der Intensität ab. Wenn letztere steigt, nimmt allerdings der Photostrom zu. Für betragsmäßig große Ziehspannungen stellt sich eine Sättigung der Stromstärke ein, indem alle Photoelektronen zur Anode gezogen werden.

Im Gegensatz zur Intensität beeinflusst die Wellenlänge des Lichtes die Grenzenergie der Photoelektronen, wie Versuchsteil 2 zeigt. In [Tabelle 1](#) sind die Grenzenergien zusammen mit der Wellenlänge des Lichtes aufgelistet. Je kleiner letztere ist, desto größer ist die maximale kinetische Energie der Elektronen.

Die qualitativen Ergebnisse der ersten beiden Versuchsteile stimmen damit mit den Erwartungen überein.

Die Wellenlängen und Frequenzen der einzelnen Leuchtdioden sind in [Tabelle 2](#) zu sehen. Diese sind gut mit den angegebenen Werten verträglich. Die größte Abweichung von

der Erwartung hat die gelbe LED, welche einen t-Test von $t = 1,25$ aufweist. Diese Übereinstimmung ist wichtig, da das Ergebnis aus Teil 2 auf der Annahme basiert, dass die Leuchtdioden sinnvoll beschriftet waren.

Das Planck'sche Wirkungsquantum lässt sich zu

$$h = (32 \pm 8) \cdot 10^{-16} \text{ eV s} \qquad \frac{\Delta h}{h} = 25\%$$

angeben. Die relative Unsicherheit ist also sehr hoch. Ein t-Test mit dem Literaturwert aus [5] ergibt aufgrund der hohen relativen Unsicherheit nur einen Wert von $t = 1,2$. Der berechnete Wert ist also gut mit dem Literaturwert verträglich, sodass die Aussage der Einstein'schen photoelektrischen Gleichung hier angenommen werden kann. ✓

4.2 Diskussion der verwendeten Messmethoden

Der Messbereich des Amperemeters musste innerhalb der Messreihen verändert werden. In Bereichen, in denen zwei verschiedene Messbereiche benutzt werden konnten, änderten sich die Stromstärken beim Umschalten deutlich. Der höhere Messbereich zeigte stets eine um einiges höhere Stromstärke an als der niedrigere. Dies kann dadurch erklärt werden, dass sich hierbei der Innenwiderstand des Messgeräts änderte, was den Spannungsabfall und Stromfluss an der Photozelle beeinflusst. In den Kennlinien sind diese Knicks deutlich zu erkennen. Diese Unterschiede hatten sehr wahrscheinlich einen Einfluss auf die bestimmten Grenzspannungen und damit auf die Berechnung des Planck'schen Wirkungsquantums. ✓

Es gab eine zusätzliche Auffälligkeit an den Kennlinien. Der Stromstärkeverlauf war im Bereich der Grenzspannungen möglicherweise anders als erwartet. Es gab keinen direkten Nulldurchgang sondern vielmehr eine fast schon asymptotische Annäherung ehe kein Strom mehr floss. Zusätzlich ist auffallend, dass der Strom für hohe Gegenspannungen nicht nur irgendwann null, sondern sogar leicht negativ wurde. Ein negativer Strom durch die Photozelle sollte aber bei diesen Spannungen garnicht möglich sein, da eine ausreichend große Gegenspannung lediglich dazu führt, dass keine Elektronen mehr zur Anode gelangen, es sollte also gar kein Stromfluss mehr vorliegen. Da stromrichtig gemessen wurde, kann auch die Messung des Fehlstroms über das Spannungsmessgerät ausgeschlossen werden. Möglicherweise gab es also einen Fehlstrom über die Photozelle. Eine andere Erklärung wäre, dass die Strommessung für diese kleinen Ströme nicht exakt genug gewesen sein könnte. Dann wäre es vielleicht sinnvoller, die Nullstelle aus den Messpunkten mit größerer Stromstärke zu extrapolieren. ✓

Nach dem Umpolen von Zieh- auf Gegenspannung war es nicht möglich, eine Spannung von 0 V einzustellen. Auch wenn der Drehknopf auf Anschlag gestellt wurde, wurde eine kleine Spannung gemessen. Auffällig ist auch, dass diese größer war, je kleiner die verwendete Wellenlänge der Leuchtdiode wurde. Für diese minimalen Gegenspannungen wurde je ein Messpunkt aufgenommen, der erläuterte Zusammenhang ist also auch in den Kennlinien gut zu sehen. Was die Ursache hierfür sein könnte und inwiefern dadurch die Messung beeinflusst wurde, konnte nicht genauer geklärt werden. ok

Die Spektren der Leuchtdioden wurden mit Einzelmessungen aufgenommen. Hierbei

könnten statistische Schwankungen hoch gewesen sein, auch das Sonnenlicht könnte einen Einfluss auf die aufgenommenen Spektren gehabt haben. Außerdem ist nicht auszuschließen, dass das Spektrometer falsch kalibriert war, was zu einer systematischen Unsicherheit führte, die leicht hätte überprüft werden können. Die Nebenmaxima einzelner Spektren könnten die Bestimmung der Wellenlängen und damit die der Frequenzen verfälscht haben. Zum einen änderte sich dadurch die Unsicherheit der Wellenlänge durch die Gauß-Anpassung. Zum anderen ist unklar, inwiefern beispielsweise das Nebenmaximum im UV-Spektrum, das eine noch geringere Wellenlänge als das Hauptmaximum aufweist, die Grenzenergien der Photoelektronen zusätzlich erhöhte. ✓

Es gab weitere kleine Fehlerursachen, die hier nur kurz Erwähnung finden. Zum einen beeinflusste Umgebungslicht die Messungen in geringem Maße. Dieser Einfluss ist aber dadurch gering, dass die Leuchtdioden unmittelbar vor der Photodiode platziert wurden. Außerdem beeinflussen die Eigenwiderstände der Kabel und des Steckbretts die Messung, weil an diesen auch Spannung abfällt. Deren Einfluss wird allerdings im Rahmen der Unsicherheiten als vernachlässigbar eingeschätzt. ✓

4.3 Verbesserte Messmethoden

Optimal wäre es, alle Messungen im selben Messbereich durchzuführen, um eine einheitliche Kennlinie zu erhalten. Für die Spannungsmessung war dies möglich, bei der Messung der Stromstärke funktionierte das allerdings bei den verwendeten Stromstärken nicht, da die Ströme sich über mehrere Größenordnungen hinweg änderten. Vielleicht gibt es hierfür geeignetere Messgeräte. ✓

Um statistische Unsicherheiten zu verringern wäre es sinnvoll, die Spektren der Leuchtdioden als Messreihen aufzunehmen. In Versuch 78 wurde hierfür beispielsweise über 100 Spektren gemittelt. Dagegen spricht aber, dass die Spektren sehr empfindlich auf die Ausrichtung des Spektrometers reagierten. Schon leichtes Zittern veränderte die gemessene Intensität immens. Ein weiterer Verbesserungsvorschlag wäre also, das Spektrometer in einer Art Vorrichtung zu platzieren anstatt es von Hand zu halten. Zusätzlich könnte der Raum für die Messung abgedunkelt oder ein Karton oder ähnliches über den Messaufbau gestülpt werden, um den Einfluss des Umgebungslichts zu minimieren. Um einen systematischen Fehler zu vermeiden, könnte das Spektrometer vor der Messung einfach mit Sonnenlicht kalibriert werden. Das Sonnenlicht weist ein charakteristisches Emissionsspektrum auf. Die gemessenen Wellenlängen könnten mit den Literaturwerten für die sogenannten Fraunhoferlinien verglichen werden.

Ein Abdunkeln des Raums wäre für alle Messungen sinnvoll gewesen, um den Einfluss des Sonnenlichts auf den Photoeffekt zu vermeiden. Noch besser wäre auch hier ein lokales Abdunkeln der Leuchtdiode und der Photozelle, damit die Praktikumsgruppe uneingeschränkt im Raum agieren kann. ✓

A Anhang

Abbildungsverzeichnis

1	Versuchsaufbau	2
2	Kennlinien für verschiedene Intensitäten bei einer LED mit $\lambda = 530 \text{ nm}$. .	4
3	Kennlinien für verschiedene Intensitäten bei einer LED mit $\lambda = 530 \text{ nm}$ im Bereich der Gegenspannungen	5
4	Kennlinien für verschiedene Leuchtdioden	7
5	Kennlinien für verschiedene Leuchtdioden mit Ausgleichsgeraden	8
6	Darstellung LED-Spektren	10
7	Grenzenergien der verschiedenen Frequenzen	12
8	Darstellung LED-Spektren mit Gauss-Anpassungen	18
9	Messprotokoll Seite 1	19
10	Messprotokoll Seite 2	20
11	Messprotokoll Seite 3	21

Tabellenverzeichnis

1	Grenzspannungen und -energien für verschiedene LEDs	9
2	Zentrale Wellenlängen und Frequenzen	11

Literaturverzeichnis

- [1] *Physiklabor für Anfänger*innen Teil 2, Anleitung Versuch 81, Photoeffekt* (Physikalisches Institut, Fakultät für Mathematik und Physik, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2022, 31. März 2022).
- [2] *Uni-T UT51 Bedienungsanleitung* (UNI-TREND TECHNOLOGY (DONG GUAN) LIMITED, 2022, 1. Apr. 2022), <https://omnibus.uni-freiburg.de/~phypra/ap/44/Uni-T%20UT51%20operating%20Manual.pdf>.
- [3] *Physiklabor für Anfänger*innen Teil 2, Datenanalyse B* (Physikalisches Institut, Fakultät für Mathematik und Physik, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2022, 7. März 2022).
- [4] *Lichtgeschwindigkeit* (Wikipedia, 3. Apr. 2022), <https://de.wikipedia.org/wiki/Lichtgeschwindigkeit>.
- [5] *Plancksches Wirkungsquantum* (Wikipedia, 2. Apr. 2022), https://de.wikipedia.org/wiki/Plancksches_Wirkungsquantum.
- [6] *Austrittsarbeit* (Wikipedia, 2. Apr. 2022), <https://de.wikipedia.org/wiki/Austrittsarbeit>.
- [7] *Physiklabor für Anfänger*innen Teil 2, Aufbau Versuch 81* (Physikalisches Institut, Fakultät für Mathematik und Physik, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2022, 31. März 2022), <https://omnibus.uni-freiburg.de/~phypra/ap/81/>.
- [8] *Physiklabor für Anfänger*innen Teil 2, Datenanalyse A* (Physikalisches Institut, Fakultät für Mathematik und Physik, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2022, 7. März 2022).

A.1 Farbspektren mit Gauß-Anpassungen

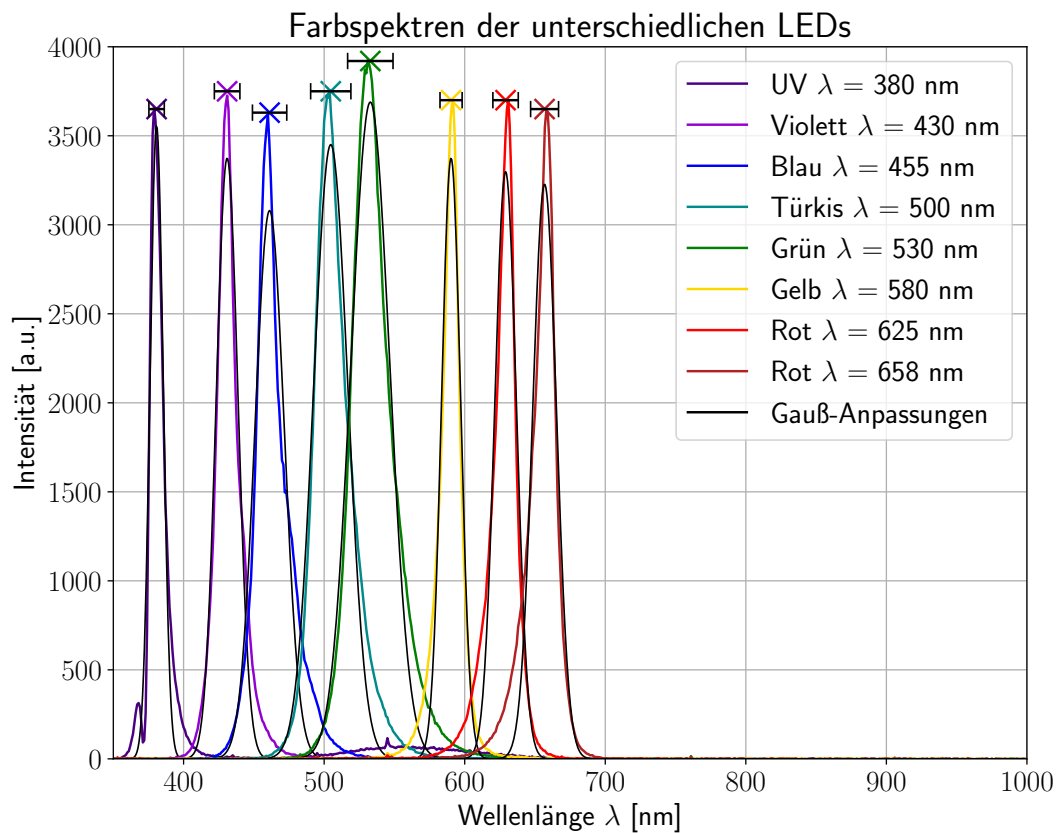


Abbildung 8: Darstellung der Spektren der 8 verwendeten LEDs. Die Intensität ist gegen die jeweilige Wellenlänge aufgetragen. In der Legende sind die Farben der LEDs zusammen mit den nominellen Wellenlängen aufgelistet. Die zentralen Wellenlängen λ_{\max} und die Unsicherheiten $\Delta\lambda_{\max}$ wurden mit Hilfe von Gauß-Anpassungen an die Messwerte ermittelt, welche hier ebenfalls sichtbar sind. Die zentralen Wellenlängen ergeben sich dabei aus der Position des Maximums, die spektralen Breiten aus der Halbwertsbreite der verwendeten Anpassungen. Die berechneten Werte für die Wellenlängen und spektralen Breiten sind in [Tabelle 2](#) zusammen mit den nominellen zentralen Wellenlängen aufgetragen.

A.2 Messprotokoll

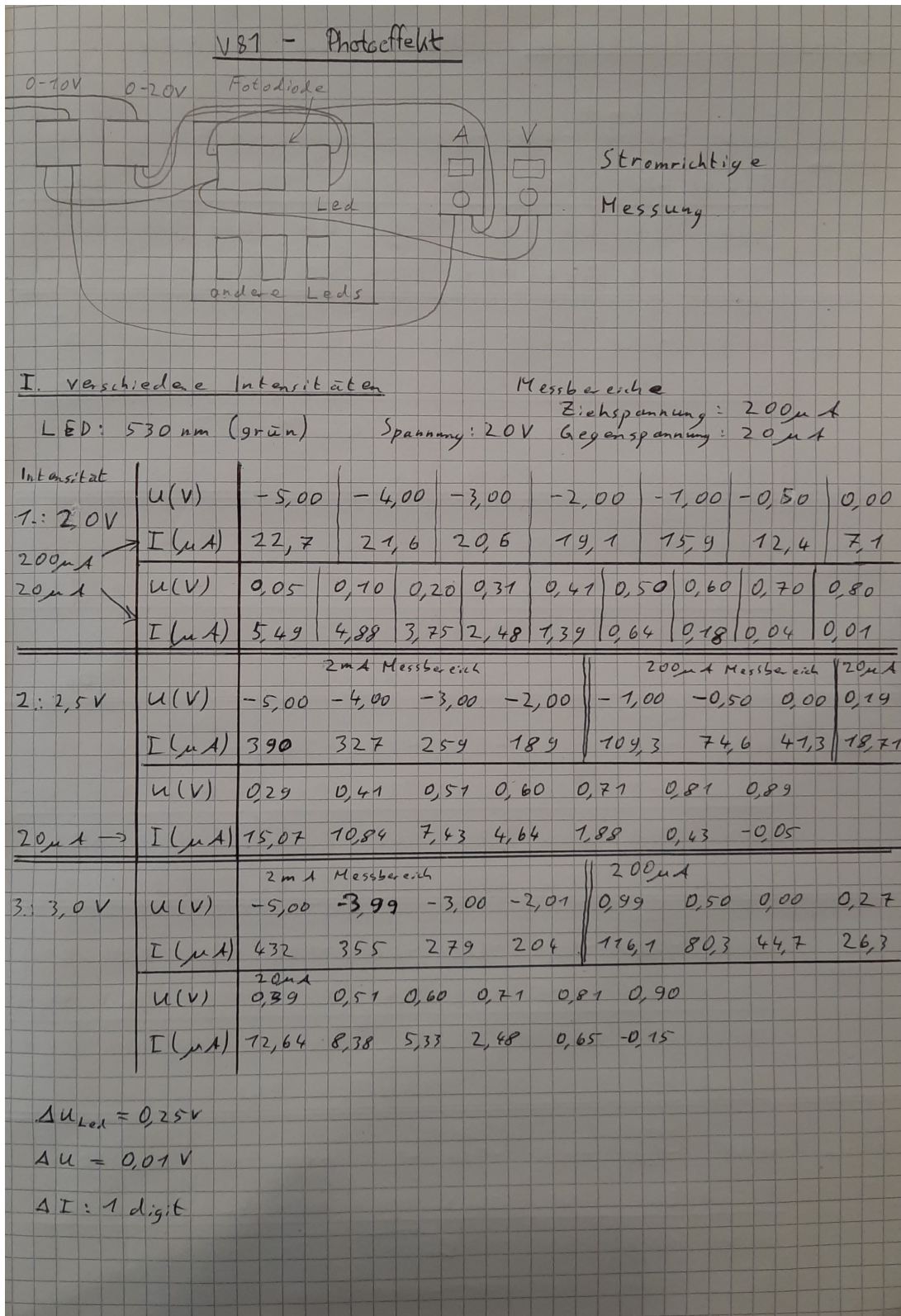


Abbildung 9: Messprotokoll Seite 1

II. verschiedene Leuchtdioden (Grün siehe I.) 3,0 V

LED		2 mA				200 μ A			
Türkis 500nm	U (V)	-5,01	-4,00	-3,01	-2,00	-0,99	-0,50	0,00	
	I (μ A)	488	400	315	230	133,5	94,3	54,8	
	U (V)	0,32	0,41	0,51	0,60	0,70	0,79	0,91	1,00
	I (μ A)	31,0	24,7	11,92	8,89	5,54	2,78	0,36	-0,49
Rot 658nm	U (V)	200 μ A				20 μ A			
	I (μ A)	-5,00	-4,00	-2,99	-2,00	-1,00	-0,51	0,00	
	I (μ A)	179,3	156,7	130,4	99,0	57,6	35,7	9,84	
	I (μ A)	0,07	0,12	0,19	0,30	0,40	0,49	0,41	
I (μ A)	7,45	5,99	4,11	3,64	0,12	-0,31	0,00		
Gelb 580nm	U (V)	200 μ A				20 μ A			
	I (μ A)	-5,01	-3,99	-3,01	-2,00	-0,99	-0,51	0,00	0,09
	I (μ A)	131,8	119,6	105,0	85,2	55,3	36,7	16,0	9,15
	I (μ A)	0,20	0,31	0,47	0,49	0,60	0,61	0,69	
I (μ A)	6,35	3,66	1,58	0,53	0,01	-0,00	-0,06		
violett 430nm 430nm	U (V)	2 mA				200 μ A			
	I (μ A)	-5,00	-3,99	-3,00	-2,01	-1,00	-0,50	0,00	0,49
	I (μ A)	647	534	428	323	214	144,7	94,6	48,0
	I (μ A)	0,59	0,69	0,79	0,89	0,99	1,09	1,18	1,23
I (μ A)	39,7	37,2	23,0	15,9	9,2	2,58	0,01	-1,17	
UV 380nm	U (V)	2 mA				200 μ A			
	I (μ A)	-5,01	-4,01	-3,00	-2,00	-1,00	-0,50	0,00	0,46
	I (μ A)	429	368	303	234	149,0	113,4	76,8	44,7
	I (μ A)	0,51	0,61	0,71	0,79	0,90	1,00	1,10	1,21
I (μ A)	41,6	35,3	29,2	24,2	12,78	9,43	6,54	3,75	
Rot 625nm	U (V)	2 mA				200 μ A			
	I (μ A)	-5,00	-4,00	-3,00	-2,00	-1,00	-0,50	0,00	0,09
	I (μ A)	243	208	163,5	113,9	67,4	42,0	12,22	9,10
	I (μ A)	0,20	0,31	0,41	0,51	0,48			
I (μ A)	5,91	2,96	0,71	-0,17	0,00				

Abbildung 10: Messprotokoll Seite 2

Blau 455nm	U (V)	2mA				200µA			
	I (µA)	544	450	358	267	159,7	114,4	72,0	38,9
	U (V)	0,50	0,61	0,71	0,81	0,90	1,00	1,10	1,08
	I (µA)	37,8	23,7	10,80	7,34	4,24	1,58	-0,21	-0,01

31.03.22 VT Boemba

Abbildung 11: Messprotokoll Seite 3