

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Ziel des Versuchs</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Versuchsaufbau</b>	<b>1</b>
<b>3</b>	<b>Versuchsdurchführung</b>	<b>1</b>
<b>4</b>	<b>Auswertung</b>	<b>3</b>
4.1	Kennlinien für verschiedene Intensitäten . . . . .	3
4.2	Kennlinien für verschiedene Leuchtdioden . . . . .	3
4.3	Emissionsspektren der verschiedenen Leuchtdioden . . . . .	7
4.4	Bestimmung des Planckschen Wirkungsquantum . . . . .	9
<b>5</b>	<b>Diskussion</b>	<b>10</b>
5.1	V Versuchsergebnisse . . . . .	10
5.1.1	Kennlinien für verschiedene Intensitäten . . . . .	10
5.1.2	Kennlinien für verschiedene Leuchtdioden . . . . .	10
5.1.3	Emissionsspektren der verschiedenen Leuchtdioden . . . . .	10
5.1.4	Bestimmung des Planckschen Wirkungsquantum . . . . .	11
5.2	Diskussion der Messmethoden und Verbesserungsvorschläge . . . . .	12
<b>A</b>	<b>Anhang</b>	<b>13</b>
A.1	Abbildungen . . . . .	13
A.2	Rohdaten . . . . .	14

# 1 Ziel des Versuchs

In diesem Versuch sollte das Plancksche Wirkungsquantum experimentell bestimmt werden. Dafür wurde der Photostrom von Leuchtdioden verschiedener Wellenlängen bei ähnlicher Intensität gemessen und die Grenzspannungen bestimmt. Mit einem Spektrometer wurden die zentralen Frequenzen der Leuchtdioden bestimmt und daraus und aus den Grenzspannungen wurde das Plancksche Wirkungsquantum bestimmt.

# 2 Versuchsaufbau

Es gab zwei Netzgeräte, zwei Digitalmultimeter, eine Photozelle, ein Steckbrett, und ein USB-Spektrometer mit Lichtleiter und Laptop. Das Netzgerät für die Gegenspannung konnte in einem Bereich von 0 V bis 10 V eingestellt werden, das für die Leuchtdioden in einem Bereich von 0 V bis 20 V. Zudem waren Leuchtdioden verschiedener Wellenlängen vorhanden.

# 3 Versuchsdurchführung

Auf dem Steckbrett wurde die Photozelle mit den Digitalmultimetern (Uni-T UT51), von denen eines als Amperemeter und eines als Voltmeter verwendet wurde, in einer stromrichtigen Schaltung mit dem Netzgerät für die Gegenspannung aufgebaut. Der Schaltplan ist in Abb. 1 zu sehen.

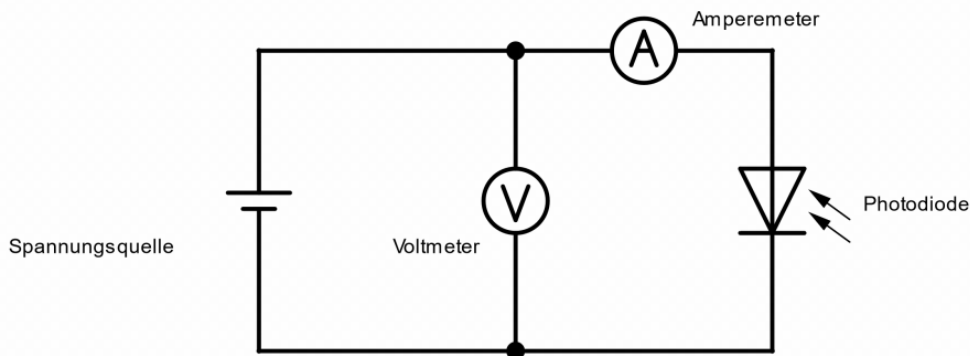


Abbildung 1: Schaltplan der stromrichtigen Schaltung Versuchsaufbaus. Am Netzgerät liegt eine Gleichspannung an. Die Photozelle wurde mit Licht verschiedener Wellenlängen und Intensitäten bestrahlt, und der Strom  $I$  mit einem Amperemeter und die Spannung  $U$  mit einem Voltmeter gemessen.

Eine stromrichtige Schaltung wurde gewählt, da unter Anderem der Stromfluss in Bereichen um ca. 0 A gemessen werden sollte. Bei solch geringen Stromflüssen hat aber die Photozelle einen vergleichsweise hohen Widerstand, der sich dann eventuell nicht mehr stark vom Widerstand des Voltmeters unterscheidet. Bei einer spannungsrichtigen Schaltung würden dann nicht zu vernachlässigende Ströme, die durch das Voltmeter fließen, auf die Strommessung Einfluss nehmen. Der Spannungsabfall am Amperemeter, der bei einer stromrichtigen Schaltung die Spannungsmessung verfälscht, ist in diesem Fall aber durch den im Vergleich zur Photozelle geringen Innenwiderstand des Amperemeters vernachlässigbar klein. Um also die systematischen Fehler auf die Strom- und Spannungsmessung zu minimieren, wurde hier eine stromrichtige Schaltung gewählt.

Anschließend wurde eine Leuchtdiode mit einer angegebenen Wellenlänge von 590 nm auf dem Steckbrett befestigt und an das Netzgeräte für die Leuchtdioden angeschlossen. Die Leuchtdiode wurde dabei so plziert, dass das Licht der Diode direkt in die Photozelle einfallen konnte.

Dann wurde die Spannung an der Diode so erhöht, dass gerade so ein Leuchten zu erkennen war. An der Photozelle wurde die Spannung auf den Maximalwert (ca. 10 V) gestellt und die am Voltmeter

angezeigte Spannung und der am Amperemeter angezeigte Strom notiert. Schritt für Schritt wurde die Spannung am Netzgerät verringert, und dabei Spannung und Strom aufgeschrieben. Bei einer Spannung von 0 V an der Photozelle wurde die Spannung umgepolt, und das Vorgehen von oben bis zum Erreichen einer Spannung von  $-10\text{ V}$  fortgeführt. Während der Messung wurde darauf geachtet, in den Bereichen, in denen eine starke Veränderung des Stroms zu beobachten war, möglichst viele Messwerte aufzunehmen.

Danach wurde die Spannung an der Leuchtdiode erhöht und dieselben Messungen für zwei verschiedene Einstellung der Leuchtdiodenintensität wiederholt.

Anschließend wurden Dioden der Wellenlängen 400 nm, 420 nm, 455 nm, 470 nm, 530 nm und 660 nm anstelle der bis jetzt verwendeten Diode nacheinander so plaziert, dass die Photozelle von den Dioden direkt beleuchtet wurde. Danach wurde für jede Diode der Messvorgang von oben wiederholt. Eine kurze Zwischenauswertung ergab für die Mittlere der untersuchten Intensitäten einen im Bereich der einstellbaren Photozellenspannungen gut erkennbaren Verlauf. Deswegen wurde die Dioden der verschiedenen Wellenlängen auf ungefähr die mittlere Intensität eingestellt. Dies wurde grob überprüft, indem vor Beginn der Messung die Spannung auf den Bereich gestellt wurde, in dem der Maximalwert für den Photozellenstrom erwartet wurde, und dann die Spannung an der Diode so angepasst, bis ein Wert von ca.  $80\text{ }\mu\text{A}$  erreicht wurde.

Anschließend wurden die Emissionsspektren der verwendeten Leuchtdioden gemessen. Dafür wurden die Dioden auf einem Steckbrett befestigt und mit einer Spannungsquelle verbunden. Das eine Ende des Lichtleiters wurde in Richtung der leuchtenden Diode gehalten, das andere Ende war mit dem USB-Spektrometer verbunden, das wiederum mit einem Laptop verbunden war. Es wurde darauf geachtet, dass das gesamte Spektrum sichtbar war. Dann wurden zu jeder Leuchtdiode mit dem *Ocean View* Programm auf dem Laptop 100 Spektren aufgenommen und auf einem USB-Stick gespeichert.

## 4 Auswertung

### 4.1 Kennlinien für verschiedene Intensitäten

Durch die Bestrahlung der Photozelle mit Licht der Frequenz  $\nu$  aus der Leuchtdiode werden aus der Kathode der Photozelle Elektronen gelöst. Wenn die herausgelösten Elektronen die Anode erreichen, fließt ein Strom  $I$ , der vom Amperemeter gemessen wird. Die Anzahl der Elektronen, die herausgelöst werden, hängt bei gleicher Frequenz  $\nu$  nur von der Intensität des einstrahlenden Lichts (also der Zahl der auftreffenden Photonen) ab. Durch Anlegen einer Gegen- bzw. Ziehspannung  $U$  können die Elektronen beschleunigt bzw. abgebremst werden. Bei einer Gegenspannung können nur die Elektronen die Anode erreichen, die nach dem Herauslösen aus der Kathode eine ausreichende kinetische Energie haben. Ab einem gewissen Wert der Gegenspannung kann also kein Elektron mehr die Anode erreichen, und es wird kein Strom mehr gemessen. Bei einer Ziehspannung werden die Elektronen in Richtung der Anode beschleunigt, es kommen also mehr der herausgelösten Elektronen an, als wenn keine Spannung anliegt. Wenn allerdings die Ziehspannung so hoch ist, dass alle herausgelösten Elektronen die Anode erreichen, kann der gemessene Strom trotz weiterem Erhöhen der Spannung nicht mehr ansteigen. Bei Auftragung von  $I$  gegen  $U$  erwartet man also im Bereich der Grenzspannung, an der die Gegenspannung gerade so groß ist, dass kein Strom mehr fließt, bei abnehmender Gegenspannung einen zunehmenden messbaren Photostrom  $I$ , der sich in diesem Bereich ungefähr linear mit der Spannung ansteigt. Da die Anzahl der herausgelösten Elektronen begrenzt ist, wird für steigende Ziehspannung eine Abflachung des Stroms erwartet. Für sehr hohe Ziehspannung erwartet man dann, dass der Strom sich einem konstanten Wert annähert, der für hohe Intensitäten hoch und für niedrige Intensitäten niedrig ist.

Für eine Diode, deren Wellenlänge mit 590 nm angegeben war, wurden Messreihen der angelegten Spannung  $U$  und des Photostroms  $I$  bei niedriger, mittlerer und hoher Intensität durchgeführt.

Die erhaltenen Werte sind in Abb. 2 dargestellt. Da die Werte beim Ablesen von den Multimetern nicht geschwankt haben, wurden beim Messen keine Unsicherheiten notiert. Die Fehler auf die Messwerte von  $U$  und  $I$  wurden dann aus den in den Herstellerangaben der Multimeter [2] einetragenen internen Unsicherheiten der Multimeter berechnet.

Da die Intensitäten sehr unterschiedlich waren, bewegen sich die Kennlinien in sehr unterschiedlichen Bereichen. Um auch die Kennlinie der geringsten Intensität sichtbar zu machen, wurde diese noch einmal einzeln geplottet. Die Kennlinie ist in Abb. 3 zu sehen.

### 4.2 Kennlinien für verschiedene Leuchtdioden

Im zweiten Versuchsteil wurden für sechs unterschiedliche LEDs mit verschiedenen nominellen Wellenlängen  $\lambda_{\text{nom}}$  die Spannung  $U$  und der Photostrom  $I$  gemessen. Für alle Dioden wurde die Intensität so eingestellt, dass die maximale Photostromstärke bei ungefähr 85  $\mu\text{A}$  lag. Die  $\sqrt{I} - U$  Verläufe der Messdaten sind in Abb. 4 aufgetragen. Es wurde  $\sqrt{I}$  anstatt von  $I$  gegen  $U$  aufgetragen, da hierbei die Verläufe in der Nähe der Grenzfrequenzen deutlich linearer wurden und besser zu erkennen waren. Die Fehler auf die Messwerte wurden hierbei aus den Herstellerangaben der Multimeter [2] berechnet. Die Fehler auf  $\sqrt{I}$  wurden dabei mit Gaußscher Fehlerfortpflanzung mit

$$s_{\sqrt{I}} = \frac{s_I}{2\sqrt{I}}$$

berechnet. Zusätzlich zu den sechs vermessenen Dioden wurde der Verlauf mit mittlerer Intensität aus der Diode Versuchsteil 1 mit einer nominellen Wellenlänge von 590 nm verwendet.

Um die Grenzspannungen zu bestimmen, wurde für jede einzelne Diode eine gewichtete Regression der Form

$$I = m \cdot U + c \tag{1}$$

durch die annähernd linearen Werte, die im Bereich oberhalb der Grenzspannung lagen, durchgeführt. Die aus den Regressionen erhaltenen Parameter sind in für jede Diode Tabelle 1 eingetragen.

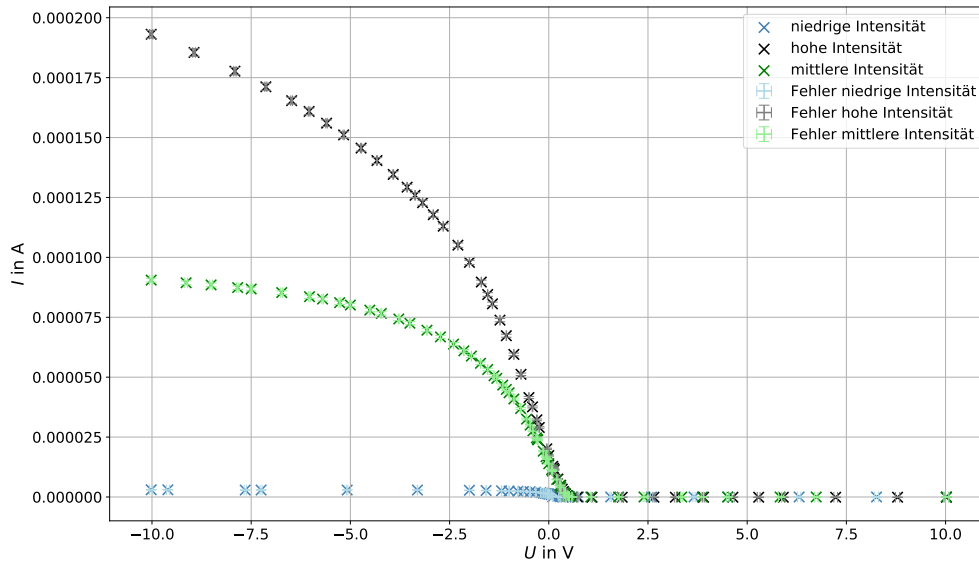


Abbildung 2: Auftragung des gemessenen Stroms  $I$  gegen die Spannung  $U$  für drei verschiedene Intensitäten der Leuchtdiode mit einer angegebenen Wellenlänge von 590 nm. Die aus den internen Messfehlern der Multimeter [2] berechneten Unsicherheiten auf die Werte sind auch mit eingetragen. Allerdings sind die Fehlerbalken so klein, dass sie kaum erkennbar sind. Da die Kennlinie der kleinsten Intensitäten kaum zu erkennen ist, ist sie noch einmal in Abb. 3 zu sehen.

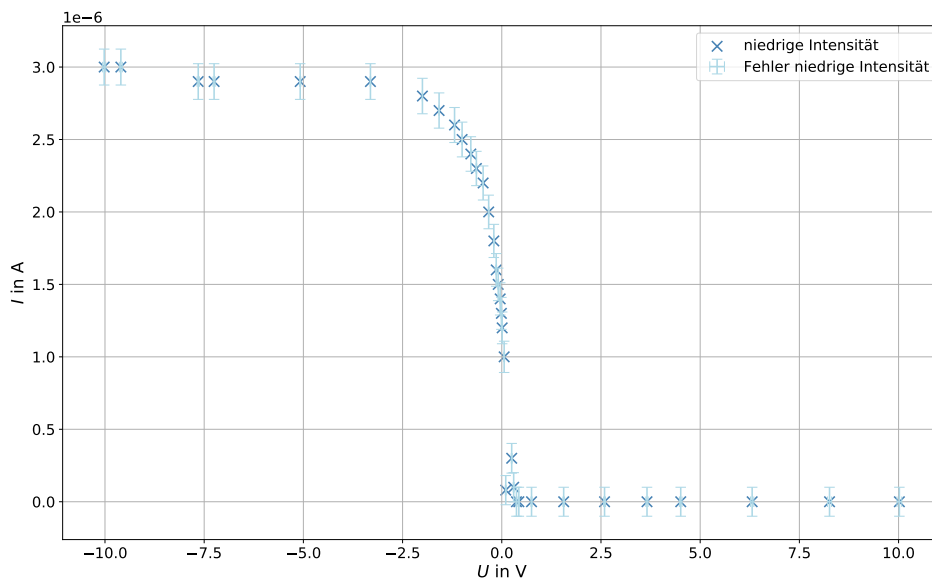


Abbildung 3: Auftragung des gemessenen Stroms  $I$  gegen die Spannung  $U$  für die kleinste der drei verschiedenen Intensitäten der Leuchtdiode mit einer angegebenen Wellenlänge von 590 nm. Die aus den internen Messfehlern der Multimeter [2] berechneten Unsicherheiten auf die Werte sind auch mit eingetragen. Allerdings sind die Fehlerbalken teilweise so klein, dass sie kaum erkennbar sind. Ein Diagramm mit den Kennlinien für alle Intensitäten ist in Abb. 2 zu sehen.

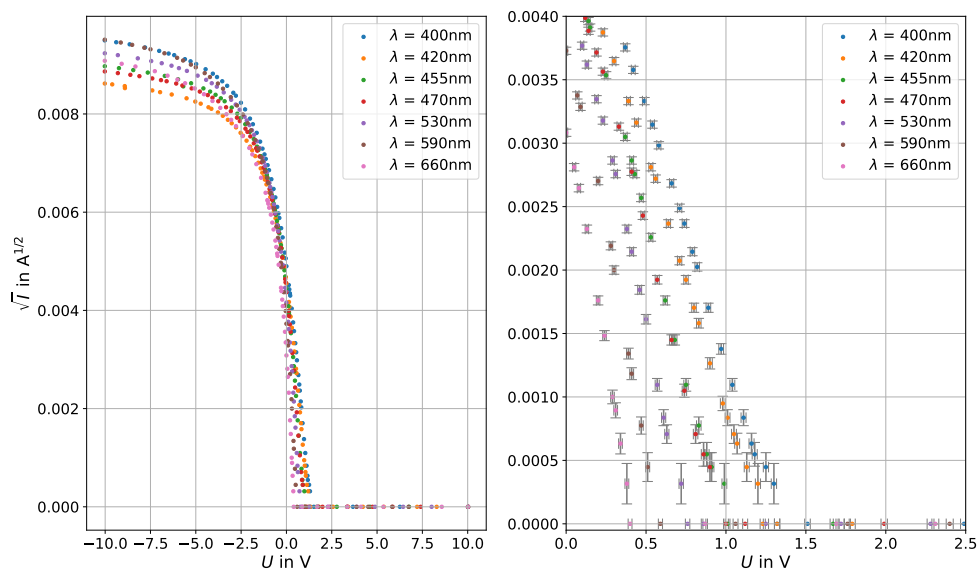


Abbildung 4:  $\sqrt{I}$ - $U$ -Verläufe der verschiedenen Dioden bei ähnlicher Intensität. Im linken Bild sind die gesamten Verläufe zu sehen, im rechten ist nur der Bereich der Grenzspannung, bei der der gemessene Strom 0 wird, zu sehen. Im rechten Bild ist klar zu erkennen, dass sich die Kennlinien im Bereich der Grenzspannung näherungsweise linear verhalten. Im rechten Bild sind auch die aus den Herstellerangaben der Multimeter [2] berechneten Unsicherheiten auf die Messwerte eingetragen. Da im linken Bild die Verläufe teilweise sehr nah aneinander liegen, wurden der Übersichtlichkeit halber die Fehlerbalken hier nicht mit eingezeichnet.

Die Grenzspannung  $U_g$  entspricht dabei der Nullstelle der Regressionsgeraden. Mit den Werten  $m_i$  für die Steigung und  $c_i$  für den y-Achsenabschnitt, wobei  $i$  für die untersuchte Diode steht, erhält man die Grenzspannung somit durch:

$$U_{g,i} = -\frac{c_i}{m_i}$$

Der Fehler  $s_{U_{g,i}}$  ergibt sich hierbei durch Gaußsche Fehlerfortpflanzung

$$s_{U_{g,i}} = \sqrt{\left(\frac{s_{c_i}}{m_i}\right)^2 + \left(\frac{c_i \cdot s_{m_i}}{m_i^2}\right)^2}$$

mit den Fehlern  $s_{c_i}$  für den y-Achsenabschnitt  $c_i$  und  $s_{m_i}$  für die Steigung  $m_i$ . In Abb. 5 ist exemplarisch für die Wellenlänge 470 nm die Ermittlung der Grenzspannung dargestellt.

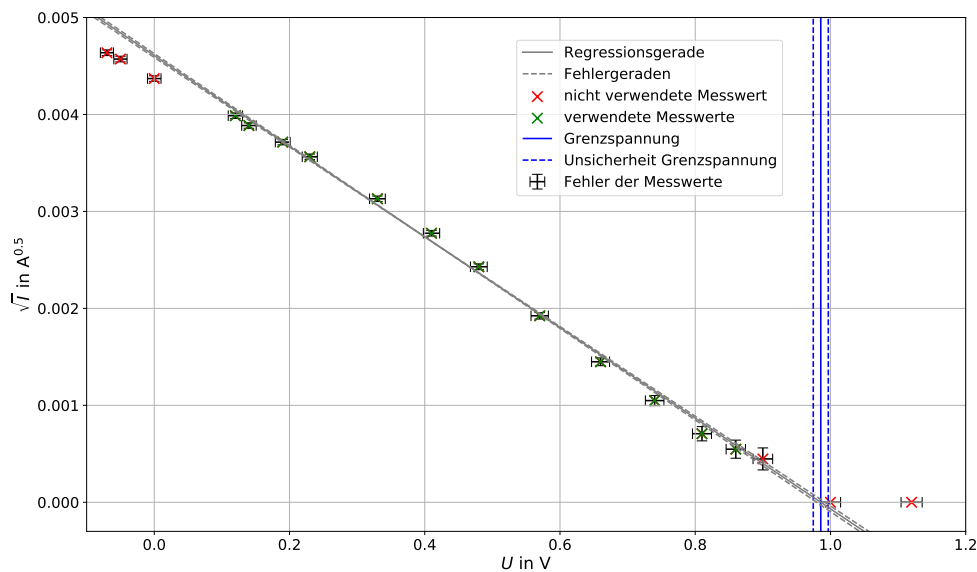


Abbildung 5: Kennlinie  $\sqrt{I}$  gegen  $U$  für die Diode mit einer nominellen Wellenlänge von 470 nm im Bereich der Grenzspannung  $U_g$ . Durch die annähernd linearen Datenpunkte in diesem Bereich wurde eine gewichtete lineare Regression durchgeführt. Die für die Regression verwendeten Messwerte sind in grün markiert, die für die Regression vernachlässigten in rot. Die erhaltene Ausgleichsgerade ist mitsamt zugehörigen Fehlergeraden auch mit eingezeichnet. In Tabelle 1 sind die Bestwerte für die Parameter eingetragen. Die Grenzspannung, die aus den Parametern der Regression berechnet wurde, ist auch eingezeichnet.

Analog wurden für alle anderen Dioden die Grenzspannungen bestimmt, sie sind auch in Tabelle 1 eingetragen.

Die Grenzenergie  $E_g$  berechnet sich durch:

$$E_g = |e \cdot U_g|$$

für die Elektronenladung verwenden wir den Literaturwert [1]

$$e_{\text{lit}} = 1,602\,176\,634 \cdot 10^{-19} \text{ C.}$$

Der Fehler ergibt sich ebenfalls mittels Gaußscher Fehlerfortpflanzung und ist gegeben durch:

$$s_{E_g} = e \cdot s_{U_g}$$

Für alle Dioden sind auch die so ermittelten Grenzenergieen in Tabelle 1 zu sehen.

$\lambda_{\text{nom}}$ in nm	$U_g$ in V	$E_g$ in $1 \cdot 10^{-19}$ J	$m$ in mA V $^{-1}$	$c$ in mA
400	$1,327 \pm 0,016$	$2,12 \pm 0,02$	$-3,97 \pm 0,04$	$5,27 \pm 0,03$
420	$1,21 \pm 0,02$	$1,94 \pm 0,04$	$-4,14 \pm 0,07$	$5,02 \pm 0,05$
455	$1,018 \pm 0,010$	$1,632 \pm 0,017$	$-4,57 \pm 0,04$	$4,654 \pm 0,019$
470	$0,985 \pm 0,011$	$1,579 \pm 0,018$	$-4,67 \pm 0,05$	$4,61 \pm 0,02$
530	$0,758 \pm 0,014$	$1,21 \pm 0,02$	$-6,10 \pm 0,10$	$4,63 \pm 0,04$
590	$0,576 \pm 0,016$	$0,923 \pm 0,003$	$-7,24 \pm 0,16$	$4,17 \pm 0,06$
660	$0,445 \pm 0,008$	$0,7136 \pm 0,0013$	$-7,10 \pm 0,12$	$3,16 \pm 0,02$

Tabelle 1: Tabelle mit den berechneten Grenzspannungen  $U_g$  mit Unsicherheiten für die verschiedenen Dioden der nominellen Wellenlängen  $\lambda_{\text{nom}}$ . Die entsprechenden Energien mit ihren Fehlern sind auch angegeben. Die aus der gewichteten linearen Regression (siehe Gleichung (1)) erhaltenen Parameter  $m$  und  $c$ , aus denen Grenzspannungen und Energien berechnet wurden, sind mit ihren Unsicherheiten auch eingetragen.

### 4.3 Emissionsspektren der verschiedenen Leuchtdioden

Für jede Diode wurde das Spektrum 100 Mal aufgenommen. Anschließend wurden die 100 Spektren für jede Leuchtdiode gemittelt. Die Fehler auf die Spektren für jede Wellenlänge ergeben sich dabei aus der Standardabweichung des Mittelwerts. Die so für die verschiedenen Dioden erhaltenen Spektren sind in Abb. 6 dargestellt. Da die Fehler schlecht zu erkennen sind, wurden die hier nicht mit eingezeichnet. Sie sind aber in Abb. 8 im Anhang zu sehen.

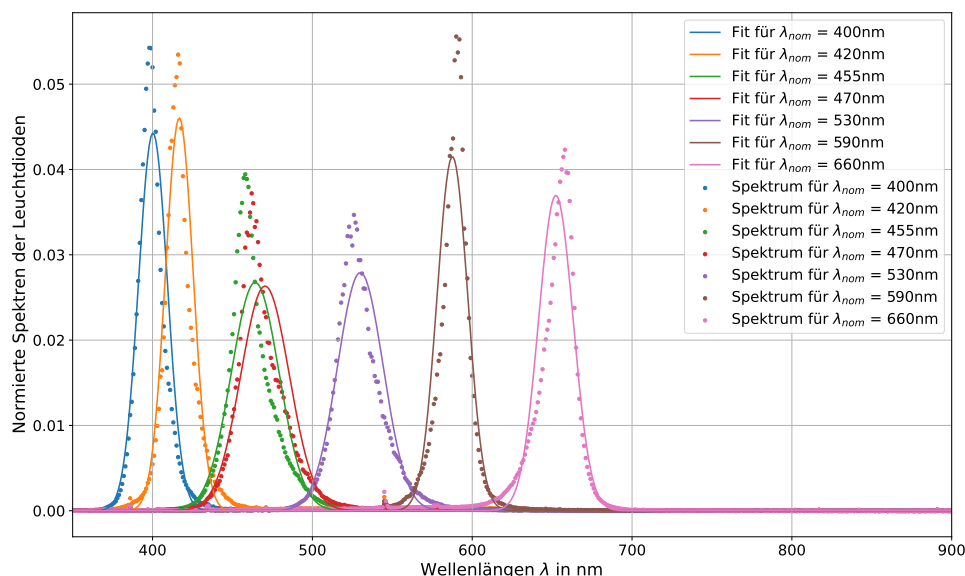


Abbildung 6: Die über 100 Messungen gemittelten und anschließend normierten Spektren der einzelnen Dioden. Für jede Diode wurde mit numerischer  $\chi^2$ -Minimierung die Anpassung einer Gaußfunktion (Gleichung (2)) durchgeführt. Die so erhaltenen Funktionen sind auch mit eingezeichnet. Der Übersicht halber wurden die aus der Standardabweichung der Mittelwerte erhaltenen Fehler auf die Messdaten nicht mit eingezeichnet, sie sind aber in Abb. 8 in Anhang A.1 zu sehen.

Es ist erkennbar, dass die Spektren der verschiedenen Leuchtdioden ein näherungsweise gaußverteiltes Maximum haben. Um die zentrale Wellenlänge (an der die Spektren ihr Maximum haben) zu bestimmen, wurde für das Spektrum jeder Diode eine Gaußfunktion gefittet. Bei reiner Suche nach dem höchsten Wert für das Spektrum könnte es sein, dass trotz Mittelung über 100



Messreihen aufgrund statistischer Schwankungen eine falsche Wellenlänge bestimmt wird. Bei der Bestimmung der Wellenlänge des Maximas über die Anpassung einer Gaußfunktion werden dagegen die Messwerte im Bereich um die zentrale Wellenlänge berücksichtigt. Deswegen wurde hier diese Vorgehensweise gewählt.

Für die Anpassung wurden die Spektren der einzelnen Dioden zunächst normiert, indem für jede Diode das Spektrum durch die Summe der Werte des Spektrums für jede Wellenlänge geteilt wurde. Danach wurde mit numerischer  $\chi^2$ -Minimierung in Python eine Gaußfunktion der Form

$$G_{\mu,\sigma} = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2)$$

mit dem Mittelwert  $\mu$  und der Standardabweichung  $\sigma$  an die Spektren der einzelnen Dioden angepasst. Die erhaltenen Funktionen sind zusammen mit den Messwerten in Abb. 6 dargestellt.

Die zentralen Wellenlänge  $\lambda_z$  ergibt sich aus dem aus der Gaußfunktion erhaltenen Mittelwert und ihr Fehler aus der Varianz:

$$\lambda_z = \mu \pm \sigma. \quad (3)$$

Mit dem Zusammenhang

$$\nu = \frac{c}{\lambda} \quad (4)$$

lassen sich die zentrale Frequenz  $\nu$  und die spektrale Breite  $\delta\nu$  bestimmen, wobei  $\delta\nu$  mit der gaußschen Fehlerfortpflanzung über

$$\delta\nu = \frac{c \cdot \delta\lambda}{\lambda^2} \quad (5)$$

bestimmt wird. Hierfür wurde der Literaturwert [1] der Lichtgeschwindigkeit  $c$

$$c_{\text{lit}} = 299\,792\,458 \text{ m s}^{-1}$$

verwendet. Die zentralen Wellenlängen, die zentralen Frequenzen und die spektralen Breiten sind zusammen mit den auf den Dioden angegebenen Werten für die zentrale Wellenlänge in Tabelle 2 aufgelistet.

$\lambda_{\text{nom}}$ in nm	$\lambda_z$ in nm	$\nu$ in $1 \cdot 10^{14} \text{ s}^{-1}$
400	$400 \pm 9$	$7,49 \pm 0,17$
420	$417 \pm 9$	$7,19 \pm 0,15$
455	$464 \pm 15$	$6,5 \pm 0,2$
470	$470 \pm 15$	$6,4 \pm 0,2$
530	$530 \pm 14$	$5,66 \pm 0,15$
590	$588 \pm 10$	$5,10 \pm 0,08$
660	$652 \pm 11$	$4,60 \pm 0,08$

Tabelle 2: Tabelle mit den aus den Spektren berechneten zentralen Wellenlängen  $\lambda_z$  mit Unsicherheiten  $\delta\lambda$  und die daraus berechneten zentralen Frequenzen  $\nu$  mit der spektralen Breite  $\delta\nu$  als Unsicherheiten. Zum Vergleich sind auch die auf den Dioden angegebenen Wellenlängen  $\lambda_{\text{nom}}$  mit eingetragen.

## 4.4 Bestimmung des Planckschen Wirkungsquantum

Als letztes wurde das Plancksche Wirkungsquantum  $h$  bestimmt. Hierzu wurden aus den in Versuchsteil 3 bestimmten Wellenlängen der vermessenen Dioden die zugehörigen Frequenzen und ihre Unsicherheiten mit Gleichungen (4) und (5) ermittelt. Diese sind in Tabelle 2 eingetragen.

Es gilt der Zusammenhang zwischen der Energie  $E$ , dem Planckschen Wirkungsquantum  $h$ , der Frequenz  $\nu$  und der Ablösearbeit  $W_{\text{ab}}$ :

$$E = h \cdot \nu - W_{\text{ab}}.$$

Daher erwarten wir für die Auftragung der Grenzenergien  $E_{g,i}$  gegen die Frequenz  $\nu$  einen linearen Zusammenhang mit der Steigung  $h$  und dem y-Achsenabschnitt  $W_{\text{ab}}$ , da im Falle der Grenzenergie die kinetische Energie der Elektronen verschwindet und sie somit lediglich eine potentielle Energie im elektrischen Feld besitzen. Die Ablöseenergie ist dabei unabhängig von der Frequenz. Die Auftragung von  $E_{g,i}$  gegen  $\nu$  ist in Abb. 7 dargestellt.

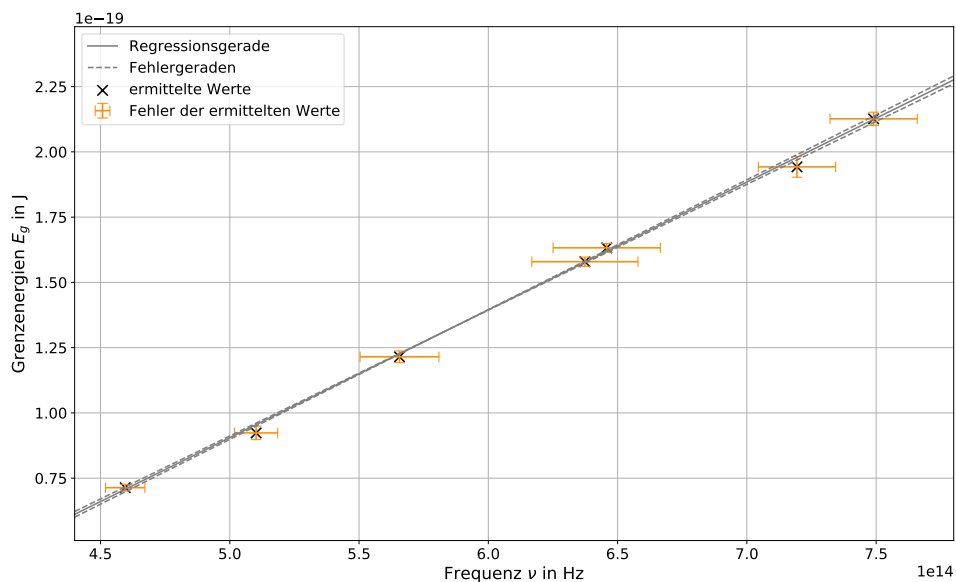


Abbildung 7: Auftragung der Grenzenergien  $E_{g,i}$  gegen die Frequenzen  $\nu$  zusammen mit den zugehörigen Unsicherheiten. Durch die Werte wurde eine gewichtete lineare Regression durchgeführt. Die so erhaltene Ausgleichsgerade ist mit Fehlergeraden auch eingezeichnet.

Wie erwartet liegen die Werte im Rahmen ihrer Fehler auf einer Geraden. Durch eine gewichtete lineare Regression erhalten wir als y-Achsenabschnitt die Ablöseenergie

$$W_{\text{ab}} = (-1,45 \pm 0,04) \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

sowie die das Plancksche Wirkungsquantum

$$h = (4,90 \pm 0,08) \cdot 10^{-34} \text{ J s}$$

## 5 Diskussion

### 5.1 Versuchsergebnisse

#### 5.1.1 Kennlinien für verschiedene Intensitäten

Im ersten Versuchsteil wurden die Kennlinien einer Diode für drei verschiedene Intensitäten bestimmt. Hierbei zeigte sich der erwartete Verlauf deutlich. Bei einer zu großen Gegenspannung erreichen keine Elektronen die Anode, weshalb kein Photostrom gemessen wird. Ab einer bestimmten Grenzspannung, die für alle drei Intensitäten identisch ist, entsteht ein Photostrom, der zunächst näherungsweise linear ansteigt. Hier zeigt sich, dass dieser Anstieg bei höheren Intensitäten deutlich schneller geht. Die Zunahme des Photostroms flacht jedoch ab einer gewissen Ziehspannung ab und pendelt sich anschließend asymptotisch auf ein Maximum ein, da alle abgelösten Elektronen die Anode erreichen. Die maximalen Werte der Photoströme steigen mit zunehmender Intensität an, was damit zu erklären ist, dass bei einer höheren Intensität mehr Elektroden an der Kathode abgelöst werden. Das Einpendeln scheint graphisch bei geringeren Intensitäten früher stattzufinden. Dies liegt jedoch daran, dass bei höheren Intensitäten in absoluten Zahlen mehr Elektronen die Anode nicht erreichen als bei Intensitäten geringeren Intensitäten. Daher führt dieses Abflachen durch die Verwendung einer gleichen Achsenskalierung in absoluten Zahlen zu einer graphischen Verzerrung des Zeitpunktes der Abflachung der Kurve. Somit sehen wir insgesamt wie erwartet für alle drei Verläufe denselben Verlauf, der für höhere Intensitäten lediglich mit einem Faktor multipliziert wird. Sinnvoll wäre es lediglich gewesen die geringe Intensität etwas höher zu stellen, da diese doch drastisch kleiner als die beiden Anderen und somit in einem gemeinsamen Diagramm nur sehr schwer zu erkennen ist. Darüberhinaus verursacht der geringe absolute Wert des Photostroms eine hohe Ungenauigkeit des Verlaufes der Kennlinie, da das Multimeter nicht mehr Nachkommastellen aufnehmen konnte.

#### 5.1.2 Kennlinien für verschiedene Leuchtdioden

Bei der Aufnahme der Kennlinien verschiedener Dioden bei ähnlicher Intensität ist auch der erwartete, im Bereich der Grenzspannung annähernd linearer, später abflachender Verlauf gut erkennbar. Deutlich zu erkennen ist auch, dass die Grenzspannung der Dioden verschiedener Wellenlängen unterschiedlich ist. Dies liegt daran, dass die Energie der Photonen von ihrer Wellenlänge abhängt. Die kinetische Energie, die die von der Kathode abgelösten Elektronen (nach Abzug der Austrittsarbeit) noch haben, hängt also von der Wellenlänge des eingestrahlten Lichts ab. Das bedeutet also auch, dass die Grenzspannung, bei der die gesamte kinetische Energie der Elektronen in potentielle Energie im elektrischen Feld umgewandelt wird, für verschiedene Dioden unterschiedlich ist. Dies ist in den aufgenommenen Messreihen gut zu erkennen: Je größer die Wellenlänge der Photonen ist, desto geringer ist ihre Energie, und entsprechend ist dann auch die Grenzspannung geringer.

Die durch gewichtete lineare Regression durch den annähernd linearen Verlauf im Bereich der Grenzspannung erhaltenen Werte für die Grenzspannung und die zugehörige Energie der verschiedenen Dioden sind in Tabelle 1 eingetragen.

#### 5.1.3 Emissionsspektren der verschiedenen Leuchtdioden

Die aus der Anpassung einer Gaußfunktion an die Spektren bestimmten zentralen Wellenlängen und zentralen Frequenzen mit der spektralen Breite sind in Tabelle 2 eingetragen.

Bei Betrachtung der Spektren mit den angepassten Gaußfunktionen fällt auf, dass die Gaußfunktionen nicht immer gut zu den Spektren passen. Vor allem für die Maximalwerte der Spektren sind die Messwerte bei fast allen Dioden deutlich größer als die Maxima der angepassten Funktionen. Dies liegt daran, dass bei der Anpassung die Annahme getroffen wurde, dass die Spektren der Dioden gaußverteilt sind. Das ist jedoch nicht zwangsläufig der Fall. Da hier aber nur die Wellenlänge, bei der sich das Maximum befindet, bestimmt werden sollte, ist der Unterschied in den Maximalwerten der Spektren vernachlässigbar.

Allerdings ist bei manchen Dioden auch eine Verschiebung der angepassten Funktion entlang der Wellenlängen sichtbar. Sie ergibt sich dadurch, dass Gaußfunktionen symmetrisch sind, das bei den Spektren der Dioden aber nicht zwangsläufig der Fall sein muss. Eine Bestimmung der Maxima durch Suchen des Maximalwerts ist jedoch auch nicht geeignet. Zwar konnte durch die Aufnahme von 100 Spektren und anschließender Mittelung der statistische Fehler auf die einzelnen Datenpunkte reduziert werden. Allerdings sind im Bereich um die Maxima zu wenig Datenpunkte vorhanden, um einen klaren Verlauf erkennen zu können. Die Anpassung der Gaußfunktionen hat also insofern eine Berechtigung, als dass auch Datenpunkte, die sich nicht unmittelbar am Maximalwert befinden, bei der Bestimmung der Maxima berücksichtigt werden.

Bei Vergleich der nominellen Wellenlängen mit den bestimmten zentralen Wellenlängen erkennt man, dass für alle Dioden die nominellen Wellenlängen innerhalb einer Standardabweichung der zentralen Wellenlängen liegen. Teilweise sind die bestimmten Wellenlängen sogar exakt gleich wie die nominellen. Allerdings gibt es zwei Dioden, bei denen eine größere Abweichung erkennbar ist: Die Dioden der Wellenlängen von 455 nm und 660 nm.

Bei der 455 nm-Diode lässt sich in Abb. 6 erkennen, dass das Spektrum sehr asymmetrisch ist, und die zugehörige Gaußfunktion im Vergleich zu den Messdaten in Richtung größerer Wellenlängen zu verschoben sein scheint. Auch bei der 660 nm-Diode liegen die Messdaten in Abb. 6 näher am nominellen Wert der Wellenlängen als die Gaußfunktion. Somit wäre hier möglicherweise eine andere Methode zu Bestimmung des Maximums von Vorteil gewesen.

#### 5.1.4 Bestimmung des Planckschen Wirkungsquantum

Aus der Auftragung der Grenzenergien gegen die zugehörigen zentralen Frequenzen der Dioden und der anschließenden gewichteten linearen Regression, siehe Abb. 7, ergeben sich eine Ablöseenergie von

$$W_{\text{ab}} = (-1,45 \pm 0,04) \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

und ein Wert für das Plancksche Wirkungsquantum von

$$h = (4,90 \pm 0,08) \cdot 10^{-34} \text{ J s.}$$

Bei Vergleich von  $h$  mit dem Literaturwert [1]

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

ergibt sich ein  $t$ -Wert von

$$t = 23.$$

Da dieser Wert deutlich über zwei liegt, sind die beiden Werte nicht miteinander verträglich. Die Größenordnung der Planckkonstante konnte jedoch akkurat bestimmt werden.

Auffällig ist, dass die Werte der Auftragung der Grenzenergien gegen die zentralen Frequenzen in Abb. 7 ziemlich gut auf einer Geraden liegen. Vor allem auch die Frequenzen der Dioden der nominellen Wellenlängen von 660 nm und 455 nm, bei denen sich die bestimmten zentralen Wellenlängen auffällig von den nominellen Werten unterschieden haben, liegen nicht auffällig neben der Regressionsgeraden. Dies rechtfertigt im Nachhinein noch einmal das Vorgehen zur Bestimmung der zentralen Wellenlängen. Es ist möglich, dass das von den Dioden abgestrahlte Licht teilweise tatsächlich nicht im Bereich der angegebenen Wellenlängen, sondern etwas dazu verschoben lag, und somit die Bestimmung der Wellenlängen durch die Anpassung einer Gaußfunktion einen besseren Wert liefert.

Andererseits ist es auch möglich, dass bei der Bestimmung der Grenzenergien durch die Regression durch die Kennlinien ein Fehler unterlaufen ist, der in Kombination mit einer fehlerhaften Wellenlänge wieder dazu geführt haben könnte, dass der Wert bei Bestimmung der Planckkonstante wieder auf der Geraden liegt. Dafür spricht auch die Tatsache, dass der hier bestimmte Wert für  $h$  nicht mit dem Literaturwert verträglich ist. Schon eine Verwendung von etwas mehr oder weniger Messwerten von  $U$  und  $I$  für die Bestimmung der Grenzenergien könnte die Grenzenergien etwas verändern. In Kombination mit z.B. anders bestimmten zentralen Wellenlängen könnte dies zu einer deutlich anderen Steigung der Regression in Abb. 7 führen, was schließlich einen anderen Wert für  $h$  liefern würde.

## 5.2 Diskussion der Messmethoden und Verbesserungsvorschläge

Um die Fehler bei der Bestimmung der Grenzenergien zu minimieren, wäre es von Vorteil, ein Netzgerät zu verwenden, bei dem sich die Spannung genauer einstellen lässt. Bei dem verwendeten Netzgerät kam es schon bei geringster Bewegung am Rädchen zum Einstellen der Spannung zu vergleichsweise großen Spannungssprüngen. Um die Grenzenergien besser bestimmen zu können, müssten im Bereich der Grenzspannung mehr Messwerte aufgenommen werden. Dies war aber mit dem vorhandenen Netzgerät nicht möglich.

Zur genaueren Bestimmung der zentralen Wellenlängen wäre es auf jeden Fall von Vorteil, mehr Messwerte im Bereich des Maximums des Spektrums aufzunehmen. Damit hätten diese Werte auch mehr Einfluss auf die angepasste Gaußfunktion. Andererseits könnte bei Aufnahme mehr Messwerte komplett auf eine solche Anpassung verzichtet werden, und die Maxima auf andere Art bestimmt werden. Dafür wäre aber auf jeden Fall ein Spektrometer notwendig, das eine höhere Auflösung in den Wellenlängen messen kann.

Außerdem musste der Lichtleiter von Hand in das Licht der Diode gehalten werden. Dabei haben schon kleinste Veränderung in der Richtung, in der gehalten wurde, zu großen Schwankungen der Höhe des auf dem Laptop sichtbaren Spektrums geführt. Eine große Verbesserung wäre also eine Halterung für das Ende des Lichtleiters. Zudem könnte man das Spektrum in einem abgedunkelten Raum aufnehmen, um den Einfluss von Umgebungslicht auf die Messung zu minimieren.

# A Anhang

## A.1 Abbildungen

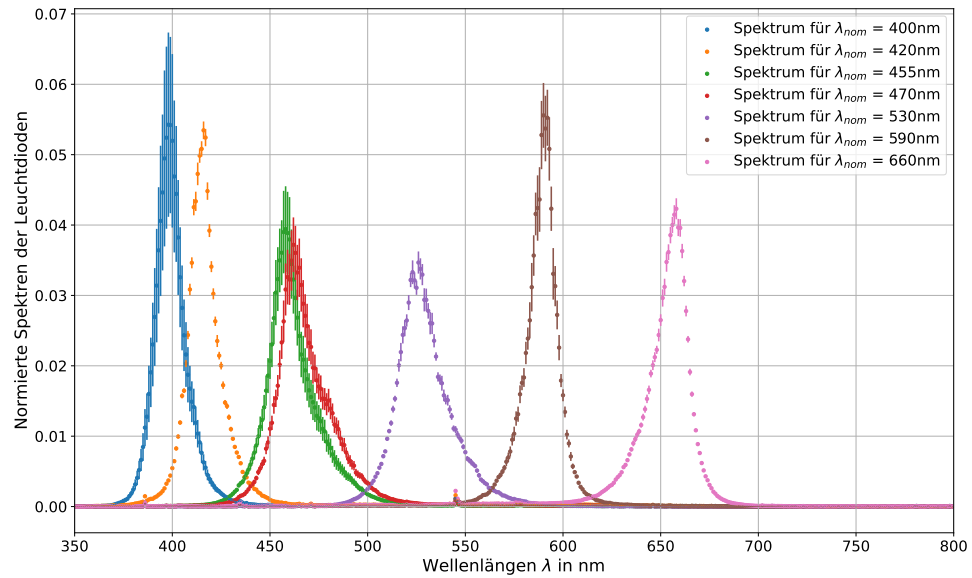


Abbildung 8: Die über 100 Messungen gemittelten und anschließend normierten Spektren der verschiedenen im Versuch verwendeten Dioden. Die über die Standardabweichung der Mittelwerte bestimmten Unsicherheiten auf die Datenpunkte sind auch mit eingezeichnet.

## A.2 Rohdaten

Vorbereitung	S17.3.2.2	1. Messwert: Standard		2. Messwert: Mittel		3. Messwert: Mittel	
		20V Bereich U in V	200µA Bereich I in µA	20V Bereich U in V	200µA Bereich I in µA	20V Bereich U in V	200µA Bereich I in µA
Datei SPO mm: Gelb		10,02	0,0	10,02	-0,1	10,02	-0,0
		-8,26	0,0	8,79	-0,1	6,74	-0,0
		6,31	0,0	7,23	-0,1	5,83	-0,0
		4,51	0,0	5,31	-0,1	4,51	-0,0
		3,86	0,0	5,29	-0,1	3,87	-0,0
		2,53	0,0	4,64	-0,1	3,35	-0,0
		1,56	0,0	3,90	-0,1	2,40	-0,0
		0,75	0,0	3,13	-0,1	1,76	-0,0
		0,43	0,0	2,65	-0,1	1,06	-0,0
		0,27	0,0	1,85	-0,1	0,59	0,0
		0,30	0,1	1,89	-0,1	0,51	0,2
		0,25	0,3	0,72	0,0	0,47	0,6
		0,10	0,8	0,50	0,2	0,41	1,4
		0,06	1,0	0,48	0,3	0,37	1,8
		0,01	1,2	0,46	0,6	0,30	4,0
		-0,01	1,3	0,42	1,3	0,28	4,8
		-0,04	1,4	0,37	2,3	0,20	7,3
		-0,09	1,5	0,34	3,3	0,07	11,4
		-0,14	1,6	0,30	4,3	0,00	10,8
		-0,20	1,8	0,23	7,5	0,10	10,5
		-0,35	2,0	0,14	11,0	0,0	13,9
		-0,47	2,2	0,12	12,0	-0,04	15,9
		-0,64	2,3	0,10	12,8	-0,07	16,8
		-0,78	2,4	0,0	13,3	-0,14	19,1
		-1,00	2,5	-0,05	20,1	-0,28	23,0
		-1,15	2,6	-0,14	29,0	-0,29	24,1
		-1,58	2,7	-0,30	37,2	-0,31	24,7
		-2,00	2,8	-0,41	37,6	-0,40	27,6
		-3,31	2,9	-0,50	41,5	-0,47	30,0
		-5,08	2,9	-0,70	51,2	-0,56	32,5
	-7,25	2,9	-0,88	53,5	-0,71	36,9	
	-7,65	2,9	-1,07	63,3	-0,88	40,9	
	-9,60	3,0	-1,23	73,8	-1,00	43,5	
	-10,02	3,0	-1,42	80,6	-1,07	44,5	
			-1,54	84,5	-1,16	46,7	
			-1,70	89,7	-1,31	49,5	
			-2,00	97,9	-1,38	50,6	
			-2,29	105,1	-1,54	53,2	
			-2,66	113,0	-1,72	55,8	
			-2,91	117,8	-1,75	58,8	
			-3,18	122,8	-2,14	61,0	
			-3,37	125,9	-2,40	63,8	
			-3,57	129,3	-2,73	66,8	
			-3,72	134,6	-3,07	69,6	
			-4,53	140,4	-3,50	72,5	
			-4,73	145,6	-3,78	74,3	
			-5,17	151,1	-4,22	76,6	
			-5,60	156,0	-4,51	78,0	
			-6,04	160,9	-5,00	80,1	
			-6,48	165,4	-5,27	81,1	
			-7,13	171,2	-5,40	82,6	
			-7,91	177,7	-6,63	83,6	
			-8,94	185,5	-6,73	85,3	
			-10,02	193,1	-7,20	86,8	

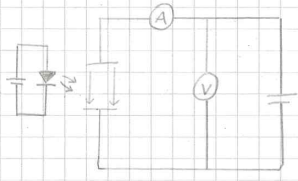
		420umh 6km				530umh 6km			
U in V	I in pA	20V Bereich		20V Bereich		20V Bereich		20V Bereich	
		U in V	I in pA	U in V	I in pA	U in V	I in pA	U in V	I in pA
-7,84	87,4	10,02	-0,0	-2,52	56,0	10,02	0,0	-4,12	74,4
-8,50	88,5	6,25	0,0	-2,76	55,7	6,01	0,0	-4,43	75,6
-9,14	89,4	7,21	0,0	-3,02	54,0	6,44	0,0	-4,50	77,1
-10,02	90,5	5,27	0,0	-3,23	62,1	4,88	0,0	-5,48	78,8
		4,22	0,0	-3,51	63,4	3,98	0,0	-5,35	79,8
		5,40	0,0	-3,78	64,3	2,28	0,0	-6,35	80,7
		2,57	0,0	-4,14	65,7	1,72	0,0	-7,88	81,6
		1,75	0,0	-4,30	66,2	1,25	0,0	-7,46	82,4
		1,62	0,0	-4,73	67,4	0,86	0,0	-8,20	83,4
		1,23	0,0	-5,03	68,1	0,76	0,0	-9,20	84,6
		1,20	0,1	-5,51	69,2	0,72	0,1	-10,02	85,3
		1,13	0,2	-6,33	70,5	0,43	0,2		
		1,07	0,4	-6,97	71,3	0,61	0,7		
		1,05	0,5	-7,40	71,3	0,57	1,2		
		1,01	0,7	-8,19	72,7	0,50	2,6		
		0,86	0,8	-8,72	73,4	0,46	3,4		
		0,80	1,6	-9,61	74,0	0,41	4,6		
		0,83	2,5	-10,02	74,3	0,38	5,4		
		0,80	2,3			0,31	7,6		
		0,77	3,2			0,25	8,2		
		0,74	4,3			0,23	10,1		
		0,64	5,6			0,18	11,2		
		0,56	7,4			0,13	12,1		
		0,53	7,9			0,10	14,2		
		0,44	10,0			0,0	17,3		
		0,39	11,7			-0,15	13,2		
		0,30	15,3			-0,12	19,9		
		0,23	15,0			-0,21	24,3		
		0,17	16,0			-0,30	27,0		
		0,14	17,4			-0,38	29,1		
		0,00	20,7			-0,45	31,5		
		-0,04	21,3			-0,50	32,8		
		-0,11	23,8			-0,61	35,7		
		-0,20	25,7			-0,67	37,9		
		-0,28	27,7			-0,77	39,8		
		-0,33	28,5			-0,83	41,1		
		-0,49	32,4			-0,85	42,4		
		-0,54	33,5			-0,84	43,5		
		-0,60	34,5			-1,03	46,4		
		-0,69	36,2			-1,17	48,2		
		-0,73	37,9			-1,24	49,3		
		-0,89	39,8			-1,31	50,5		
		-0,96	41,0			-1,49	53,4		
		-1,10	43,1			-1,63	55,4		
		-1,17	44,4			-1,78	57,4		
		-1,24	45,2			-1,90	58,8		
		-1,33	46,3			-2,04	60,4		
		-1,42	47,5			-2,19	61,3		
		-1,55	49,1			-2,31	63,1		
		-1,77	51,0			-2,58	65,4		
		-1,89	52,7			-2,80	67,1		
		-2,00	53,8			-3,05	68,7		
		-2,20	55,6			-3,46	71,2		
		-2,40	57,1			-3,98	73,2		



470 nm				660 nm				455 nm			
20V Bereich		Blau		20V Bereich		Blau		20V Bereich		Blau	
U <sub>in</sub> [V]	I <sub>in</sub> [mA]	U <sub>in</sub> [V]	I <sub>in</sub> [mA]	U <sub>in</sub> [V]	I <sub>in</sub> [mA]	U <sub>in</sub> [V]	I <sub>in</sub> [mA]	U <sub>in</sub> [V]	I <sub>in</sub> [mA]	U <sub>in</sub> [V]	I <sub>in</sub> [mA]
10,02	-0,0	-5,23	72,6	10,02	0,0	-7,26	78,7	10,02	0,0	-3,91	79,4
7,41	-0,0	-5,74	73,6	8,57	0,0	-8,38	80,6	6,76	0,0	-4,21	79,5
5,86	0,0	-6,08	74,3	5,25	0,0	-9,08	81,4	4,61	0,0	-4,58	79,6
4,75	0,0	-6,61	75,1	4,11	0,0	-10,02	82,5	2,76	0,0	-5,26	79,7
3,36	0,0	-6,92	75,5	3,26	0,0			1,67	0,0	-5,65	79,8
1,93	0,0	-7,40	76,1	2,31	0,0			1,01	0,0	-5,98	79,8
1,12	0,0	-8,11	76,3	1,63	0,0			0,33	0,1	-6,70	79,0
1,00	0,0	-8,61	77,4	0,87	0,0			0,31	0,2	-7,65	78,2
0,30	0,2	-9,30	78,0	0,40	0,0			0,58	0,3	-8,45	79,1
0,58	0,3	-10,02	78,6	0,38	0,1			0,83	0,6	-9,24	79,8
0,81	0,5			0,34	0,4			0,75	1,2	-10,02	80,5
0,74	1,1			0,31	0,8			0,68	2,1		
0,66	2,1			0,29	1,0			0,62	3,1		
0,57	3,7			0,24	2,2			0,53	5,1		
0,48	5,8			0,20	3,1			0,47	6,6		
0,41	7,7			0,13	5,4			0,43	7,6		
0,32	9,8			0,08	7,0			0,41	8,2		
0,23	12,7			0,05	7,9			0,37	9,3		
0,19	15,8			0,0	9,5			0,25	12,5		
0,14	15,7			-0,04	11,2			0,15	10,3		
0,12	15,9			-0,08	12,7			0,14	15,7		
0,0	19,1			-0,15	15,0			0,11	16,7		
-0,05	20,8			-0,20	16,7			0,10	18,8		
-0,07	21,8			-0,23	17,8			-0,07	22,0		
-0,16	24,0			-0,28	19,3			-0,11	23,2		
-0,23	25,8			-0,30	19,8			-0,10	26,0		
-0,30	27,9			-0,43	24,3			-0,17	27,7		
-0,44	31,3			-0,48	26,1			-0,20	29,4		
-0,50	32,7			-0,51	26,6			-0,33	31,0		
-0,63	35,6			-0,56	28,0			-0,43	31,8		
-0,68	36,8			-0,61	29,4			-0,47	32,8		
-0,72	37,7			-0,71	31,8			-0,52	33,9		
-0,79	39,1			-0,78	33,5			-0,57	35,1		
-0,86	40,6			-0,86	35,4			-0,63	36,5		
-0,93	41,9			-0,95	37,1			-0,70	38,1		
-1,03	43,8			-1,00	38,1			-0,74	38,9		
-1,19	46,6			-1,03	39,8			-0,81	40,4		
-1,26	47,7			-1,05	39,0			-0,80	42,2		
-1,36	49,2			-1,15	40,8			-0,86	43,4		
-1,48	50,9			-1,40	44,3			-1,04	44,3		
-1,61	52,6			-1,66	48,7			-1,08	45,7		
-1,67	53,3			-1,88	51,5			-1,18	47,3		
-1,80	54,8			-2,05	53,4			-1,31	49,8		
-1,99	56,0			-2,42	57,0			-1,42	51,0		
-2,15	58,3			-2,78	60,1			-1,54	52,8		
-2,26	59,3			-3,05	62,1			-1,62	53,8		
-2,57	61,7			-3,31	63,8			-1,80	56,1		
-2,73	62,8			-3,65	66,0			-2,02	58,3		
-3,07	64,5			-4,08	68,3			-2,27	60,7		
-3,33	66,2			-4,55	70,6			-2,52	62,7		
-3,76	68,2			-5,06	72,6			-2,77	64,1		
-4,08	69,4			-5,53	74,4			-3,02	66,1		
-4,34	70,3			-6,01	75,7			-3,41	68,2		
-4,78	71,5			-6,66	77,1			-3,62	69,2		

400 mV U <sub>off</sub>			
U <sub>in</sub> V	I <sub>in</sub> mA	U <sub>out</sub> V	I <sub>out</sub> mA
10,02	0,0	-3,54	75,1
6,16	0,0	-3,83	76,6
3,67	0,0	-4,06	77,8
2,43	0,0	-4,46	79,4
1,51	0,0	-4,98	81,3
1,32	0,0	-5,29	82,3
1,30	0,1	-5,60	83,1
1,25	0,2	-6,19	84,6
1,18	0,3	-6,50	85,2
1,16	0,4	-7,02	86,2
1,11	0,7	-7,80	87,5
1,04	1,2	-8,65	89,7
0,97	1,8	-9,59	91,5
0,89	2,9	-10,02	90,2
0,82	4,1		
0,75	4,6		
0,74	5,6		
0,71	6,2		
0,66	7,2		
0,58	8,9		
0,54	9,9		
0,49	11,1		
0,42	12,3		
0,37	14,1		
0,29	16,3		
0,21	18,5		
0,19	18,9		
0,16	19,6		
0,13	20,4		
0,0	24,0		
-0,04	25,6		
-0,09	26,8		
-0,21	30,1		
-0,25	32,2		
-0,39	34,6		
-0,44	35,7		
-0,51	37,3		
-0,61	39,7		
-0,71	41,8		
-0,83	44,5		
-0,96	49,0		
-1,04	48,4		
-1,14	50,2		
-1,21	51,5		
-1,32	53,2		
-1,44	55,3		
-1,64	58,0		
-1,85	60,7		
-2,01	62,5		
-2,29	65,5		
-2,51	67,7		
-2,75	70,1		
-2,93	71,1		
-3,27	73,5		

Schaltplan:



UNIT UTS1-55:

DC Voltage: 2V : ±(0,5% + 1)

DC Current: 200 mA : ±(0,8% + 1)

31.03.22 VT Boembe

## Literatur

- [1] Eite Tiesinga u. a. „CODATA Recommended Values of the Fundamental Physical Constants: 2018“. In: (10. Jan. 2022). DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0064853>. URL: [https://tsapps.nist.gov/publication/get\\_pdf.cfm?pub\\_id=932441](https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=932441).
- [2] *Uni-T UT51 Bedienungsanleitung*. Dong Guan City: UNI-TREND TECHNOLOGY (DONG GUAN) LIMITED, 2022, März 2022. URL: <https://omnibus.uni-freiburg.de/~phypra/ap/59/Uni-T%20UT51%20operating%20Manual.pdf>.