

Physikalisches Fortgeschrittenenpraktikum

Lumineszenz

– *Auswertung* –

Armin Burgmeier

Robert Schittny

1 Laserdiode

1.1 Kennlinie

Wir haben die Kennlinie der Laserdiode aufgenommen, zunächst oberhalb der Laserschwelle und dann darunter. Dazu haben wir die Spannung zwischen 2 V und 2,3 V bzw. 0 V und 2 V variiert und die Stromstärke durch die Diode gemessen.

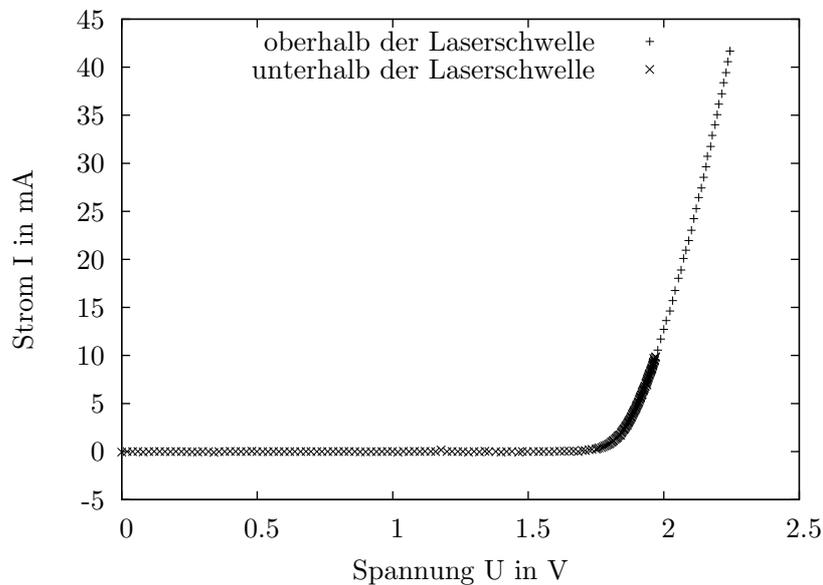


Abbildung 1: Kennlinie der Laserdiode

Dies entspricht der typischen Kennlinie einer Diode in Durchlassrichtung. Oberhalb der Laserschwelle nimmt die Stromstärke sehr stark mit der Spannung zu.

1 Laserdiode

In der Theorie erwarten wir einen Verlauf der Form

$$I(U) = I_S \left(e^{\frac{eU}{\beta k_B T}} - 1 \right) \quad (1)$$

wobei β ein Faktor zwischen 1 und 2 ist, der im wesentlichen davon abhängt wo die Ladungsträger rekombinieren.

Es scheint uns daher geeignet, die dimensionslose Größe $\frac{I}{I_S} + 1$ logarithmisch auf der y-Achse aufzutragen. Wir betrachten den Bereich oberhalb und unterhalb der Laserschwelle (etwa 2 V) getrennt, da sich das System nicht im thermischen Gleichgewicht befindet und wir insbesondere erwarten, dass die Temperatur in beiden Fällen unterschiedlich ist.

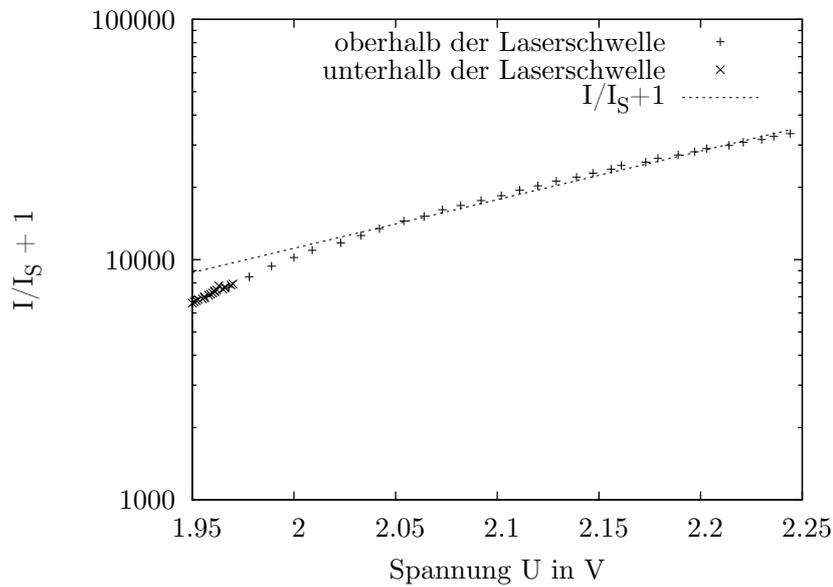


Abbildung 2: Kennlinie der Laserdiode, logarithmisch, oberhalb der Laserschwelle

Nach Anpassung einer Ausgleichsfunktion der Form von Gleichung 1 erhalten wir $I_S = (1,25 \pm 0,28) \mu\text{A}$ und $\beta T = (2488 \pm 55) \text{K}$.

Im Bereich unterhalb der Laserschwelle verwenden wir nur die Werte ab 1,7 V, da die Ströme darunter so klein sind, dass sie nicht mehr vernünftig aufgelöst werden konnten.

1 Laserdiode

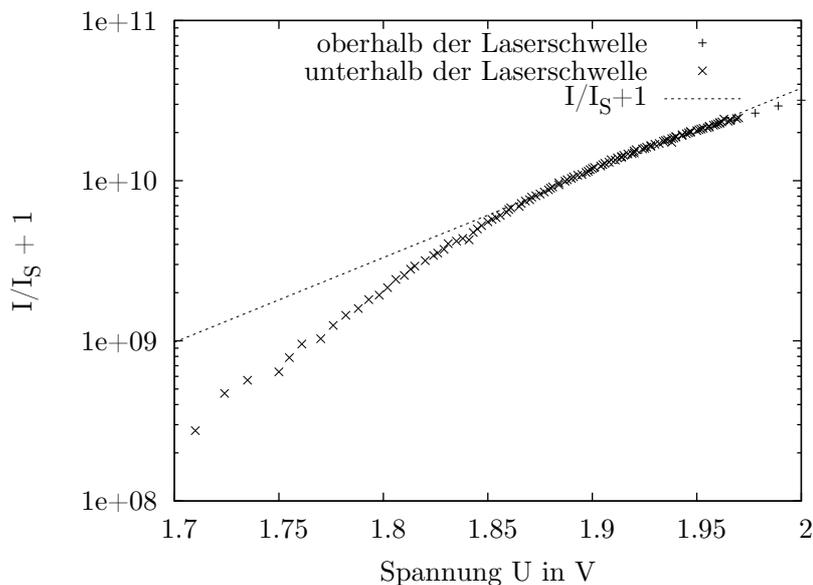


Abbildung 3: Kennlinie der Laserdiode, logarithmisch, unterhalb der Laserschwelle

Das gleiche Vorgehen liefert uns nun $I_S = (0,40 \pm 0,13)$ pA und $T = (952 \pm 13)$ K.

1.2 Integraler Photonenstrom

Für die integrale Photonenstromdichte gilt

$$j_{Ph} = \frac{I_K}{\eta_{ext,Sol} \cdot p \cdot e \cdot A_{emitt,LD}} \quad (2)$$

Als bekannte Größen treten der Quantenwirkungsgrad der Detektor-Solarzelle $\eta_{ext,Sol} = 0,68$, der Abstrahlkoeffizient $p = 0,85$, die Elementarladung e und die Fläche des pn-Übergangs $A_{emitt,LD} = 5 \cdot 10^{-5} \text{ cm}^2$ auf. I_K bezeichnet den Kurzschlussstrom an der Solarzelle und wurde in Abhängigkeit von der an der Diode angelegten Spannung gemessen.

In der Theorie erwartet man eine exponentielle Abhängigkeit von der angelegten Spannung. Aufgetragen über die Stromstärke erwarten wir also wieder eine lineare Abhängigkeit.

1 Laserdiode

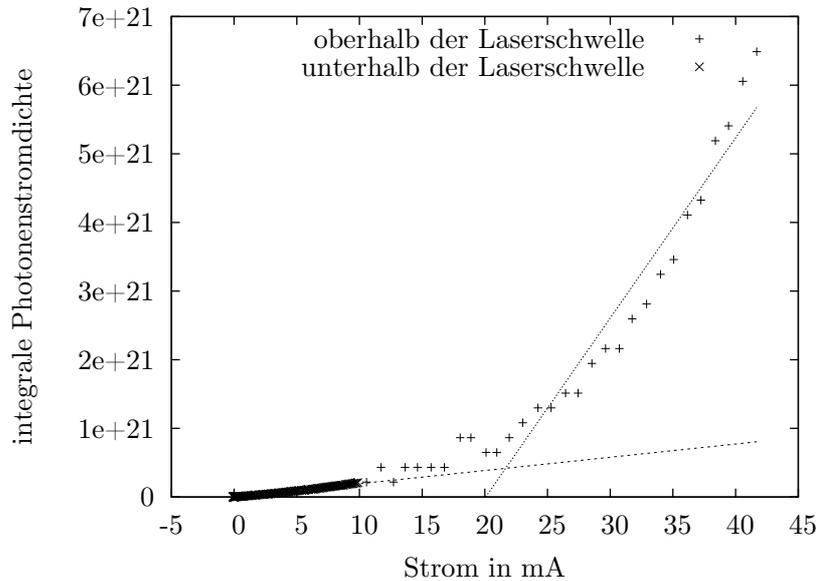


Abbildung 4: Emittierte integrale Photonenstromdichte

Wie zu sehen ist nimmt die Photonenstromdichte bei Erreichen der Laserschwelle stark zu. Vor und nach einem Übergangsbereich von etwa 10 mA bis 20 mA lässt sich das erwartete lineare Verhalten bestätigen. Gerade im oberen Bereich bleiben aber noch Unsicherheiten, die sich womöglich durch Aufnahme von mehr Messwerten beseitigen lassen würden.

1.3 externer Quantenwirkungsgrad

Der Quantenwirkungsgrad entspricht dem Quotienten aus der Zahl der erzeugten Photonen und der Zahl der injizierten Ladungsträger, oder auch dem Quotient der Ströme aus beiden Teilchen:

$$\eta = \frac{j_{Ph}}{j_e} \quad (3)$$

j_{Ph} entspricht der integralen Photonenstromdichte die aus dem vorigen Aufgabenteil bereits bekannt ist. Die Zahl der injizierten Ladungsträger hängt mit dem Diodenstrom I zusammen:

$$j_e = \frac{j}{e} = \frac{I}{e \cdot A_{pn,LD}} \quad (4)$$

Dabei bezeichnet j die Stromdichte an elektrischer Ladung und $A_{pn,LD} = 7 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2$ die Querschnittsfläche des pn-Übergangs der Diode.

Den Bereich bei niedrigen Stromstärken (kleiner als $I = 0,5 \text{ mA}$) betrachten wir wie bei der Betrachtung der Kennlinie nicht, da dort starke Schwankungen in Folge von nicht hinreichend genau auflösbaren Stromstärken auftreten.

1 Laserdiode

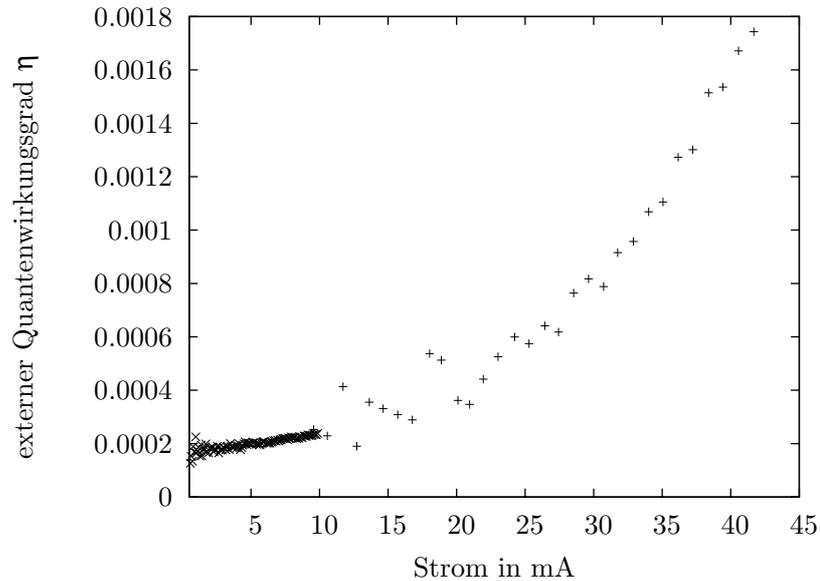


Abbildung 5: Externer Quantenwirkungsgrad

Man erkennt einen deutlichen Anstieg des Wirkungsgrades oberhalb der Laserschwelle. Dies ist auf die einsetzende stimulierende Emission zurückzuführen, da nun deutlich mehr Ladungsträger Photonen emittieren.

1.4 Spektraler Photonenstrom

1.4.1 Oberhalb der Laserschwelle

Wir nahmen nun mittels des Monochromators die spektrale Verteilung der emittierten Photonenstromdichte bei einer Spannung von $U = 2,23 \text{ V}$ auf, das heißt oberhalb der Laserschwelle. Dabei wählten wir eine Spaltbreite von $0,1 \text{ mm}$. Bei noch kleineren Spaltbreiten konnten wir keinen nennenswerten Kurzschlussstrom mehr feststellen, was wie wir vermuten am Alter der Laserdiode liegt, da diese grundsätzlich eher kurzlebige Bauteile sind. Aus der Spaltbreite ergab sich eine Bandbreite von $B = 1,3 \text{ nm}$. Bei einem Wellenlängenintervall von $\Delta\lambda = 5 \text{ nm}$ zwischen zwei Messpunkten erhielten wir folgendes Spektrum:

1 Laserdiode

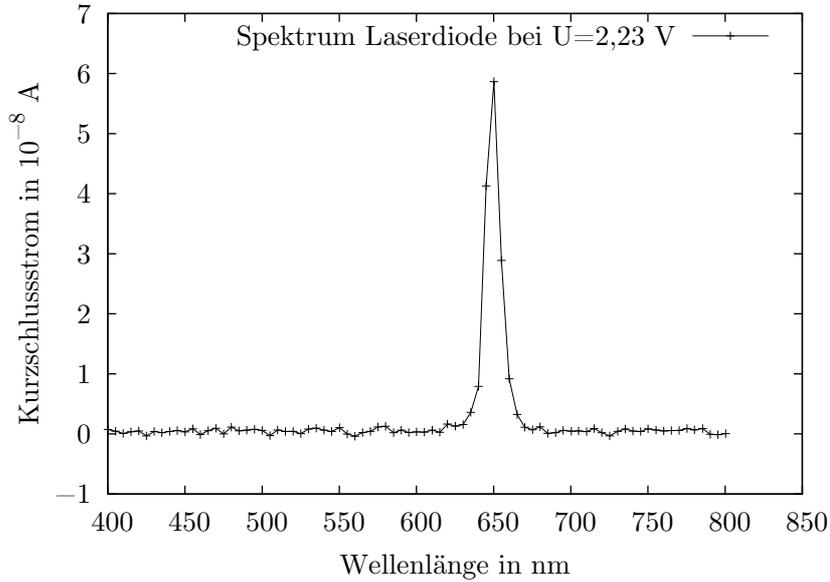


Abbildung 6: Spektraler Photonenstrom der Laserdiode oberhalb der Laserschwelle

Deutlich sichtbar ist der erwartete scharfe Peak bei ca. $\lambda = 650$ nm.

Das abgebildete Spektrum stellt zunächst nur die direkten Messgrößen dar, hier Kurzschlussstrom der Photodiode über der am Monochromator eingestellten Wellenlänge. Wir wollen aus diesen Werten nun den emittierten integralen Photonenstrom berechnen, müssen also in geeigneter Weise über alle gemessenen Werte summieren.

Aus dem Kurzschlussstrom I_K berechnen wir hierzu zunächst nach Formel (2) die Photonenstromdichte. Aus dem differentiellen Photonenstrom pro Wellenlänge $dj_{Ph}/d\lambda$ lässt sich durch Integration die integrale Photonenstromdichte j_{Ph} berechnen:

$$j_{Ph} = \int d\lambda' \frac{dj_{Ph}(\lambda')}{d\lambda} \quad (5)$$

In unserem Fall ist $dj_{Ph}/d\lambda$ durch j_{Ph}/B mit der Bandbreite B zu ersetzen, wodurch das Integral in eine Summe übergeht mit dem Wellenlängenintervall $\Delta\lambda = 5$ nm:

$$j_{Ph} \approx \Delta\lambda \sum_{\lambda'=400 \text{ nm}}^{800 \text{ nm}} \frac{dj_{Ph}(\lambda')}{d\lambda} = \frac{\Delta\lambda}{B} \sum_{\lambda'=400 \text{ nm}}^{800 \text{ nm}} j_{Ph}(\lambda') \quad (6)$$

Damit erhalten wir eine integrale Photonenstromdichte von

$$j_{Ph,ober} = 1,59 \cdot 10^{21} \text{ 1/m}^2\text{s} . \quad (7)$$

1.4.2 Unterhalb der Laserschwelle

Die gleiche Messung wiederholten wir nun bei einer Spannung von $U = 1,97$ V, die Diode wurde also unterhalb der Laserschwelle betrieben. Als Bandbreite wählten wir nun 26 nm. Es ergab sich folgendes Spektrum:

1 Laserdiode

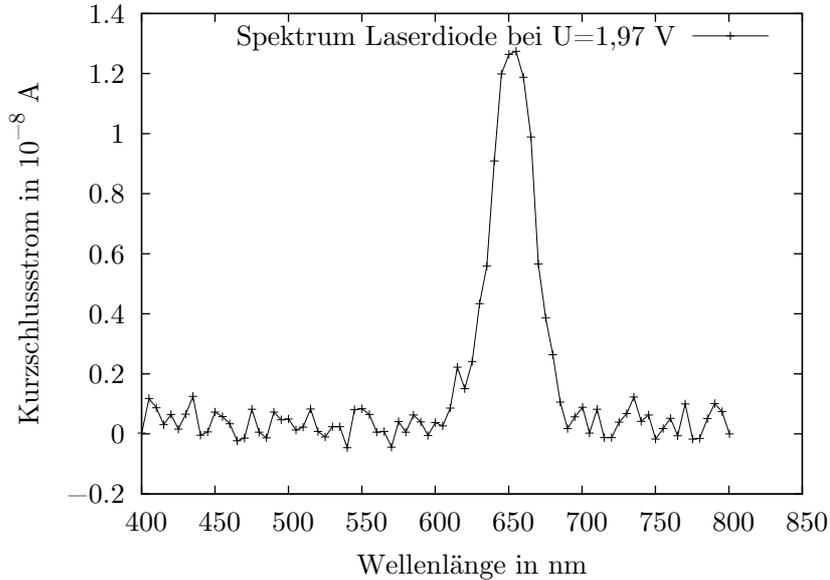


Abbildung 7: Spektraler Photonstrom der Laserdiode unterhalb der Laserschwelle

Man sieht dass der Peak deutlich breiter ist als vorher und er sich nicht so stark vom Untergrund abhebt.

Die gleiche Rechnung wie oben liefert

$$j_{Ph,unter} = 5,06 \cdot 10^{19} \text{ 1/m}^2\text{s} . \quad (8)$$

1.5 Durchlässigkeit des optischen Systems

Um die Durchlässigkeit des optischen Systems (Monochromator, Linse etc.) zu berechnen, vergleichen wir die ohne Monochromator gemessene integrale Photonstromdichte j_{Ph_1} mit der eben berechneten integralen Photonstromdichte mit Monochromator j_{Ph_2} .

j_{Ph_1} ergibt sich aus der Kennlinie der Leuchtdiode, wir lesen für die Spannungen $U_{ober} = 2,23 \text{ V}$ und $U_{unter} = 1,97 \text{ V}$ ab:

$$j_{Ph_1,ober} = 5,41 \cdot 10^{21} \text{ 1/m}^2\text{s} \quad (9)$$

$$j_{Ph_1,unter} = 1,99 \cdot 10^{20} \text{ 1/m}^2\text{s} \quad (10)$$

Damit erhalten wir Durchlässigkeiten von

$$d_{ober} = \frac{j_{Ph_2,ober}}{j_{Ph_1,ober}} \approx 0,294 \quad (11)$$

$$d_{unter} = \frac{j_{Ph_2,unter}}{j_{Ph_1,unter}} \approx 0,254 . \quad (12)$$

1.6 Korrigierte spektrale Photonenstromdichte

Nun soll ein hinsichtlich der Durchlässigkeit des optischen Systems korrigiertes Spektrum der Photonenstromdichte erstellt werden, wobei wir den spektralen Photonenstrom pro Wellenlängenintervall in eine emittierte Photonenstromdichte pro Energieintervall umrechnen wollen.

Um das Spektrum über der Photonenenergie auftragen zu können, rechnen wir zunächst die Wellenlänge in eine Energie um:

$$E = \hbar\omega = \frac{hc}{\lambda} \quad (13)$$

Der spektrale Photonenstrom pro Energieeinheit ergibt sich nach

$$\frac{dj_{Ph}(\lambda)}{dE} = \frac{dj_{Ph}(\lambda)}{d\lambda} \frac{d\lambda}{dE} \quad (14)$$

mit

$$\frac{d\lambda}{dE} = \frac{d(hc/E)}{dE} = -\frac{hc}{E^2} = \frac{\lambda^2}{hc}, \quad (15)$$

wobei das negative Vorzeichen hier vernachlässigt wird, da es für den qualitativen Zusammenhang keine Rolle spielt. Um die Durchlässigkeit des opt. Systems zu berücksichtigen, teilen wir noch durch d und erhalten somit

$$\frac{dj_{Ph}}{dE} = \frac{\lambda^2}{hc \cdot d} \frac{dj_{Ph2}}{d\lambda} = \frac{\lambda^2}{hc \cdot d} \frac{j_{Ph2}}{B}. \quad (16)$$

Dies tragen wir über hc/λ auf und erhalten:

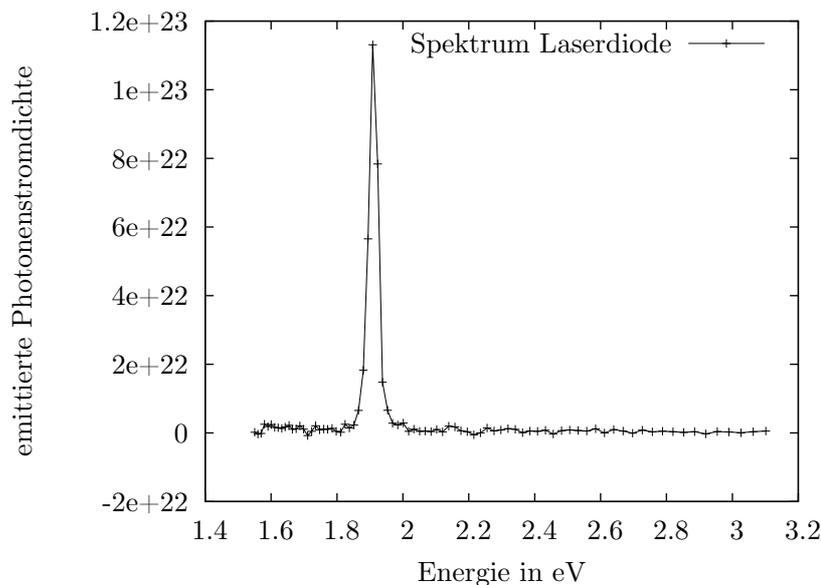


Abbildung 8: Korrigiertes Spektrum der Photonenstromdichte der Laserdiode oberhalb der Laserschwelle

2 Leuchtdiode

Wenig überraschend finden wir den Peak bei der Energie die einer Wellenlänge von 650 nm entspricht, wo der Peak bei der Auftragung der spektralen Photonendichte lag.

Eine analoge Rechnung mit der Durchlässigkeit und Bandbreite der Laserdiode unterhalb der Laserschwelle ($d = 0,254$, $B = 26$ nm, wie zuvor bestimmt) ergibt ein entsprechendes Schaubild für den Bereich unterhalb der Laserschwelle.

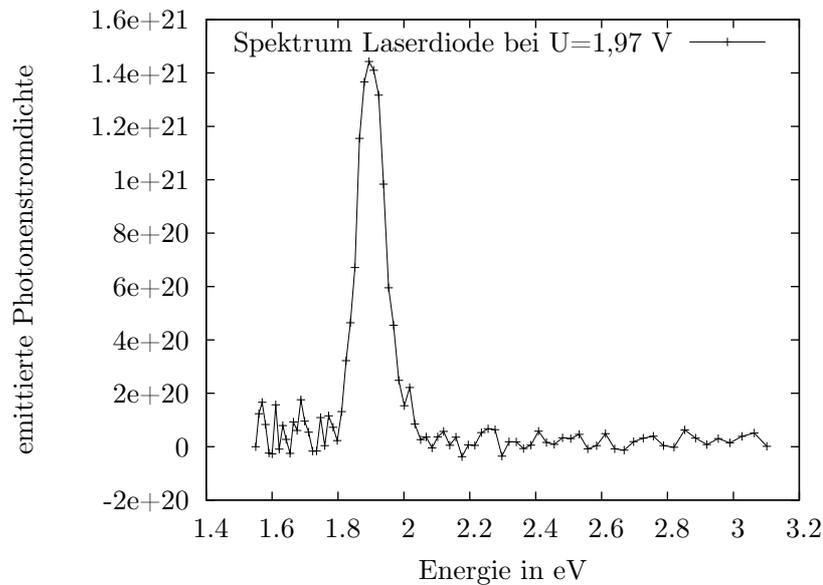


Abbildung 9: Korrigiertes Spektrum der Photonendichte der Laserdiode unterhalb der Laserschwelle

2 Leuchtdiode

Analog zu den Messungen zur Laserdiode wollen wir nun ebenfalls eine herkömmliche Leuchtdiode untersuchen.

2.1 Strom-Spannungs-Kennlinie

Mit Hilfe des vorgegebenen LabView-Programms maßen wir die Strom-Spannungs-Kennlinie der Leuchtdiode im Bereich von 0 V bis 2 V und zusätzlich den integralen Photonstrom mit der Silizium-Photodiode.

Wir erhielten dabei folgende Kennlinie:

2 Leuchtdiode

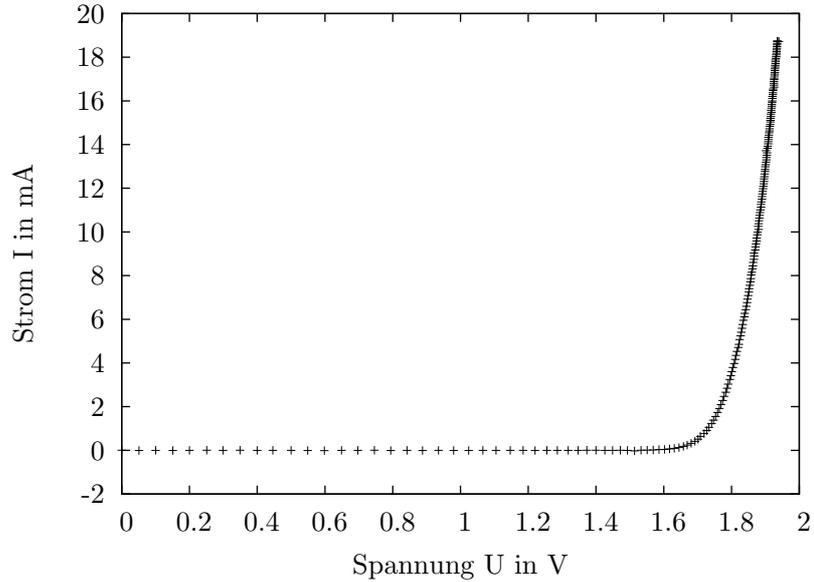


Abbildung 10: Kennlinie der Leuchtdiode

Wir erwarten eine exponentielle Abhängigkeit des Stroms von der Spannung (siehe Vorbereitung), weshalb wir im folgenden noch eine logarithmische Auftragung der Strom-Achse wählen. Die exponentielle Abhängigkeit ist allerdings nicht für die gesamte Kennlinie zu erwarten (und auch offensichtlich nicht gegeben). Unterhalb von $U \approx 1,5$ V ist der Strom konstant Null, da hier die Sperrspannung noch nicht erreicht wurde. Im Bereich höherer Spannungen geht der anfangs exponentielle Anstieg dann in einen linearen über, da der Widerstand der Verarmungszone im pn-Übergang so klein wird, dass die ohmschen Widerstände der n- und p-Zonen den weiteren Verlauf der Kennlinie bestimmen. Wir stellen daher nur den Bereich oberhalb von 1,5 V Diodenspannung dar, was uns zu folgendem Bild führt:

2 Leuchtdiode

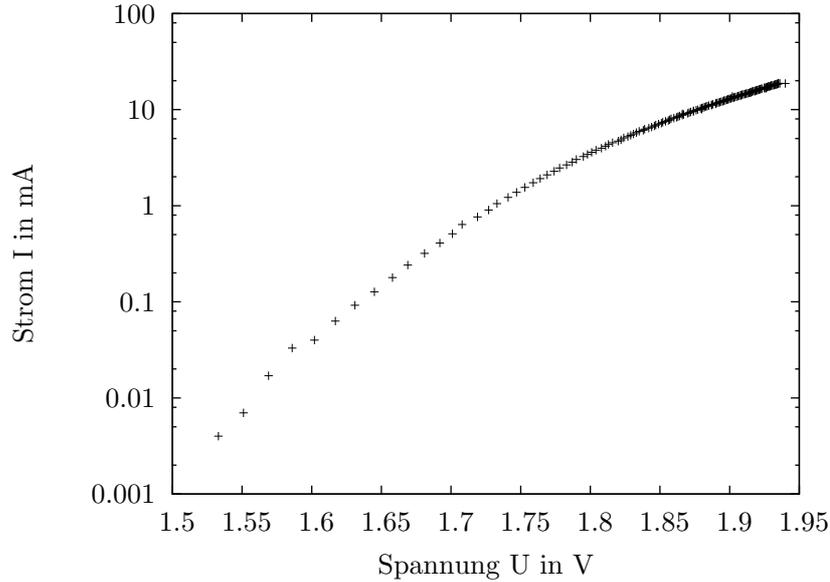


Abbildung 11: Kennlinie der Leuchtdiode in logarithmischer Auftragung

Eine lineare Abhängigkeit ist hier approximativ erkennbar.

2.2 Emittierte integrale Photonenstromdichte

Wir berechnen die emittierte integrale Photonenstromdichte j_{Ph} nach folgender Formel der Vorbereitungshilfe:

$$I_K = \eta_{ext,Solt} \cdot \frac{\Omega}{\pi} \cdot j_{Ph} \cdot e \cdot A_{LED} \quad \Leftrightarrow \quad j_{Ph} = \frac{\pi \cdot I_K}{\eta_{ext,Sol} \cdot \Omega \cdot e \cdot A_{LED}} \quad (17)$$

Hier ist der Quantenwirkungsgrad der Detektordiode gegeben als $\eta_{ext,Sol} = 0,68$, e ist die Elementarladung und A_{LED} die Fläche der Leuchtdiode mit $A_{LED} = 7 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2$. Ω ist der Raumwinkel, in den Photonen von der LED emittiert werden. Er ist festgelegt durch die Metallblende vor der Diode und berechnet sich zu

$$\Omega = 4\pi \frac{\pi \cdot r^2}{4\pi \cdot R^2} = \frac{\pi \cdot (2,5 \text{ mm})^2}{(20 \text{ mm})^2} = 0,0491 \quad (18)$$

r ist hierbei der Radius der Blendenöffnung und R der Abstand der Blende von der Leuchtdiode.

Generell erwarten wir für die Photonenstromdichte ein durch den Boltzmannfaktor bestimmtes Verhalten:

$$j_{Ph} \propto e^{\frac{e \cdot U(I)}{k_B T}} \propto \frac{I}{I_S} - 1 \quad (19)$$

Wir erwarten also eine lineare Abhängigkeit von der Stromstärke I sowie eine exponentielle Abhängigkeit von der Spannung U .

Wir tragen im folgenden die berechnete Photonenstromdichte j_{Ph} über der Stromstärke I auf:

2 Leuchtdiode

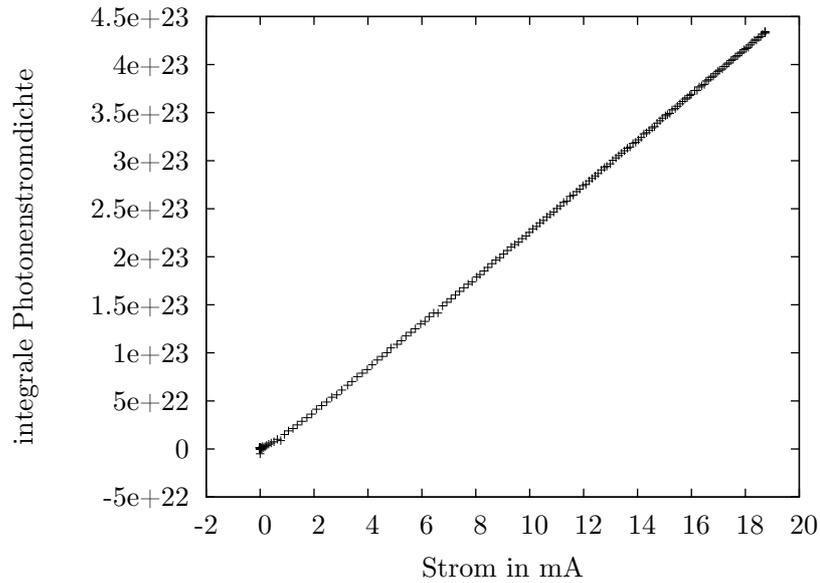


Abbildung 12: Photonenstromdichte j_{Ph} , aufgetragen über der Stromstärke I

Die lineare Abhängigkeit ist hier gut zu erkennen.

Außerdem tragen wir j_{Ph} nun noch über der Spannung U auf, wobei wir eine logarithmische y-Achse wählen und wie bei der Kennlinie schon nur den relevanten Teil der Daten plotten, hier ab $U = 1,6$ V:

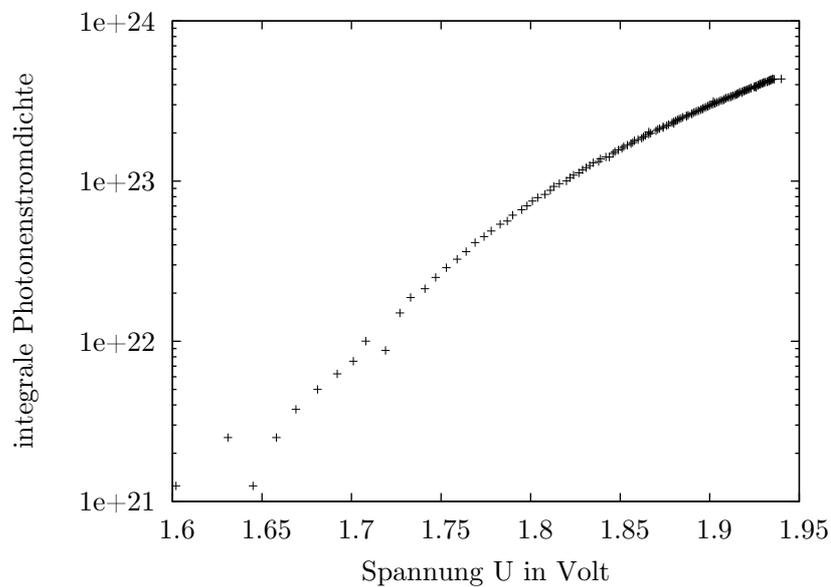


Abbildung 13: Photonenstromdichte j_{Ph} , aufgetragen über der Spannung

Auch hier ist wie schon bei der Strom-Spannungs-Kennlinie die erwartete Abhängigkeit nur eingeschränkt zu bestätigen. Da jedoch die lineare Abhängigkeit vom Strom sehr gut wiedergegeben wird, vermuten wir Ungenauigkeiten bei der Spannungsmessung.

2.3 Externer Quantenwirkungsgrad

Wir berechnen nun noch den externen Quantenwirkungsgrad der Leuchtdiode, für den

$$\eta_{ext,LED} = \frac{j_{Ph}}{j_e} = \frac{j_{Ph}}{I} \cdot e \cdot A_{LED} \quad (20)$$

mit $A_{LED} = 4,7 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2$ gilt. Mit der oben verwendeten Formel für die integrale Photonenstromdichte j_{Ph} reduziert sich der Ausdruck zu

$$\eta_{ext,LED} = \frac{\pi \cdot I_K}{\eta_{ext,Sol} \cdot \Omega \cdot I} \quad (21)$$

Damit erhalten wir folgenden Verlauf für den Quantenwirkungsgrad, wobei wir wieder nur die relevanten Werte ab $U = 1,75 \text{ V}$ plotten:

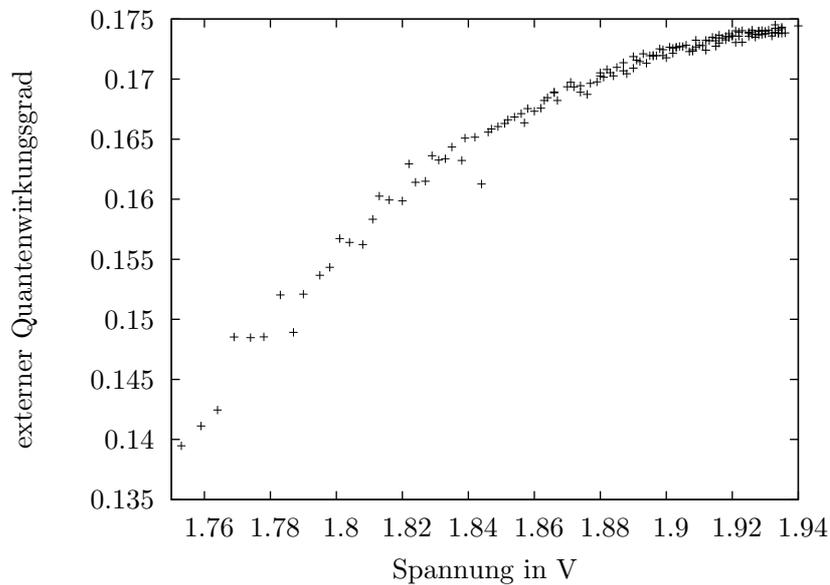


Abbildung 14: externer Quantenwirkungsgrad der Leuchtdiode

Wir sehen, dass sich der externe Quantenwirkungsgrad der Leuchtdiode mit steigender Spannung einer oberen Grenze annähert, hier $\eta_{ext,LED} \approx 0,175$. Dies steht im Gegensatz zur Laserdiode, wo der externe Quantenwirkungsgrad weiter mit der Spannung anstieg. In absoluten Zahlen ist der Quantenwirkungsgrad der Leuchtdiode unerwarteterweise allerdings deutlich größer. Auch dies könnte auf das Alter der Laserdiode zurückzuführen sein.

2.4 Spektraler Photonenstrom

Wie zuvor haben wir nun mit Hilfe des Monochromators die spektrale Verteilung der emittierten Photonenstromdichte aufgenommen. Dabei wählten wir eine Spannung von $U = 1,8 \text{ V}$ auf, wobei wir mit einer gewählten Spaltbreite von $0,3 \text{ mm}$ eine Bandbreite von $B = 7,8 \text{ nm}$ erhielten. Es ergab sich folgendes Spektrum:

2 Leuchtdiode

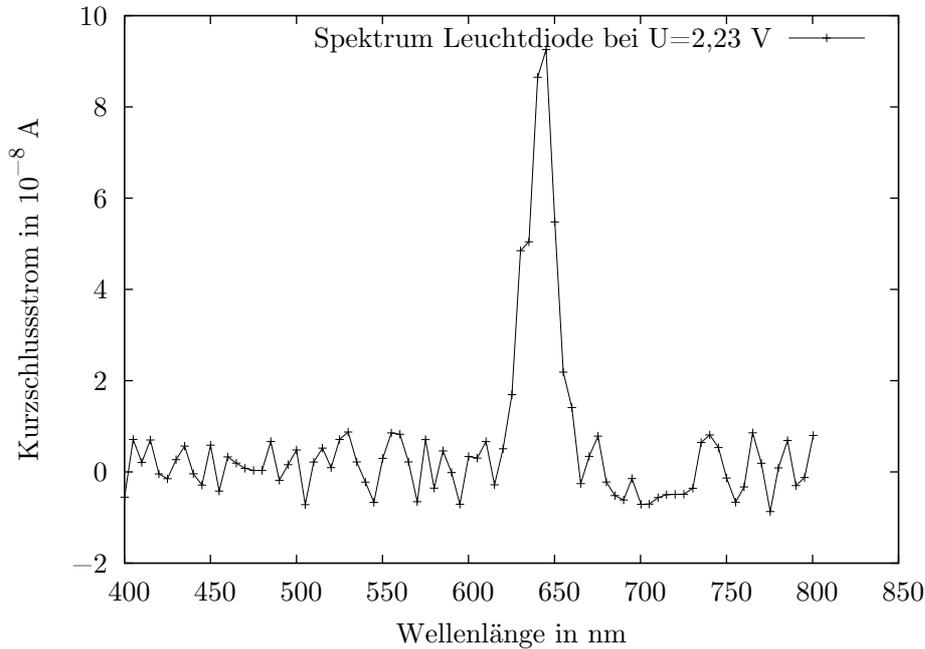


Abbildung 15: Spektraler Photonenstrom der Leuchtdiode

Deutlich sichtbar ist der erwartete Peak bei ca. $\lambda = 650$ nm.

Wie schon bei der Laserdiode erhalten wir durch Summation den emittierten integralen Photonenstrom. Dabei ist allerdings zu beachten, dass bei der Umrechnung vom Kurzschlussstrom zu einer Photonenstromdichte nun Gleichung 17 verwendet werden muss. Mit Hilfe von Gleichung 6 erhalten wir

$$j_{Ph} = 1,055 \cdot 10^{22} \text{ 1/m}^2\text{s} . \quad (22)$$

2.5 Durchlässigkeit des optischen Systems

Wie für die Laserdiode bestimmen wir die Durchlässigkeit des optischen Systems.

Für die Spannung $U = 1,8$ V lesen wir ab:

$$j_{Ph_1} = 7,88 \cdot 10^{22} \text{ 1/m}^2\text{s} \quad (23)$$

Damit erhalten wir eine Durchlässigkeit von

$$d = \frac{j_{Ph_2}}{j_{Ph_1}} \approx 0,134 . \quad (24)$$

Die Durchlässigkeit der Laserdiode ist deutlich größer als die der Leuchtdiode.

2.6 Korrigierte spektrale Photonenstromdichte

Auch die Umrechnung vom spektralen Photonenstrom pro Wellenlängenintervall zur emittierten Photonenstromdichte pro Energieintervall funktioniert genauso wie bei der Laserdiode. Es gilt Gleichung 16.

Die Auftragung über hc/λ in Einheiten von eV ergibt:

2 Leuchtdiode

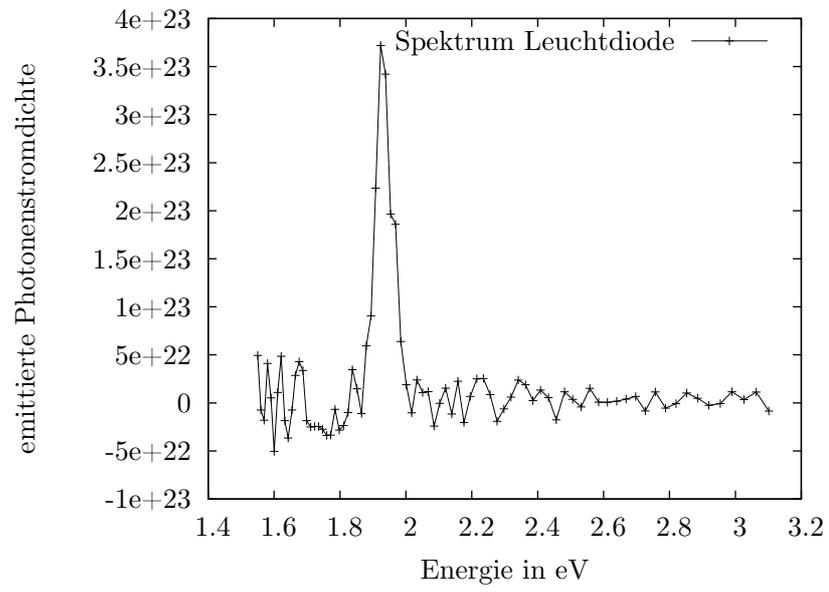


Abbildung 16: Korrigiertes Spektrum der Photonenstromdichte der Leuchtdiode