

# Grundpraktikum 2: Leucht- und Laserdioden

9. März 2016

## Ziel des Versuchs:

In diesem Versuch sollen die wesentlichen Merkmale lichtemittierender Halbleiter untersucht werden. Dies umfasst sowohl die elektronische als auch die spektrale Charakteristik und den Wirkungsgrad.

## Messprogramm:

- Aufnahme der Strom-Spannungskennlinie von zwei Leuchtdioden
- Aufnahme der Strom-Leistungskennlinie ( $P_{\text{optisch}}$ ) einer Leuchtdiode
- Kollimation des von einer Laserdiode emittierten Strahlungsfeldes
- Aufnahme der Strom-Leistungskennlinie ( $P_{\text{optisch}}$ ) einer Laserdiode
- Bestimmung der Linienbreite der spontanen Fluoreszenzstrahlung einer Laserdiode

## 1 Zur Vorbereitung

### Grundlagen und Inhalt der Versuche

#### 1.1 Leuchtdioden

##### Elektrolumineszenz

Ein in Durchlassrichtung betriebener p-n-Übergang kann als Leuchtdiode oder, unter bestimmten Voraussetzungen, auch als Laserdiode arbeiten. Dabei werden Photonen an der Grenzschicht zwischen dem p- und n-dotierten Bereich durch Elektronen-Loch-Rekombination emittiert: Durch die zugeführte elektrische Energie gelangen Elektronen aus dem n-dotierten Teil in das Leitungsband des p-dotierten Teils. Nach einer bestimmten Zeit, der sogenannten Rekombinationszeit, springt das Elektron in das energetisch tiefer liegende Valenzband, wo es mit einem Loch rekombiniert. Die dabei frei werdende Energie kann in Form eines Photons abgegeben werden.

Die relevanten Energien kann man mit folgenden Überlegungen abschätzen:

- Die Energie  $h\nu$  eines Photons, das beim Übergang des Elektrons zwischen Valenz- und Leitungsband emittiert wird, entspricht mindestens dem energetischen Abstand zwischen den Bändern, der sogenannten Bandlücken- oder Gap-Energie  $E_{\text{gap}}$ .
- Durch die unterschiedliche Dotierung im p- und n-Teil diffundieren freie Elektronen und Löcher am Übergang in den jeweils anderen Bereich, wo sie rekombinieren. Dadurch entsteht eine Verarmungszone an freien Ladungsträger, die sogenannte Raumladungszone oder Sperrschicht. Im Gleichgewicht wird die diffusive Kraft gerade durch das aufgebaute elektrische Potential, die sogenannten Diffusionsspannung  $U_d$ , kompensiert. Die Potentialdifferenz  $U_d$  ist materialabhängig, in der Regel jedoch in etwa so groß wie die Bandlückenenergie  $E_{\text{gap}}$ . Um Stromfluss durch den p-n-Übergang zu ermöglichen, muss die Verarmungszone aufgebrochen werden, d. h. es muss mindestens die Diffusionsspannung  $U_d$

in Durchlassrichtung angelegt werden. Man spricht deshalb in diesem Zusammenhang auch von der Durchlassspannung  $U_d$ .

Durch Vergleich der obigen Beziehungen ergibt sich also folgende Relation:

$$h\nu \gtrsim E_{\text{gap}} \approx eU_d \quad (1)$$

Die Durchlassspannung  $U_d$  der Diode liefert also eine Abschätzung für den Bandabstand und die Frequenz der emittierten Photonen. Diese Abschätzung ist recht gut für die im Versuch verwendeten roten und blauen LEDs, bei den grünen LEDs ist sie weniger präzise.

### Strom-Leistungs-Bilanz

Neben der strahlenden Rekombination der Elektron-Loch-Paare gibt es auch nichtstrahlende Prozesse, die zu einer Rekombination führen können. In diesem Fall wird die Energie des angeregten Elektrons durch das Gitter absorbiert. Die interne Quanteneffizienz  $\eta_{\text{int}}$  gibt an, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein durch elektrische Energie angeregtes Elektron strahlend rekombiniert. Da nur Elektron-Loch-Paare im Halbleiter beweglich sind, entspricht ein elektrischer Strom  $I$  durch die Diode einem Strom von  $I/e$  Elektron-Loch-Paaren. Für den Photonenfluss  $\Phi$ , d.h. die Zahl der entstandenen Photonen pro Sekunde, ergibt sich dann folgender Zusammenhang mit dem elektrischen Strom  $I$ :

$$\Phi = \eta_{\text{int}} \cdot \frac{I}{e}. \quad (2)$$

Nur wenige der so erzeugten Photonen verlassen tatsächlich die Leuchtdiode, da folgende Prozesse dies verhindern:

- Photonen werden im Halbleitermaterial absorbiert.
- Aufgrund des hohen Brechungsindex des Halbleitermaterials  $n = 3,6$  wird ein großer Teil an der Grenzschicht Halbleiter/Luft reflektiert.
- Nur Photonen mit einem Winkel kleiner als der durch den Brechungsindex gegebenen Grenzwinkel können den Halbleiter verlassen (Totalreflexion).

Es ist daher sinnvoll eine externe Quanteneffizienz  $\eta_{\text{ext}}$  zu definieren die diese Verluste mitberücksichtigt. Für die optische Ausgangsleistung  $P_0$  der LED ergibt sich folgender Ausdruck:

$$P_0 = \eta_{\text{ext}} \cdot \frac{I}{e} \cdot h\nu. \quad (3)$$

Schließlich gibt die direkt messbare Konversionseffizienz  $\eta_k$  an, wieviel der elektrischen Leistung in Lichtleistung umgewandelt wird. Sie kann folgendermaßen berechnet werden:

$$\eta_k = \frac{P_0}{IU}, \quad (4)$$

wobei  $U$  die an der Diode angelegte Spannung und  $I$  der Stromfluss durch die Diode ist.

## 1.2 Laserdioden

### Physikalische Grundlagen

Wie bereits im Abschnitt 1.1 beschrieben wurde, können Elektronen an der p-n-Grenzschicht strahlend rekombinieren. Für die Lasertätigkeit der Diode sind dabei folgende Verlustmechanismen relevant: Ein Photon, das emittiert wird, kann im Halbleitermaterial absorbiert werden und dabei wieder ein Elektron-Loch-Paar erzeugen. Weiterhin können die Photonen, wie in der LED, die Diode als spontanes Fluoreszenzlicht verlassen, sie sind somit für den Lasing-Prozess verloren. Photonen können aber auch durch *stimulierte Emission* die Rekombination eines weiteren Elektron-Loch-Paares auslösen. Dadurch entsteht ein weiteres Photon, das zu dem auslösenden Photon *kohärent* ist, d. h. die beiden Photonen sind in Bezug

auf Wellenvektor, Frequenz, Phase und Polarisation identisch. Ist die stimulierte Emission wahrscheinlicher als die Verluste, setzt Lasertätigkeit ein. Dies ist genau dann der Fall, wenn sich an der Grenzschicht im p-Teil mehr Elektronen im Leitungsband befinden als im Valenzband. Um diesen Zustand der *Besetzungsinversion* zu erreichen, muss ein bestimmter Strom, der sogenannte *Schwellenstrom*  $I_s$ , fließen. Um bei einer LED Lasertätigkeit zu erzielen, müsste ein Strom von ca.  $I_s = 1\text{ A}$  aufgewendet werden. Ströme dieser Größenordnung führen jedoch zur Zerstörung des Bauelementes. Beim Aufbau einer Laserdiode wird daher eine sogenannte Halbleiter-Heterostruktur verwendet, die zu einer höheren Elektronendichte an der Grenzschicht führt und somit den Schwellenstrom um etwa einen Faktor 20-100 reduziert. Die stimulierte Emission beschleunigt den Prozess der strahlenden Rekombination, daher ist der Wirkungsgrad einer Laserdiode oberhalb des Schwellenstroms immer deutlich höher als der einer vergleichbaren LED. Für die Laserdiode oberhalb der Schwelle gilt näherungsweise folgender Zusammenhang zwischen Ausgangsleistung  $P_0$  und Strom  $I$  durch die Diode:

$$P_0 = \eta_d(I - I_s) \frac{h\nu}{e}, \quad (5)$$

wobei  $\eta_d$  der *differentielle Wirkungsquerschnitt* der Diode oberhalb des Schwellstroms  $I_s$  ist.

### 1.3 Eigenschaften von Laserdioden

#### Strahlungscharakteristik von Laserdioden

Für viele Anwendungen ist es wichtig, dass der Laserstrahl eine geringe Divergenz aufweist. Wie in Abb. 1 gezeigt, kommt es aufgrund der geringen Abmessungen der aktiven Zone ( $1\text{ }\mu\text{m} \times 3\text{ }\mu\text{m}$ ) zu einer beugungsbedingten Divergenz des Strahls von typ.  $\theta_{\perp} \simeq 30^\circ$  und  $\theta_{\parallel} \simeq 10^\circ$ . Mit einer Linse im Abstand ihrer Brennweite von der Laserdiodenfacette (Vorderfläche) kann der Strahl kollimiert werden (d.h. das Lichtbündel weitet sich im wesentlichen hinter der Linse nicht mehr auf). Aufgrund der unterschiedlichen Divergenzen in den zwei Achsen ergibt sich ein elliptisches Strahlprofil.

Durch die Brechungsindexänderung beim Übergang von der aktiven Zone zur Luft wird ein Teil der Photonen in den Laser zurückreflektiert. Die vordere und hintere Facette (Grenzfläche) mit einem Abstand von typischerweise  $250\text{ }\mu\text{m}$  wirken deshalb als Resonatorspiegel mit niedriger Reflektivität. Die Rückreflexion ermöglicht erst die Lasertätigkeit durch stimulierte Emission.

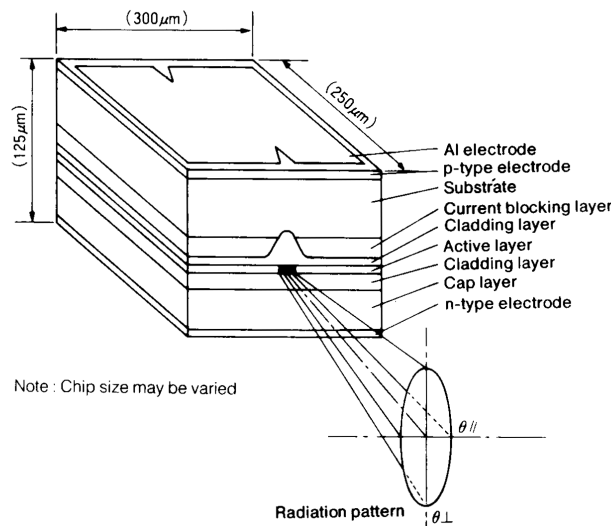


Abbildung 1: Aufbau und Strahlungscharakteristik von Laserdioden

#### Inbetriebnahme einer Laserdiode

Abb. 2 zeigt den mechanischen Aufbau einer Laserdiode. Unterhalb der rückseitigen hochreflektierenden Facette des Lasers befindet sich eine Photodiode. Sie liefert eine zur Lichtleistung proportionale Strom-

stärke und kann zu deren Kontrolle verwendet werden (im Experiment nicht benutzt). Des Weiteren ist die Anschlussbelegung der verwendeten Laserdiode DL-3149-056 gezeigt.

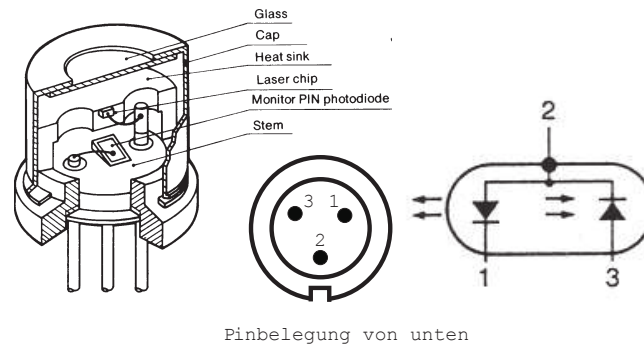


Abbildung 2: Mechanischer Aufbau und Pinbelegung der Laserdiode. Die Laserdiode liegt zwischen Pin 1 und 2, die Monitordiode zwischen Pin 2 und 3.

### Das Reflexionsgitter

Zur quantitativen Ermittlung von spektralen Linienbreiten wird ein Reflexionsgitter verwendet. Das Licht aus der Laserdiode wird wellenlängenabhängig gebeugt und die Breite des so aufgespaltenen Spektrums kann ermittelt werden. Das im Praktikum verwendete Gitter ("blazed grating") hat die Eigenschaft, alle Beugungsordnungen außer der ersten zu unterdrücken (siehe Abb. 3).

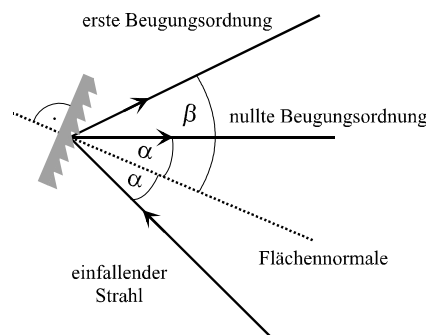


Abbildung 3: Beugungsgitter und Beugungswinkel

Die Beugung am Reflexionsgitter gehorcht folgender Gleichung:

$$\sin \alpha - \sin \beta = \frac{k\lambda}{d}, \quad (6)$$

wobei  $k$  die Beugungsordnung,  $d$  die Gitterkonstante und  $\alpha$  und  $\beta$  der Ein- bzw. Ausfallswinkel ist.

### Testfragen zur Vorbereitung

- Durch welchen Prozess wird in LEDs und Laserdioden der elektrische Strom in Licht verwandelt?
- Was ist der Unterschied zwischen Licht aus einer LED (oder Glühlampe) und Laserlicht?
- Wie heißen die verschiedenen Wirkungsgrade für LEDs und Laserdioden und wie sind sie definiert?
- Warum ist der Wirkungsgrad von Laserdioden höher als der von LEDs und weshalb kommt dieser Effekt erst über dem Schwellenstrom zum Tragen?

- Wie sieht der Lichtstrahl aus einer Laserdiode aus und was kann man tun um ihn zu kollimieren?
- Welche Anschlüsse hat ein typisches Laserdiodengehäuse?
- Wie funktioniert ein Beugungsgitter?

## 2 Versuchsdurchführung und Ausarbeitung

### 2.1 Versuchszubehör

- LED rot, LED blau, Laserdiode im Gehäuse
- Stromquelle Lasernet, Powermeter TJ96 mit Messkopf und aufschraubbarem Abschwächer
- Grundplatte mit Lineal, Maßband, div. Schrauben, 2 Einfachsockel, 2 Doppelsockel, div. Stangen, div. Halter für opt. Elemente
- Spalt auf Stange montiert, Beugungsgitter, Kollimatorlinse, Linse  $f = +25 \text{ mm}$
- Labornetzgerät, 2 Digitalmultimeter, Schiebewiderstand  $330 \Omega$

### 2.2 Strom-Spannungskennlinie der Leuchtdiode

#### Durchführung

Wir messen für zwei Leuchtdioden verschiedener Farbe (rot, blau) jeweils den Durchlassstrom als Funktion der angelegten Spannung. Den Versuchsaufbau dazu zeigt Abb. 4. Durch Variation der Versorgungsspannung (0-30 V) wird jeweils der Strom und die Spannung an der LED geändert. Der  $330 \Omega$  Widerstand dient dabei zur Strombegrenzung. Pro LED sind ca. 15 sinnvoll verteilte Messpunkte aufzunehmen.

**ACHTUNG! Maximalen Leuchtdiodenstrom  $I_{\max} = 40 \text{ mA}$  nicht überschreiten!**

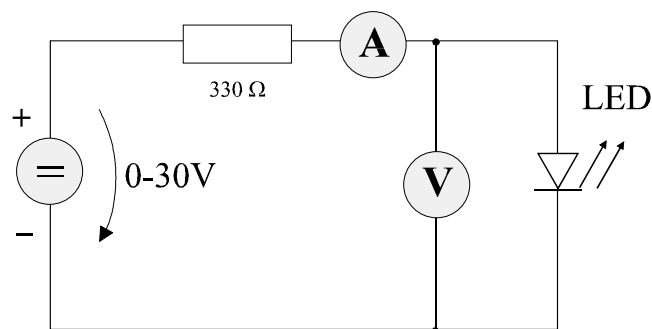


Abbildung 4: Elektrische Schaltung zur Aufnahme der Strom-Spannungskennlinie einer Leuchtdiode.

#### Ausarbeitung

Stelle die aufgenommenen Strom-Spannung-Werte graphisch dar (Fehlerkreuze!). Da oberhalb der Knickspannung ein annähernd linearer Zusammenhang zwischen Strom und Spannung besteht (diese Näherung ist bei der roten LED besser als bei der blauen LED) kann man diesen Teil der Kennlinie durch lineare Regression bis zur Spannungsachse fortsetzen. So erhält man einen Näherungswert für  $U_d$  als Schnittpunkt mit der Spannungsachse. Berechne mit Hilfe dieses Spannungswerts die Wellenlänge des emittierten Lichtes. Verwende dazu näherungsweise folgenden Zusammenhang

$$eU_d = E_{\text{gap}} = h\nu. \quad (7)$$

Diskutiere die Ergebnisse.

## 2.3 Strom-Leistungskennlinie der LED

### Durchführung

Die Kennlinie soll für die rote Leuchtdiode gemessen werden. Abb. 4 zeigt den elektrischen Aufbau, Abb. 5 den optischen Aufbau. Verwende den optischen Tisch zur Positionierung der Komponenten. Da die Emission einer Leuchtdiode sehr divergent ist, aber möglichst die ganze abgestrahlte optische Leistung gemessen werden soll, wird das Licht der LED mit einer  $f = 25\text{ mm}$  Sammellinse auf die Photodiode des opt. Leistungsmeßgeräts (Powermeter TJ96) abgebildet. Die Kollimation geschieht durch Variation der Entfernung zwischen LED und Linse. Da die spontane Emission relativ schwach ist, verwenden wir den opt. Messkopf des Leistungsmessgeräts ohne den 1:1000-Abschwächer. Stelle durch Variation der Versorgungsspannung unterschiedliche Ströme von 0 - 40 mA ein und miss die entsprechende optische Leistung. Es sind ca. 15 Messpunkte aufzunehmen.

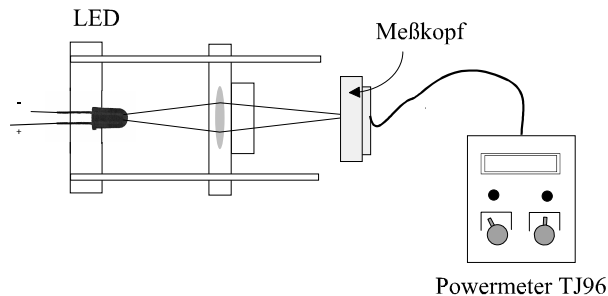


Abbildung 5: Optischer Aufbau zur Aufnahme der Strom-Leistungskennlinie einer Leuchtdiode.

### Ausarbeitung

Erstelle eine Tabelle der Strom-Leistungskennlinie und stelle die Kennlinie graphisch dar (Fehlerkreuze!). Bestimme die externe Quanteneffizienz  $\eta_{\text{ext}}$  unter Verwendung der zuvor bestimmten Wellenlänge. Berechne außerdem die Konversionseffizienz  $\eta_k$  für den Diodenstrom  $I = 40\text{ mA}$ . Diskutiere die Ergebnisse.

## 2.4 Strom-Leistungskennlinie der Laserdiode

### Durchführung

Die im Praktikum verwendete Laserdiode emittiert rotes Licht um  $\lambda = 670\text{ nm}$ . Wir betreiben sie mit der Stromquelle, die bereits eine Anzeige der Diodenstroms (in mA) besitzt. Durch Veränderung des Stromes kann die optische Ausgangsleistung der Laserdiode zwischen 0 und 5 mW eingestellt werden.

**ACHTUNG! Maximalstrom von 45 mA niemals überschreiten! Dies führt zur Zerstörung der Laserdiode!**

Die Emission einer Laserdiode ist im allgemeinen sehr divergent aufgrund der sehr kleinen Abmessungen der aktiven Zone. Deshalb ist eine Kollimation mit Hilfe einer kurzbrennweitigen Linse notwendig. Die Brennweite unserer Linse beträgt 4,5 mm. Oftmals sind Kollimatorlinsen als Gradientenindexlinsen (GRIN-lens) ausgeführt, d.h. sie besitzen einen Brechungsindex der radial variiert und deshalb fokussierend wirkt, wie eine gewöhnliche sphärisch geschliffene Linse.

Die Laserdiode wird zunächst am optischen Tisch befestigt (mit Hilfe einer Befestigungsstange (engl.: post), eines Halters (post holder) und einer Grundplatte (base plate)). Danach werden die vier ca. 35 mm langen Stangen am Diodenhalter montiert. Die Kollimatorlinse kann nun entlang dieser Stangen derart verschoben werden, dass das transmittierte Licht die Linse als paralleles Strahlenbündel (möglichst kleine Divergenz) verlässt. Es hilft, wenn die Laserdiode bei der Kollimation im Laserbetrieb ist. Zur Messung der optischen Leistung wird der Messkopf des Leistungsmessgeräts mit einem 1:1000-Abschwächer bestückt. Abbildung 6 zeigt schematisch den Aufbau. Es sollen ca. 15 Messpunkte aufgenommen werden.

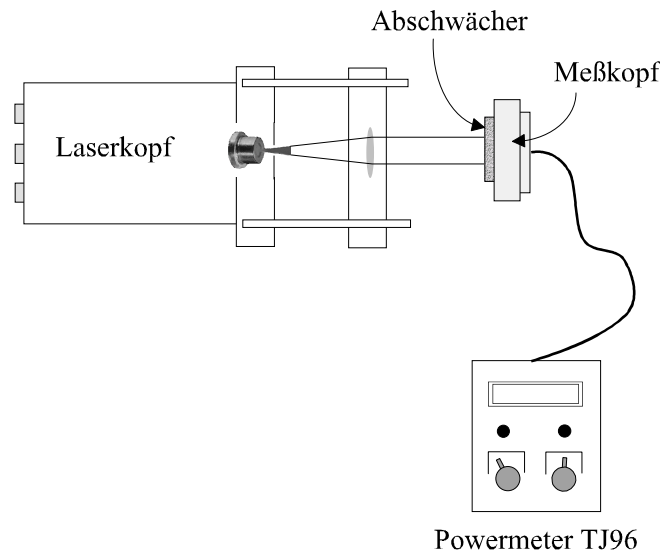


Abbildung 6: Optischer Aufbau zur Aufnahme der Strom-Leistungskennlinie einer Laserdiode.

### Ausarbeitung

Erstelle eine Tabelle der Strom-Leistungs-Messpunkte. Stelle die Kennlinie graphisch dar (opt. Leistung als Funktion des Laserdiodenstromes aufgetragen, Fehlerkreuze!). Führe eine lineare Regression oberhalb bzw. unterhalb des Abknickpunkts der Kennlinie durch. Ermittle den Schwellenstrom  $I_s$  der Laserdiode aus dem Schnittpunkt der Regressionsgeraden. Berechne mit Hilfe der linearen Regression im zweiten Teil der Kennlinie (Diodenstrom  $I > I_s$ ) den differentiellen Wirkungsgrad  $\eta_d$  der Laserdiode. Vergleiche diesen Wert mit der zuvor bestimmten externen Quanteneffizienz der roten LED. Diskutiere die Ergebnisse.

## 2.5 Bestimmung der Linienbreite der spontanen Fluoreszenzstrahlung einer Laserdiode

### Durchführung

Die Laserdiode wird unterhalb des Schwellenstromes  $I_s$  (siehe vorheriges Experiment) betrieben, mit der Strahlung wird ein Gitter beleuchtet (siehe Abbildung 7). Das Gitter hat eine Strichzahl von 1200 Strichen/mm und wird so aufgestellt, dass der direkte Rückreflex beinahe antiparallel zum einfallenden Strahl zurückgeworfen wird. (Aus Stabilitätsgründen sollte der Rückreflex auf der Diodenfassung ca. 2-3 mm außerhalb der Laserdiode liegen). Die 1. Beugungsordnung des Gitters schließt nun annähernd den Winkel  $\beta$  mit dem auf das Gitter einfallenden Strahl ein. Der Aufbau ist so zu justieren, dass das gebeugte Licht symmetrisch um die Mitte des am Tischende montierten Lineals liegt (vergleiche dazu Abbildung 7). Wird die gebeugte Strahlung in einer Entfernung von ca. 50 cm vom Gitter beobachtet und qualitativ mit der verglichen, die auf das Gitter einfällt, so stellt man eine starke räumliche Verbreiterung fest. Da der Strahl im Vorversuch kollimiert wurde muss diese Verbreiterung von der relativ großen spektralen Linienbreite der spontanen Emission unterhalb der Schwelle herrühren die am Gitter in einen großen Winkelbereich gebeugt wird.

Zur quantitativen Bestimmung der Linienbreite wird ein Spalt auf einem Halter direkt vor dem Messkopf des Leistungsmessgerätes montiert. Dieser Spalt schneidet einen schmalen Streifen aus dem relativ breiten Intensitätsmuster. Durch gemeinsames Verschieben von Spalt und Messkopf entlang des Lineals kann nun die durch den Spalt fallende Leistung entlang der Querachse als Funktion des Ortes gemessen werden.

Steigere nun den Strom der Laserdiode über den Schwellenwert. Sobald der Laserprozess einsetzt, sollte der breite Untergrund nicht mehr heller werden, sondern nur ungefähr im Zentrum ein neuer heller Punkt auftauchen, der im wesentlichen die Breite des kollimierten Strahles hat. Dies bedeutet, daß die Divergenz dieses Anteils auch nach Beugung am Gitter klein gegen die schon vorher vorhandene Divergenz ist und

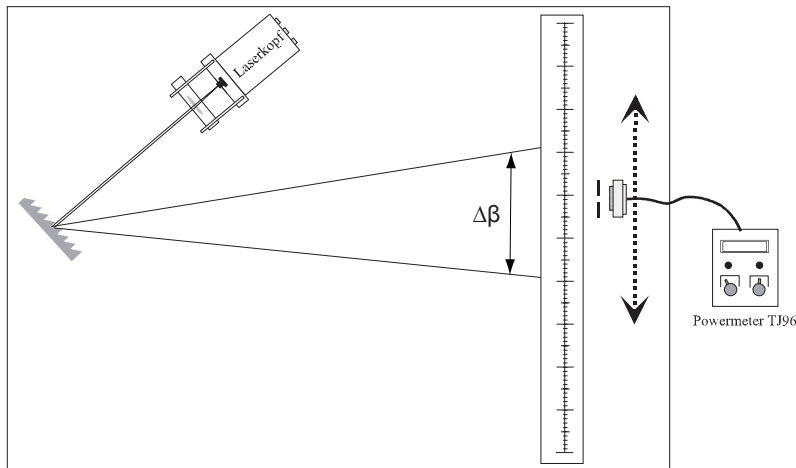


Abbildung 7: Versuchsaufbau zur Messung der Linienbreite der spontanen Emission einer Laserdiode.

daher die ins Zentrum emittierte Strahlung eine sehr kleine spektrale Breite haben muss. Das Licht ist demnach sehr *monochromatisch*, eine typische Eigenschaft von Laserlicht. Demonstriere diesen Effekt dem Betreuer.

### Ausarbeitung

Bestimme die spektrale Linienbreite  $\Delta\lambda$  des spontan emittierten Lichtfeldes der Laserdiode. Erstelle dazu zunächst eine Tabelle der ortsabhängigen durch den Spalt transmittierten Leistung aus der 1. Beugungsordnung mit ca. 12 Messpunkten. Stelle die Daten graphisch dar (transmittierte Leistung als Funktion des Ortes). Bestimme dann den Abstand der Punkte mit halber Maximalleistung bei der zuvor gezeichneten Kurve (Halbwertsbreite, engl. FWHM “Full Width at Half Maximum“) und berechne daraus den Öffnungswinkel. Die Linienbreite kann man durch Differenzieren der Beziehung (6) nach dem Ausfallswinkel und die Substitution  $(\partial\lambda)/(\partial\beta) \simeq (\Delta\lambda)/(\Delta\beta)$  näherungsweise bestimmen. Beschreibe qualitativ den Vergleich des Spektrums der spontanen Emission mit dem der stimulierten Emission mithilfe des Gitters. Diskutiere die Ergebnisse.

## 3 Weiterführende Fragen

- Warum haben die  $U$ - $I$ -Kennlinien der LEDs im annähernd linearen Bereich unterschiedliche Steigung?
- Wie erklärt sich der Unterschied in den Steigungen der Strom-Leistungs-Kennlinie für Ströme kleiner bzw. größer als der Schwellstrom  $I_s$ ?
- Warum kann man die Linienbreite der Laserdiode über der Schwelle nicht mit dem Gitter bestimmen?