

Experiment E110 - Laserdiode

Robin Hoffmann*, Arik Bürkle†, Valentin Ertl‡

10. Juni 2025

Zusammenfassung

In diesem Experiment werden die Charakteristiken einer Laserdiode bestimmt. Dabei wird für die vorliegende Diode eine leichte Veränderung des Schwellstroms und der Effizienz, durch Veränderung der Temperatur, beobachtet. Der Schwellstrom dieser Diode liegt bei etwa 14,2(5) mA, und es wird eine Effizienz von etwa 1,07(1) pW für verschiedene Temperaturen gemessen. Beim Frequenzspektrum der Diode konnte eine Abhängigkeit der Frequenz von der Temperatur festgestellt werden, nämlich $-162(10)$ GHz/K, und es wird gezeigt, dass es zu Phasensprüngen der Lasermoden kommt.

*robin.hoffmann@student.uibk.ac.at

†arik.buerkle@student.uibk.ac.at

‡valentin.ertl@student.uibk.ac.at

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1
2 Theorie	2
2.1 Optischer Resonator	2
2.2 Funktion einer Laserdiode	3
2.2.1 Diode	3
2.2.2 Laserprozess der Diode	4
3 Versuchsaufbau und -durchführung	7
3.1 Versuchsaufbau	7
3.2 Versuchsdurchführung	9
3.2.1 Messung der Leistungscharakteristik	9
3.2.2 Messung der Frequenzcharakteristik	9
4 Ergebnisse	10
4.1 Bestimmung der Leistungscharakteristik	10
4.2 Auswertung der Frequenzcharakteristiken	11
5 Diskussion	15

1 Einleitung

Diodenlaser sind aus der modernen Physik und Technologie nicht mehr wegzudenken. Sie gehören zu den vielseitigsten und am weitesten verbreiteten Laserquellen in zahlreichen Anwendungen, von der Telekommunikation bis hin zur Materialbearbeitung. Ihre kompakte Bauweise, Effizienz und einfache Handhabung machen sie zu einem unverzichtbaren Werkzeug in verschiedenen Bereichen der Wissenschaft und Industrie. Abbildung 4 zeigt die schematische Struktur einer Laserdiode. Der Diodenlaser basiert auf dem Prinzip der Elektronen-Loch-Rekombination in einem Halbleitermaterial, das typischerweise aus einer p-dotierten und einer n-dotierten Schicht besteht. Durch Anlegen einer Spannung an die p-n-Übergangsregion wird ein Strom von Elektronen und Löchern injiziert, was zur Emission von Photonen führt. Diese Photonen werden dann durch Totalreflexion zwischen den beiden Endflächen des Lasermediums verstärkt, wodurch ein kohärenter Laserstrahl erzeugt wird. Durch die Änderung der Stromstärke oder der Temperatur des Halbleitermaterials kann die Ausgangsleistung und Wellenlänge des Laserstrahls präzise kontrolliert werden [1]. Die detaillierte Erklärung der Funktionsweise eines Diodenlasers ist in Abschnitt 2 niedergeschrieben. Ziel dieses Versuchs ist es die Diodenlasercharakteristika genauer zu untersuchen. Die Leistungscharakteristik wird betrachtet, indem wir die Abhängigkeit der Ausgangsleistung vom Laserstrom aufzeichnen. Außerdem spielt die Frequenzcharakteristik eine wichtige Rolle. Diese kann analysiert werden, indem man die Abhängigkeit des Emissionsspektrums der Laserdiode von Strom und Temperatur untersucht [2]. Die genaue Versuchsdurchführung wird in Abschnitt 3.2 erläutert.

Diodenlaser sind heute in einer Vielzahl von Anwendungen weit verbreitet, darunter in der optischen Datenspeicherung, der medizinischen Bildgebung, der Materialbearbeitung und der Telekommunikation. Ihre kompakte Bauweise, Energieeffizienz und Zuverlässigkeit haben sie zu einem unverzichtbaren Werkzeug in der modernen Wissenschaft und Technologie gemacht [3].

2 Theorie

In diesem Abschnitt wird die Theorie der Laserdiode und des optischen Resonators zugrundegelegt. Dazu wird die Funktionsweise der Diode erklärt sowie die daraus resultierenden Eigenschaften.

2.1 Optischer Resonator

Als einen optischen Resonator bezeichnet man ein Modul in der Laserphysik, welches Licht anhand der Wellenlänge filtern kann. Er besteht aus zwei Spiegeln, die gegenüber voneinander positioniert sind, wie in Abbildung 1 dargestellt. Licht, das von außen eintritt, wird im Resonator hin und her reflektiert. Dabei tritt immer etwas Licht an den Spiegeln aus, da diese nicht perfekt reflektieren. Dabei hat das austretende Licht immer eine unterschiedliche Phase ϕ , die durch Gleichung 1 gegeben ist.

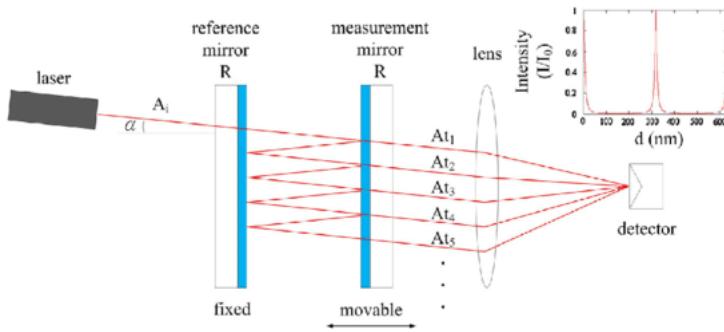


Abbildung 1: Schmatische Darstellung eines FPI. Zu sehen sind zwei Spiegel, in welchen das einfallende Licht hin und her reflektiert wird. Der rechte Spiegel besitzt einen geringeren Brechungsindex, wodurch Licht durchgelassen wird. Ausfallendes Licht wird über eine Linse zu einem Strahl kollimiert. [4].

$$\phi = 2\pi \frac{2L}{\lambda} \quad (1)$$

Dabei ist L der Abstand zwischen den Spiegeln und λ die Wellenlänge des Lichts. Ist die Phase nun ein ganzzahliges Vielfaches von 2π , so kommt es zu keiner Phasenverschiebung beim Ausstreuen des Lichts und dieses interfeiert konstruktiv. Dies bedeutet, dass es in einem gewissen Abstand zu konstruktiver Interferenz kommt, was durch die Freie Spektralrange (FSR) beschrieben wird, wie in Gleichung 2 dargestellt. Dabei ist c_m die Lichtgeschwindigkeit im Medium.

$$FSR = \frac{c_m}{2L} \quad (2)$$

Weicht nun die Wellenlänge leicht von der Resonanz ab, dann kommt es bei jedem Durchlaufen des Resonators zu einer kleinen Phasenverschiebung. Diese sorgt dafür, dass es nach einer gewissen Anzahl von Reflexionen zu destruktiver Interferenz kommt. Da jedoch das austretende Licht proportional von der Intensität innerhalb des Resonators abhängt, tritt mehr Licht bei den ersten Reflexionen aus als bei späteren. Dies bedeutet, dass das Licht nicht vollständig zerstört wird. Diese Eigenschaft wird durch die Finesse beschrieben. Diese beschreibt das Verhältnis der

Breite zum Abstand der Peaks. 3.

$$F = \frac{\Gamma_{FWHM}}{FSR} \quad (3)$$

Dabei beschreibt Γ_{FWHM} die Breite des Peaks, bei der die Intensität die Hälfte des Maximums erreicht. Dadurch entsteht für jeden optischen Resonator eine charakteristische Kurve, die unterschiedlich aussieht. In Abbildung 2 wird eine solche Kurve für verschiedene Finessen dargestellt. Anhand der Grafik kann man erkennen, dass man mittels eines FPI die Frequenz des Lichts sehr

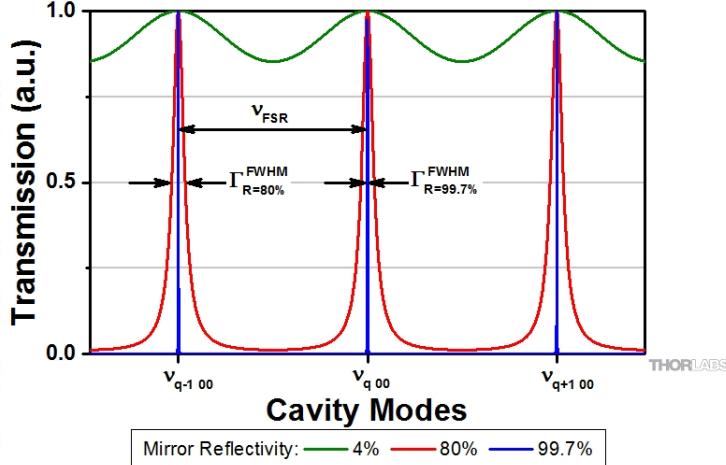


Abbildung 2: Darstellung des Frequenzprofils eines FPI für unterschiedliche Reflexionswerte der Spiegel, zu erkennen eine Abhängigkeit der Peak-Breite vom Reflexionskoeffizienten, und eine Periodizität der Peaks, gegeben durchs FSR. [4].

spezifisch filtern kann.

2.2 Funktion einer Laserdiode

Eine Laserdiode ist eine Erweiterung des optischen Resonators durch das Einsetzen einer Diode innerhalb des Resonators. Sie nutzt die lichtemittierenden Eigenschaften der Diode, um einen Laser zu erzeugen. Im folgenden Abschnitt wird erklärt, wie eine Diode funktioniert und wie man sie nutzen kann, um einen Laser zu erzeugen.

2.2.1 Diode

Eine Diode besteht aus einem Halbleitermaterial, bei dem sich die Fermi-Energie zwischen einer Bandlücke befindet. Diese Bandlücke ist jedoch nicht sehr groß, weshalb Elektronen teilweise im oberen Band vorkommen und im unteren Band fehlen. Bei einer Diode wird nun in das Material eine p- und n-dotierte Schicht eingefügt, was bedeutet, dass dort Atome mit entweder mehr Elektronen (n) oder weniger Elektronen (p) in die Kristallstruktur eingefügt werden. Dadurch kann man forcieren, dass sich Elektronen im oberen Band befinden (n-Dotierung) oder dass im unteren Band ein Loch entsteht (p-Dotierung). Schaltet man nun eine p- und n-Schicht nebeneinander, so erhält man eine Diode (siehe Abbildung 3). Dabei entsteht eine Übergangsschicht zwischen dem p- und n-Teil, wo Elektronen aus dem höheren Band in die Löcher des niedrigeren Bands fallen. Dadurch entsteht eine Sperrschiert. Im n-dotierten Teil der Diode befinden sich weniger

Elektronen als Protonen, wodurch er positiv geladen wird. Im p-Teil befinden sich mehr Elektronen als Protonen, er ist dort negativ geladen. Innerhalb der Sperrsicht entsteht ein elektrisches

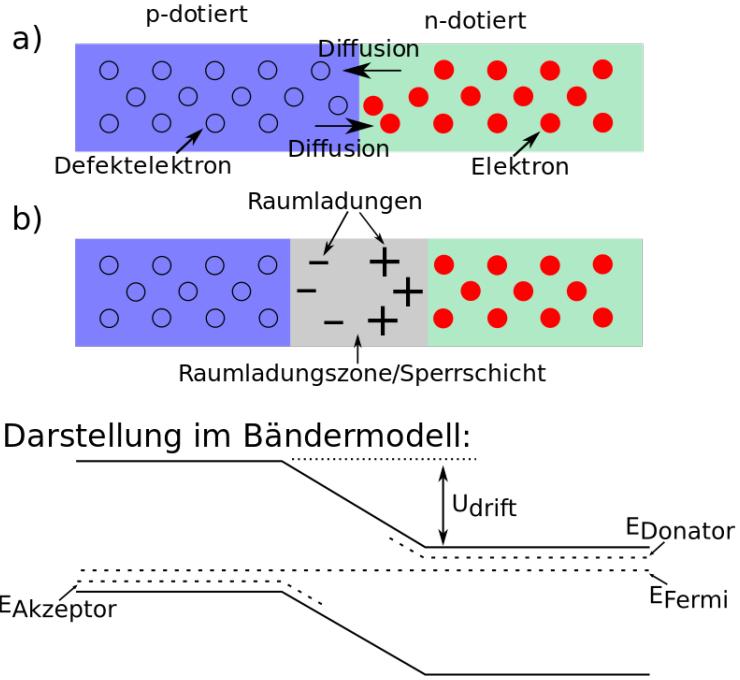


Abbildung 3: Aufbau eines p-n Übergangs einer Diode. In a) sind die Schichten durch die Dotierung eingetragen, im blauen Bereich gibt es Löcher für Elektronen, im grünen sind mehr besetzte Elektronen. In b) ist die Sperrsicht zu erkennen, welche sich zwischen dem p-n Übergang bildet. Dort entsteht eine Raumladungszone. Darunter ist die entstehende Bandstruktur dargestellt. [5].

Feld, welches verhindert, dass weitere Elektronen von der n-dotierten Schicht in die p-dotierte Schicht wandern können. Das entstehende elektrische Feld sorgt auch dafür, dass kein Strom fließt, wenn eine Spannung entgegen diesem Feld angelegt wird und diese nicht groß genug ist, um es zu kompensieren. Wird jedoch eine Spannung in die andere Richtung angelegt, kann Strom fließen. Nun springen Elektronen bei der Übergang zwischen n- und p-Schicht vom oberen Band auf das untere Band. Dabei wird Energie frei, die dem Unterschied in der Bandlücke entspricht. Diese Energie wird in Form eines Photons freigesetzt, welches diese Energie hat. Da die Bänder durch ein quasi-kontinuierliches Spektrum beschrieben werden können, kann die Energie etwas variieren, was zu einem Frequenzprofil führt, das durch eine Gaußkurve beschrieben werden kann (siehe Abbildung 11).

2.2.2 Laserprozess der Diode

Durch einfallende Photonen kann es zur stimulierten Emission kommen, bei der ein Elektron im oberen Band angeregt wird, in das untere Band zu springen. Dadurch entsteht ein weiteres Photon, das kohärent zum einfallenden Photon ist. Das bedeutet, dass es dieselbe Phase ϕ , dieselbe Wellenzahl \vec{k} und dieselbe Wellenlänge λ hat. Trifft das Photon jedoch auf ein Elektron im niedrigeren Band, kann es absorbiert werden. Durch den Einbau der Diode in einen optischen Resonator, wie in Abbildung 4 dargestellt, kann ein Laser erzeugt werden. Durch den Resonator

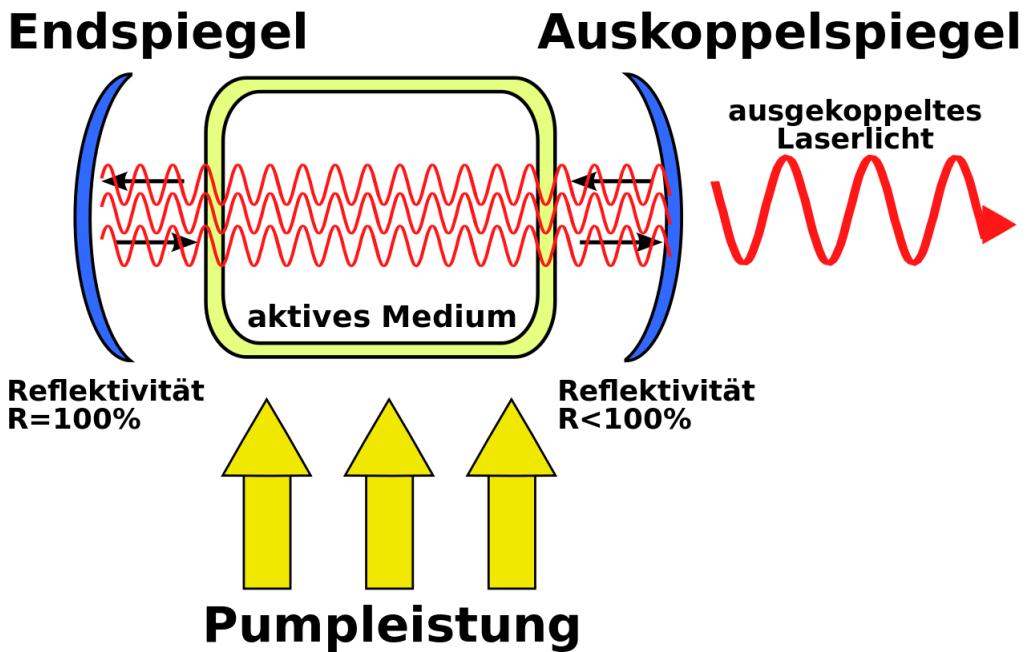


Abbildung 4: Aufbau einer Laserdiode bestehend aus einem FPI, einem aktiven Medium, welches das reflektierte Licht verstärkt, einem angelegten Pumpstrom, um die Besetzungs-Inversion des Mediums zu erhalten. Aus dem Aufbau wird dann kohärentes Laserlicht entkoppelt [6].

wird das Licht nun wieder auf die Diode reflektiert. Dies führt dazu, dass es dort zu stimulierter Emission oder Absorption kommen kann. Legt man nun einen Pumpstrom an, der dafür sorgt, dass sich mehr Elektronen im angeregten Zustand befinden, und ist der Pumpstrom nun genügend hoch (Schwellenstrom), so kann es wahrscheinlicher sein, dass ein Photon emittiert wird als absorbiert. Diesen Zustand nennt man Laserschwelle. Ist diese Schwelle erreicht, werden mehr Photonen emittiert als absorbiert. Dies löst eine Kaskade aus, bei der immer mehr kohärente Photonen entstehen. Dieser Prozess ist als Lasern bekannt. Durch den optischen Resonator wird nicht nur das Licht der Diode auf dieses zurück reflektiert, sondern er filtert weiterhin die Frequenzen, wie in Abschnitt 2.1 erklärt. Dies führt zu dem im 5 dargestellten Spektralprofil der Laserdiode, wo das Spektrum der Diode eine Einhüllende Stärke bedeutet und der Resonator verschiedene Frequenzmoden einführt. Als Verstärkungsprofil bezeichnet man genau die Frequenzen, die über dem Schwellwert liegen und bei denen ein Lasereffekt auftritt. Veränderungen in der Diode, z.B. Temperaturänderungen, können dazu führen, dass sich dieses Profil ändert, indem sich der Diodenhalbleiter ausdehnt oder die Bänder verschoben werden. Durch solche Veränderungen kann es zum Phänomen des Modensprungs kommen, bei dem sich abrupt die angesteuerte Mode des Lasers ändert, was zu einem Sprung im Spektrum führt.

Die Effizienz einer Diode wird durch Gleichung 4 dargestellt. Dabei beschreibt P die gemessene Leistung des Lasers und I den angelegten Strom.

$$\eta = \frac{P}{I} \quad (4)$$

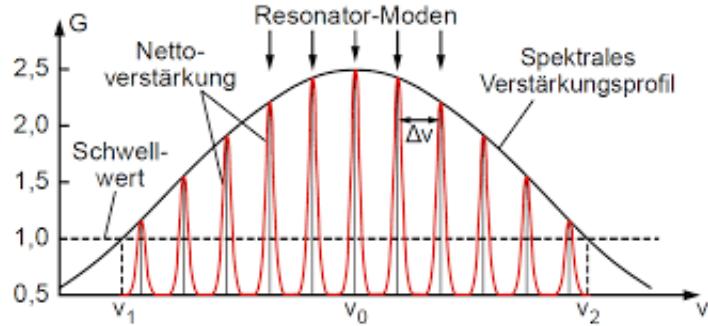


Abbildung 5: Darstellung des Leistungsprofils einer Laserdiode. In Schwarz ist das Einhüllende Spektrum der Diode zu sehen. In Rot sind die Intensitäten der einzelnen Lasermoden eingezeichnet, die jeweils $\Delta\nu$ voneinander entfernt sind. Gestrichelt ist der Schwellwert eingezeichnet. Für alle Werte über diesem kann es zur Anregung der Lasermode kommen. [7].

Nun stellt sich die Frage, wie viele Elektronen in Photonen umgewandelt werden. Dies kann durch die differentielle Quanteneffizienz, wie in Gleichung 5 dargestellt, beschrieben werden. Dabei ist e die Ladung eines Elektrons, h das Plancksche Wirkungsquantum, λ die Wellenlänge des entstehenden Lichts und c die Lichtgeschwindigkeit.

$$\eta_q = \eta \frac{\lambda e}{hc} \quad (5)$$

3 Versuchsaufbau und -durchführung

Die folgenden Textabschnitte veranschaulichen den Versuchsaufbau und erklären die exakte Datenaufnahme bzw. Durchführung des Versuchs.

3.1 Versuchsaufbau

Der Aufbau des Versuchs ist in Abbildung 7 dargestellt. Der durch die Laserdiode (1) erzeugte Laser mit einer Wellenlänge von $\lambda = 670 \text{ nm}$, welcher durch einen Stromtreiber (nicht zu sehen auf Abbildung 7) betrieben wird, bei dem man die Stromstärke von 0 mA bis 40 mA variieren kann, passiert anfangs zwei Umlenkspiegel (2). Die Laserdiode (1) mit der integrierten Kollimatorlinse befindet sich in einem temperaturstabilisierten Gehäuse auf dessen Dach man die Temperatur der Laserdiode regeln kann. Die Temperatur wird mit einem Temperatursensor gemessen und über einen Regelkreis auf einen Sollwert stabilisiert. Um die Ausgangleistung direkt messen zu können, diente ein Powermeter, dass man immer in den Laserstrahl einschieben konnte (nicht zu sehen auf Abbildung 7). Nachdem das kollimierte Licht über die zwei Ausrichtungsspiegel (2) gelenkt wurde, trifft es dann auf das Fabri-Perot Interferometer (3), bei dem ein Spiegel auf einem Piezo montiert ist. Dieser Piezo wird von einem Hochspannungsverstärker angesteuert, der wiederum von einem Frequenzgenerator mit einer Dreiecksspannung angetrieben wird. Das vom Interferometer durchgelassene Laserlicht trifft dann, nachdem es eine Fokussierungslinse (4) passiert hat auf eine Photodiode (5), welche die Intensität des Lichts aufzeichnet. Um das durch die Photodiode (5) aufgenommene Signal verarbeiten zu können, wird ein Oszilloskop verwendet, welches in Abbildung 8 zu sehen ist. Die Anzeige des Oszilloskops ist mit der Dreiecksspannung synchronisiert. Das Laserspektrum wird mehrmals auf dem Bildschirm wiederholt, einmal für jeden freien Spektralbereich des FPI (3), der während der Abtastung durchlaufen wird. Der Versuchsaufbau wird zur besseren Veranschaulichung auch noch einmal in Grafik 6 skizziert. [2]

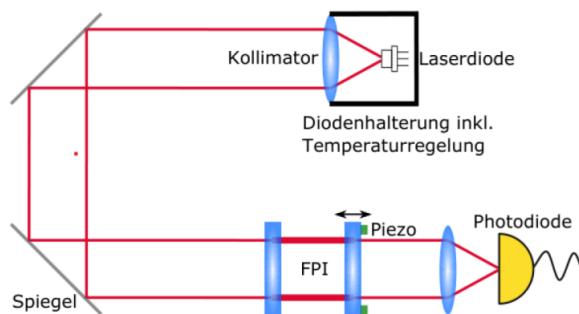


Abbildung 6: Skizze des Versuchsaufbaus [2]

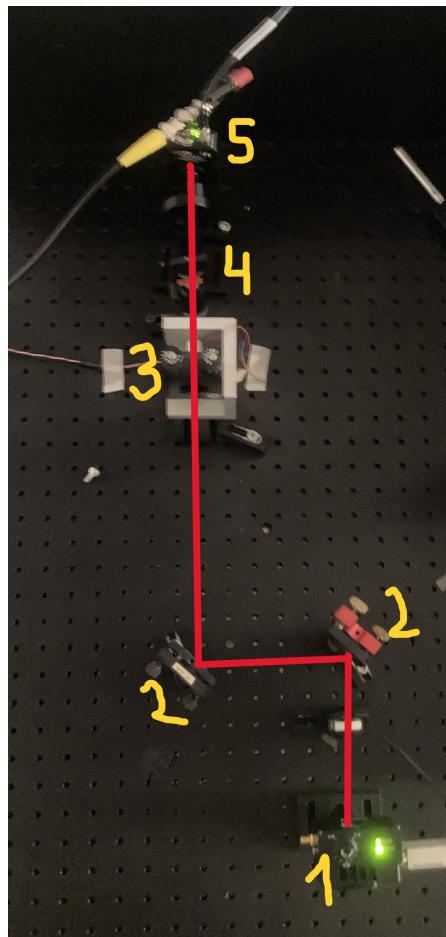


Abbildung 7: Echtdarstellung des Versuchsaufbau im Praktikumsraum. Folgende Komponenten werden gezeigt: (1) Laserdiode mit Kollimatorlinse im temperaturstabilisierten Gehäuse; (2) Umlenkspiegel; (3) Fabri-Perot Interferometer mit integrierten Piezo; (4) Fokussierungslinse; (5) Fotodiode zur Messung der Lichtintensität

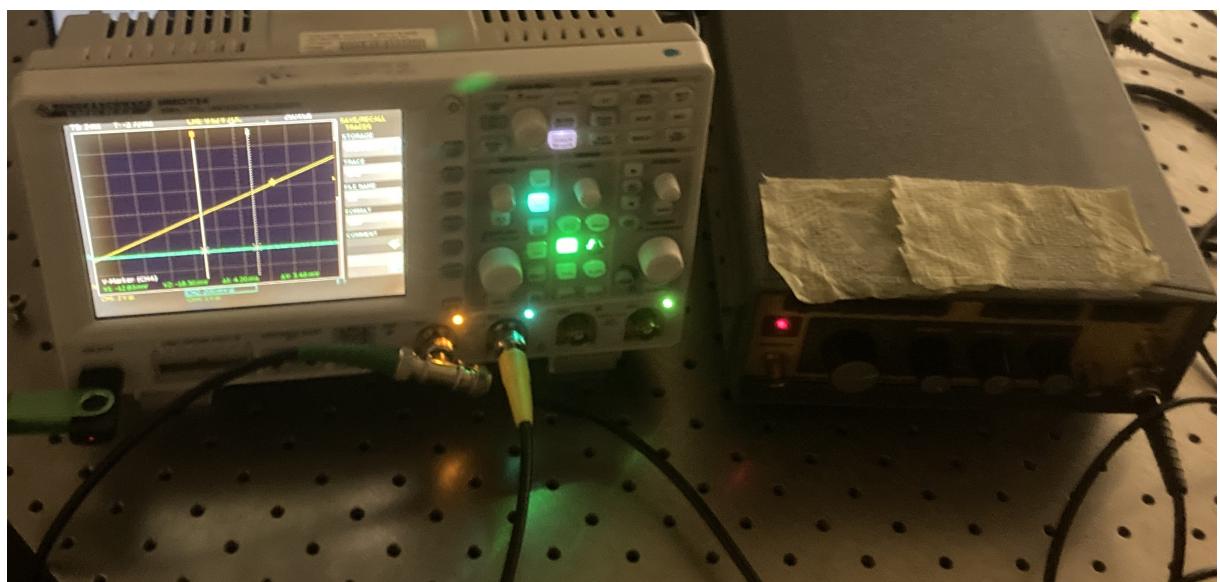


Abbildung 8: Das verwendete Oszilloskop, um das Signal der Photodiode, welche die Intensität des Lichts misst, verarbeiten zu können

3.2 Versuchsdurchführung

3.2.1 Messung der Leistungscharakteristik

Zu Beginn soll die Leistungscharakteristik genauer untersucht werden. Dies tun wir, indem wir die Leistungskurve bei drei verschiedenen Temperaturen (20°C , 25°C und 30°C) aufzeichnen. Dazu variieren wir den Laserstrom von 0 mA bis hin zur Maximalstromstärke von 40 mA in 2-3 mA Schritten und nehmen zu jeder Stromstärke die Ausgangsleistung mithilfe des Powermeters auf. Wir erhalten die Ausgangsleistung der Laserdiode als Funktion des Laserstroms. Daraus können wir dann den Schwellenstrom I_S als auch die Effizienz η sowie die differentielle Quanteneffizienz η_d für die verschiedenen Temperaturen bestimmen und deren Temperaturverhalten analysieren. [2]

3.2.2 Messung der Frequenzcharakteristik

In dieser Messung untersuchen wir die Frequenzcharakteristik eines Dioidenlasers, indem wir die Abhängigkeit des Emissionsspektrums der Laserdiode von Strom und Temperatur untersuchen. Hierfür verwenden wir das Oszilloskop um das Transmissionssignal des FPI aufzeichnen und abspeichern zu können. Der freie Spektralbereich des Interferometers wird dabei als $FSR = 630\text{ GHz}$ angenommen. Wir zeichnen dieses Signal für unterschiedliche Ströme bzw. Temperaturen auf. Wir beginnen wie in der vorherigen Messung damit, den Laserstrom in ein paar wenigen mA-Schritten zu variieren. Doch diesmal starten wir bei der Laserstromschwelle und gehen wieder bis zur Maximalstromstärke von 40 mA. Diese Messserie wiederholen wir für die Temperaturen 20°C , 25°C und 30°C . Anschließend halten wir den Strom ungefähr im Zentrum des Lasing-Bereichs (bei uns 36 mA) konstant und verändern diesmal die Temperatur der Laserdiode in $0,5^{\circ}\text{C}$ -Schritten von 20°C - 30°C . Auch hier wird eine Messserie aufgezeichnet. Aus den aufgenommenen Daten dieser Messung soll dann der Modenabstand bzw. der FSR der Laserdiode bestimmt werden. Außerdem wird die Frequenzverstimmbarkeit in Einheiten von GHz/K bzw. GHz/mA mit und ohne Berücksichtigung von Modensprüngen ermittelt. [2]

4 Ergebnisse

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse unserer Messung dargestellt. Dazu wird sowohl der Schwellenstrom als auch die Effizienz der Diode bei verschiedenen Temperaturen bestimmt. Anschließend wird die Frequenzcharakteristik der Diode analysiert.

4.1 Bestimmung der Leistungscharakteristik

Zuerst wurde die Leistung in Abhängigkeit vom Strom gemessen. Dies wurde bei verschiedenen Temperaturen (20°C , 25°C , 30°C) durchgeführt. Dabei wurde die Stromstärke von $I = 1\text{ mA}$ bis $40,59\text{ mA}$ in Schritten von etwa $1,5\text{ mA}$ erhöht. Die Spannung konnte dabei auf $0,01\text{ mA}$ genau eingestellt werden, was die Unsicherheit der gewählten Stromstärken darstellt. Die emittierte Leistung der Laserdiode wurde gemessen, indem über einen Zeitraum von etwa 5 s die gemessene Leistung mit einem Powermeter gemittelt wurde. Dabei stellt der Erwartungswert unsere gemessene Leistung mit der Standardabweichung die Unsicherheit dar. Aus diesen Daten kann die Leistungskurve der Diode geplottet werden. Diese ist zusammen mit linearen Fits in der Grafik 9 dargestellt. In der Grafik ist erkennbar, dass die Leistung ab einer bestimmten Stromstärke deutlich ansteigt. Dies ist der Schwellstrom der Diode und beschreibt den Punkt, ab dem es in der Diode zum Lasern kommt. Sowohl vor als auch nach dem Schwellstrom steigt die Leistung der Diode linear mit der Stromstärke. Diese Steigung kann mittels Fits bestimmt werden. Dabei sollte der Schnittpunkt dieser beiden Geraden dem Schwellstrom entsprechen. Bei unserem Datensatz liegen die Schnittpunkte bei $I_{20} = 13,99(3)\text{ mA}$, $I_{25} = 14,35(4)\text{ mA}$, $I_{30} = 14,72(18)\text{ mA}$. Dies stimmt sehr gut mit unseren Daten überein, wie man erkennen kann, gibt es einen Punkt, der fast mit diesem übereinstimmt und sehr gut zu beiden Geraden passt. Das Erhöhen des Schwellstroms für höhere Temperaturen ist zu erwarten, da sich der Innenwiderstand durch verschiedene Temperaturen verändert. Dies sorgt auch dafür, dass man einen höheren Strom für höhere Temperaturen anlegen muss. Die Effizienz der Diode ergibt sich nun über die Steigung der Lasergeraden, welche hier $\eta_{20} = 1,0855(12)\text{ }\mu\text{W/mA}$, $\eta_{25} = 1,077(2)\text{ }\mu\text{W/mA}$ und $\eta_{30} = 1,066\text{ }\mu\text{W/mA}$ beträgt. Diese Werte sind sehr nahe beieinander, stimmen aber nicht perfekt überein. Dadurch lässt sich sagen, dass die Effizienz einer Diode mit der Temperatur leicht abnimmt. Damit ergibt sich, nach 5, für die Quanten Effizienz folgende Werte: $\eta_{q,20} = 0,6111(7)$, $\eta_{q,25} = 0,6068(11)$ und $\eta_{q,30} = 0,600(5)$. Somit werden etwa 60 % der Elektronen in Photonen umgewandelt.

Man beobachtet, dass die Leistungskurve von der idealen Geraden bei höheren Stromstärken nach unten abweicht. Dies deutet auf eine gewisse Sättigung der Diode hin, jedoch konnten keine Messungen für größere Stromstärken durchgeführt werden, da diese nach oben begrenzt ist, damit die Diode nicht beschädigt wird.

Sowohl die beobachtete Verschiebung des Schwellstroms als auch die Abnahme der Effizienz sind bei Diodenlasern zu erwarten, denn Durch eine Höhere Temperatur können sich die Valenzelektronen im Kristall auch freier Bewegen, dies dient dafür das sich eine Größere Sperschicht bildet weshalb für höhere Temperaturen ein Größerer Schwellstrom benötigt wird.

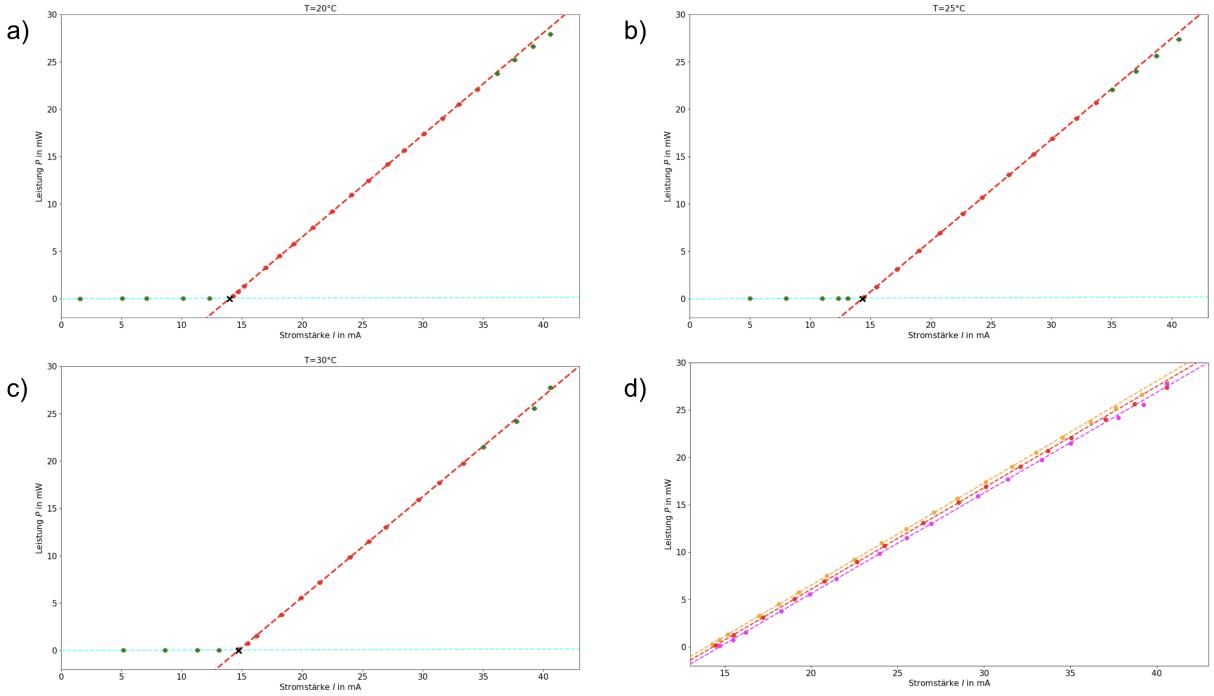


Abbildung 9: Die vier Diagramme zeigen die Leistung P aufgetragen gegen die Stromstärke I . Dabei variiert die Temperatur für a) $T = 20,0(2)^\circ\text{C}$, b) $T = 25,0(2)^\circ\text{C}$ und c) $T = 30,0(2)^\circ\text{C}$. An die Daten sind jeweils lineare Fits angelegt. Der blaue Fit zeigt dabei das Verhalten vor dem Erreichen des Schwellenstroms I_S und der rote Fit das Verhalten danach. Die für den roten Fit verwendeten Daten wurden rot eingefärbt. Es wurden hierbei nicht alle Daten verwendet, da diese bei zunehmender Stromstärke leicht abfallen. Die Fit-Funktionen für das Verhalten nach Erreichen des Schwellenstroms können durch folgende Gleichungen beschrieben werden:

- $y = 1,086(1) \text{ mW/mA} \cdot x - 15,19(2) \text{ mW}$
- $y = 1,078(2) \text{ mW/mA} \cdot x - 15,47(3) \text{ mW}$
- $y = 1,066(8) \text{ mW/mA} \cdot x - 15,7(2) \text{ mW}$

Der Schnittpunkt dieser Geraden mit der x-Achse ist hierbei mit einem Kreuz gekennzeichnet und beschreibt den Schwellenstrom I_S . Hieraus ergibt sich der Schwellenstrom zu:

- $I_S = 13,99(3) \text{ mA}$
- $I_S = 14,35(4) \text{ mA}$
- $I_S = 14,7(2) \text{ mA}$

Im Diagramm d) sind nun alle drei Geraden im Vergleich dargestellt. Es ist eine leichte Verschiebung zu erkennen, außerdem gibt es eine leichte Abnahme der Steigung mit zunehmender Temperatur.

4.2 Auswertung der Frequenzcharakteristiken

Im zweiten Teil des Experiments wurde das Frequenzverhalten der Laserdiode betrachtet. Dazu wurde das Frequenzspektrum mittels eines Oszilloskops aufgezeichnet. Es wurden vier Messreihen durchgeführt. In drei davon wurde die Stromstärke, die an der Laserdiode angelegt wurde, bei unterschiedlichen Temperaturen variiert. In der vierten Messreihe wurde die Stromstärke konstant gehalten und die Temperatur variiert. In den ersten drei Messreihen wurden jeweils 25 Messpunkte gemacht, die gleichmäßig über fast den gesamten Laserbereich der Diode ($I = 18,5 \text{ mA} - 40,59 \text{ mA}$) verteilt waren. Dabei wurde versucht, nahe an Modensprüngen zu ge-

langen. Bei der letzten Messreihe wurde die Temperatur in Schritten von 0,5(2) K erhöht, da sie nicht genauer mit dem Drehregler eingestellt werden konnte. Dadurch entstanden 21 Datensätze. Durch Anlegen einer Dreiecksspannung an einen Piezokristall konnte die Länge des FPI konstant verändert werden. Dadurch konnte die Frequenz des resonanten Lichts des FPI zeitabhängig verändert werden, was zur Aufzeichnung des Frequenzspektrums der Laserdiode führte. In Abbildung 10 ist ein solches Spektrum aus dem aufgenommenen Datensatz dargestellt. Hier ist

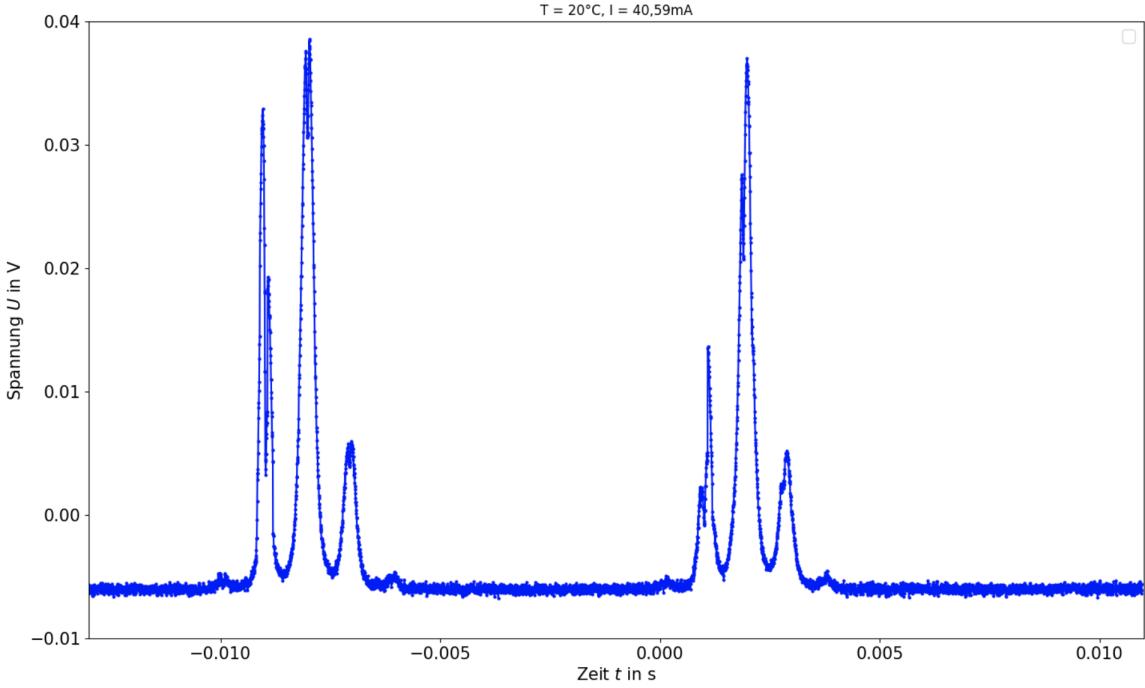


Abbildung 10: Dargestellt ist ein aufgezeichneter Datensatz, bei dem zu erkennen ist, dass sich das Spektrum nach einer gewissen Länge wiederholt. Innerhalb eines einzelnen Spektrums kann eine Hauptmode (höchster Peak) identifiziert werden, sowie weitere Moden, die mit geringerer Intensität aufgezeichnet wurden.

zu erkennen, dass das Frequenzspektrum mehrmals vorhanden ist, wenn der Piezokristall eine ganze Modenverschiebung durchlaufen hat. Da bekannt ist, dass das FPI eine $FSR = 630 \text{ GHz}$ hat, kann man diesen Fakt nutzen, um das Frequenzspektrum zu kalibrieren. Dazu wurde der Abstand zwischen den höchsten Peaks der verschiedenen Spektren bestimmt und festgelegt, dass dieser dem FSR entsprechen muss.

Nachdem die Zeitachse unserer Daten kalibriert ist, können wir nun diese auswerten. Dazu wurden zunächst die einzelnen Maximalwerte des Spektrums bestimmt. Anhand dieser Maximalwerte konnten dann Gaußkurven gefittet werden, was beispielhaft in Grafik 11 gezeigt ist. Anhand dieser Gaußkurve konnten sowohl die Hauptmode (höchste Intensität), die Modenbreite und auch der Modenabstand bestimmt werden. Über alle Daten gemittelt ergab sich ein Modenabstand von $FSR_{\text{laser}} = 57,6(17) \text{ GHz}$. Der Abstand der Moden ändert sich zwar leicht über die gesamte Messung, was später noch genauer besprochen wird, jedoch ist diese Änderung für eine einzelne Mode sehr klein, weshalb für einen besseren Überblick angenommen wurde, dass dieser ungefähr konstant ist. Dadurch ergibt sich, dass bei einem Laser mit der Wellenlänge $\lambda = 670 \text{ nm}$ ungefähr die 7,78(23)-te Mode angeregt wird.

Für die Breite der Mode ergibt sich ein Durchschnittswert von $\Gamma_{FWHM} = 23(5) \text{ GHz}$, wobei hier

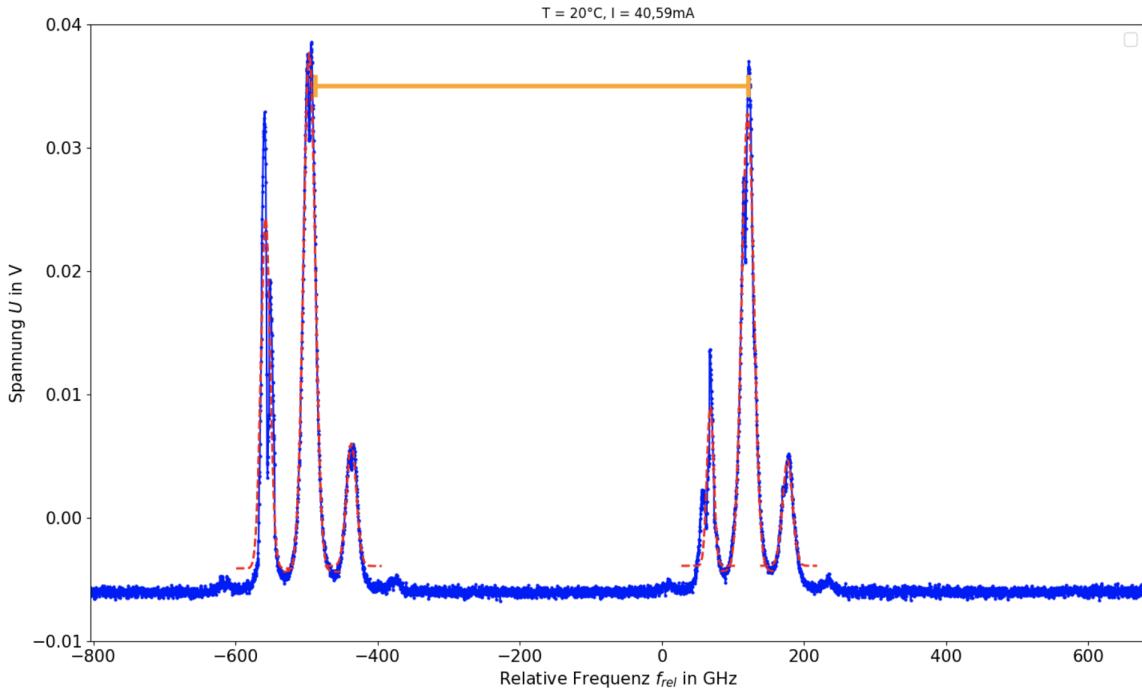


Abbildung 11: Der vorherige Datensatz wird dargestellt, jedoch ist er nun auf die Frequenz kalibriert. In Gelb ist der Kalibrierungsabstand von 630 GHz eingezeichnet. In Rot sind verschiedene Gaußfunktionen passend zu den einzelnen Moden eingezeichnet.

auch die vorher besprochenen Effekte gelten. Daraus lässt sich eine Finesse der Laserdiode von $F = 0,40(9)$ ableiten. Dabei wurde auch angenommen, dass die Breite des FPI deutlich kleiner ist als die der Laserdiode, damit die Frequenz dieser gut auflösbar ist.

Als nächstes wurde das Verhalten der Hauptmode untersucht, wenn Strom und Temperatur variiert werden. Dazu wurde für jeden Datensatz die Frequenz der Hauptmode gegenüber den eingestellten Eigenschaften geplottet. Die dazugehörigen Messergebnisse sind in Grafik 12 dargestellt. In diesem Zusammenhang ist deutlich erkennbar, dass sowohl die Frequenz als auch die Stromstärke und Temperatur Veränderungen unterliegen. Hierbei lässt sich das Phänomen der Modensprünge besonders gut beobachten. Modensprünge bezeichnen den Wechsel der Frequenz der Hauptmode zu einer mit niedrigerer Frequenz. Durch Variation der Stromstärke können klar abgegrenzte Bereiche einzelner Moden identifiziert werden. Innerhalb dieser Bereiche ist jedoch auch eine Verschiebung der Frequenz zu beobachten, welche mittels eines linearen Fits bestimmt werden kann. Bei Variation der Temperatur gestaltet sich die Identifikation solcher Bereiche schwieriger, da Modensprünge häufiger auftreten und weniger Datenpunkte zwischen den Sprüngen vorliegen. Dies erschwert die eindeutige Zuordnung, ob es sich um einen Modensprung handelt oder ob eine Verschiebung der Mode vorliegt, wie beispielsweise beim ersten Punkt der blauen Mode im Temperaturdiagramm.

Nach der Bestimmung der Frequzverschiebung innerhalb einer Mode kann nun auch die Gesamtverschiebung der Hauptmodenfrequenz betrachtet werden. Dies wird durch einen linearen Fit in Diagramm 12 dargestellt, der als schwarze Linie eingezeichnet ist.

Daraus ergibt sich eine Gesamtverschiebung der Frequenz der Hauptmode um $a_{20} = -21,0(14) \text{ GHz/mA}$, $a_{25} = -23,8(15) \text{ GHz/mA}$, $a_{30} = -21,8(7) \text{ GHz/mA}$ und $a_{\text{Strom}} = -162(10) \text{ GHz/K}$. Die Ver-

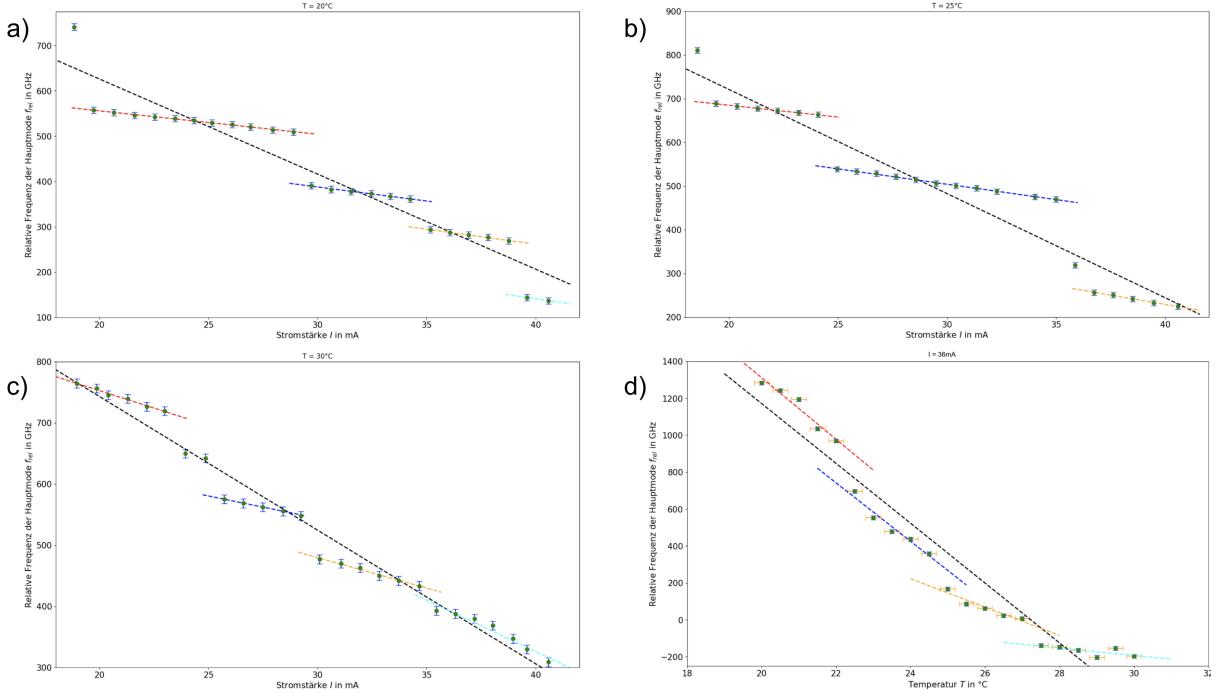


Abbildung 12: Die 4 Diagramme zeigen die relative Frequenz der Hauptmode f_{rel} aufgetragen gegen die Stromstärke I . Dabei haben wir eine konstante Temperatur T von a) $T = 20^\circ\text{C}$, b) $T = 25^\circ\text{C}$ und c) $T = 30^\circ\text{C}$ und die Stromstärke wurde variiert. Im Diagramm d) wurde dann die Stromstärke I konstant auf 36,08(1) mA gehalten und die Temperatur wurde von 20,0(2) $^\circ\text{C}$ – 30,0(2) $^\circ\text{C}$ variiert. An die Daten sind jeweils lineare Fits angelegt. Hierbei stellen die schwarzen Fits den Verlauf der gesamten Daten dar und die farbigen zeigen den Verlauf zwischen Modensprüngen. Die schwarzen Gesamt-Fits der vier Diagramme können durch folgende Gleichungen beschrieben werden:

- $y = -21(1) \text{ GHz/mA} \cdot x + 1,04(4) \cdot 10^3 \text{ GHz}$
- $y = -24(2) \text{ GHz/mA} \cdot x + 1,20(4) \cdot 10^3 \text{ GHz}$
- $y = -21,8(7) \text{ GHz/mA} \cdot x + 1,18(2) \cdot 10^3 \text{ GHz}$
- $y = -1,62(10) \text{ GHz/K} \cdot x + 4,4(3) \cdot 10^3 \text{ GHz}$

Für weitere Berechnungen wird auch aus a) die rote Fit-Funktion exemplarisch verwendet. Sie wird beschrieben durch $y = -5,16(10) \text{ GHz/mA} \cdot x + 659(3) \text{ GHz}$.

schiebung der einzelnen Moden ist in den Beschreibungen der Abbildungen zu finden.

Es ist jedoch erkennbar, dass sowohl eine Erhöhung der Temperatur als auch eine Steigerung der Stromstärke zu einer Verringerung der Laserfrequenz führt. Dabei kann zwischen der Gesamtverschiebung und der Verschiebung innerhalb einer Mode unterschieden werden. Die Verschiebung innerhalb einer Mode lässt sich durch die Veränderung der Resonanzfrequenz erklären. Dies führt dazu, dass dieselbe Mode leicht verschoben wird. Aufgrund der Tatsache, dass die etwa 7780(230)-te Mode betrachtet wird, führt bereits eine geringfügige Veränderung des FSR zu einer erheblichen Frequenzverschiebung. Dies bedeutet, dass alle Veränderungen zu einer etwa 7780(230)-fach so großen Frequenzverschiebung führen. Die Steigung der Geraden einer einzelnen Mode ermöglicht die Bestimmung einer Verringerung des FSR um etwa $\Delta = 0,66(2) \text{ MHz/mA}$. Zu diesem Effekt kommt dann noch eine Verschiebung des einhüllenden Leistungsprofils der Diode hinzu. Wenn sich dieses Profil verschiebt, ändert sich zwar nicht die Frequenz der Mode, jedoch

ändert sich die Hauptmode, was ebenfalls zu einer Frequenzverschiebung führt. Beide Kurven können sich verschieben, und zusammen ergeben sie die Gesamtverschiebung der Frequenz. Diese Verschiebung geschieht hauptsächlich durch Änderungen der Temperatur der Diode. Eine Erhöhung der Stromstärke führt ebenfalls zu einer Erhöhung der Temperatur. Somit ändert sich in allen vier Messreihen die Temperatur. Eine Erhöhung der Temperatur hat verschiedene Auswirkungen auf den Diodenlaser. Zum einen dehnt sich der Kristall der Diode aus, was dazu führt, dass der Modenabstand kleiner wird (siehe Gleichung 2). Die höhere Temperatur wirkt sich auch auf die Bandstruktur der Laserdiode aus. Durch die erhöhte Temperatur werden auch höhere Niveaus im Band wahrscheinlicher besetzt, was dazu führt, dass sich die Einhüllende der Funktion der Diode zu höheren Frequenzen hin verschiebt. Die in Abschnitt 4.1 angesprochene Vergrößerung der Sperrsicht könnte auch dazu führen, dass die Elektronen einen niedrigeren Energieübergang haben, was wiederum dazu führen würde, dass sich die Einhüllende des Lasers zu niedrigeren Frequenzen bewegt. Es gibt noch viele weitere kleinere Auswirkungen, die die Temperatur auf die Diode hat. Diese sind jedoch zu zahlreich, um sie hier alle aufzulisten. Anhand der Messergebnisse kann jedoch festgestellt werden, dass solche Effekte, die die Modenabstände und Frequenzen der Einhüllenden verringern, in diesem Experiment überwiegen.

5 Diskussion

Dieser Versuch befasste sich mit der Funktionsweise und den Charakteristiken der Laserdiode. Zunächst wurde die Temperaturabhängigkeit der Effizienz sowie des Schwellstroms bestimmt. Dabei ergaben die Messungen für den Schwellstrom folgende Werte: $I_{20} = 13,99(3)$ mA, $I_{25} = 14,35(4)$ mA, $I_{30} = 14,72(18)$ mA, woraus deutlich eine Zunahme des Schwellstroms in Abhängigkeit von der Temperatur ersichtlich ist. Für die Effizienz $\eta_{20} = 1,0855(12)$ $\mu\text{W}/\text{mA}$, $\eta_{25} = 1,077(2)$ $\mu\text{W}/\text{mA}$ und $\eta_{30} = 1,066$ $\mu\text{W}/\text{mA}$ konnte festgestellt werden, dass diese mit steigender Temperatur leicht abnimmt. Anschließend wurde das Frequenzspektrum der Diode untersucht. Durch Erhöhen des Stroms sowie der Temperatur konnten sowohl Veränderungen der Modenabstände als auch Modensprünge beobachtet werden. Die Messreihe ergab eine Frequenzveränderung von $a_{20} = -21,0(14)$ GHz/mA, $a_{25} = -23,8(15)$ GHz/mA, $a_{30} = -21,8(7)$ GHz/mA und $a_{\text{Strom}} = -162(10)$ GHz/K. Damit wird das Temperaturverhalten der Diode im Bereich von 20 °C bis 30 °C sehr gut beschrieben.

Literatur

- [1] E. .-. Magnetism. *Laserdioden*. Online; Abgerufen am 02.05.24. 2024. URL: <https://www.electricity-magnetism.org/de/laserdioden/>.
- [2] U. Innsbruck. *Fortgeschrittenenpraktikum Versuch 09: Dioidenlaser*. Skript; Status: 21. Februar 2024. Abgerufen am 02.05.24.
- [3] Wikipedia. *Laserdiode*. Online; Stand 27. April 2024. Abgerufen am 02.05.24. 2024. URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Laserdiode>.
- [4] Stoppi. *Fabry-Pérot-Interferometer*. Online; Abgerufen am 02.05.24. URL: <https://stoppi-homemade-physics.de/fabry-perot-interferometer/>.
- [5] Wikipedia. *Diode*. Online; Stand 20. November 2023. Abgerufen am 02.05.24. URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Laserdiode>.
- [6] Wikipedia. *Optischer Resonator*. Online; Stand 10. Dezember 2023. Abgerufen am 02.05.24. URL: https://de.wikipedia.org/wiki/Optischer_Resonator.
- [7] N. M. Lehmkuhl. *Theoretisches Konzept eines Dioidenlasers mit externem Resonator in Littrow-Konfiguration und Vermessung von Laserdioden für die Atom Trap Trace Analysis*. Online; Stand 01. Juni 2014. Abgerufen am 02.05.24. URL: <https://www.znf.uni-hamburg.de/media/documents/archiv-qualifikationsarbeiten/theoretisches-konzept-eines-dioidenlasers-lehmkuhl.pdf>.

Erklärung

Hiermit bestätigen wir, dass der vorliegende Bericht unabhängig verfasst wurde und dass alle erforderlichen Quellen und Referenzen angegeben wurden.

Arik Bürkle 02.05.2024

Student 1 Datum

Robin Hoffmann 02.05.2024

Student 2 Datum



Valentin Ertl 02.05.2024

Student 3 Datum

Arbeitsaufwand

Arik Bürkle 02.05.2024

Vorbereitung:3,5h

Versuch:4h

Bericht:18h

Robin Hoffmann 02.05.2024

Vorbereitung:2,5h

Versuch:4h

Bericht:19h



Valentin Ertl 02.05.2024

Vorbereitung:3,5h

Versuch:4h

Bericht:5h