Anleitung zum Fortgeschrittenenpraktikumsversuch

„Grundlagen der Laserphysik Helium-Neon-Laser“

Universität des Saarlandes
Fachrichtung Experimentalphysik
Prof. Dr. Christoph Becher
AG Quantenoptik

Version WS 2026/2027



UNIVERSITÄT
DES
SAARLANDES



Inhaltsverzeichnis

1 Grundlagen der Laserphysik **3**
- 1.1 Funktionsweise eines Lasers 3
- 1.2 Besetzungsinversion, Schwellwertbedingung und Verluste 5

2 Grundlagen optischer Resonatoren **6**
- 2.1 Longitudinale Lasermoden 6
- 2.2 Stabilitätskriterien für Resonatoren 7
- 2.3 Paraxiale Wellengleichung und Gaußsche Moden 8

3 Spezielle Fragestellungen zum Helium-Neon-Laser **10**
- 3.1 Termschema des Helium-Neon-Lasers 10
- 3.2 Technische Realisierung eines Helium-Neon-Lasers 12
- 3.3 Funktionsweise eines Fabry-Perot-Spektrum-Analysators 13

4 Durchführung des Experiments **15**
- 4.1 Sicherheits- und Handhabungshinweise 15
- 4.2 Justage des Aufbaus 16

5 Messungen und Auswertung **21**
- 5.1 Durchzuführende Messungen 21
- 5.2 Auswertung 22
- 5.3 Hinweise zu Datenaufnahme und Auswertung 23

Literaturverzeichnis **24**

A Anhang **25**
- A.1 Formelsammlung Gaußsche Strahlen 25
- A.2 Kalibrierkurve der Photodiode 26
- A.3 Transmissionskurven der Resonatorspiegel 26

Im Folgenden sind die wichtigsten theoretischen Grundlagen zum Versuch *Helium-Neon-Laser* zusammengefasst. Ziel der Vorbereitung ist es, die physikalischen Prinzipien des Laserbetriebs, optischer Resonatoren sowie die speziellen Eigenschaften des Helium-Neon-Lasers zu verstehen.
Erstellen Sie zur Vorbereitung auf den Versuch einen zusammenhängenden Text von mindestens fünf Seiten, in dem Sie die unten genannten Themen in eigenen Worten erläutern. Die am Ende jedes Abschnitts aufgeführten Vorbereitungsfragen dienen dabei als Leitfaden. Sie sollen nicht nur einzeln beantwortet, sondern in einen zusammenhängenden theoretischen Hintergrund eingebettet werden. Dieser Text kann später als Grundlage für das Theorie-Kapitel Ihres Versuchsprotokolls verwendet werden.
Es wird erwartet, dass die aufgeführten Punkte zu Beginn der Versuchsdurchführung ausreichend bekannt und verstanden sind. Geeignet zur Vorbereitung sind gängige Lehrbücher der Laserphysik. In der Bibliothek vorhanden ist z. B. die am Ende dieser Anleitung aufgeführte Literatur [1–5].
Machen Sie sich darüber hinaus mit den Sicherheitshinweisen und der Justageprozedur vertraut. Notieren Sie die während des Versuchs aufgenommenen Daten sowie ergänzende Informationen, z.B. zum Versuchsaufbau und zu Fehlerabschätzungen, übersichtlich und vollständig in Ihrem Laborbuch. Die Messungen müssen anhand dieser Aufzeichnungen klar nachvollzogen werden können.

1 Grundlagen der Laserphysik

Laser sind Lichtquellen mit besonderen Eigenschaften, die sie deutlich von gewöhnlichen thermischen Lichtquellen unterscheiden und aufgrund deren sie in vielen Bereichen der Wissenschaft, Technik, Medizin und Industrie eingesetzt werden.
Die Grundlage der Laserwirkung ist die Verstärkung von Licht in einem geeigneten aktiven Medium. Damit ein Laser funktionieren kann, müssen drei wesentliche Bestandteile zusammenwirken: ein aktives Medium, eine Energiezufuhr zum Pumpen dieses Mediums und ein optischer Resonator, der das Lichtfeld rückkoppelt.

1.1 Funktionsweise eines Lasers

Die grundlegenden Wechselwirkungsprozesse zwischen Licht und Materie lassen sich zunächst an einem einfachen System mit zwei Energieniveaus betrachten. Dabei kann ein Atom oder Molekül unter Absorption oder Emission eines Photons zwischen einem höheren und einem niedrigeren Energiezustand übergehen. Bei der Emission wird zwischen der spontanen und der stimulierten Emission unterschieden.
Ein Laser besteht im Grundprinzip aus einem aktiven Medium, einer Energiepumpe und einem Resonator, wie in Abbildung 1.1 dargestellt.

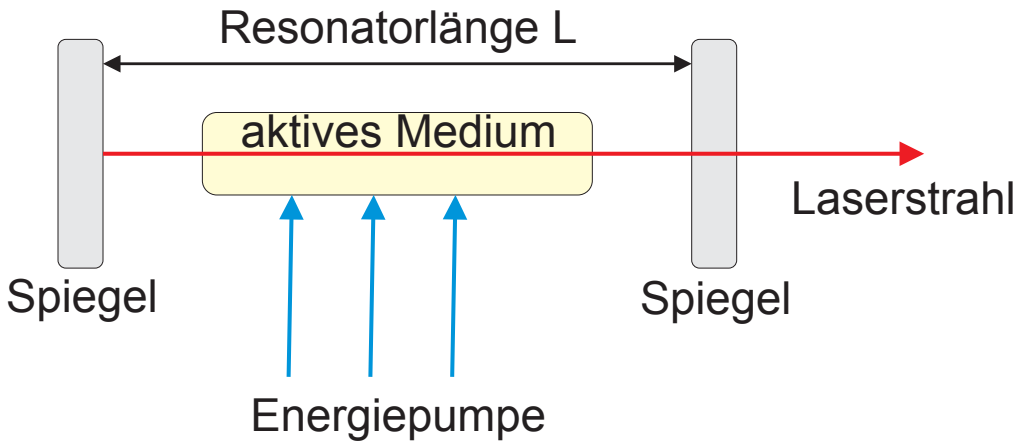


Abb. 1.1: Bauelemente eines Lasers (Abbildung nach [1]).

Das aktive Medium enthält Atome, Moleküle oder Halbleiterzustände, in denen die Verstärkung des Lichts durch stimulierte Emission erfolgt. Die hierfür erforderliche Besetzungsinversion wird durch die Pumpquelle erzeugt, die dem aktiven Medium Energie zuführt. Der optische Resonator besteht in der Regel aus zwei gegenüberliegenden Spiegeln. Er führt einen Teil des erzeugten Lichts wiederholt durch das aktive Medium und ermöglicht dadurch die Rückkopplung und Verstärkung des Lichtfeldes. Gleichzeitig bewirkt er die Auswahl bestimmter Frequenzen und räumlicher Moden. Abhängig von der Art des aktiven Mediums kommen unterschiedliche Pumpmechanismen zum Einsatz. Das verwendete aktive Medium bildet zugleich die Grundlage für die Einteilung in verschiedene Lasertypen.

Vorbereitungsfragen

- Welche besonderen Eigenschaften zeichnen Laserlicht gegenüber Licht thermischer Quellen aus?
- Nennen Sie typische Anwendungen von Lasern in Wissenschaft, Technik, Medizin oder Industrie.
- Erläutern Sie die Prozesse Absorption, spontane Emission und stimulierte Emission an einem Zwei-Niveau-System. Welcher dieser Prozesse wird im Laser gezielt genutzt?
- Erläutern Sie die grundlegenden Bauelemente eines Lasers und deren Funktion.
- Wofür steht das Akronym LASER?
- Nennen Sie verschiedene Lasertypen bzw. aktive Medien.
- Nennen Sie verschiedene Möglichkeiten, ein Lasermedium zu pumpen.

1.2 Besetzungsinversion, Schwellwertbedingung und Verluste

Damit ein Lichtfeld in einem Medium verstärkt wird, muss die stimulierte Emission häufiger auftreten als die Absorption. Dies erfordert eine Besetzungsinversion, also eine Situation, in der mehr Teilchen im oberen als im unteren Laserniveau vorhanden sind. Die zeitliche Änderung der Besetzungszahlen kann mit Ratengleichungen beschrieben werden.
Für ein Zwei-Niveau-System mit den Besetzungen N_1 im Grundzustand und N_2 im angeregten Zustand lauten die Ratengleichungen:

$$\frac{dN_1}{dt} = N_2 A_{21} + B_{21} q N_2 - B_{12} q N_1 \tag{1.1}$$

$$\frac{dN_2}{dt} = -N_2 A_{21} - B_{21} q N_2 + B_{12} q N_1 \tag{1.2}$$

Der erste Term beschreibt die spontane Emission mit dem Einstein-Koeffizienten A_{21}, der zweite Term die stimulierte Emission und der dritte Term die Absorption. Für Niveaus mit gleichem statistischem Gewicht gilt $B_{21} = B_{12}$. Die Größe q beschreibt die Photonenzahl des mit dem Zwei-Niveau-System wechselwirkenden Lichtfeldes.
In thermischem Gleichgewicht ist die Besetzung der Energieniveaus durch die Boltzmann-Verteilung gegeben. Höher liegende Zustände sind dabei weniger stark besetzt als niedrigere Zustände. Ein Medium mit thermischer Besetzungsverteilung kann daher keine Lichtverstärkung liefern. Auch ein reines Zwei-Niveau-System ist für dauerhaften Laserbetrieb ungeeignet, wenn es nur optisch zwischen diesen beiden Niveaus angeregt wird.
Damit Lasertätigkeit einsetzt, muss die Verstärkung pro Umlauf im Resonator größer sein als die Verluste. Diese Bedingung bezeichnet man als Schwellwertbedingung.

Vorbereitungsfragen

- Welche Bedingung muss für das Verhältnis von stimulierter Emission und Absorption gelten, damit ein Lichtfeld verstärkt wird?
- Was folgt aus den Ratengleichungen für die Besetzungen N_1 und N_2?
- Wie sieht die Besetzungsverteilung in thermischem Gleichgewicht aus?
- Warum ist in einem Zwei-Niveau-System keine dauerhafte Lichtverstärkung durch rein optisches Pumpen möglich?
- Was versteht man unter Besetzungsinversion?
- Leiten sie die Schwellwertbedingung eines Lasers her
- Welche Verlustprozesse können in einem Laserresonator auftreten?

2 Grundlagen optischer Resonatoren

Ein wesentliches Bauelement eines Lasers ist der optische Resonator. Im einfachsten Fall besteht dieser aus zwei gegenüberliegenden Spiegeln. Der Resonator sorgt für die Rückkopplung des Lichtfelds, selektiert bestimmte Frequenzen und räumliche Feldverteilungen und beeinflusst dadurch maßgeblich die Eigenschaften des emittierten Laserlichts.

2.1 Longitudinale Lasermoden

Betrachtet man zunächst nur die Ausbreitung des Lichtfeldes entlang der Resonatorachse, so bildet sich zwischen den Spiegeln eine stehende Welle aus. Die Randbedingungen an den Spiegeln erlauben nur bestimmte Wellenlängen bzw. Frequenzen. Diese diskreten Resonanzfrequenzen werden longitudinale oder axiale Moden des Resonators genannt und sind in Abbildung 2.1 dargestellt.

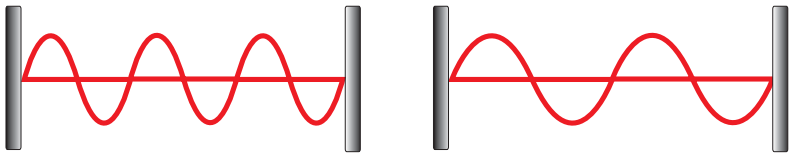


Abb. 2.1: Vereinfachte Darstellung einer stehenden Welle in einem Resonator. Bei einem realen optischen Resonator ist die Knotenzahl sehr viel größer ($\approx 10^7$).

Vorbereitungsfragen

- Welche Bedingung muss die Wellenlänge λ einer stehenden Welle in einem Resonator der Länge L erfüllen?
- Was versteht man unter longitudinalen Moden?
- Wie groß ist der Frequenzabstand zwischen zwei benachbarten longitudinalen Moden in Abhängigkeit von L?
- Berechnen Sie den longitudinalen Modenabstand für einen Resonator mit $L = 50\,\mathrm{cm}$.

2.2 Stabilitätskriterien für Resonatoren

Ein Resonator wird als stabil bezeichnet, wenn ein achsennaher Lichtstrahl auch nach vielen Umläufen im Resonator verbleibt. Die Stabilität eines Zweispiegelresonators kann mit den Resonatorparametern g_1 und g_2 beschrieben werden:

$$g_1 = 1 - \frac{L}{R_1} \qquad g_2 = 1 - \frac{L}{R_2}. \tag{2.1}$$

Dabei ist L die Resonatorlänge, und R_1 sowie R_2 sind die Krümmungsradien der Spiegel. Konkave Spiegel werden mit positivem Krümmungsradius angesetzt. Ein Resonator ist stabil, wenn gilt:

$$0 \leq g_1 \cdot g_2 \leq 1. \tag{2.2}$$

Diese Stabilitätsbedingung kann mit Methoden der Strahlenoptik hergeleitet werden und resultiert in den Parabeln in Abbildung 2.2.

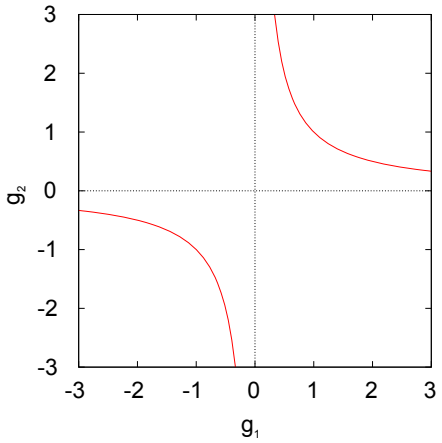


Abb. 2.2: Hyperbeln für $g_1 g_2 = 1$. Die stabilen Resonatoren liegen in dem durch die Stabilitätsbedingung definierten Bereich.

Vorbereitungsfragen

- Wo liegen stabile Resonatoren im g_1-g_2-Diagramm?
- Wo liegen der symmetrische konfokale Resonator mit $R_1 = R_2 = L$ und ein Resonator aus zwei planen Spiegeln im Stabilitätsdiagramm?
- In welchem Längenbereich ist ein Resonator aus zwei Spiegeln mit $R = 450\,\mathrm{mm}$ stabil?

2.3 Paraxiale Wellengleichung und Gaußsche Moden

Die Stabilität eines Resonators und die longitudinalen Moden lassen sich mit geometrischen Überlegungen bzw. mit der Strahlenoptik beschreiben. Für die räumliche Feldverteilung senkrecht zur Resonatorachse ist jedoch eine wellenoptische Beschreibung notwendig. Ausgangspunkt ist die skalare Wellengleichung für das elektrische Feld im Vakuum:

$$\nabla^2 E(\vec{r},t) - \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2}{\partial t^2}E(\vec{r},t) = 0 \tag{2.3}$$

Für Laserresonatoren betrachtet man häufig monochromatische Felder der Form

$$E(\vec{r},t) = \mathcal{E}(\vec{r})e^{-i\omega t}. \tag{2.4}$$

Zusätzlich nimmt man an, dass sich das Feld nur unter kleinen Winkeln zur Resonatorachse ausbreitet. Diese Annahme heißt paraxiale Näherung. Mit dem Ansatz

$$\mathcal{E}(\vec{r}) = \mathcal{E}_0(\vec{r})e^{ikz} \tag{2.5}$$

ergibt sich die paraxiale Wellengleichung:

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}\right)\mathcal{E}_0 + 2ik\frac{\partial \mathcal{E}_0}{\partial z} = 0. \tag{2.6}$$

Eine wichtige Lösung dieser Gleichung ist der Gaußsche Strahl, dargestellt in Abbildung 2.3. Bei diesem besitzt die Intensitätsverteilung senkrecht zur Ausbreitungsrichtung die Form einer Gaußfunktion.

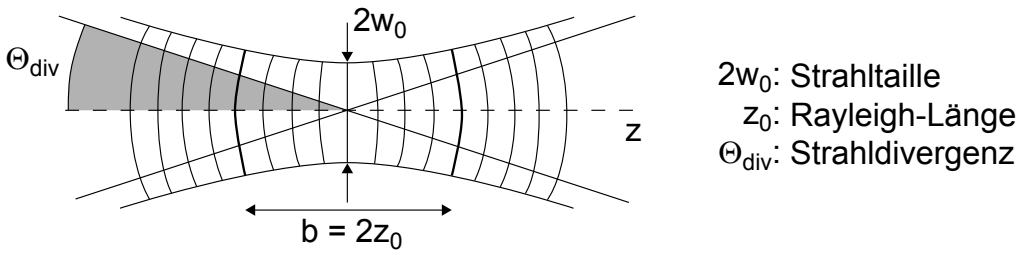


Abb. 2.3: Darstellung eines Gaußschen Strahls mit angedeuteter Krümmung der Wellenfronten.

Damit ein Gaußscher Strahl eine stationäre Mode eines Resonators bildet, muss sich seine Feldverteilung nach einem Umlauf reproduzieren. Insbesondere muss der Krümmungsradius der Wellenfronten an den Spiegelpositionen mit den Krümmungsradien der Spiegel übereinstimmen.

Neben der Gaußschen Grundmode existieren weitere Lösungen der paraxialen Wellengleichung, die so genannten Hermite-Gauß-Moden. Die Grundmode wird als TEM_{00} bezeichnet. Höhere Moden besitzen Knotenlinien in transversaler Richtung und werden durch zwei Indizes charakterisiert, etwa TEM_{10} oder TEM_{01}.
Die Intensitätsverteilung dieser Moden wird durch

$$I_{mn}(x,y,z) = \frac{Aw_0}{w(z)}\left[H_m\left(\sqrt{2}\frac{x}{w(z)}\right)\right]^2\left[H_n\left(\sqrt{2}\frac{y}{w(z)}\right)\right]^2 e^{\frac{-2(x^2+y^2)}{w^2(z)}} \tag{2.7}$$

beschrieben. Die ersten Hermite-Polynome lauten:

$$H_0(u) = 1 \qquad H_1(u) = 2u \qquad H_2(u) = 4u^2 - 2 \qquad H_3(u) = 8u^3 - 12u.$$

Vorbereitungsfragen

- Warum reicht die Strahlenoptik zur Beschreibung transversaler Moden nicht aus?
- Was versteht man unter der paraxialen Näherung?
- Welche Eigenschaften besitzt ein Gaußscher Strahl?
- Definieren Sie Strahltaille, Strahlradius, Rayleigh-Länge, Wellenfrontkrümmung und Divergenz.
- Was unterscheidet die TEM_{00}-Mode von höheren transversalen Moden?
- Stellen Sie einen Schnitt durch eine TEM_{01}-Mode graphisch dar.
- Ist es möglich, dass ein Laser auf mehreren transversalen Moden läuft?

3 Spezielle Fragestellungen zum Helium-Neon-Laser

3.1 Termschema des Helium-Neon-Lasers

Der Helium-Neon-Laser ist ein Gaslaser, dessen aktives Medium aus einem Gemisch von Helium- und Neonatomen besteht. Die eigentliche Laseremission findet an Übergängen des Neonatoms statt. Helium dient vor allem dazu, Energie aus der Gasentladung aufzunehmen und durch Stöße effizient auf Neonatome zu übertragen. Der HeNe-Laser kann als Vier-Niveau-Laser beschrieben werden, wobei das genaue Termschema in Abbildung 3.1 dargestellt ist.

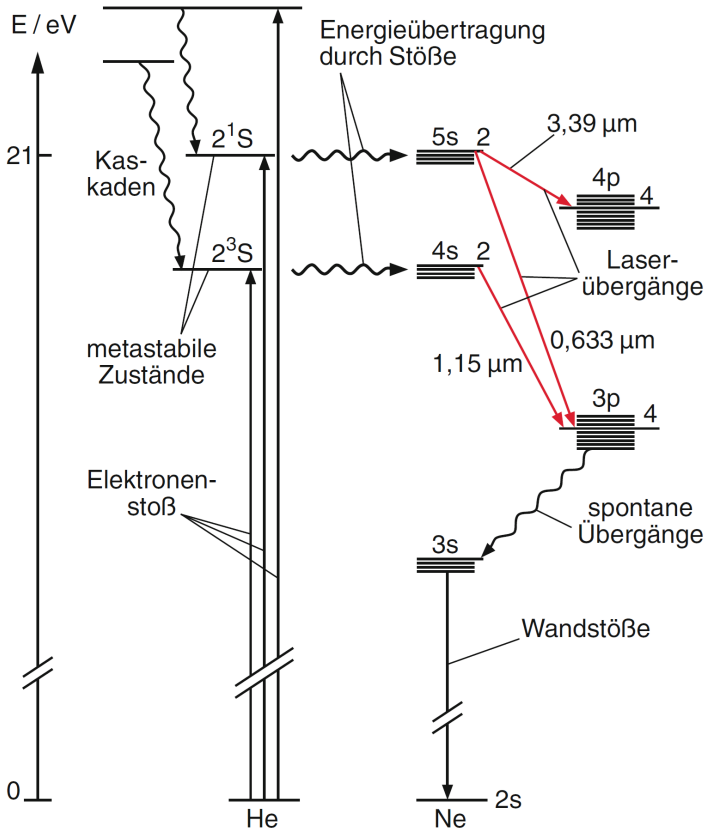


Abb. 3.1: Termschema des Helium-Neon-Lasers mit ausgewählten Laserübergängen [1]

Die Anregung der Heliumatome erfolgt durch Elektronenstöße in der Gasentladung. Bestimmte metastabile Heliumzustände liegen energetisch nahe bei angeregten Neon-Niveaus, sodass durch resonante Stoßprozesse Energie auf Neon übertragen werden kann.
Ein Helium-Neon-Gemisch kann Lasertätigkeit bei mehreren Wellenlängen zeigen, z. B. bei 543 nm, 633 nm, 1150 nm und 3390 nm. Die erste demonstrierte HeNe-Laseremission lag bei 1150 nm [6]. Im vorliegenden Versuch wird jedoch Laserstrahlung bei λ = 633 nm verwendet. Dies wird vor allem durch geeignete Spiegelbeschichtungen erreicht, die den roten Übergang bevorzugen und andere übergänge unterdrücken.

Vorbereitungsfragen

- Welche Vorteile besitzt ein Vier-Niveau-Schema gegenüber einem Zwei- oder Drei-Niveau-System?
- Welche Rolle spielen die Heliumatome im HeNe-Laser?
- Welche Heliumzustände sind für die Funktion besonders wichtig und warum?
- Wie wird die Energie von Helium auf Neon übertragen?
- Zwischen welchen Energieniveaus des Neons findet der Laserübergang bei 633 nm statt?
- Warum kann ein Helium-Neon-Gemisch bei verschiedenen Wellenlängen Lasertätigkeit zeigen?
- Warum emittiert der im Versuch verwendete Laser nur bei 633 nm?

3.2 Technische Realisierung eines Helium-Neon-Lasers

Die Gasentladung im HeNe-Laser wird in einer dünnen Kapillare gezündet, deren Endfenster nicht senkrecht zur Strahlachse, sondern unter dem Brewster-Winkel angebracht sind. Am Brewster-Winkel erfahren s- und p-polarisiertes Licht unterschiedliche Reflexions- und Transmissionswahrscheinlichkeiten. Dadurch werden Verluste für eine Polarisationsrichtung minimiert, und der Laser emittiert bevorzugt linear polarisiertes Licht.
Die Reflexionskoeffizienten für s- und p-polarisiertes Licht lauten [7]:

$$R_s = \left(\frac{\sin(\alpha-\beta)}{\sin(\alpha+\beta)}\right)^2 \qquad R_p = \left(\frac{\tan(\alpha-\beta)}{\tan(\alpha+\beta)}\right)^2. \tag{3.1}$$

Im Brewster-Winkel gilt

$$\alpha + \beta = 90°. \tag{3.2}$$

Vorbereitungsfragen

- Warum wird die Gasentladung in einer dünnen Kapillare gezündet?
- Was versteht man unter s-polarisiertem und p-polarisiertem Licht?
- Was ist der Brewster-Winkel?
- Berechnen Sie den Brewster-Winkel für den übergang Glas–Luft mit $n_{\text{Glas}} = 1,45702$.
- Berechnen Sie die Reflexionskoeffizienten R_s und R_p am Brewster-Winkel.
- Warum werden die Fenster der HeNe-Röhre unter dem Brewster-Winkel angebracht?
- Welche Folgen hat dies für die Polarisation des entstehenden Laserlichts?

3.3 Funktionsweise eines Fabry-Perot-Spektrum-Analysators

Zur Vermessung der Frequenzabstände der Moden des Helium-Neon-Lasers wird ein Scanning-Fabry-Perot-Interferometer der Firma Toptica verwendet. Es besteht aus einem konfokalen Resonator mit zwei hochreflektierenden Spiegeln. Einer der Spiegel kann mit Hilfe von Piezo-Kristallen im Nanometerbereich verschoben werden. Die Ansteuerung erfolgt über eine Spannungsrampe, die durch einen Scangenerator erzeugt wird. Hinter dem Resonator wird das transmittierte Licht mit einer Photodiode detektiert. Beim Durchstimmen des Interferometers entsteht ein periodisches Signal. Der Frequenzabstand zweier aufeinanderfolgender Transmissionsmaxima wird als freier Spektralbereich, englisch *free spectral range* oder FSR, bezeichnet. Zusätzlich zu den hier angegebenen physikalischen Grundlagen sollte das Paper 'Nonconservation of Amplitude in Wave Division' [8] herangezogen werden um eine Intuition für das FPI zu entwickeln.
Für das verwendete Fabry-Perot-Interferometer gilt:

$$FSR = \frac{c}{2L} = 4\,\mathrm{GHz},$$

was einer Resonatorlänge von etwa $L = 3,75\,\mathrm{cm}$ entspricht. Aufgrund dieser Periodizität können mit dem Interferometer keine absoluten Frequenzen, sondern nur Frequenzabstände kleiner als der freie Spektralbereich gemessen werden.
Die transmittierte Intensität wird durch die Airy-Funktion beschrieben. Die Finesse

$$\mathcal{F} = \frac{\pi\sqrt{R}}{1-R}$$

ist ein Maß für die Güte des Interferometers und hängt von der Spiegelreflektivität R ab. Zwei nahe benachbarte Frequenzen können nur dann getrennt beobachtet werden, wenn ihre Transmissionsmaxima ausreichend separiert sind. Die minimal auflösbare Bandbreite beträgt:

$$\delta\nu_{\min} = \frac{c}{2L\mathcal{F}} = \frac{\mathrm{FSR}}{\mathcal{F}}.$$

Für das verwendete Interferometer ist $\mathcal{F} = 400$.
Für transversale Moden eines Laserresonators mit $L = 60\,\mathrm{cm}$ und zwei gekrümmten Spiegeln mit $R = 45\,\mathrm{cm}$ kann der Frequenzabstand zwischen TEM_{00q}- und TEM_{01q}-Moden berechnet werden durch

$$\Delta\nu_{00-01} = \frac{c}{2L}\pi^{-1}\arccos\left(\sqrt{g_1 g_2}\right).$$

Vorbereitungsfragen

- Beschreiben Sie den Aufbau und die Funktionsweise eines Scanning-Fabry-Perot-Interferometers.

- Warum kann das Fabry-Perot-Interferometer keine absoluten Frequenzen, sondern nur Frequenzabstände messen?
- Was versteht man unter der Finesse eines Fabry-Perot-Interferometers?
- Stellen Sie die Airy-Funktion für $\mathcal{F} = 30$, $\mathcal{F} = 100$ und $\mathcal{F} = 400$ graphisch dar.
- Berechnen Sie die minimal auflösbare Bandbreite für $\mathcal{F} = 400$ und $FSR = 4\,\mathrm{GHz}$.
- Welche Spiegelreflektivität benötigt man für eine Finesse von $\mathcal{F} = 400$?
- Berechnen Sie den Frequenzabstand $\Delta\nu_{00-01}$ der TEM_{00q}- und TEM_{01q}-Moden für $L = 60\,\mathrm{cm}$ und $R = 45\,\mathrm{cm}$.
- Wie groß ist in diesem Fall der Abstand zweier longitudinaler Moden?
- Können mit dem Fabry-Perot-Interferometer sowohl die transversalen als auch die longitudinalen Moden sichtbar gemacht werden?

4 Durchführung des Experiments

4.1 Sicherheits- und Handhabungshinweise

- **Lasersicherheit**: Die eingesetzten Laser (Justierlaser, Selbstbau Helium-Neon-Laser) sind Laser der Klasse 2 und damit prinzipiell gefährlich für das menschliche Auge. Beachten Sie daher in jedem Fall folgende Hinweise.
  - Am Versuch stehen Laser-Justierbrillen zur Verfügung. **Die Justierbrillen sind während der gesamten Versuchsdurchführung zu tragen.** Diese schwächen die Intensität der Laserstrahlung um Faktor 10 ab. Das bedeutet **nicht**, dass ein direkter Blick in den Laser mit diesen Brillen ungefährlich ist, es wird lediglich die Zeit bis eine Schädigung eintritt verlängert. Die Laserstrahlung ist auch durch die Brillen noch so gut sichtbar, dass der Fleck des Lasers auf einer Blende oder einem Schirm beobachtbar ist.
  - Um zu vermeiden, dass der Laserstrahl oder ein Reflex in ihr Auge gelangt dürfen **keine Uhren, Ringe oder ähnliche reflektierende Gegenstände getragen werden**, die mit dem Laserstrahl in Berührung kommen könnten. Begeben Sie sich niemals auf Augenhöhe mit der Laserstrahlung. Bevor Sie den Computer verwenden stellen Sie sicher, dass keine Reflexe in dieser Richtung gelenkt werden.
  - Wird eine Optik wie z.B. ein Umlenkspiegel in den Strahl gebracht, sollte der Laserstrahl vorher geblockt werden. Ist dies nicht möglich, da z.B. die Position des Laserstrahls auf einem Spiegel beobachtet werden muss, achten Sie darauf, den Halter mit der Optik vorsichtig und gerade in den Strahl zu schieben, so dass es nicht durch ein Verkippen zur Reflektion nach oben kommen kann.

- Die verwendete Gasentladungsröhre wird mit einer Hochspannung von über 1 kV betrieben. Die Spannung liegt an den äußeren Enden der Röhre an, diese wurden mit Teflon-Isolationen versehen. **Das Berühren der Röhre kann jedoch lebensgefährlich sein!** Auch im ausgeschalteten Zustand darf der Glaskörper der Röhre nicht berührt werden, da die so entstehende Verschmutzungen die Röhre beschädigen. **Fassen Sie die Röhre daher nur im ausgeschalteten Zustand und nur an der metallischen Halterung an.** Das Putzen der Fenster der Röhre darf, falls nötig, nur vom Betreuer durchgeführt werden.

- Die verwendeten Optiken (Resonator-Spiegel, Umlenkspiegel) sind sehr empfindlich. **Die reflektierenden Flächen dürfen auf keinen Fall berührt werden!** Falls sich Staub auf den Spiegeln befindet, kann dieser mit dem beim Versuch vorhandenen Blasebalg abgepustet werden. Wenn dies keine Verbesserung bringt und das Putzen der Spiegel notwendig ist, wird dies unter Aufsicht des Betreuers durchgeführt.

4.2 Justage des Aufbaus

Im Folgenden werden die zur Justage des Aufbaus nötigen Schritte beschrieben. Mit Hilfe eines Justierlasers wird die optische Achse markiert, an dieser werden anschließend sowohl die Gasentladungsröhre als auch die Spiegel ausgerichtet. In weiteren Schritten wird die Untersuchung der Laserstrahlung mit Hilfe von CCD-Kamera und Fabry-Perot-Interferometer beschrieben.

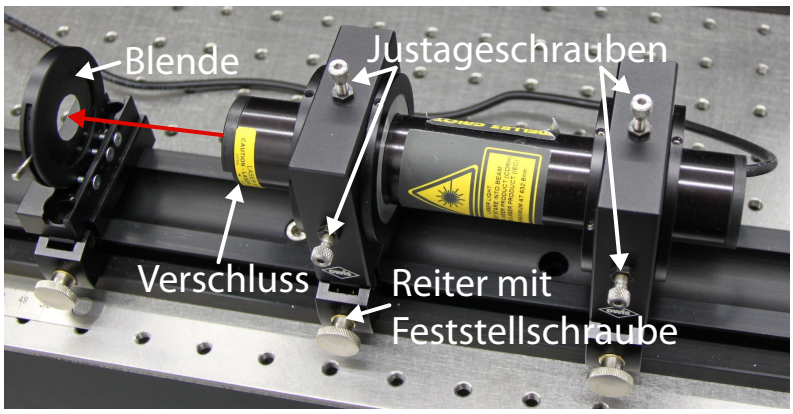


Abb. 4.1: Der Justierlaser: Der Laser wird durch Drehen des Schlüssels am Netzgerät eingeschaltet. Achten Sie darauf, dass die Reiter auf der optischen Bank festgezogen sind. An der Austrittsöffnung des Lasers befindet sich ein Schieber zum Blocken der Laserstrahlung.

1. **Justage des Laserresonators**: Als erstes sollten Sie einen Resonator aus zwei gekrümmten Spiegeln und eine Länge von 45 cm aufbauen. Setzen Sie zunächst den weiter vom Justierlaser entfernten Spiegel ein, dieser sollte der Auskoppelspiegel sein (keine Beschriftung auf Halter). Setzten Sie vor den Justierlaser die Blende, so dass Sie auf dieser den Rückreflex des Spiegels beobachten können (siehe Abb. 4.2). Justieren Sie den Spiegel mit den beiden Schrauben auf der Rückseite des Spiegelhalters so, dass dieser Rückreflex durch die Gasentladungsröhre und durch die Blende geht. Setzen Sie nun den zweiten Spiegel auf der Seite des Justierlaser ein (Beschriftung HR 450 mm). Sie erhalten auch hier einen Rückreflex, den Sie wieder in die Blende zurück justieren.

2. **Erreichen des Laserbetriebs**: Vergewissern Sie sich, dass sich die Teflon-Isolationen auf den Hochspannungsanschlüssen befinden. Schalten Sie die Gasentladungsröhre ein. Stellen Sie hinter dem Auskoppelspiegel den Reiter mit Schirm auf (siehe Abb. 4.2). Die Wahrscheinlichkeit, dass der Laser nun schon läuft, ist relativ gering und stark abhängig von der Präzision Ihrer Justage (wenn doch herzlichen Glückwunsch). Ansonsten sollten Sie nun beginnen, die Schrauben der Spiegelhalter probeweise leicht zu verdrehen. Fangen Sie hierbei zuerst mit dem HR-Spiegel an. Wenn dies nichts hilft, können die Schrauben auch gegeneinander verdreht werden, also z.B. einen der Spiegel etwas in horizontaler Richtung verdrehen und dann die vertikale Richtung testweise in beide Richtungen leicht verändern. Der Bereich, um den die Schrauben verdreht werden müssen, beträgt in der Regel nicht mehr als eine Viertelumdrehung nach links bzw. rechts. Falls diese Maßnahmen nicht zum Erfolg führen, wiederholen Sie die vorhergehenden Schritte.

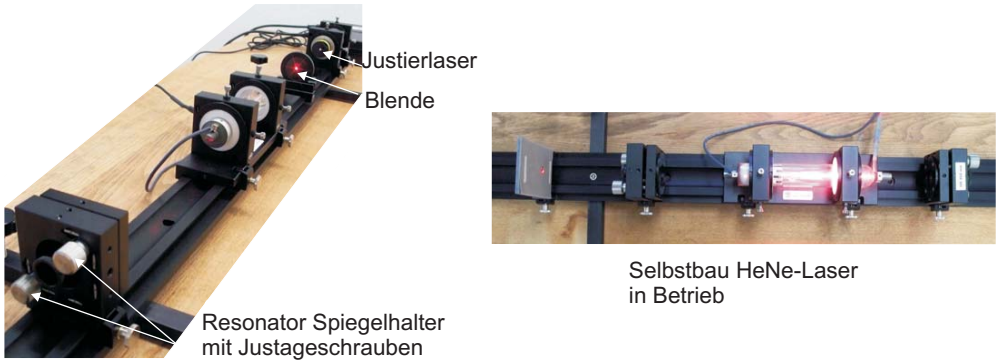


Abb. 4.2: Die Resonatorjustage: Zuerst wird der weiter vom Justierlaser entfernte Spiegel eingebaut und der Rückreflex in den Strahl zurückjustiert. In der hier gezeigten Aufnahme ist der Reflex noch nicht genau in den Strahl zurück justiert, was man am hellen Leuchten auf der Blende erkennt. Die rechte Abbildung zeigt den HeNe-Laser nach erfolgreicher Justage in Betrieb.

3. **Justage des Aufbaus zur Untersuchung der Laserstrahlung:** Zum Vermessen der transversalen und longitudinalen Moden verwenden Sie bitte den in Abb. 4.3 dargestellten Aufbau. Zum Festschrauben der Komponenten verwenden Sie die vorhandenen Klammern, die mit einer Schraube (Gewinde M6) in den Gewindelöchern des optischen Tisches befestigt werden. Kontrollieren Sie, dass alle Komponenten ordnungsgemäß befestigt wurden (also fest stehen). Lenken Sie den Laserstrahl mit Hilfe von zwei Umlenkspiegel um 180° ab. **Nach jedem der beiden Umlenkspiegel sollte der Laserstrahl parallel zur Oberfläche des optischen Tisches und parallel zu den Lochreihen des Tisches verlaufen.** Kontrollieren Sie dies mit Hilfe

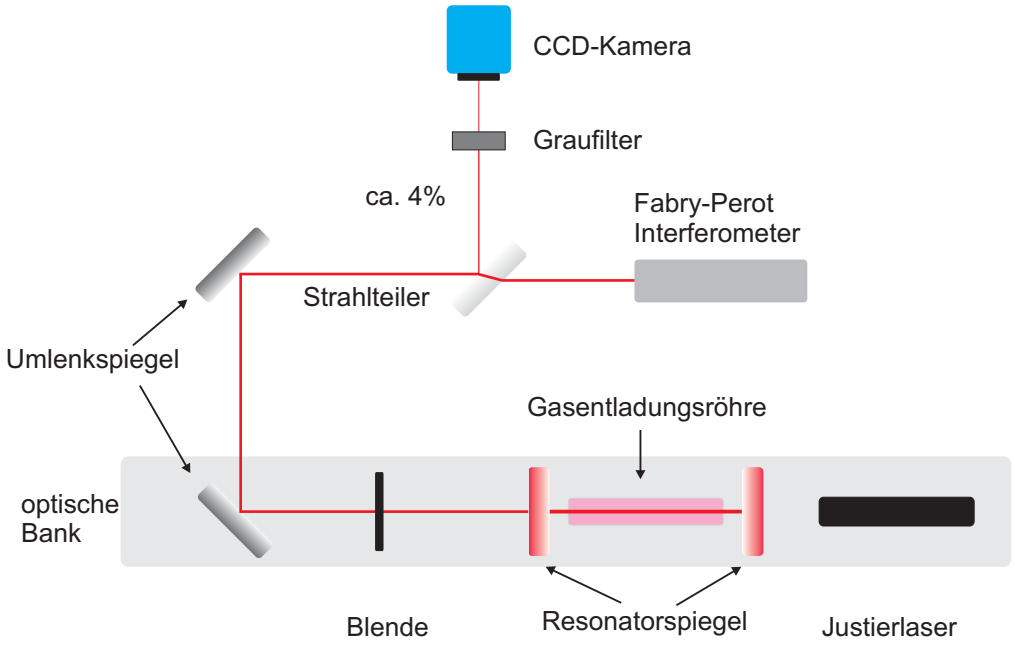


Abb. 4.3: Schematische Darstellung des Aufbaus zur Untersuchung der longitudinalen und transversalen Moden des HeNe-Lasers

des Schirms mit Millimeterpapier, den Sie entlang des Laserstrahls verschieben.

- **Justage auf die CCD-Kamera**:Zum Umlenken des Laserstrahl auf die CCD-Kamera verwenden Sie einen Strahlteiler (siehe Abb. 4.3). Befestigen Sie die CCD Kamera so, dass der Laserstrahl möglichst mittig auf die Abdeckung der Kamera trifft. Der Strahlteiler befindet sich in einem justierbaren Halter, verwenden Sie diesen Halter, um den Laserstrahl genau mittig auf die CCD-Kamera zu lenken. Damit die CCD Kamera nicht übersteuert, muss ein Graufilter vor der Kamera angebracht werden. Der verwendete Graufilter hat eine optische Dichte von 2. Bringen Sie den Graufilter in den Strahlengang. Stellen Sie sicher, dass das USB Kabel der Kamera am PC eingesteckt ist und starten Sie das Programm 'IC Capture 2.2' (Icon auf dem Desktop). Sie sollten sofort ein Live-Bild der Kamera erhalten.
- **Justage der Einkopplung in das Fabry-Perot-Interferometer (FPI)**: Diese Justage ist wesentlich anspruchsvoller als die Justage auf die CCD-Kamera, da das Licht das Interferometer parallel zu dessen Achse passieren muss. Stellen Sie hierzu zunächst sicher, dass der Strahl möglichst horizontal und parallel zu den Lochreihen über dem optischen Tisch läuft (kontrollieren Sie dies durch Abmessen der Höhe und vertikalen Lage an verschiedenen Positionen mit Hilfe des Schirms mit Millimeterpapier). Der das FPI aufbauende Resonator ist bereits jus-

tiert. **Handhaben Sie das FPI daher beim Einbau mit äußerster Vorsicht und setzten Sie das Gerät keinen zu starken Erschütterungen aus!** Stellen Sie die Höhe des FPI mit Hilfe des Halters auf die Strahlhöhe ein. Das FPI muss parallel zum Verlauf des Laserstrahls stehen.

Führen Sie nun vor der Verkabelung des FPI erst die Messungen 1 und 2 durch, da hierfür ebenfalls der Photodiodenverstärker benötigt wird. Sie können dazu die Photodiode und den Polarisator zwischen die beiden Umlenkspiegel stellen.

Zur genauen Justage müssen Sie die Transmission durch das FPI be-

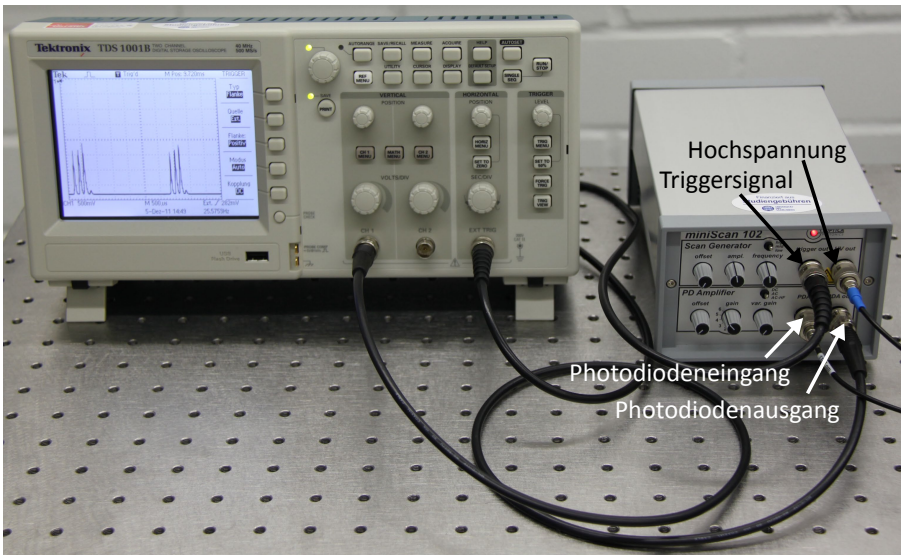


Abb. 4.4: Verkabelung des FPI, Anleitung im Text! Das Signal der Photodiode wird, nachdem es verstärkt wurde, auf dem Oszilloskop dargestellt.

obachten. Nehmen Sie dazu zunächst die Verkabelung vor (Abb. 4.4, Text beachten). An der Rückseite des FPIs findet sich der Anschluss der Photodiode, dieser wird mit dem Anschluss 'PDA In' an der Miniscan Einheit verbunden (Eingang des Photodiodenverstärkers). Der Ausgang des Verstärker 'PDA Out' wird an das Oszilloskop angeschlossen. Den Anschluss 'HV out' verbinden Sie mit dem seitlichen Eingang des FPI. Neben diesem Anschluss befindet sich an der Scaneinheit ein Trigger Ausgang, diesen verbinden Sie mit dem externen Triggereingang des Oszilloskops. **Stellen Sie sicher, dass der Regler für 'Amplitude' auf Links-Anschlag steht, damit zu Anfang keine zu hohe Spannung anliegt.** Triggern Sie das Digital-Oszilloskop mit dem externen Triggersignal. Stellen Sie am Photodiodenverstärker die Verstärkung ('Gain') maximal ein. Sie sollten nun Peaks im Photodiodensignal erkennen. Ist dies nicht der Fall, kontrollieren Sie, dass der Strahl auf gleicher Höhe und

parallel zu den Lochreihen verläuft und das FPI gerade im Strahl steht. Je besser der Strahl in das FPI eingekoppelt ist, desto höher und schmaler sind diese Peaks. In Abb. 4.5 sehen Sie ein Beispiel für die Transmissionspeaks bei gut und schlecht eingekoppeltem Laserlicht. Optimieren Sie die Justage mit den beiden Umlenkspiegeln durch Beobachtung der Signalverbesserung.

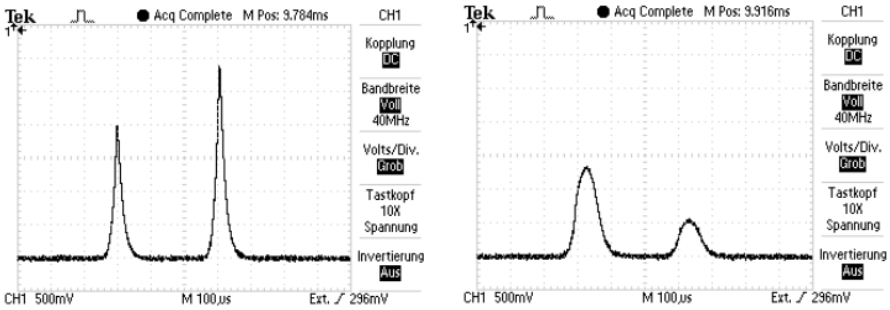


Abb. 4.5: Links: Bei guter Einkopplung sollten die Peaks auf einem flachen Untergrund aufsitzen und möglichst schmal und symmetrisch sein. Rechts: Bei schlechter Einkopplung verbreitern sich die Peaks und verlieren an Intensität.

5 Messungen und Auswertung

5.1 Durchzuführende Messungen

Führen sie Messungen 1-3 für eine Resonatorlänge von 45 cm und vier weiteren Resonatorlängen durch

1. **Laserleistung für verschiedene Resonatorlängen**
   Justieren Sie den Laser auf die maximale Ausgangsleistung. Nutzen Sie dazu die Photodiode und die zugehörige Kalibrierkurve (Abb. A.1).

2. **Höhere transversale Moden**
   Nehmen Sie bei der maximalen Leisung die jeweiligen Transversalmoden auf der CCD Kamera, sowie das zugehörige FPI Spektrum dieser Moden auf.

3. **Modenprofil der Grundmode**
   Wechseln Sie nun zur Grundmode (TEM_{00}) und nehmen Sie auch hier ein Bild der Mode mit der CCD Kamera und ein FPI Spektrum auf

4. **Polarisation**
   Nachdem die vorherigen Schritte für fünf verschiedene Resonatorlängen durchgeführt wurden, messen Sie für eine feste Resonatorlänge die Leistung hinter einem Polarisator mittels einer Photodiode gemessen werden. Variieren Sie hierbei die Ausrichtung des Polarisators in Schritten von 10°. Nehmen Sie außerdem einen Untergrundwert auf.

5. **Strahldivergenz**
   Montieren Sie nun für eine feste Resonatorlänge die CCD Kamera in fünf Abständen zum Resonator und nehmen Sie jeweils ein Bild der Grundmode auf.

5.2 Auswertung

1. **Laserleistung für verschiedene Resonatorlängen**
   Stellen Sie die maximale Laserleistung für die verschiedenen Resonatorlängen graphisch dar und begründen Sie den Verlauf.

2. **Modenabstände**
   Vergleichen Sie die FPI Aufnahmen, um transversale und longitudinale Moden zu identifizieren. Plotten Sie anschließend die Abstände zwischen longitudinalen Moden und fitten Sie die Werte mit dem FSR $\Delta\nu = c/2L$ an.

3. **Polarisation**
   Plotten Sie die gemessene Leistung für jede Einstellung des Polarisators und fitten Sie die Ergebnisse mit dem Gesetz von Malus an.

4. **Strahldivergenz**
   Bestimmen Sie mit einem Gaußfit der aufgenommenen Grundmode die jeweilige Fleckgröße für jede Position der CCD Kamera. Berechnen Sie aus diesen Werten die Strahldivergenz der Grundmode.

5.3 Hinweise zu Datenaufnahme und Auswertung

1. Beachten Sie, dass die Sägezahnspannung am FPI bewirkt, dass sich die Transmissionspeaks während der abfallenden Flanke wiederholen. Ein Beispiel, inklusive der angelegten Spannung selbst ist in Abb. 5.1 zu sehen. Um eine genaue Bestimmung der Modenabstände zu ermöglichen, achten Sie für die Kalibrierung und die auszuwertenden Moden nur auf die steigende Flanke der Spannung.

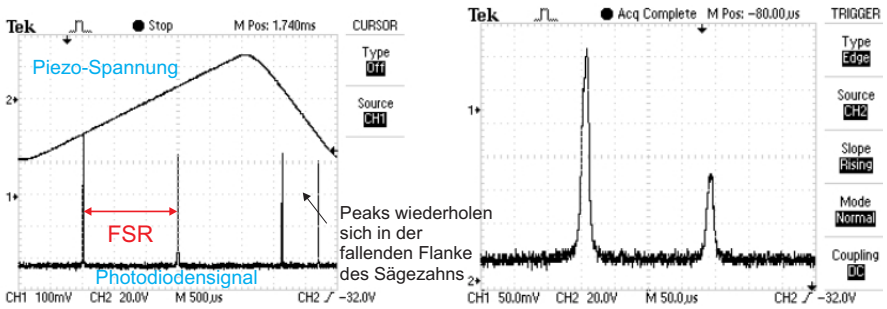


Abb. 5.1: Links: Typisches Transmissionssignal des FPIs bei einem einmodigen Laser. (Bei den meisten ihrer Messungen werden jedoch mehrere Moden zu sehen sein.) Rechts: Bei guter Einkopplung sollten die Peaks auf einem achen Untergrund aufsitzen und möglichst schmal und symmetrisch sein.

2. Nutzen Sie die Software 'IC Capture 2.2' auf dem zur Verfügung stehenden PC, um Bilder der CCD-Kamera aufzunehmen. Achten Sie hierbei darauf, einen Graufilter vor der Kamera zu verwenden und die Belichtung gegebenenfalls anzupassen, sodass es nicht zu Übersättigung der Kamera kommt.

3. Um die Werte des Oszilloskops aufzunehmen, nutzen Sie die Software 'Open Choice Desktop' der Firma Tektronix. Sie sollten hierbei nicht den Bildschirm aufnehmen sondern direkt die Daten als csv-Datei exportieren lassen, um später die Auswertung in einer geeigneten Software durchzuführen.

4. Um die Fleckgröße mittels der aufgenommenen Bilder der CCD-Kamera zu bestimmen, müssen sie erst die Pixelnummer in eine reale Einheit umrechnen. Ein Pixel ist dabei $7,94\,\mu$m in x- und y-Richtung groß.

Literaturverzeichnis

[1] Demtröder, Wolfgang: *Experimentalphysik 3: Atome, Moleküle und Festkörper*. Springer, 2005

[2] Eichler, Jürgen ; Eichler, Hans-Joachim: *Laser: Grundlagen · Systeme · Anwendungen*. Springer, 2013

[3] Kneubühl, Fritz K. ; Sigrist, Markus W.: *Laser*. Springer, 2008

[4] Milonni, Peter W. ; Eberly, Joseph H.: *Laser physics*. John Wiley & Sons, 2010

[5] Svelto, Orazio ; Hanna, David C. u. a.: *Principles of lasers*. Bd. 4. Springer, 1998

[6] Javan, A. ; Bennett, W. R. ; Herriott, D. R.: Population Inversion and Continuous Optical Maser Oscillation in a Gas Discharge Containing a He-Ne Mixture. In: *Phys. Rev. Lett.* 6 (1961), Feb, S. 106–110

[7] Demtröder, Wolfgang: *Experimentalphysik 2: Elektrizität und Optik*. Springer, 2009

[8] Kay, L: Nonconservation of amplitude in wave division-a compelling example. In: *American Journal of Physics* 54 (1986), Nr. 4, S. 346–347

A Anhang

A.1 Formelsammlung Gaußsche Strahlen

$$\mathcal{E}(\vec{r}) = A\frac{w_0}{w(z)}e^{i[kz-\tan^{-1}(\frac{z}{z_0})]}e^{\frac{ik(x^2+y^2)}{2R(z)}}e^{\frac{-(x^2+y^2)}{w^2(z)}} \tag{A.1}$$

$$I(\vec{r}) = \frac{c\epsilon_0}{2}|A|^2\left(\frac{w_0}{w(z)}\right)^2 e^{\frac{-2(x^2+y^2)}{w^2(z)}} \tag{A.2}$$

$$w(z) = w_0\sqrt{1+\frac{z^2}{z_0^2}} \tag{A.3}$$

$$R(z) = z + \frac{z_0^2}{z} \tag{A.4}$$

$$z_0 = \frac{\pi w_0^2}{\lambda} \tag{A.5}$$

$$\theta = \frac{w(z)}{z} = \frac{\lambda}{\pi w_0} \tag{A.6}$$

A.2 Kalibrierkurve der Photodiode

Um die erreichte Laserleistung auch quantitativ bestimmen zu können, wurde die zur Verfügung stehende Photodiode im Vergleich mit einem kommerziellen Laser-Leistungsmessgerät (Coherent FieldMax) kalibriert.

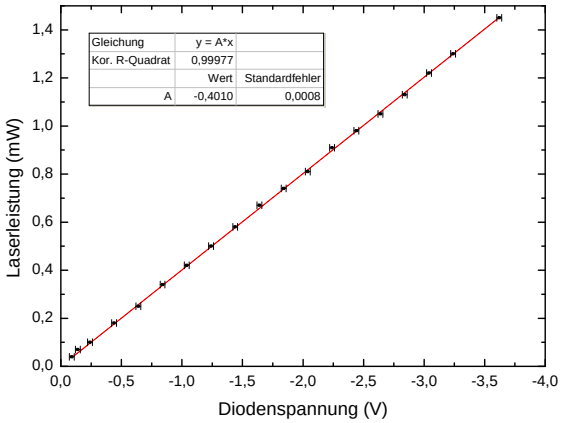


Abb. A.1: Kalibriermessung der Photodiode vom 13.10.2008.

A.3 Transmissionskurven der Resonatorspiegel

Die für den Aufbau des Laserresonators verwendeten Spiegel sind speziell für den gewünschten Übergang im Neon bei einer Wellenlänge von $\lambda = 632,8\,\mathrm{nm}$ optimiert. Für den Auskoppelspiegel und die beiden hochreflektierenden (HR)-Spiegel werden verschiedene Beschichtungen verwendet. Abbildung A.2 zeigt die mit Hilfe eines Photospektrometers (Hitachi U3501) gemessene Transmission der Spiegel.

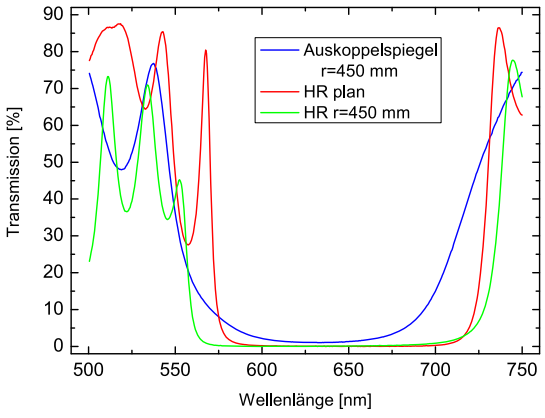


Abb. A.2: Transmissionskurven der Resonatorspiegel.