

Anleitung zum Fortgeschrittenenpraktikumsversuch

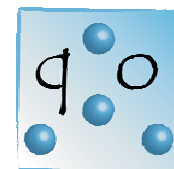
„Grundlagen der Laserphysik Helium-Neon-Laser“

Universität des Saarlandes
Fachrichtung Experimentalphysik
Arbeitsgruppe Prof. Dr. Christoph Becher

Version WS 2011/2012



UNIVERSITÄT
DES
SAARLANDES



Quantum Optics
Group

Inhaltsverzeichnis

1 Grundlagen der Laserphysik	3
1.1 Funktionsweise eines Laser	3
1.2 Besetzungsinversion, Schwellwertbedingung, Verluste	4
2 Grundlagen optischer Resonatoren	4
2.1 Longitudinale Lasermoden	4
2.2 Stabilitätskriterien für Resonatoren	5
2.3 Paraxiale Wellengleichung und Gauß'sche Moden	6
2.4 Parameter der Gauß'schen Grundmode am Beispiel zweier Resonatoren	8
3 Spezielle Fragestellungen zum Helium-Neon-Laser	8
3.1 Termschema des Helium-Neon-Laser	8
3.2 Technische Realisierung eines Helium-Neon-Lasers	9
3.3 Lasermoden und Linienverbreiterung	9
3.4 Funktionsweise eines Fabry-Perot-Spektrum-Analysators	9
4 Durchführung des Experiments	10
4.1 Sicherheits- und Handhabungshinweise	10
4.2 Justage des Aufbaus	11
4.3 Durchzuführende Messungen	16
4.4 Auswertung	19
5 Ergänzende Informationen	20
5.1 Kalibrierkurve der Photodiode	20
5.2 Transmissionskurven der Resonatorspiegel	20

1 Grundlagen der Laserphysik

Im Folgenden finden Sie eine kurze Auflistung der wichtigsten Themengebiete zum Versuch Helium-Neon-Laser mit grundlegenden Erläuterungen und Vorbereitungsfragen. Stellen Sie als Vorbereitung auf den Versuch die aufgeführten Punkte mit Hilfe der Vorbereitungsfragen in eigenen Worten auf mindestens 2 Seiten schriftlich dar. Es wird erwartet, dass die aufgeführten Punkte zu Beginn der Versuchsdurchführung ausreichend bekannt und verstanden sind. Geeignet zur Vorbereitung sind alle gängigen 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, zu Fehler-Abschätzungen) zu den digital aufgenommenen Daten übersichtlich und vollständig, so dass anhand dieser Aufzeichnungen die Messungen klar nachvollzogen werden können. Dieses Messprotokoll ist bei Rückfragen dem Betreuer vorzulegen, bewahren Sie es also bis zum Abschluss des Versuchs auf.

1 Grundlagen der Laserphysik

1.1 Funktionsweise eines Laser

Betrachten Sie als einfaches Modellsystem ein System (z.B. ein Atom) mit nur 2 Energieniveaus. Erläutern Sie die Prozesse der Absorption, spontanen und stimulierten Emission von Licht. Welchen der Prozesse macht man sich im Laser zu Nutze? Was sind die grundlegenden Unterschiede zwischen stimulierter und spontaner Emission?

Abb. 1 zeigt die grundlegenden Bauelemente eines Lasers. Erläutern Sie die grundlegende Funktionsweise eines Lasers und die Aufgabe des jeweiligen Bauelements. Wofür steht das Akronym „LASER“?

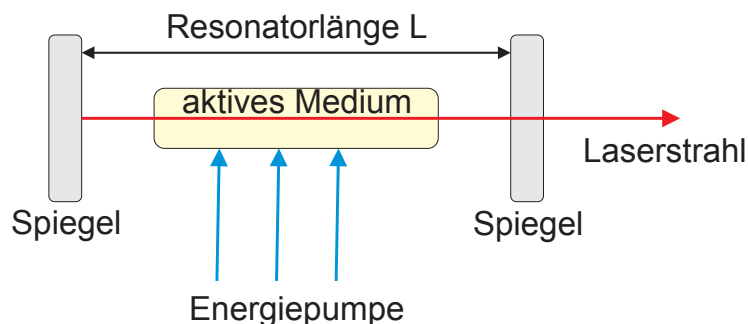


Abbildung 1: Bauelemente eines Laser, Abbildung nach [1]

1.2 Besetzungsinversion, Schwellwertbedingung, Verluste

Besetzungsänderungen $\frac{dN_i}{dt}$ werden meist durch sog. Ratengleichungen beschrieben. Für ein 2-Niveau System mit den Besetzungen N_1 im Grundzustand und N_2 im angeregten Zustand gelten die Ratengleichungen:

$$\begin{aligned}\frac{dN_1}{dt} &= N_2 A_{21} + B_{21} q N_2 - B_{12} q N_1 \\ \frac{dN_2}{dt} &= -N_2 A_{21} - B_{21} q N_2 + B_{12} q N_1\end{aligned}$$

Der erste Term auf der rechten Seite beschreibt die spontane Emission mit dem Einstein-Koeffizienten A_{21} , der zweite Term die stimulierte Emission, der dritte die Absorption. Für Niveaus mit identischem statistischen Gewicht (gleiche Anzahl energetisch entarteter Unterniveaus) gilt $B_{21} = B_{12}$. q ist die Photonenzahl eines mit dem 2-Niveausystem wechselwirkenden Lichtfeldes. Jeder Prozess der stimulierten Emission erzeugt ein Photon, jede Absorption vernichtet ein Photon. Was muss also für N_1 und N_2 gelten, damit das Lichtfeld verstärkt wird, wenn man von den spontan emittierten Photonen absieht? Wie sieht die Besetzungsverteilung aus, wenn die Niveaus eine thermische Besetzung aufweisen? Kann ein Medium mit thermischer Besetzungsverteilung Licht verstärken? Ist in einem 2-Niveau System eine (dauerhafte) Lichtverstärkung möglich, wenn man von obigen Ratengleichungen ausgeht, also das System nur mit Licht anregt? Damit das Lichtfeld im Laser tatsächlich verstärkt werden kann, muss die erreichte Verstärkung pro Lichtumlauf im Resonator größer als die Verluste in diesem Umlauf sein, man spricht in diesem Zusammenhang von der sog. Schwellwertbedingung. Erläutern Sie mögliche Verlustprozesse in einem Laser.

2 Grundlagen optischer Resonatoren

Ein wichtiges Bauelement des Lasers ist der im einfachsten Fall aus 2 gegenübergestellten Spiegeln bestehende Resonator. Wie das im Resonator entstehende Lichtfeld charakterisiert werden kann, ist Gegenstand der nächsten Abschnitte.

2.1 Longitudinale Lasermoden

Der (geometrisch) einfachste Ansatz eines Laserresonators sind zwei parallel stehende plane Spiegel. Betrachtet man zunächst einmal nur die Feldverteilung des Lichtfeldes in Richtung der Resonatorachse, so bildet sich zwischen den beiden Spiegeln eine stehende Welle aus, wobei auf den Spiegelflächen ein Knoten liegen muss. Welche Bedingung muss die Wellenlänge λ dieser stehenden Welle erfüllen, wenn die Länge des Resonators L ist? Die stehenden Wellen mit unterschiedlicher Knotenzahl werden als longitudinale oder axiale Moden des Resonators bezeichnet. Wie groß ist der Frequenzabstand zwischen 2 „benachbarten“ longitudinalen Moden in Abhängigkeit von der Resonatorlänge L ? Was passiert, wenn der Resonator thermischen oder mechanischen Schwankungen ausgesetzt ist?

2 Grundlagen optischer Resonatoren

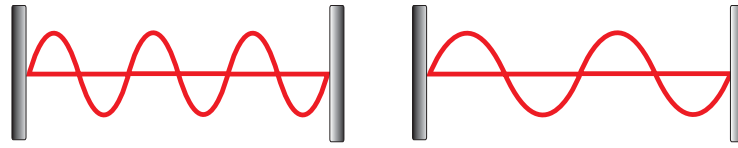


Abbildung 2: Vereinfachte Darstellung der stehenden Welle in einem Resonator. Bei einem realen Resonator für Licht ist die Knotenzahl der stehenden Wellen sehr viel größer ($\approx 10^7$).

2.2 Stabilitätskriterien für Resonatoren

Ein Laserresonator wird als stabil bezeichnet, wenn ein achsennaher Strahl unendlich oft (bei Annahme von unendlich gut reflektierenden Spiegeln) im Resonator umläuft. Um zu entscheiden, ob ein Resonator stabil ist, führt man die sog. Resonatorparameter g_1 und g_2 ein, mit

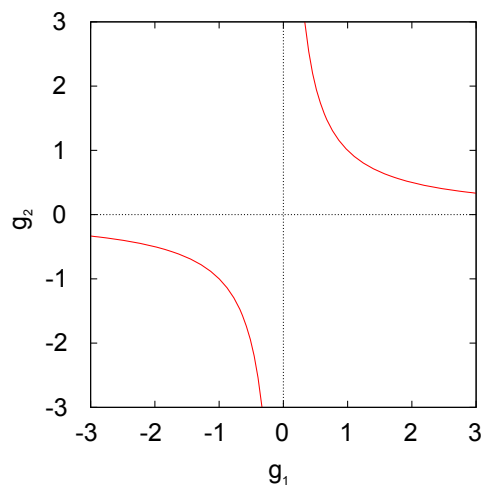
$$g_1 = 1 - \frac{L}{R_1} \quad g_2 = 1 - \frac{L}{R_2}$$

Hierbei ist L die Resonatorlänge und R_1 und R_2 sind die Krümmungsradien der Spiegel, die als positiv anzusetzen sind, wenn die Spiegel konkav sind. Der Resonator ist stabil wenn gilt:

$$0 \leq g_1 \cdot g_2 \leq 1$$

Diese Beziehung lässt sich mit Prinzipien der Strahlenoptik (lineare Lichtausbreitung) berechnen. Abb. 3 zeigt die Hyperbeln $g_1 \cdot g_2 = 1$. Wo liegen die stabilen Resonatoren (siehe z.B. [3] Kap. 5, [4] Kap. 14.)? Ein Spezialfall ist der sog. symmetrische konfokale Resonator mit $R_1 = R_2 = L$, wo liegt dieser im Stabilitätsdiagramm? Wo müsste man einen Resonator aus zwei planen Spiegeln eintragen? Zum Aufbau ihres HeNe-Lasers stehen ihnen zwei verschiedene Arten von Spiegeln zur Verfügung: plane Spiegel und Spiegel mit einem Krümmungsradius von $R = 450$ mm. In welchem Längenbereich ist ein Resonator aus zweien dieser gekrümmten Spiegeln stabil? In welchem Bereich ist ein Resonator aus einem Planspiegel und einem dieser gekrümmten Spiegel stabil?

Abbildung 3: Hyperbeln für $g_1 g_2 = 1$. Machen Sie sich anhand der Abbildung klar, wo in dieser Darstellung die stabilen Resonatoren liegen. Markieren Sie die genannten Spezialfälle und die im Versuch aufzubauenenden Resonatoren.



2.3 Paraxiale Wellengleichung und Gauß'sche Moden

Die Stabilität eines Laserresonators, sowie die longitudinalen Moden lassen sich durch einfache geometrische Überlegungen (stehende Wellen) und mit Gesetzen der Strahlenoptik herleiten. Will man jedoch eine Aussage über die Feldverteilung in Richtungen senkrecht zur Resonatorachse (**transversale Resonatormode**) treffen, liefern diese Ansätze keine Aussagen. Die Ausbreitung von Licht muss hierfür durch die Maxwell-Gleichungen beschrieben werden. Durch Umformen und Einsetzen der Maxwell-Gleichungen erhält man die sog. skalare Wellengleichung für ein skalares elektrisches Feld im Vakuum (keine Berücksichtigung von Polarisierungseffekten nach [4]):

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

Diese Gleichung lässt sich im allgemeinen nicht analytisch lösen. Für die Betrachtung von Laserresonatoren macht man folgende Annahmen für die Felder: man geht von einem monochromatischen Feld $E(\vec{r}, t) = \mathcal{E}(\vec{r})e^{-i\omega t}$ aus. Weiterhin schränkt man die Betrachtung des Feldes, genau wie vorher in der Strahlenoptik, auf Anteile ein, die nur kleine Winkel gegen die Resonatorachse einschließen. Man spricht von der sogenannten paraxialen Näherung, die angesetzten Felder haben die Form $\mathcal{E}(\vec{r}) = \mathcal{E}_0(\vec{r})e^{ikz}$. Durch Einsetzen in Gl. (1) erhält man die sog. paraxiale Wellengleichung

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

Diese Gleichung lässt sich analytisch lösen, die wichtigste Lösung sind die sogenannten

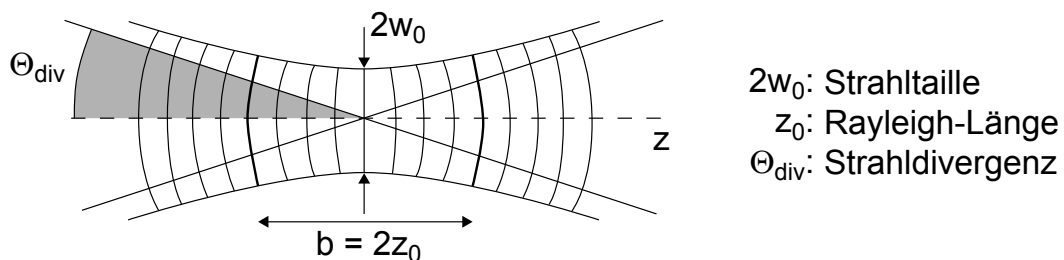


Abbildung 4: Darstellung eines Gauß'schen Strahls mit angedeuteter Krümmung der Wellenfronten (Abbildung nach <http://www.iap.uni-bonn.de/oll/graphik/kap2>)

Gauß'schen Strahlen, wie sie in Abbildung 4 dargestellt sind. In den Richtungen senkrecht zur Resonatorachse (x,y) folgt die Verteilung der Intensität bzw. des elektrischen Feldes einer Gaußfunktion. Der Gauß'sche Strahl zeigt eine Strahltaille der Breite w_0 von der aus sich die Fleckgröße $w(z)$ in beide Richtungen vergrößert. Die Fleckgröße ist dabei definiert

2 Grundlagen optischer Resonatoren

als der Radius, in dem die Intensität auf $\frac{1}{e^2}$ des Maximalwertes abgefallen ist. Eine wichtige Größe ist die sog. Rayleigh-Länge z_0 , die die Strecke in z-Richtung angibt, in der sich die Fleckgröße auf $\sqrt{2}w_0$ vergrößert hat. Der Krümmungsradius R der Wellenfronten verändert sich ebenfalls mit der Propagationsstrecke z . Die Divergenz des Gauß'schen Strahls θ wird für $z \gg z_0$ definiert.

Formelsammlung Gauß'sche Strahlen:

$$\mathcal{E}(\vec{r}) = A \frac{w_0}{w(z)} e^{i[kz - \tan^{-1}(\frac{z}{z_0})]} e^{\frac{ik(x^2+y^2)}{2R(z)}} e^{-\frac{(x^2+y^2)}{w^2(z)}} \quad (3)$$

$$I(\vec{r}) = \frac{c\epsilon_0}{2} |A|^2 \left(\frac{w_0}{w(z)} \right)^2 e^{-\frac{2(x^2+y^2)}{w^2(z)}} \quad (4)$$

$$w(z) = w_0 \cdot \sqrt{1 + \frac{z^2}{z_0^2}} \quad (5)$$

$$R(z) = z + \frac{z_0^2}{z} \quad (6)$$

$$z_0 = \frac{\pi w_0^2}{\lambda} \quad (7)$$

$$\theta = \frac{w(z)}{z} = \frac{\lambda}{\pi w_0} \quad (8)$$

Diese Formeln beschreiben zunächst einmal einen Gauß'schen Strahl im freien Raum. Wenn dieser Strahl eine stationäre Feldverteilung in einem Resonator darstellen soll, muss sich die Feldverteilung beim Umlauf im Resonator reproduzieren. Dazu muss der Krümmungsradius der Wellenfront $R(z)$ auf den Spiegeln gleich dem Krümmungsradius R des verwendeten Spiegels sein. Wenn man diese Voraussetzungen mit einbezieht, lässt sich die Gauß'sche Grundmode eines Resonators aus 2 Spiegeln berechnen (siehe 2.4).

Die Gauß'sche Grundmode ist jedoch nicht die einzige Lösung der paraxialen Wellengleichung: Weitere Lösungen sind die sogenannten höheren Moden, in unserem Fall sog. Hermite-Gauß-Moden. Im Gegensatz zur Grundmode weisen diese Intensitätsprofile Nullstellen (Knoten) in x- bzw. y-Richtung auf. Die Anzahl der Knoten wird zur Charakterisierung verwendet. Die Gauß'sche Grundmode wird als TEM_{00} bezeichnet. Eine Mode mit einem Knoten in x-Richtung, aber ohne Knoten in y-Richtung als TEM_{10} usw. Die Intensitätsverteilung dieser höheren Moden wird beschrieben durch die Funktion

$$I_{mn}(x, y, z) = \frac{Aw_0}{w(z)} \left[H_m \left(\sqrt{2} \frac{x}{w(z)} \right) \right]^2 \left[H_n \left(\sqrt{2} \frac{y}{w(z)} \right) \right]^2 e^{-\frac{2(x^2+y^2)}{w^2(z)}} \quad (9)$$

Dabei sind H die Hermite Polynome mit

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

Stellen Sie einen Schnitt durch eine TEM_{01} Mode graphisch dar. Ist es möglich, dass ein Laser auf mehreren transversalen Moden läuft?

2.4 Parameter der Gauß'schen Grundmode am Beispiel zweier Resonatoren

Die Parameter der Gauß'schen Grundmode sollen nun für 2 Resonatortypen, die Sie im Experiment aufbauen werden, berechnet werden. Die beiden Resonatortypen sind dabei ein konfokaler Resonator mit 2 Spiegeln mit Krümmungsradius $R = 45 \text{ cm}$ ($L = 45 \text{ cm}$) und ein plan-sphärischer Resonator aus einem Planspiegel und einem gekrümmten Spiegel ($R = 45 \text{ cm}$) mit einer Länge von $L = 35 \text{ cm}$. Berechnen Sie zunächst die Resonatorparameter g_1 und g_2 . Berechnen Sie nun die Positionen der Spiegel z_1, z_2 relativ zur Strahltaile im Resonator. (Tip: für den konfokalen Resonator zuerst $g_1 = g_2 = g$ setzen und Formel vereinfachen). **WICHTIG:** Die Kenntnis der Position der Strahltaile ist entscheidend für die Versuchsdurchführung und Auswertung: Beim Bestimmen der Strahldivergenz θ aus der Formel $\theta = \frac{w(z)}{z}$ muss der Abstand z immer von dieser Strahltaile aus gemessen werden. Machen Sie sich daher in jedem Fall klar, wo die Strahltaile im Resonator liegt.

$$z_1 = \frac{-Lg_2(1 - g_1)}{g_1 + g_2 - 2g_1g_2} \quad (10)$$

$$z_2 = z_1 + L \quad (11)$$

Berechnen Sie nun den Radius w_0 der Strahltaile im Resonator (für die Wellenlänge $\lambda = 633 \text{ nm}$) sowie den Radius des Flecks w_1, w_2 auf Spiegel 1 und 2.

$$w_0 = \left(\frac{\lambda L}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{g_1g_2(1 - g_1g_2)}{(g_1 + g_2 - 2g_1g_2)^2} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (12)$$

$$w_1 = \left(\frac{\lambda L}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{g_2}{g_1(1 - g_1g_2)} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (13)$$

$$w_2 = \left(\frac{\lambda L}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{g_1}{g_2(1 - g_1g_2)} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (14)$$

Skizzieren Sie qualitativ die Gauß'sche Mode der beiden Resonatoren. Vergleichen sie die Fleckgröße mit der Größe der Spiegel (die Spiegel haben einen Durchmesser von 7,75 mm). Berechnen Sie mit Hilfe der oben gegebenen Formel die Strahldivergenz und die Rayleigh-Länge der Gauß'schen Grundmode der beiden Resonatortypen.

3 Spezielle Fragestellungen zum Helium-Neon-Laser

3.1 Termschema des Helium-Neon-Laser

Was versteht man unter einem 4-Niveau-Laser? Welche Vorteile bietet die Verwendung eines 4-Niveau-Schemas? Erläutern Sie den beim HeNe-Laser verwendeten Pumpprozess und die daran beteiligten Energieniveaus, sowohl im Neon als auch im Helium. Was ist die Aufgabe der Helium-Atome, welche Zustände dieser Atome sind besonders wichtig und

3 Spezielle Fragestellungen zum Helium-Neon-Laser

warum? Zwischen welchen Energieniveaus findet der Laserübergang statt?

Ein Gemisch aus Helium und Neon Atomen kann bei verschiedenen Wellenlängen Lasertätigkeit zeigen. Zuerst demonstriert wurde 1961 die Emission bei 1150 nm [6]. Weitere Wellenlängen liegen bei 543 nm, 633 nm und 3390 nm. Der verwendete Selbstbaulaser emittiert jedoch nur Laserstrahlung bei 633 nm. Wie kann dies erreicht werden?

3.2 Technische Realisierung eines Helium-Neon-Lasers

Die Gasentladung in der verwendeten Helium-Neon-Röhre muss in einer sehr dünnen Kapillare gezündet werden. Warum? Die Fenster der Röhre werden nicht senkrecht, sondern in einem Winkel von ca. $\alpha_B = 59^\circ$ zum Strahl angebracht. Es handelt sich dabei um den sog. Brewster-Winkel für den Übergang Glas Luft ($n_{\text{Glas}}=1.45702$) [7]. Machen Sie sich klar, was man unter s- und p-polarisiertem Licht versteht. Berechnen Sie die Reflektionskoeffizienten R_s und R_p (aus [7])

$$R_s = \left(\frac{\sin(\alpha - \beta)}{\sin(\alpha + \beta)} \right)^2 \quad R_p = \left(\frac{\tan(\alpha - \beta)}{\tan(\alpha + \beta)} \right)^2 \quad (15)$$

Im Brewsterwinkel gilt $\alpha + \beta = 90^\circ$. Warum bringt man die Fenster unter diesem Winkel an? Welche Folgen hat dies für das entstehenden Laserlicht?

3.3 Lasermoden und Linienverbreiterung

Bei einem Laser können nur solche Resonatormoden Lasertätigkeit hervorrufen, deren Frequenz in der sogenannten Verstärkungsbandbreite des Laserübergangs liegt. Beim Helium-Neon-Laser wird diese Breite durch die Doppler-Verbreiterung $\Delta\nu_D$ des im vorigen Punkt erläuterten atomaren Übergangs nach oben begrenzt. Wodurch entsteht die Doppler-Verbreiterung? Berechnen Sie mit folgender Formel die Breite (FWHM) der Verstärkung, wenn das Gas in der Gasentladung eine Temperatur von $T = 400$ K hat.

$$\Delta\nu_D = \sqrt{8\ln(2)} \sqrt{\frac{k_B T}{m_{Ne} c^2}} \nu_0$$

ν_0 ist die zum Übergang bei $\lambda = 632,8$ nm gehörige Frequenz. Wie viele longitudinale Moden würden Sie bei einem Resonator der Länge $R = 50$ cm erwarten, wenn alle Moden in dieser Breite anschwingen? Wie lange darf ein Laserresonator höchstens sein, damit nur eine longitudinale Resonatormode Verstärkung erfährt? Zeichnen bzw. suchen Sie ein Bild, das den Zusammenhang zwischen Verstärkungsprofil, Resonatormoden und Laserschwelle (Schwellwertbedingung) verdeutlicht. Was erwarten Sie für die experimentell bestimmte Verstärkungsbandbreite im Vergleich zum theoretischen Wert?

3.4 Funktionsweise eines Fabry-Perot-Spektrum-Analysators

Zur Vermessung der Frequenzabstände der Moden des Helium-Neon-Lasers steht ein Scanning-Fabry-Perot-Interferometer der Firma Toptica (FPI 100) zur Verfügung. Es besteht

4 Durchführung des Experiments

aus einem konfokalen Resonator mit 2 hochreflektierenden Spiegeln, wobei einer der Spiegel mit Hilfe von Piezo-Kristallen im Nanometerbereich verfahren werden kann. Zur Ansteuerung muss eine Spannungsrampe mit bis zu 100 V erzeugt werden, dazu steht ein Scangenerator (Miniscan 102) zur Verfügung. Hinter dem Resonator wird das transmittierte Licht mit Hilfe einer Photodiode aufgenommen. Weitere Erläuterungen zum FPI finden sich zum Beispiel in Kapitel 10.4 in [7]. Trifft Strahlung mit einer Wellenlänge λ auf das Interferometer, so wird diese durch den Resonator transmittiert, wenn die Resonatorlänge ein ganzzahliges Vielfaches der halben Wellenlänge ist $L = n \cdot \frac{\lambda}{2}$. Die selbe Wellenlänge wird wieder transmittiert, wenn $L = (n+1) \cdot \frac{\lambda}{2}$ ist. Das heißt, auf das Interferometer auftreffende Strahlung mit einer festen Wellenlänge erzeugt ein sich periodisch wiederholendes Signal, der Frequenzabstand dieser sich wiederholenden Signale wird als freier Spektralbereich des Interferometers (engl. 'free spectral range', FSR) bezeichnet. Das hier verwendete Fabry-Perot-Interferometer hat einen freien Spektralbereich von $FSR = \frac{c}{2L} = 4 \text{ GHz}$, entsprechend einer Resonator-Länge von ca. $L = 3,75 \text{ cm}$. (Auf Grund dieser Signal-Wiederholung nach dem freien Spektralbereich ist es nicht möglich mit dem FPI absolute Frequenzen zu messen, sondern nur Abstände die kleiner als 4 GHz sind.)

Die durch ein Fabry-Perot-Interferometer transmittierte Intensität wird durch die sog. Airy-Funktion beschrieben, in der häufig die Finesse $\mathcal{F} = \frac{\pi\sqrt{R}}{1-R}$ mit der Spiegelreflektivität R als Maß für die Güte des Interferometers verwendet wird. Stellen Sie die Funktion für $\mathcal{F} = 30, 100, 400$ graphisch dar. Will man zwei nah benachbarte Wellenlängen bzw. Frequenzen im Interferometer beobachten, so können diese nur getrennt werden, wenn die zu den Wellenlängen gehörigen Durchlassmaxima nicht überlappen. Dies wird angegeben durch die minimal auflösbare Bandbreite $\delta\nu_{min} = \frac{c}{2L\mathcal{F}}$. Das verwendete Interferometer hat eine Finesse von $\mathcal{F} = 400$. Wie ist die minimal auflösbare Bandbreite? Welche Spiegelreflektivität benötigt man für eine Finesse von 400? Berechnen sie den Frequenzabstand $\Delta\nu_{00-01}$ der TEM_{00q} und TEM_{01q} Moden eines Laserresonators mit $L = 60 \text{ cm}$ aus zwei gekrümmten Spiegeln mit $R = 45 \text{ cm}$:

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

Wie groß ist in diesem Fall der Abstand zweier longitudinaler Moden? Welche Moden des Laserresonators können Sie mit dem FPI sichtbar machen? (longitudinale, transversale Moden)?

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

4 Durchführung des Experiments

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.

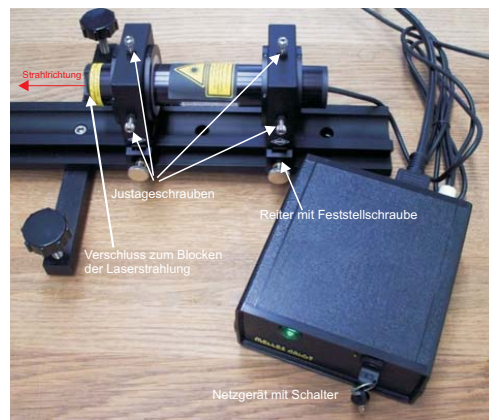
- Um zu vermeiden, dass der Laserstrahl oder ein Reflex in ihr Auge gelangt dürfen **keine Uhren, Ringe oder ähnliche reflektierende Gegenstände getragen werden**, die mit dem Laserstrahl in Berührung kommen könnten. Begeben Sie sich niemals auf Augenhöhe mit der Laserstrahlung. Beim Bücken Augen abschirmen oder schließen! Bevor Sie den Computer verwenden stellen Sie sicher, dass keine Reflexe in dieser Richtung gelenkt werden.
- Es dürfen sich keine anderen Praktikumssteilnehmer ohne Justierbrillen in dem Raum aufhalten.
- Wird eine Optik 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.

4 Durchführung des Experiments

Abbildung 5: 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. Einrichten der optischen Achse mit Hilfe des Justierlasers:** In einem ersten Schritt soll der Strahl des Justierlasers (ebenfalls ein HeNe-Laser der Firma Melles Griot) auf die optische Achse der Bank eingestellt werden. Gehen Sie dazu folgendermaßen vor: Verwenden Sie eine Blende um die optische Achse zu markieren. Achtung: Die Blende sitzt nur richtig auf der optischen Achse, wenn der Reiter, auf dem die Blende montiert ist, an der Bank festgeschraubt ist. Zum Einstellen der optischen Achse muss der Strahl an 2 Stellen, jeweils sehr nah am Justierlaser und in einer größeren Entfernung durch die Blende justiert werden. Um zu erreichen, dass der Strahl in den beiden Positionen durch die Blende läuft, stehen Ihnen 2 x-y-Transjustierungen zur Verfügung, die mit 4 Schrauben eingestellt werden (siehe Abb. 5). Die Schrauben lassen sich mit einem Inbusschraubendreher (Größe 3) oder von Hand drehen. Um zum gewünschten Ergebnis zu kommen, müssen Sie sich überlegen mit welchen der Schrauben Sie z.B. ein horizontales aus der Achse heraus Laufen oder einen Versatz in horizontaler Richtung beheben können. Nachdem diese Achse eingerichtet wurde, werden alle weiteren Elemente an dieser Achse ausgerichtet und die Lage des Justierlasers nicht mehr verändert!
- 2. Justage der Gasentladungsröhre:** Setzen Sie, nachdem der Justierlaser auf die optische Achse justiert wurde, die Gasentladungsröhre im ausgeschalteten Zustand auf die Bank. Schließen Sie vor dem Einsetzen der Röhre den Schieber am Justierlaser, damit es nicht zu Reflexen kommt. Nachdem die Röhre festgeschraubt ist, können Sie den Schieber des Justierlasers wieder öffnen. Justieren Sie die Entladungsröhre nun mit Hilfe der 4 Schrauben so, dass der Strahl des Justierlasers genau durch die Kapillare in der Mitte der Röhre läuft (siehe Abb. 6). Justieren Sie die Röhre zunächst so, dass der Laser grob durch die Röhre geht. Zur feineren Justage betrachten Sie am besten den Fleck des Justierlasers an der gegenüberliegenden Wand. Der Strahl läuft dann richtig durch die Röhre, wenn keine bzw. kaum Beugungsmuster um den Fleck des Justierlasers herum zu sehen sind.

4 Durchführung des Experiments

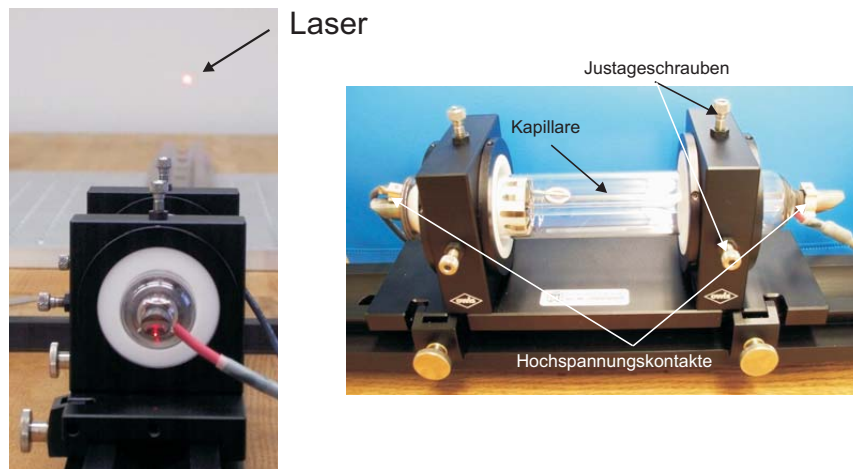


Abbildung 6: Die Gasentladungsröhre: Die für den Selbstbaulaser benötigte Gasentladungsröhre befindet sich genau wie der Justierlaser in 2 x-y-Transjustierung. In der Mitte der Röhre ist die Kapillare zu sehen. Die Hochspannungskontakte sind außen auf die Röhre aufgesteckt. Um zu erkennen ob der Justierlaser korrekt durch die Röhre läuft, betrachtet man den Fleck des Lasers an der gegenüberliegenden Wand (siehe linke Abbildung).

- 3. Justage des Laserresonators:** Als erstes sollten Sie einen Resonator aus zwei gekrümmten Spiegeln aufbauen, da dieser leichter zu justieren ist. Überlegen Sie sich eine sinnvolle Resonatorlänge, bei der Sie beginnen möchten. Setzen Sie zunächst den weiter vom Justierlaser entfernten Spiegel ein, dieser sollte der Auskoppelspiegel sein (keine Beschriftung auf Halter). Setzen Sie vor den Justierlaser die Blende, so dass Sie auf dieser den Rückreflex des Spiegels beobachten können (siehe Abb. 7). 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.
- 4. 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. 7). Die Wahrscheinlichkeit, dass der Laser nun schon läuft, ist relativ gering (wenn doch herzlichen Glückwunsch). Ansonsten sollten Sie nun beginnen alle 4 Schrauben der Spiegelhalter probeweise leicht zu verdrehen. Wenn dies nichts hilft, können die Schrauben auch gegeneinander verdreht werden, also z.B. einen der Spiegel etwas in horizontaler Richtung verdrehen und bei dem gegenüberliegenden die horizontale Richtung testweise in beide Richtungen leicht verändern. Falls diese Maßnahmen nicht zum Erfolg führen, wiederholen Sie die vorhergehenden Schritte.

4 Durchführung des Experiments

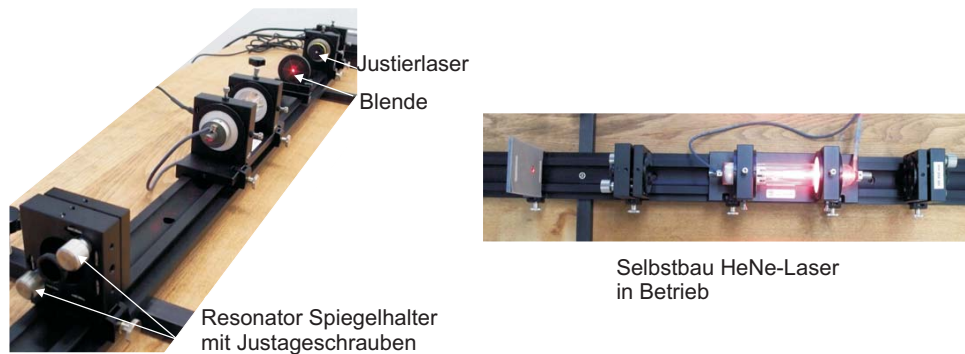


Abbildung 7: Die Resonatorjustage: Zuerst wird der weiter vom Justierlaser entfernte Spiegel eingebaut und der Rückreflex in den Strahl zurückjustiert. In der hier gezeigten Aufnahme ist der Reflex noch nicht genau in den Strahl zurück justiert, was man am hellen Leuchten auf der Blende erkennt. Die rechte Abbildung zeigt den HeNe-Laser nach erfolgreicher Justage in Betrieb.

5. **Justage des Aufbaus zur Untersuchung der Laserstrahlung:** Zum Vermessen der transversalen und longitudinalen Moden verwenden Sie bitte den in Abb. 8 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 Umlenkspiegeln um 180° ab. Nach den beiden Umlenkspiegeln sollte der Laserstrahl parallel zur Oberfläche des optischen Tisches und parallel zu den Lochreihen des Tisches verlaufen. Kontrollieren Sie dies mit Hilfe 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. 8). 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. Stel-

4 Durchführung des Experiments

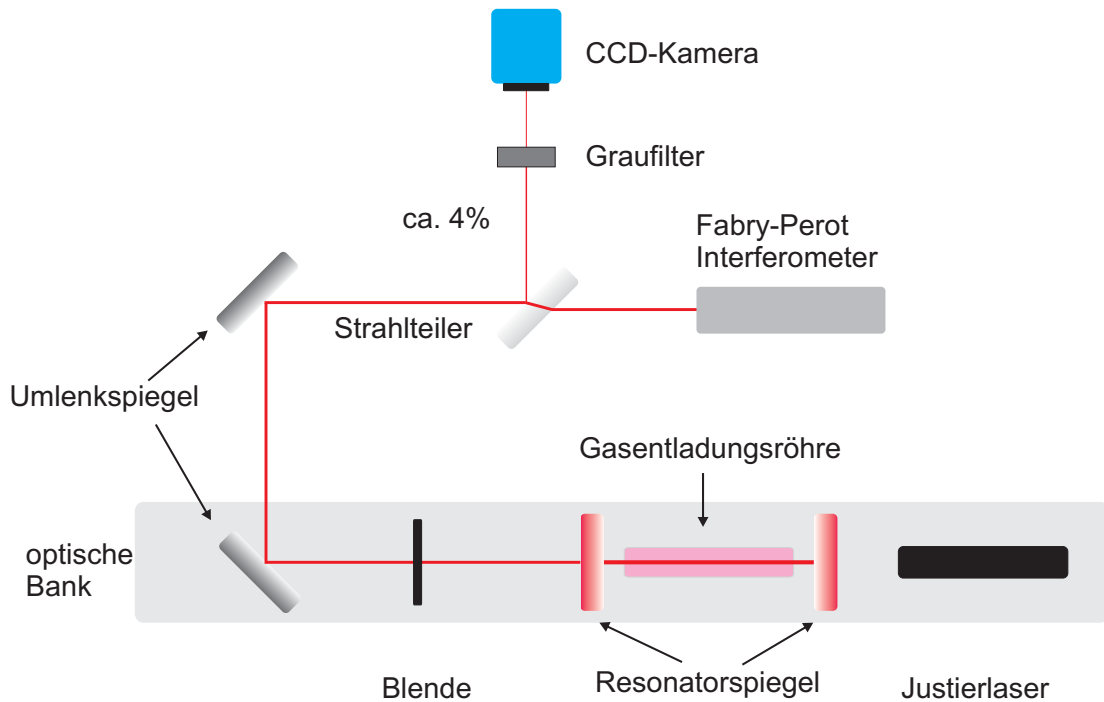


Abbildung 8: Schematische Darstellung des Aufbaus zur Untersuchung der longitudinalen und transversalen Moden des HeNe-Lasers

len 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 justiert. **Handhaben Sie das FPI daher beim Einbau mit äußerster Vorsicht und setzen 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 beobachten. Nehmen Sie dazu zunächst die Verkabelung vor (Abb. 9, 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

4 Durchführung des Experiments

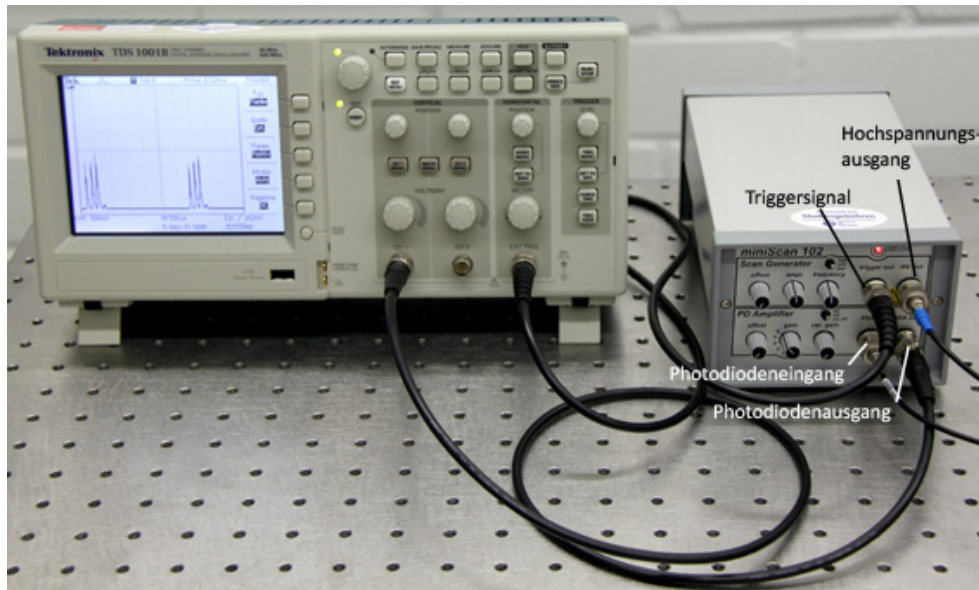


Abbildung 9: Verkabelung des FPI, Anleitung im Text! Das Signal der Photodiode wird, nachdem es verstärkt wurde auf dem Oszilloskop dargestellt.

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. Falls Sie das Oszilloskop bereits eingeschaltet haben stellen Sie sicher, dass die beiden Kanäle auf 'Coupling=ground' also Erdung stehen, wenn Sie die Scaneinheit einschalten, da hierbei ein Spannungsimpuls entsteht!** 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. 10 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.

4.3 Durchzuführende Messungen

Überlegen Sie sich zu allen von Ihnen gemessenen Werten jeweils den Fehler der Messung der z.B. durch Ablesefehler, Schwankungen der Laserintensität oder Ähnliches verursacht wird.

Bauen Sie zunächst einen Resonator aus 2 sphärischen-Spiegeln mit einer Länge von **45 cm** auf und führen Sie die folgenden Messungen durch.

4 Durchführung des Experiments

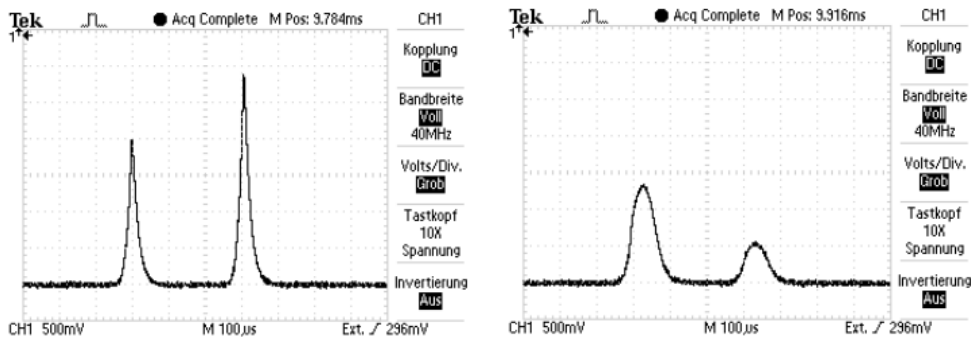


Abbildung 10: Links: Bei guter Einkopplung sollten die Peaks auf einem flachen Untergrund aufsitzen und möglichst schmal und symmetrisch sein. Rechts: Bei schlechter Einkopplung verbreitern sich die Peaks und verlieren an Intensität.

1. Messen Sie mit Hilfe der kalibrierten Photodiode und des zur Verfügung stehenden Photodiodenverstärkers (an der Miniscan 102 Einheit, **Einstellung Gain 2**) die Leistung des Lasers. Optimieren Sie den Laserresonator. Messen Sie auch das Signal der Photodiode, wenn der Laser geblockt ist, um den Untergrund abziehen zu können und die im Anhang gegebene Kalibrierkurve verwenden zu können. Wie stark schwankt die Laserleistung?
2. Messen Sie mit Hilfe des Folienpolarisators den Polarisationszustand des Lasers. Verwenden Sie dazu hinter dem Polarisator die Photodiode mit Verstärker, um die Transmission aufzunehmen. Überlegen Sie sich sinnvolle Schrittweiten für die Polarisatordrehung und drehen Sie ihn um 360° . Führen Sie die Messung zügig ohne Unterbrechung durch, damit die Ausgangsleistung des Lasers während der Messung nicht driftet.
3. Aufnahme von transversalen Moden mit Hilfe der CCD-Kamera: Nehmen Sie die Intensitätsverteilung verschiedener Moden (am besten für den konfokalen Resonator) auf. In der Software 'IC Capture 2.2' finden Sie unter dem Punkt 'File' einen Punkt 'Save Image'. Legen Sie auf Laufwerk D einen eigenen Ordner an und speichern Sie die Bilder dort. Unter 'Device' Untermenü 'Properties' finden Sie die Einstellungen für die Belichtungszeit der Kamera. **Die Bilder sollten in jedem Fall so aufgenommen werden, dass es nicht zum Übersteuern kommt (Graufilter verwenden!!, Bilder müssen grau nicht weiß aussehen)**. Sie sollten auf jeden Fall eine TEM_{00} und eine TEM_{01} Mode aufnehmen. Sie können verschiedene Moden erreichen, indem Sie die Justage der Resonatorspiegel mit den dafür vorgesehenen Schrauben leicht verändern. Nehmen Sie die Moden in einer Entfernung zum Resonator auf, in der der Laserstrahl noch gut auf den Chip der Kamera passt, der Abstand sollte jedoch (viel) größer als die von ihnen berechnete Rayleigh-Länge der Gauß'schen Grundmode sein. **Notieren Sie den Abstand von der Strahltaile im Resonator, in dem die Aufnahmen gemacht wurden, für die Auswer-**

4 Durchführung des Experiments

tung. (Lage der Strahltaile: siehe Vorbereitung Abschn. 2.4!)

4. Nehmen Sie mit Hilfe des Fabry-Perot-Interferometers das Modenspektrum des Lasers bei mindestens **5 verschiedenen Resonatorlängen zwischen ca. 30 cm und 80 cm** auf. Sie können die auf dem Oszilloskop angezeigten Daten mit Hilfe der Software 'Open Choice Desktop' von Tektronix in den PC übertragen. Dabei gibt es die Möglichkeit, den Bildschirm des Oszilloskops zu kopieren (mögliche Formate .jpg .png usw.). Messen Sie mit dem Cursor am Oszilloskop den Modenabstand und die FSR aus und speichern Sie die jeweiligen Bilder. Notieren Sie sich hierbei auch die Genauigkeit, mit der der Cursor bewegt werden kann, um später eine Fehlerabschätzung durchführen zu können. Alternativ können Sie auch die Datenpunkte als Textdatei exportieren und dann z.B. mit Hilfe von Origin die Abstände bestimmen. **Achtung: Wenn die ausgelesenen Daten im Programm angezeigt werden, sind diese noch nicht gespeichert! Wenn Sie einen weiteren Datensatz auslesen, ohne den vorhergehenden zu speichern, ist dieser verloren und das Programm wird Sie auch nicht davor warnen!** Kontrollieren Sie bei der Messung des longitudinalen Modenabstandes mit Hilfe der CCD-Kamera, ob der Laser auf der TEM₀₀ Mode läuft, damit keine zusätzlichen Peaks durch höhere transversale Moden entstehen, die die Auswertung erschweren. Idealerweise sollten Sie nur zwei bis drei Peaks im Modenspektrum sehen (siehe Abb. 11).

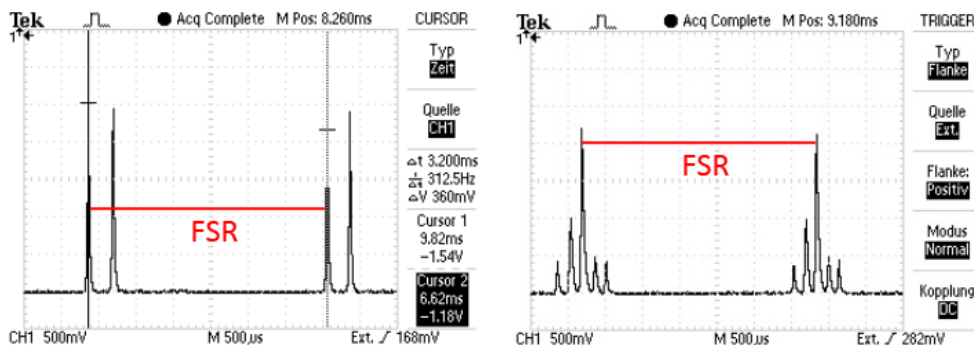


Abbildung 11: Links: Betrieb auf zwei Moden. Mit dem Cursor können Sie die Abstände bestimmen. Rechts: Hier schwingen höhere transversale Moden an, so dass der longitudinale Modenabstand nicht messbar ist.

5. Bestimmen Sie mit Hilfe des FPIs grob die Verstärkungsbandbreite des Lasers. Dazu können Sie die Nachleuchten ('Persist') Funktion des Oszilloskops verwenden (zu finden unter 'Display'). Durch die Frequenzänderung der Moden (Jitter) durch mechanische Schwankungen wird mit der Zeit das komplette Verstärkungsprofil überstrichen und sichtbar. Stellen Sie das Nachleuchten auf unendlich ein, starten und stoppen Sie die Messung über die Run-Stop-Taste.

Achtung: Die durch das Nachleuchten grau gefärbte Fläche lässt sich nicht durch Auslesen der Daten in den PC übertragen. Sie können in diesem Fall nur die Option verwenden, den Bildschirm des Oszilloskops zu kopieren. Bestimmen Sie daher die nötigen Werte am besten direkt mit dem Cursor am Oszilloskop.

Justieren Sie nach Abschluss dieser Messungen einen Resonator mit einem planen Spiegel, am einfachsten funktioniert dies, wenn Sie nur den hochreflektierenden Spiegel tauschen und dann auch nur die Justage dieses Spiegels verändern (Stabilitätsbereich beachten). Nehmen Sie nochmal **longitudinales Modenspektrum** (mind. 3 Resonatorlängen), **transversale Moden** und **Leistung** auf. Auf jeden Fall sollten Sie eine TEM₀₀-Mode bei einer Resonatorlänge von $L = 35$ cm aufnehmen. Notieren Sie für die Auswertung den Abstand der CCD Kamera von der Strahltaile im Resonator. (Lage der Strahltaile: siehe Vorbereitung Abschn. 2.4!)

4.4 Auswertung

1. Legen Sie z.B. mit Hilfe von Origin Schnitte durch die Bilder der transversalen Moden. *Hinweis:* Verwenden Sie eine aktuelle Version von Origin. Origin besitzt eine recht brauchbare Hilfedatei. Mit dem Suchbegriff 'Bild importieren' findet sich eine Erläuterung, wie Sie ein Bild in eine Matrix importieren. Unter dem Suchbegriff 'Profile' die Anleitung zum Anfertigen der Schnitte. Passen Sie den theoretisch zu erwartenden Verlauf zumindest an eine TEM₀₀ und TEM₀₁ Mode an. **Rechnen Sie dazu zunächst die Pixelnummer in eine 'echte' Längenangabe um (ein Pixel ist $7,94 \mu\text{m}$ in x- und y-Richtung groß).** Wie groß ist die Fleckgröße und der Strahldurchmesser der TEM₀₀ Mode der beiden Resonatortypen? Kommentieren Sie die gemessenen höheren Moden, um welche Moden bzw. Überlagerungen von Moden könnte es sich handeln.
2. Berechnen Sie aus den bestimmten Breiten die Strahldivergenz θ der jeweiligen Grundmode TEM₀₀. Vergleichen Sie den erhaltenen Wert mit den berechneten Werten für den konfokalen Resonator und den plan-sphärischen mit Länge $L = 35$ cm.
3. Bestimmen Sie den Abstand der longitudinalen Moden bei verschiedenen Resonatorlängen, tragen Sie diese gegen die Resonatorlänge auf (Fehlerbalken nicht vergessen!). Ergibt sich der theoretisch zu erwartende Verlauf?
4. Bestimmen Sie die Breite des Verstärkungsprofils für verschiedene Resonatorlängen. Stellen Sie die Werte in einem Graphen dar. Kommentieren Sie die von Ihnen gemessenen Werte.
5. Tragen Sie die bei der Polarisationsmessung gewonnenen Werte gegen die Polarisatorstellung auf. Passen Sie an die Kurve den theoretisch zu erwartenden Verlauf an. Kommentieren Sie das Ergebnis.

6. Vergleichen Sie die für die beiden Resonatortypen gemessenen Ausgangsleistungen. Welche Eigenschaften der Laserstrahlung, die Sie während des Versuchs untersucht haben, sprechen für die Verwendung eines Resonators aus zwei gekrümmten Spiegeln, welche sprechen für die Verwendung von einem planen und einem gekrümmten Spiegel?

5 Ergänzende Informationen

5.1 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. Die gezeigte Kurve wurde mit dem zur Verfügung stehenden Photodiodenverstärker auf Einstellung 'Gain 2' aufgenommen.

5.2 Transmissionskurven der Resonatorspiegel

Die für den Aufbau des Laserresonators verwendeten Spiegel sind speziell für den gewünschten Übergang im Neon bei einer Wellenlänge von $\lambda = 632,8 \text{ nm}$ optimiert. Für den Auskoppelspiegel und die beiden hochreflektierenden (HR)-Spiegel werden verschiedene Beschichtungen verwendet. Abbildung 12 zeigt die mit Hilfe eines Photospektrometers (Hitachi U3501) gemessene Transmission der Spiegel.

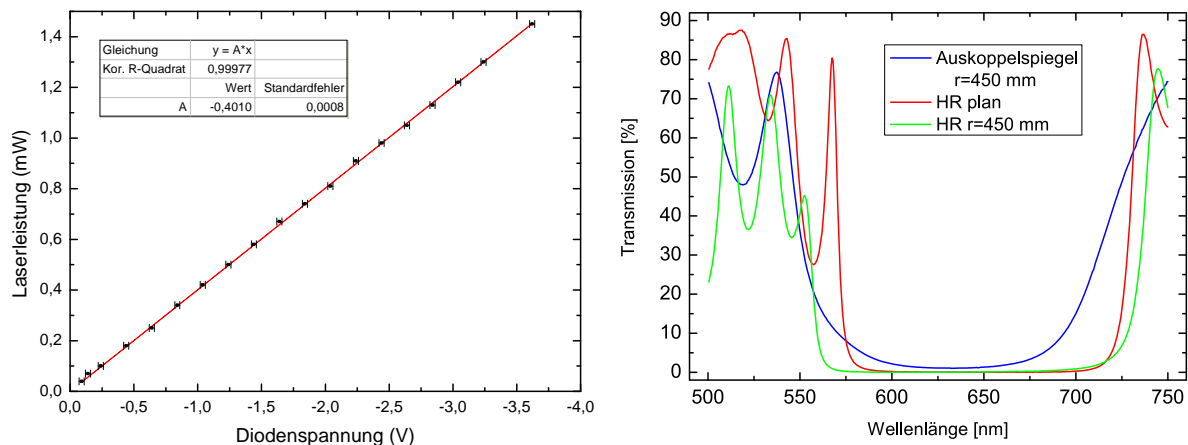


Abbildung 12: Kalibrierkurve der Photodiode sowie Transmission der Resonatorspiegel.

Literatur

- [1] DEMTRÖDER, W.: *Experimentalphysik 3 Atome, Moleküle und Festkörper*. 3. überarbeitete Auflage. Springer Berlin Heidelberg, 2005 <http://www.springerlink.com/content/t36071/>
- [2] EICHLER, J. ; EICHLER, H. J.: *Laser Bauformen, Strahlführung, Anwendungen*. Springer Verlag, Berlin-Heidelberg, 2010 <http://www.springerlink.com/content/978-3-642-10461-9>
- [3] KNEUBÜHL, F.K ; SIGRIST, M.W.: *Laser*. 6. Auflage. Teubner Verlag, Wiesbaden, 2005, Signatur 80/UH 5610 K689(6)
- [4] MILONNI, P. ; EBERLY, J.: *Lasers*. Wiley Interscience, New York, 1988, Signatur 80/UH 5610 M661
- [5] SVELTO, O. ; HANNA, D. (Hrsg.): *Principles of Lasers*. vierte Auflage. Springer, New York, 1998, Signatur 80/UH 5610 S968(4)§dp
- [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, Nr. 3, 106–110. <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.6.106>
- [7] DEMTRÖDER, W.: *Experimentalphysik 2 Elektrizität und Optik*. 4., überarb. u. erw. Aufl. Springer Berlin Heidelberg, 2006 <http://www.springerlink.com/content/978-3-540-68210-3>

Die angegebenen Links sind nur aus dem Universitätsnetz abrufbar.