

**Institut für Angewandte Physik
der Technischen Universität Braunschweig**

Physikalisches Praktikum für Fortgeschrittene

Helium-Neon-Laser

Stand: Oktober 2018

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	5
1.1	Ziel des Versuchs	5
1.2	Erforderliche Kenntnisse	5
1.3	Literatur	5
1.4	Ausstattung	6
1.5	Handhabung und Sicherheitshinweise	6
2	Aufgaben	7
2.1	Laser-Stabilität	7
2.2	Bestimmung der Wellenlänge	8
2.3	Bestimmung der Strahltaile und Divergenz	8
	2.3.1 Symmetrischer Resonator	8
	2.3.2 Asymmetrischer Resonator	9
2.4	Anregung transversaler Moden	9
2.5	Messung der Linienbreite	9

1. Einleitung

1.1 Ziel des Versuchs

Während Laser zur Zeit ihrer ersten Realisierung im Jahre 1960 anfänglich noch als „solution looking for a problem“ charakterisiert wurden, finden sie heutzutage vielfältige Anwendungen in der Grundlagenforschung, Informationstechnologie, Industrie oder Medizin. Insbesondere in der Physik sind Laser ein fundamentales experimentelles Werkzeug. In diesem Versuch werden der grundlegende Aufbau optischer Resonatoren sowie die Eigenschaften von Lasern und der von ihnen emittierten Strahlung näher untersucht.

1.2 Erforderliche Kenntnisse

Eine umfassende Vorbereitung des Versuchs beinhaltet u. a. Kenntnisse zu den folgenden Stichworten:

- Übergänge in quantenmechanischen Systemen
- Besetzungsinversion
- Laser-Schwelle
- Optische Resonatoren
- Stabilitätskriterium
- Gauß-Strahlen, Transformation mit Linsen
- Feldverteilung im Resonator
- longitudinale und transversale Moden
- 2-, 3-, 4-Niveau-Systeme
- Aufbau und Funktionsprinzip eines He-Ne-Lasers
- Fabry-Pérot-Interferometer

1.3 Literatur

- Weber, Herziger, *Laser – Grundlagen und Anwendungen*
- Svelto, *Principles of Lasers*
- Demtröder *Laserspektroskopie: Grundlagen und Techniken*
- Kneubühl, Sigrist, *Laser*
- Hodgson, Weber, *Optische Resonatoren*
- Eichler, *Laser*

1.4 Ausstattung

- Optische Bank
- Gasentladungsröhre mit Brewster-Fenstern und He-Ne-Gasgemisch
- konkaver hochreflektierender Spiegel, konkaver Auskoppelspiegel (jeweils $R = 0,75\text{ m}$), planarer Auskoppelspiegel
- Sammellinse ($f = 15\text{ mm}$)
- Spaltblende
- Blenden mit $d = 80\text{ }\mu\text{m}$ und $d = 30\text{ }\mu\text{m}$
- x - y -Stage mit μm -Schrauben
- Si-Photodiode
- PC mit Kamera, angesteuert über LabVIEW
- Schutzbrillen
- Filter
- Fabry-Pérot-Interferometer (FPI)
- Controller für FPI
- Digitales Speicher-Oszilloskop

1.5 Handhabung und Sicherheitshinweise

Die mit einem He-Ne-Gemisch gefüllte Gasentladungsröhre ($d = 5\text{ mm}$) ist auf einer optischen Bank befestigt. Zur Initiierung der Gasentladung ist eine Zündspannung von ca. 10 kV erforderlich. Um unbeabsichtigte Berührungen der elektrischen Kontakte zu verhindern, ist die Röhre von einer Abdeckung aus Plexiglas umgeben. Die Abdeckung wird ausschließlich vom Betreuer entfernt – selbst im ausgeschalteten Zustand liegt noch eine prinzipiell lebensgefährliche Hochspannung an der Gasentladungsröhre an.

Der Resonator wird von zwei Spiegeln gebildet. Dabei handelt es sich um einen Auskoppel-Spiegel (konvex oder plan) (*output coupler*, OC) mit einer Transmittivität von etwa 1-2% bei $\lambda = 632,8\text{ nm}$ und einen hochreflektierenden Spiegel (*high reflector*, HR) mit einer Transmittivität von etwa 0,3% bei der genannten Wellenlänge. Mit der Sammellinse kann der Laserstrahl außerhalb des Resonators aufgeweitet werden, was die Analyse der Intensitätsverteilung erleichtert. Die Photodiode und der Rechner samt Kamera ermöglichen die Vermessung der Intensitätsprofile.

Der Resonator reagiert äußerst empfindlich auf kleinste Änderungen der Einstellungen der Spiegel – der Laser-Betrieb findet nur in einem sehr kleinen Winkelbereich der Ausrichtung statt. Die Justierung erfolgt ausschließlich am Auskoppelspiegel. *Änderungen am HR sind dem Betreuer vorbehalten.* Sind beide Spiegel verstellt, ist eine komplette Neujustage des Resonators unter hohem Zeitaufwand erforderlich.

Der Laser gehört zur Klasse 3R. Zum Schutz der Augen ist der Betrieb nur mit Schutzbrillen zulässig. Berührungen der Gasentladungsröhre oder stromführender Kabel sind zu vermeiden. Das Essen und Trinken im Praktikumsraum ist strikt untersagt. *Verstöße gegen die Sicherheitshinweise können den Ausschluss vom Versuch nach sich ziehen.* Weiterhin sind zu jedem Versuchsteil alle wesentlichen Eigenschaften des Resonators (Länge, ...) zu notieren.

2. Aufgaben

2.1 Laser-Stabilität

In diesem Versuchsteil wird die Abhängigkeit der aus dem Resonator ausgekoppelten Leistung von der Resonatorlänge untersucht. Dazu wird für mindestens zehn verschiedene Resonatorlängen L der Photostrom an der Diode gemessen. Es ist sinnvoll, die Werte nahe der konfokalen Konfiguration des Resonators in kleineren Schrittweiten aufzunehmen und die Resonatorlänge über die gesamte optische Bank zu variieren.

Zu Beginn des Versuchs wird die Hochspannung an die Gasentladungsröhre angelegt, indem der Schalter am Netzteil betätigt wird. Nach einigen Sekunden zündet die Gasentladung. Ein stabiler, zur Aufnahme von Messwerten geeigneter Betrieb ist nach etwa zehn Minuten zu erwarten. Für diesen Versuchsteil ist ein symmetrischer Resonator aufzubauen. Anschließend ist der Auskoppelspiegel systematisch zu justieren, bis Laser-Betrieb einsetzt. Die Justierung auf maximale Intensität der Grundmode ist nach jeder neuen Positionierung des Auskoppelspiegels vorzunehmen. Die Leistung kann unter Zuhilfenahme von Abbildung 2.1 direkt aus dem Photostrom berechnet werden. Dabei ist der Dunkelstrom der Photodiode zu berücksichtigen. Die Daten sind grafisch aufzubereiten und in Hinblick auf das Stabilitätsdiagramm optischer Resonatoren zu diskutieren. Leiten Sie zudem das Stabilitätskriterium her.

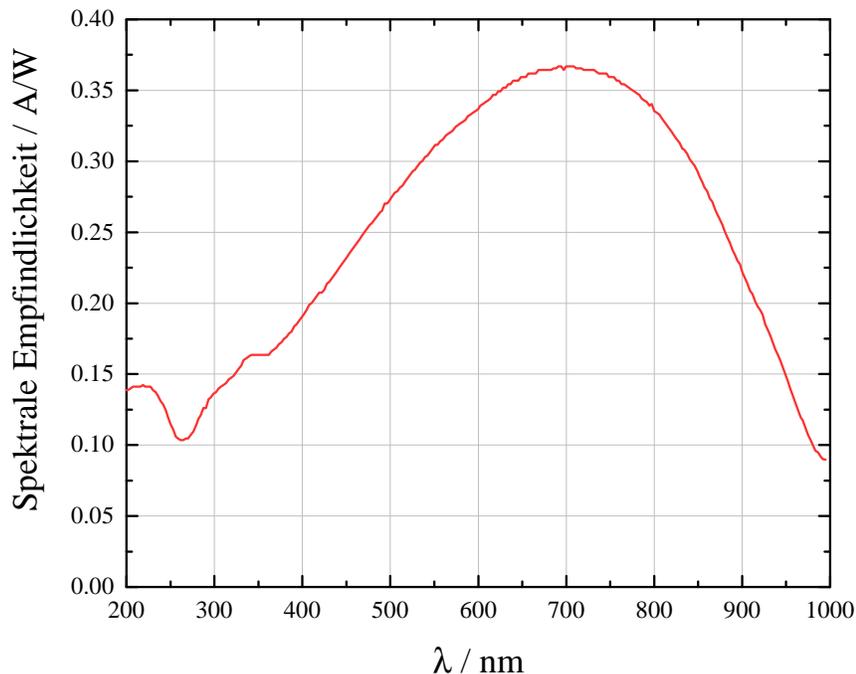


Abbildung 2.1: Spektrale Empfindlichkeit der Si-Photodiode als Funktion der Wellenlänge.

2.2 Bestimmung der Wellenlänge

Mit einer Spaltblende soll die Emissionswellenlänge des Lasers ermittelt werden. Dazu ist zunächst ein symmetrischer Resonator mit einer Länge aufzubauen, die stabilen und intensiven Betrieb gewährleistet. Anschließend wird die Spaltblende mit einem Reiter auf der optischen Bank befestigt. Bei hinreichend schmalen Spalt entsteht ein Interferenzbild, das auf den Schirm geworfen und mit der Kamera aufgenommen wird. Die Messung ist für verschiedene Spaltöffnungen $\geq 150 \mu\text{m}$ durchzuführen, wobei die Null-Position der μm -Schraube zu prüfen ist. Zusätzlich wird zur Kalibrierung der Bildpunkte eine Aufnahme mit cm-Papier als Schirm erstellt. Aus den Abständen der Extrema des Beugungsbildes von der 0. Ordnung, der Spaltöffnung und dem Abstand der Spaltblende zum Beugungsbild wird die Wellenlänge berechnet. Sofern die Kamera übersteuert, kann es hilfreich sein, den Strahl mit einem Filter (optische Dichte 0.6 oder 0.8) abzuschwächen.

2.3 Bestimmung der Strahltaile und Divergenz

Ein Gauß-Strahl wird u. a. mit seinem Strahltaile ω_0 und seiner Divergenz θ beschrieben. Die Strahltaile ist der minimale radiale Abstand von der optischen Achse, bei dem die elektrische Feldstärke auf $\frac{1}{e}$ abgeklungen ist und liegt definitionsgemäß stets bei $z = z_0 = 0$ innerhalb des Resonators. Für $z \neq z_0$ entlang der optischen Achse nimmt der Strahlradius den Wert $\omega(z) > \omega_0$ an. In relativ zur Rayleigh-Länge $z_R = \frac{\pi\omega_0^2}{\lambda}$ großen Abständen z von der Strahltaile gilt für den Divergenzwinkel θ näherungsweise:

$$\theta = \lim_{z \rightarrow \infty} \frac{\omega(z)}{z} = \frac{\omega_0}{z_R} = \frac{\lambda}{\pi\omega_0} \quad (2.1)$$

Anschaulich entspricht die Rayleigh-Länge z_R dabei der Entfernung von der Strahltaile, bei der sich der Strahlradius verdoppelt. Für die Positionen z_i der Resonator-Spiegel relativ zur Strahltaile gilt die Beziehung

$$z_1 = -\frac{Lg_2(1-g_1)}{g_1+g_2-2g_1g_2} \quad (2.2)$$

$$z_2 = z_1 + L \quad (2.3)$$

mit der Resonatorlänge L , den Spiegelparametern $g_i = 1 - \frac{L}{R_i}$ sowie den Krümmungsradien R_i der Spiegel. *Die Kenntnis der Lage der Strahltaile im Resonator ist essenziell für die Versuchsdurchführung und Auswertung der Messdaten, weil sie den Ursprung des Koordinatensystems festlegt.* Weiterhin gilt für die Strahltaile:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{\lambda L}{\pi}} \cdot \left(\frac{g_1g_2(1-g_1g_2)}{(g_1+g_2-2g_1g_2)^2} \right)^{1/4} \quad (2.4)$$

sowie für das transversale Profil entlang der z -Achse:

$$\omega(z) = \omega_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z - z_0}{z_R} \right)^2} \quad (2.5)$$

Der Verlauf von $\omega(z)$ soll in diesem Versuchsteil mit verschiedenen experimentellen Methoden für verschiedene Resonator-Typen untersucht und diskutiert werden. Dazu wird jeweils der Strahlradius $\omega(z)$ in Abhängigkeit der Entfernung z von der Strahltaile ω_0 entlang der optischen Achse vermessen.

2.3.1 Symmetrischer Resonator

Zunächst soll die Strahlgeometrie eines symmetrischen Resonators entlang der optischen Achse vermessen werden. Dazu soll das Strahlprofil in mindestens acht verschiedenen Abständen mit der Photodiode vermessen werden, wobei es sinnvoll ist, dicht hinter dem Resonator in kurzer Schrittweite zu messen.

Die Vermessung des Strahlprofils erfolgt dabei mit einer Lochblende ($d = 80 \mu\text{m}$), die mit Hilfe einer x - y -Stage transversal in 50-100 μm -Schritten durch den Strahl gefahren wird, wobei der jeweilige Photostrom gemessen wird. Aus der z -Abhängigkeit des Strahlradius im Fernfeld ist θ zu ermitteln. Die gemessenen transversalen Profile sind geeignet zu fitten. Der gemessene Verlauf von $\omega(z)$ ist grafisch aufzutragen, sinnvoll zu fitten und soll mit dem theoretischen Verlauf von $\omega(z)$ verglichen und diskutiert werden. Zur Veranschaulichung ist es sinnvoll, zusätzlich die gemessenen Profile einschließlich der Graphen der Fit-Funktionen *zentriert* und *normiert* in *einem* Diagramm aufzutragen.

2.3.2 Asymmetrischer Resonator

Die Messungen mit der Photodiode werden analog zu Kapitel 2.3.1 an einem asymmetrischen, hemisphärischen Resonator wiederholt und entsprechend ausgewertet und diskutiert.

2.4 Anregung transversaler Moden

Neben der Grundmode kann der Resonator auch in Moden höherer Ordnung betrieben werden, was sich auf verschiedenen Wegen erzwingen lässt. Zunächst können Moden höherer Ordnung durch geringfügige Variation des Auskoppelspiegels angeregt werden. Darüberhinaus können höhere Moden durch geschicktes Platzieren feiner Objekte im Strahlengang (dünner Draht, Staub, Haar) forciert werden. Möglichst viele verschiedene Moden sollen angeregt, mit der Kamera dokumentiert (Screenshot, Linienprofil) und hinsichtlich ihrer Entstehung erläutert werden. Dazu ist der Strahl mit der Linse ($f = 15 \text{ mm}$) aufzuweiten.

2.5 Messung der Linienbreite

Mit Hilfe eines Fabry-Pérot-Interferometers (FPI) lässt sich die vom Laser emittierte Strahlung spektral erfassen (*wie?*). Dazu ist das Interferometer ($\text{FSR} = 10 \text{ GHz}$) mit dem zugehörigen Controller und dem digitalen Speicher-Oszilloskop zu verschalten. Die Resonatorlänge ist so zu wählen, dass ein stabiler Laserbetrieb in der Grundmode gegeben ist. Anschließend wird das FPI justiert, bis das Signal am Schirm des Oszilloskops maximal wird. Zur Reduzierung statistischen Rauschens kann das Oszilloskop über den Menüpunkt *ACQUIRE* über bis zu 128 Werte mitteln.

Kalibrieren Sie die Timebase des Oszilloskops sinnvoll!

Anschließend ist die Laser-Linie auf dem Schirm sinnvoll auszurichten und mit Hilfe des PCs qualitativ zu erfassen. Bestimmen Sie daraus die Halbwertsbreite (full width half maximum, FWHM) der Laser-Linie und diskutieren Sie die Gestalt des Profils. Welche weiteren physikalischen Eigenschaften des Lasers können daraus abgeleitet werden?