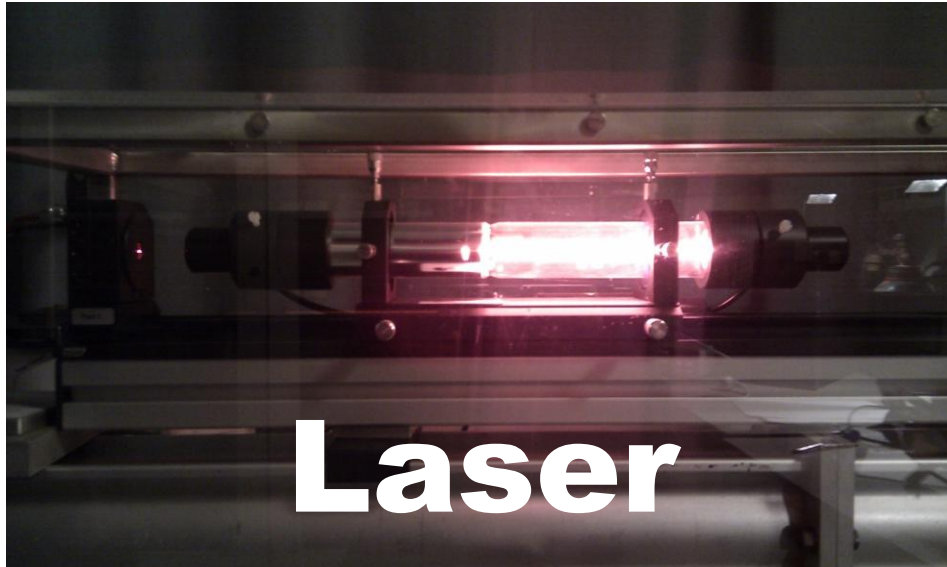


Fortgeschrittenen-Praktikum

Stand: März 2011

1 Einführung

Der Laser findet in unserer heutigen Gesellschaft eine Vielzahl von Anwendungen. Als Lesegerät in Laufwerken, zur Längenmessung, in der Medizin oder einfach als Ersatz für einen Zeigestab ist er aus dem heutigen Leben nicht mehr wegzudenken. Ein Laser besteht grundsätzlich aus einem lichtverstärkenden Material (z.B. Neon), das sich im Inneren eines Resonators befindet. Die Verstärkung des Lichtes erfolgt durch induzierte Emission von stärker besetzten höheren Energieniveau ins niedrigeren Niveau. Es kommt zur sog. Besetzungsinversion. Durch induzierte Emission werden kohärente Photonen erzeugt, welche weitere kohärente Photonen erzeugen, so dass durch eine Art Lawineneffekt ein starker kohärenter Lichtstrahl (Laser) entsteht. Beim He-Ne-Laser wird die Besetzungsinversion durch Gasentladung mit einer Kathodenspannung von ca. 2,8 kV erreicht. Man unterscheidet zwischen Dauerstrich- (*engl. Abkürzung „cw“ – continuous wave operation*) und gepulsten Lasern. Als Lasermedium können feste (z. B. Rubin, Nd:YAG), flüssige (z. B. Farbstoffe) und gasförmige (z. B. He-Ne, N₂, CO₂) Stoffe dienen. Die wichtigsten Eigenschaften des monochromatischen Laserlichtbündels sind seine hohe Intensität, seine geringe Divergenz und seine Kohärenz.

2 Lernziele**2.1. Verständnis der Aussagen der Theorie:**

- Möglichkeiten der Lichtverstärkung durch Besetzungsinversion
- Bedeutung der induzierten Emission: Erzeugung von kohärentem Licht großer Intensität
- Moden eines Resonators

2.2. Verständnis des technischen Aufbaus des Lasers:

- Verschiedenen Resonatorarten
- Erzeugung eines Lichtbündels mit kleiner Divergenz
- Verschiedene optische Elemente

2.3. Ausblick auf Anwendungsmöglichkeiten des Lasers:

- Modulationsmöglichkeiten (notwendig für Informationstransport)
- Lichtleitung in Glasfasern

2.4. Arbeitsweise weiterer optischer Geräte:

- Solarzelle
- Modulatoren
- Reflexionsgitter

2.5. Selbständiger Aufbau von Versuchen.

3 Aufgaben

1. Darstellung verschiedener transversaler Moden
2. Bestimmung der Wellenlänge des Lasers
3. Bestimmung des Verstärkungsfaktors des laseraktiven Materials
4. Messung der Lichtgeschwindigkeit und interferometrische Längenmessungen
5. Modulation des Lasers

4 Sicherheitsbestimmungen

Der He-Ne-Laser (Modell **micos** CA-1200, Ausgangsleistung < 5 mW) entspricht der Laserklasse 3. Weder der direkte noch der reflektierte Strahl darf das Auge treffen. Der Benutzer sollte es außerdem vermeiden, sich dem direkten oder reflektierten Strahl auszusetzen. Aus diesem Grund keine reflektierenden Gegenstände (z.B. Uhren, Gläser) in den Strahlengang bringen.

!!Achtung!!

Nicht in den Laserstrahl blicken!!! Gefahr für die Augen!!!

5 Aufbau und Versuchsdurchführung

Hinweis: Bei den einzelnen Versuchsteilen wird es oftmals nötig sein, die Resonatorspiegel, d. h. den Endspiegel (Krümmungsradius $r_1 = 1$ m; $R_1 = 99,8\%$) den Auskopplungsspiegel ($r_2 = \infty$; $R_2 = 98\%$), sowie die anderen Spiegel mit $r_3 = r_1 = 1$ m; $r_4 = 750$ mm, $R = 99,8\%$, nachzujustieren und/oder vom Lasergehäuse abzunehmen bzw. anzuschrauben. Dies sollte immer nur dann geschehen, wenn der Laser optimal justiert ist, d. h. die Laserintensität maximal ist. Das Nachjustieren der Spiegel (es ist möglich aber wird nicht empfohlen) sollte immer nur an einer Seite des Lasers erfolgen. Günstig ist es dabei, den Auskopplungsspiegel nicht zu verstellen.

Ein dejustierter Laser ist nur schwer ohne größeren Aufwand neu zu justieren!!! Der Laser sollte nur optimal justiert abgeschaltet werden.

5.1 Modendarstellung

Hemisphärischer Resonator: Endspiegel $r_1 = 1$ m; Auskopplungsspiegel $r_2 = \infty$

Der Laserstrahl wird mit Hilfe eines Objektivs, das vor dem Laser auf die Schiene aufgeschraubt wird, aufgeweitet. Durch Einbringen z. B. eines Haares oder Fadenkreuzes in den Strahlengang innerhalb des Resonators kann man bereits transversale Modenselektion erreichen und an der Wand beobachten. Woraus besteht die modenselektierende Wirkung des Haares bzw. Fadenkreuzes im Resonator? Man skizziere und indiziere die dargestellten Moden.



Abb. 1: TEM_{01} Mode

5.2 Bestimmung der Wellenlänge des Laserlichtes:

Hemisphärischer Resonator: Endspiegel $r_1 = 1$ m; Auskopplungsspiegel $r_2 = \infty$

Zur Bestimmung der Wellenlänge des Lasers wird die Maßeinteilung eines Messschiebers als Reflexionsgitter benutzt. Man markiert zunächst die Stelle, an der das nicht abgelenkte Bündel die Wand (versehen mit Papier) trifft. Dann legt man den Messschieber so auf den runden, in der Neigung verstellbaren Experimentiertisch, dass das Bündel die mm-Maßeinteilung streift. (**Achtung! Der Messschieber hat auch eine Zolleinteilung!** Wird diese gestreift, so muss die Rechnung entsprechend angepasst werden). An der Wand kann man nun eine Anzahl von Beugungsmaxima beobachten. Aus der Geometrie, der Gittergleichung für das Reflexionsgitter, sowie der Näherung, dass das Bündel die Wand senkrecht trifft, lässt sich mit der Gitterkonstanten

$g = 1 \text{ mm}^{-1}$ und der Lage der Maxima die Wellenlänge bestimmen und durch Berechnung für mehrere Maxima ein Mittelwert angeben.

5.3 Kennlinienbestimmung der Solarzelle

Hemisphärischer Resonator: Endspiegel $r_1 = 1 \text{ m}$; Auskopplungsspiegel $r_2 = \infty$

Im verdunkelten Raum wird die Solarzelle mit dem aufgeweiteten Laserbündel beleuchtet und der Photostrom an der Solarzelle mit dem Amperemeter gemessen. Durch Einbringen von Neutralglasfiltern (möglichst nahe vor der Zelle), deren Transmission T aus der Tabelle entnommen werden kann, (liegt beim Versuch aus), lässt sich der Strom in Abhängigkeit von der eingestrahelten relativen Intensität bestimmen. Welchen Zusammenhang erwarten Sie?

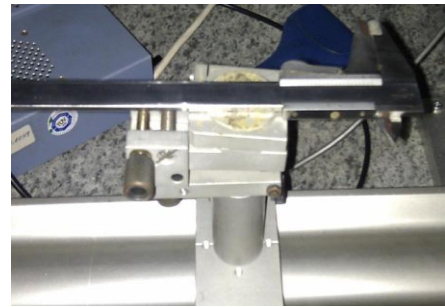


Abb. 2: Experimentiertisch mit Messschieber

5.4 Bestimmung des Verstärkungsfaktors des laseraktiven Mediums

Sphärischer Resonator: Endspiegel $r_1 = 1 \text{ m}$; Auskopplungsspiegel $r_3 = 1 \text{ m}$

Beim Wechseln der Spiegel müssen Sie sehr vorsichtig sein! Berühren Sie nicht die Mikrometerschrauben oder die Spiegelfläche. Die Güte des Resonators soll über ein zusätzliches optisches Element mit einstellbarem Transmissionsgrad T variiert werden. Bei bekanntem Transmissionsgrad T an der Laserschwelle kann man mit Hilfe der Schwellwertbedingung und den ebenfalls bekannten Resonatorspiegelreflektivitäten R_1 und R_2 die Verstärkung V des laseraktiven Materials ermitteln (Beugungs- und Absorptionsverluste werden vernachlässigt). Aus der Verstärkung V erhält man über die Beziehung

$$V = e^{\alpha l}$$

den Verstärungskoeffizienten $\alpha[\text{cm}^{-1}]$. Zur stufenlosen Regelung des Transmissionsgrads nutzt man die Vielstrahlinterferenz in einem planparallelen Quarzglasplättchen. Der Transmissionsgrad T dieses Plättchens ist abhängig vom Einfallswinkel θ_i und wird von der periodischen Airy-Funktion $A(\delta)$ beschrieben (vgl. z. B. [7]). Vergessen Sie nicht, dass Quarz ein doppelbrechendes Material ist und die Transmission somit von der Polarisation des Lichts abhängt. Unser Laser hat Brewsterfenster, welche s -polarisierte Komponente unterdrücken, so dass das Licht im Resonator stark linear p -polarisiert ist. Drehen Sie das Plättchen in der Halterung, um die Polarisation der optischen Achse des Quarzplättchens zu justieren. Welche Größe stellt das Argument δ dar und welcher Zusammenhang besteht zwischen δ und θ_i ? Überlegen Sie sich, wie Sie die Phasenverschiebung δ_0 an der Laserschwelle bestimmen ohne die genaue Dimensionierung des Glasplättchens zu kennen.

Berücksichtigen Sie dabei die Periodizität der Airy-Funktion (vgl. Abb. 4).

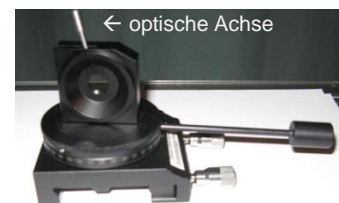
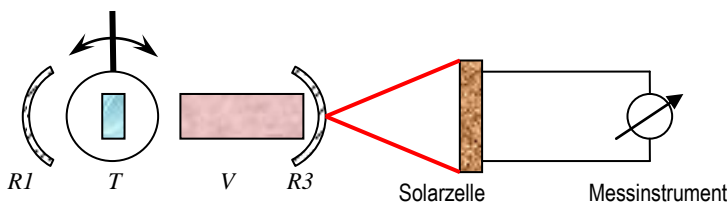


Abb. 3: Links: Solarzelle; in der Mitte: Aufbau zur Verstärkungsfaktorbestimmung; rechts: Quarzplättchen

Stellen Sie für diesen Versuchsteil sicher, dass der vordere Resonatorspiegel mit der Kennzeichnung „Part 3“ ($r_3 = 1 \text{ m}$; $R_3 = 99,8\%$) versehen ist.

In den Resonator des Lasers bringt man den Drehtisch mit dem Quarzglasplättchen innerhalb der Markierungen bzw. am Anschlagpunkt ein. Durch vorsichtiges bewegen des Hebels stellt man zunächst das Quarzglas so ein, dass der Rückreflex sich mit dem normalen Strahlengang im Resonator deckt (Flächennormale in Richtung der optischen Achse).

Wichtig!! Der abgelenkte Lichtstrahl wird teilweise an der Schutzvorrichtung um den Laser reflektiert. Daher ist es nötig, dass Sie die dafür vorgesehene Blende quer vor den Laser legen.

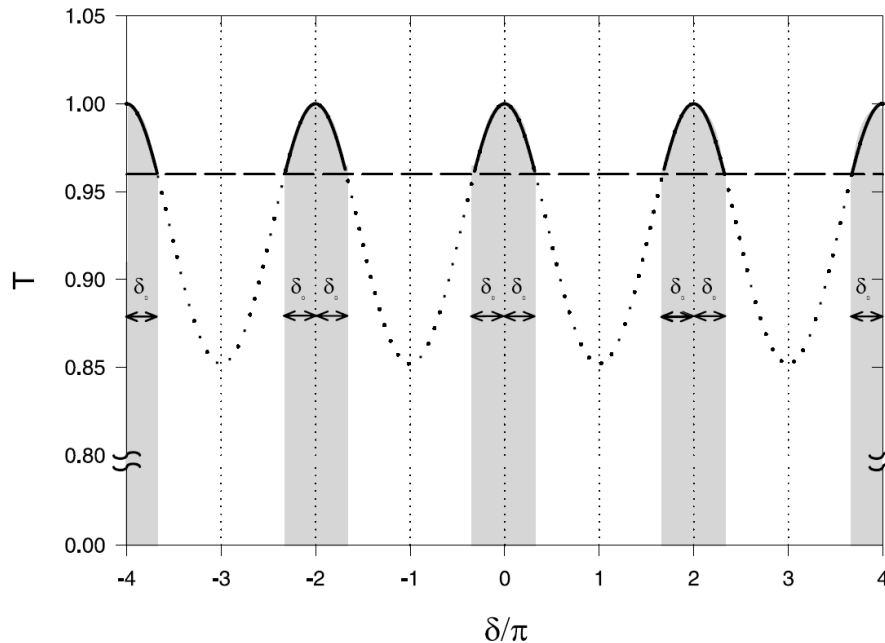


Abb. 4: Airy-Funktion für Transmission

Durch Drehen des Plättchens um eine Achse, die senkrecht zur optischen Achse liegt, kann man gemäß der Airy-Funktion, den Transmissionsgrad periodisch ändern, so dass die Lasertätigkeit abwechselnd ein- und aussetzt. Werden die jeweiligen Laserintensitäten mit Hilfe der Solarzelle in Abhängigkeit von der Drehung des Glasplättchens gemessen, so erhält man, graphisch aufgetragen, eine unterbrochene Airy-Funktion für die Transmission (vgl. Abb. 3). Der Winkel kann über den reflektierten Strahl an der weißen Wand abgelesen werden. Beachten Sie hierbei, dass die ersten Reflexe auf das Gehäuse des Lasers treffen und daher nicht abgelesen werden können. Achten sie weiterhin darauf dass sich keine Gerätschaften oder Ähnliches im Strahlengang befinden.

Die für die Airy-Funktion benötigte Reflektivität R des Quarzglasplättchens ($n = 1,4584$) kann als konstant angenommen werden und ist für kleine Drehwinkel etwa gleich der Reflektivität bei senkrechtem Lichteinfall, d. h. $R \approx (n-1)^2 / (n+1)^2$. Die Länge l der Entladungsröhre beträgt 0,38 m.

5.5 Messung der Lichtgeschwindigkeit und interferometrische Längenmessung:

Hemisphärischer Resonator: Endspiegel $r_1 = 1$ m; Auskopplungsspiegel $r_2 = \infty$

Zur Messung der Lichtgeschwindigkeit wird die Differenzfrequenz zweier Longitudinalmoden gemessen. Diese Frequenz hängt, außer von der Lichtgeschwindigkeit nur von der optischen Resonatorlänge L ab, so dass aus zwei Messungen bei definierter Längenänderung des Resonators die Lichtgeschwindigkeit bestimmt werden kann. Umgekehrt kann man analog bei gegebener Lichtgeschwindigkeit die Länge eines Maßstabes angeben. Die Messung wird wie folgt vorgenommen: Das periodische Zeitverhalten der Intensität des aufgeweiteten Laserbündels wird mit einer schnellen Photodiode aufgenommen und die spektralen Komponenten dieses Signals werden von einem Spektralanalysator (Hameg HM5006, Messbereich 0,15MHz - 500MHz, 60 min Aufwärmzeit) dargestellt. Was für eine Struktur erwarten Sie für dieses Spektrum, in welchem Frequenzbereich liegt es und wie kommt es zustande? Die definierte Längenänderung des Resonators erfolgt durch Einlegen des Maßstabes zwischen zwei Stativreiter. Die Länge eines zweiten Maßstabes soll bestimmt werden. Im Gegensatz zu Oszilloskopen, mit denen im $Y-t$ -Betrieb



Abb 5: Photodiode für Spektralanalysator

Amplituden auf der Zeitachse dargestellt werden, erfolgt mit dem Spektralanalysator die Darstellung der Amplituden auf der Frequenzachse ($Y-t$ -Betrieb). Der Analysator arbeitet wie ein elektronisch abgestimmter Schmalbandfilter, dessen Frequenzabstimmung mit der Horizontalablenkung des Bildschirm-Elektronenstrahls synchronisiert ist. Die gleichgerichtete Ausgangsspannung des Filters steuert die Vertikalablenkung des Elektronenstrahls.

5.6 Modulation

Hemisphärischer Resonator: Endspiegel $r_1 = 1\text{ m}$; Auskopplungsspiegel $r_2 = \infty$

Ein Faraday-Rotator dreht, proportional zum angelegten Magnetfeld, die Schwingungsrichtung vom einfallenden linear polarisierten Licht um den Winkel β .

Mit Hilfe eines solchen Faraday-Rotators, der an einen CD-Player (oder einen Signalgenerator) angeschlossen wird, soll im ersten Schritt die Information (Musik oder Ton), die aus der Modulation der Polarisationsrichtung besteht, in ein elektrisches Signal umgewandelt werden. Als Empfänger steht ein Phototransistor (oder eine Photodiode) zur Verfügung, der an einen NF-Verstärker mit Lautsprecher angeschlossen wird.

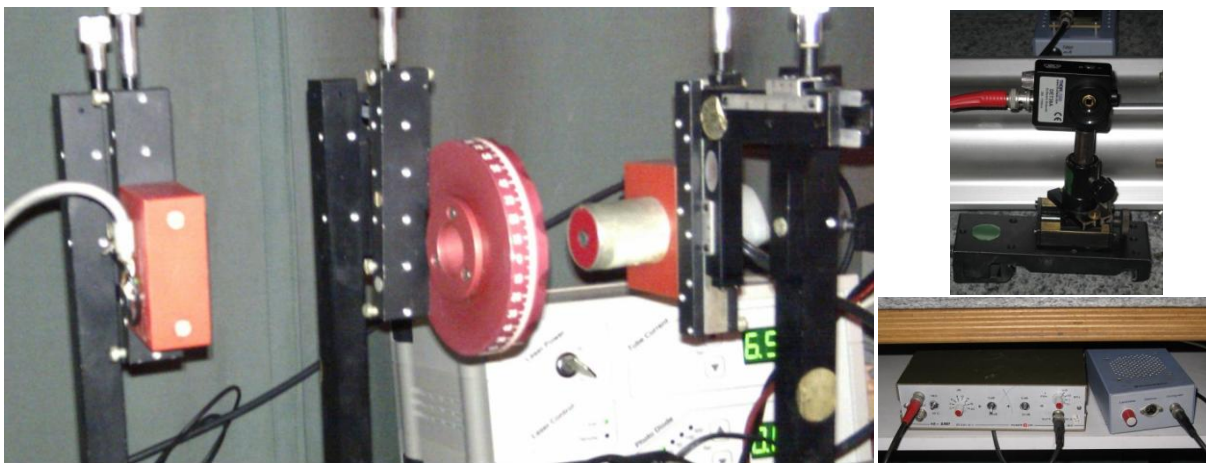


Abb. 5: Links: Aufbau für Lichtmodulation: Phototransistor, Polarisator, Faraday-Rotator; rechts oben – Photodiode; rechts unten – NF-Verstärker mit Lautsprecher.

Wie kommt man von der Modulation der Polarisationsrichtung auf eine, für diese Art von Signalübertragung notwendige, Amplitudenmodulation? Worauf kommt es bei der Modulation an, wie muss demnach der Polarisationsfilter gestellt werden? Wieso erhält man bei abgedecktem Laserstrahl manchmal trotzdem ein Signal?

Als Übertragungsmedium für leitungsgebundene Kommunikationssysteme kommen heute vor allem Lichtwellenleiter vor. In einem zweiten Schritt soll dann die Übertragung über einen Lichtwellenleiter erfolgen.

Literatur

- [1] K. Tradowsky: *Laser*, Vogel-Verlag, Würzburg, 1968; 84/UH 5610 T763
- [2] H. Weber, G. Herziger: *Laser Grundlagen und Anwendungen*, Physik Verlag, Weinheim/ Bergstraße, 1972; 84/UH 5610 W373
- [3] J. Eichler, H.-J. Eichler: *Laser*, Springer, Berlin, 1990; 84/UH 5610 E34
- [4] F. K. Kneubühl, M. W. Sigrist: *Laser*, Teubner, Stuttgart, 1991; 84/UH 5610 K68(3)
- [5] B. A. Lengyel: *Lasers*, Wiley-Interscience, N.Y., 1971; 84/UH 5610 L566 L3(2)
- [6] L. Bergmann, C. Schaefer: *Experimentalphysik*, Bd. 3: Optik, de Gruyter, Berlin, 1993; 84/UC 143 B499-3(9)
- [7] E. Hecht: *Optics*, Addison-Wesley, Reading, 1987; 84/UH 5000 H477 O6(2)

[1] - [5] behandeln speziell den Laser (weitere Literatur hierzu allgemein unter 84/UH 5610 ...), [6] und [7] beschäftigen sich vor allem mit der Optik.