

Versuch V61: Der HeNe-Laser

1 Ziel

In diesem Versuch soll die Funktionsweise eines HeNe-Lasers kennengelernt werden.

2 Stichworte

Absorption, Besetzungsinversion, Boltzmann-Verteilung, Brewster-Fenster, Einstein Koeffizienten, Emission, Fabry-Perot Etalon, Gaußsche Strahlenoptik, Kohärenz, Optischer Resonator, Stabilitätsbedingung, TEM-Moden

3 Theoretische Grundlagen

Ein Laser (**L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation) emittiert monochromatisches Licht hoher Intensität und Kohärenz. Um dies zu erreichen, muß der Laser aus drei grundlegenden Komponenten bestehen. Einem aktiven Lasermedium und einer Pumpquelle, um Inversion durch stimulierte Emission zu erzeugen, und einem Resonator zur Rückkopplung. Der Resonator schickt durch optische Rückkopplung das emittierte Licht durch das Lasermedium und erzeugt so einen selbsterregenden Oszillator. Dabei bestimmt das Lasermedium das Strahlungsspektrum, das vom UV über das sichtbare Licht bis hin zum IR reichen kann.

Ganz allgemein versucht man bei einem Laser das Lasermaterial so zu manipulieren, daß es bei der Wechselwirkung des Strahlungsfeldes mit dem Material zu einer Verstärkung des einfallenden Lichtes kommt. Im einfachsten Fall hat das Material 2 mögliche Zustände, wobei n_1 und n_2 die Besetzungszahlen der Atome im Grundzustand und im angeregtem Zustand sind. Hat das einfallende Photon die Energie des Überganges, so kann es absorbiert werden und wird so geschwächt. Ein angeregtes Atom kann spontan vom angeregtem Zustand in den Grundzustand übergehen und ein Photon emittieren. Dieser Übergang kann aber auch durch ein einfallendes Photon stimuliert

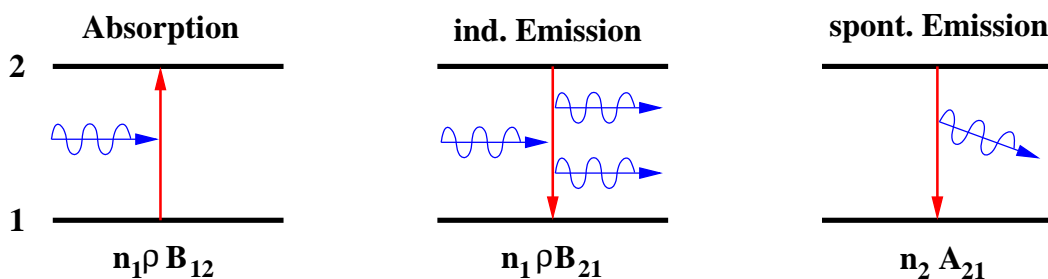


Abbildung 1: Schemata für die Absorption und Emission eines Strahlungsfeldes $\rho(\nu)$ bei einem 2-Niveau System.

werden, wobei das stimulierte Photon dieselbe Energie, Phase und Ausbreitungsrichtung wie das auslösende Photon hat. Bei der Wechselwirkung eines Strahlungsfeldes ρ mit einem Zwei-Niveau-System wird die Besetzungsdichte n_2 des angeregten Zustandes durch spontane und induzierte Emission vermindert und durch Absorption erhöht. Die Anzahl der pro Volumeneinheit und pro Sekunde absorbierten bzw. emittierten Photonen \dot{N} wird durch die Besetzungszahlen n_1 bzw. n_2 , die Energiedichte ρ des Strahlungsfeldes und den Einsteinkoeffizienten A_{21} , B_{21} und B_{12} bestimmt.

$$\begin{array}{ll} \dot{N}_A &= n_1 \rho(\nu) B_{12} & \text{Absorption} \\ \dot{N}_{IE} &= n_2 \rho(\nu) B_{21} & \text{induzierte Emission} \\ \dot{N}_E &= n_2 A_{21} & \text{spontane Emission} \end{array}$$

Dabei sind die Konstanten A_{21} , B_{21} und B_{12} ein Maß für die Übergangswahrscheinlichkeiten von einem Zustand zum anderen. Wenn keine Verluste auftreten ($n_1 + n_2 = \text{const}$), müssen sich die Besetzungsdichte n_1 und n_2 im gleichem Maß ändern, sodaß sich die Ratengleichungen für die Besetzungsdichten wie folgt berechnen lassen.

$$\begin{aligned} \frac{dn_1}{dt} &= -n_1 B_{12} \rho + n_2 B_{21} \rho + n_2 A_{21} \\ \frac{dn_2}{dt} &= +n_1 B_{12} \rho - n_2 B_{21} \rho - n_2 A_{21} \end{aligned}$$

Im thermischen Gleichgewicht überwiegt nach der Maxwell-Boltzmann-Verteilung die Besetzung des Grundzustandes. Um Kohärenz und eine dauerhafte Verstärkung des Strahlungsfeldes ρ zu erhalten, muß die stimulierte Emission häufiger auftreten als die spontane Emission. Dies wird durch eine höhere Besetzung des angeregten Zustandes als des Grundzustandes erreicht (Besetzungsinversion). Für eine Besetzungsinversion muß dem Lasermedium von außen permanent Energie zugeführt ('pumpen') wird. Dies kann z.B. durch Elektronenstoß oder optische Anregung (d.h. durch Strahlenzufuhr) erfolgen. Die Verstärkung wächst dabei exponentiell mit der Länge des Laufweges im aktiven Lasermedium an.

Damit der Laserstrahl einen möglichst langen Weg im aktiven Medium zurücklegt, sorgt ein Resonator dafür, daß der Laserstrahl das aktive Medium mehrfach durchläuft.

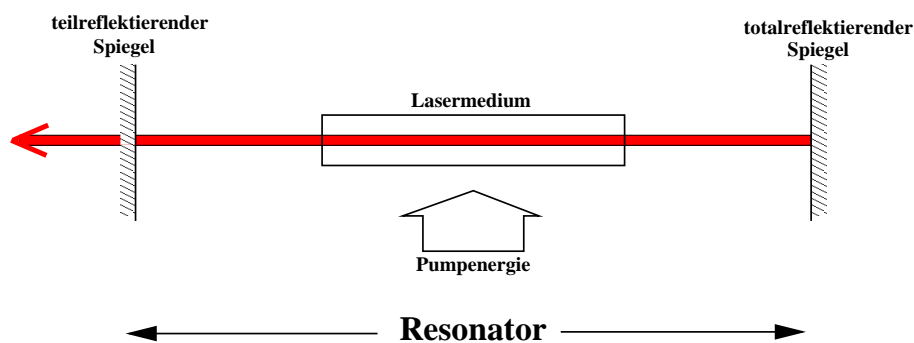


Abbildung 2: Prinzipielle Funktionsweise eines Lasers

Der optische Resonator wird durch zwei Spiegel realisiert die sich gegenüberstehen, wobei einer der Spiegel teildurchlässig ist, um den Laserstrahl auszukoppeln. Der Resonator kann z.B. aus zwei planparallelen Spiegeln (planparalleler Resonator), zwei sphärischen Spiegeln (sphärischer Resonator) oder einer Kombination aus Beidem bestehen. Damit sich ein Oszillator realisieren läßt, müssen die Verluste durch die Resonatorspiegel möglichst gering gehalten werden. Dies ist besonders bei einem konfokalen Resonator gegeben, bei dem die Spiegelbrennpunkte zusammenfallen. Sind die Verluste im Resonator kleiner als die Verstärkung durch die induzierte Emission, dann hat man einen selbsterregten Oszillator und der Resonator ist optisch stabil. Dies ist der Fall, wenn

$$0 \leq g_1 \cdot g_2 < 1 \quad (1)$$

erfüllt ist. Wobei die Resonatorparameter $g_i = 1 - L/r_i$ durch die Krümmungsradien r_i der Spiegel und der Resonatorlänge L bestimmt sind. Dabei hängen die Verluste und somit die Stabilität des Lasers nicht nur vom Resonatortyp sondern auch von der Form der Resonatorspiegel ab.

Da die Resonatorlänge L sehr viel größer als die Wellenlänge λ des Lasers ist, erfüllen prinzipiell viele Frequenzen die Resonanzbedingung einer stehenden Welle im Resonator. Die Anzahl q der Wellenlängen im Resonator wird longitudinale Mode genannt. Aufgrund von Spiegelunebenheiten, Verkippung oder anderem kann der Resonator auch in transversalen Moden schwingen. Die Eigenschwingungen oder Moden des Resonators werden in Anlehnung an Hohlleiter mit TEM_{lpq} (TEM=transverse electromagnetic mode) bezeichnet, wobei l und p die Knoten in x - und y -Richtung sind und transversale Modenzahl genannt werden. Die longitudinale Modenzahl q wird in der Regel als Bezeichnung weggelassen, da sie für die skalare Feldverteilung nicht von Bedeutung ist. In der Regel haben höhere Moden größere Verluste als niedrigere Moden mit höherer Symmetrie, sodaß im Resonator nur wenige transversale Moden isoliert und verstärkt werden. Die Feldverteilungen für einen konfokalen Resonator mit runden Spiegeln läßt sich durch

$$E_{lpq} \propto \cos(l \varphi) \frac{(2\rho)^2}{(1+Z^2)^{(1+l)/2}} L_p^q \left(\frac{(2\rho)^2}{1+Z^2} \right) \exp \left(-\frac{\rho^2}{1+Z^2} \right) \\ \times \exp \left(-i \left(\frac{(1+Z)\pi R}{\lambda} + \frac{\rho^2 Z}{1+Z^2} - (l+2p+1) \left(\frac{\pi}{2} - \arctan \left(\frac{1-Z}{1+Z} \right) \right) \right) \right)$$

$$\text{mit : } \rho = \left(\frac{2\pi}{R\lambda} \right)^{1/2} \quad \text{und} \quad Z = \left(\frac{2}{R} \right) z$$

annähern. Dabei sind l und p die transversalen Modenzahlen und $L_p^q(u)$ das zugeordnete Laguerre-Polynom. Aus den Feldverteilungen der transversalen Moden lassen sich die zu beobachtenden Intensitätsverteilungen berechnen.

Die Mode mit der höchsten Symmetrie und mit den wenigsten Verlusten ist die TEM_{00} Grundmode, die keine Nullstelle in transversaler Richtung aufweist. Die Intensitätsverteilung der TEM_{00} Grundmode wird durch eine Gaußverteilung

$$I(r) = I_0 e^{-\frac{2\pi^2}{w^2}} \quad (2)$$

beschrieben, wobei I_0 die Maximalintensität, r der Abstand zur optischen Achse und $2w$ der Strahldurchmesser ist. Der Strahlradius w des Gaußschen Strahles läßt sich im Abstand z von der minimalen Strahltaile w_0 durch

$$w(z) = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\theta z}{w_0}\right)^2} \quad (3)$$

berechnen, wobei $\theta = (\lambda/\pi)w_0$ die Strahldivergenz des Gaußschen Strahles ist.

Der HeNe-Laser ist ein Gaslaser mit einem Gasgemisch aus He- und Ne-Atomen im Verhältnis 5 zu 1 bei einem Druck von ungefähr 1 Torr. Das Gasgemisch befindet sich in einem Laserrohr, indem über eine elektrische Entladung eine Besetzungsinversion erzeugt wird. Das Laserrohr ist mit Brewsterfenster abgeschlossen, um so einen möglichst verlustfreien Durchtritt von Licht zu ermöglichen. Als Lasermaterial wird Neon verwendet, während das Helium als Pumpgas dient. Durch Entladung wird das Helium in metastabile Zustände angeregt. Durch Stöße zweiter Art wird die Anregungsenergie an die Neon-Atome weitergegeben, sodaß Inversion auftreten kann. Lasertätigkeit wird dabei auf mehreren Linien beobachtet, wobei die rote Linie mit $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ die intensivste ist.

4 Vorbereitung

- Welcher Übergang ist für die rote Linie des HeNe-Lasers verantwortlich?
- Warum ist ein Zwei-Niveau Laser nicht möglich?
- Berechnen Sie den Stabilitätsparameter $g_1 \cdot g_2$ als Funktion der Resonatorlänge L für mindestens zwei Resonatoren und stellen Sie das Ergebnis graphisch dar. Welcher Resonatorabstand kann maximal erreicht werden.
- Erklären Sie den Begriff der “Modenblende”.

5 Aufgaben

- Justieren Sie den HeNe-Laser und bringen Sie ihn zum lasen.
- Überprüfen Sie die Stabilitätsbedingung für die von Ihnen berechneten Resonatoren, indem Sie den maximal möglichen Resonatorabstand ausmessen.
- Erzeugen und vermessen Sie mindestens 2 TEM-Moden des Lasers.
- Vermessen Sie die Polarisation des Lasers. Warum führt der Einsatz von Brewsterendfenstern zur Polarisation der Laserstrahlung?
- Bestimmen Sie die Wellenlänge des Lasers mittels Beugung am Spalt bekannter Breite und eines Strichgitters bekannter Strichzahl.

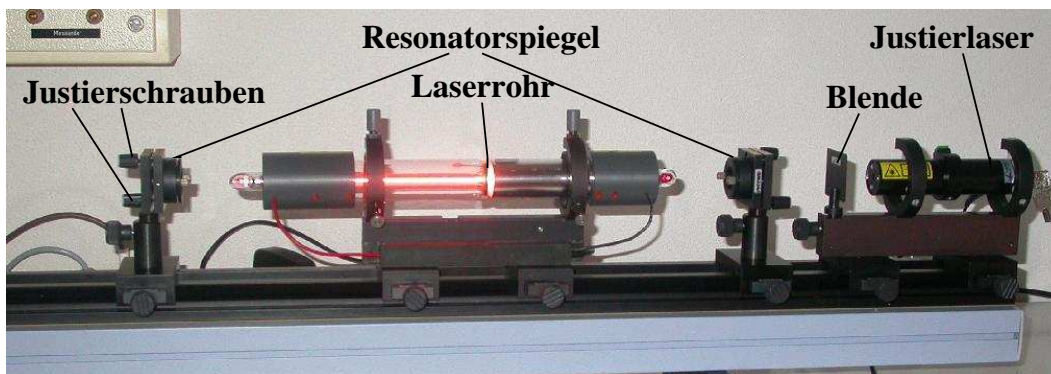


Abbildung 3: Experimenteller Aufbau

- Bestimmen Sie die Dicke eines unbekannten Drahtes (z.B. Haar) aus der Beugung.

Von den beiden letzten Aufgaben kann eine Aufgabe weggelassen werden.

6 Versuchsaufbau

Auf einer optischen Schiene befindet sich ein Justierlaser ($\lambda = 532 \text{ nm}$, $P_{\max} = 1 \text{ mW}$) mit einer reduzierten Laserleistung von $P_{\text{red}} = 0.2 \text{ mW}$.¹ Für den Aufbau und die Justage des HeNe-Lasers, muß zuerst der Justierlasers ausgerichtet werden. Hierzu kann man je einen Schirm mit Fadenkreuz und Beugungsblende direkt hinter den Justierlaser und am Ende der optischen Bank positionieren. Befinden sich die Beugungsringe direkt im Fadenkreuz, so ist der grüne HeNe-Laser auf die optische Achse justiert. Der eigentliche HeNe-Laser besteht aus einem Laserrohr und zwei hochreflektierenden Spiegeln, die den Laserresonator bilden. Das Laserrohr (Länge $l=408 \text{ mm}$ und Durchmesser $d_{\text{HeNe}}=1.1 \text{ mm}$) ist mit einem HeNe-Gasgemisch gefüllt und mit Elektroden versehen, sodaß mittels Entladung eine Inversion stattfinden kann. An den Enden des Laserrohres befinden sich Brewster-Fenster, um eine definierte Polarisationsrichtung mit möglichst wenig Verlusten zu erreichen. Als Resonatorspiegel stehen Ihnen vier verschiedene Spiegel (Durchmesser $D_{\text{Spiegel}}=12.7 \text{ mm}$) zur Verfügung mit denen Sie einen optischen Resonator aufbauen können.

Spiegel	Bezeichnung	Oberflächenbeschaffenheit	
plan	flat/flat	HR (high reflectivity)	$R \geq 99\%$
konkav	$r=1000 \text{ mm}/\text{flat}$	HR (high reflectivity)	$R \geq 99\%$
konkav	$r=1400 \text{ mm}/\text{flat}$	HR (high reflectivity)	$R \geq 99\%$
konkav	$r=1400 \text{ mm}/\text{flat}$	OC (out coupling)	$T=1.5, \dots 1.8\%$

¹Um die volle Leistung zu erhalten, müssen Sie den grünen Knopf auf dem Laser drücken. Die reduzierte Leistung ist allerdings für die Justage völlig ausreichend!!

Zum Vermessen der Lasereigenschaften wie z.B. Polarisierung, Strahldurchmesser oder Wellenlänge stehen Ihnen verschiedene Komponenten wie Photodiode, Spalte, Mikrometerschraube oder Polarisator zur Verfügung, die Sie in den Strahlengang des Lasers einbringen können.

Achtung! Laser der Klasse 3B!
Nicht in den Laserstrahl blicken!
Schutzbrille tragen!

7 Durchführung und Auswertung

Justieren des HeNe-Lasers:² Stellen Sie den Justierlaser mit den beiden Beugungsblenden auf die optische Schiene, sodaß die Blenden einen maximalen Abstand voneinander haben. Richten Sie den Laser mit den 6 Justierschrauben so aus, daß sich die Fadenkreuze in der Mitte der Beugungsringe befinden. Stellen Sie nun nacheinander die Resonatorspiegel und das Laserrohr auf die optische Schiene und stellen Sie für jede Komponente einzeln sicher, daß der Rückreflex des Justierlasers wieder die Justierblende im Fadenkreuz trifft. (Hinweis: Nehmen Sie auch die gegenüberliegende Wand Zuhilfe. Eine gute Vorjustage ist wichtig, um nachher den Laser in Betrieb nehmen zu können!!) Stellen Sie alle Komponenten (Plasmarohr und Resonatorspiegel) auf die optische Bank und schalten Sie den Justierlaser aus. Stellen Sie den Strom der Hochspannung auf $I=6.5$ mA. Das Laserrohr wird aufgrund der Entladung rot leuchten. In der Regel setzt aber noch keine Lasertätigkeit ein. Hierzu müssen Sie **vorsichtig!!!** an den Justierschrauben der Resonatorspiegel nachjustieren. Wenn die Lasertätigkeit einsetzt sehen Sie einen roten Strahl zwischen Brewster-Fenster und Resonatorspiegel. Ist dies auch nach einiger Zeit nicht der Fall, dann haben Sie bei der Vorjustage nicht sorgfältig genug gearbeitet und Sie müssen den gesamten Ablauf von Anfang an neu beginnen.

Überprüfen der Stabilitätsbedingung: Justieren Sie den Laser mit Hilfe einer Photodiode auf die maximale Leistung ein. Stellen Sie den maximal möglichen Resonatorabstand ein. Vergrößern Sie hierzu den Abstand der beiden Laserspiegel bei laufendem Laser, dabei sollten Sie nicht vergessen die Laserleistung nachzujustieren. Bei guter Justage sollten sie fast den theoretischen Wert aus der Stabilitätsbedingung erreichen. Wiederholen Sie die Messung für einen weiteren Resonator. Überlegen Sie sich, welche Gründe zum Verlust der Stabilität führen.

Beobachten von TEM-Moden: Versuchen Sie möglichst viele verschiedene Moden zu stabilisieren und zu identifizieren. Zum Stabilisieren der Moden wird ein dünner Wolframdraht ($d=0.005$ mm) zwischen Resonatorspiegel und Laserrohr gebracht und so verschoben, daß verschiedene Moden auf einem optischen Schirm erkennbar sind. Welche Funktion hat der Draht? Ersetzen Sie den optischen Schirm durch eine Photodiode und vermessen Sie mindestens zwei Moden. Tragen Sie die gemessenen Intensitätsverteilungen in ein Diagramm ein und passen Sie die theoretische Verteilung an die experimentellen Daten an.

²Eine genauere Justieranleitung liegt am Experiment aus.

Bestimmung der Polarisation: Stellen Sie einen Polarisator hinter den Auskoppelspiegel und messen Sie die Intensität mit einer Photodiode als Funktion der Polarisationsrichtung. Erklären Sie, warum ein Brewsterendfenster zur Polarisation führt und vergleichen Sie die gemessene Intensitätsverteilung mit der theoretisch berechneten. Welchen Einfluß haben die Resonatorspiegel auf die Polarisation des Lasers?

Bestimmung der Wellenlänge Bestimmen Sie aus den Beugungsmaxima bzw. Beugungsminima eines Spaltes und eines Gitters die Wellenlänge des HeNe-Lasers.

Literatur

- [1] K. Tradowsky, *Laser*, Vogel-Fachbuch.
- [2] W. Demtröder, *Laserspektroskopie*, Springer-Verlag.
- [3] F.K. Kneubühl und M.W. Sigrist, *Laser*, Teubner Taschenbücher.
- [4] G. Brooker, *Modern Classical Optics*, Oxford Master Series.