

A10: Physik und Technik des Helium-Neon-Lasers.

1. Übersicht zum Thema und Zusammenfassung der Ziele

Der Laser ist eine Schlüsseltechnologie der heutigen Zeit. In seiner etwa 40jährigen Geschichte haben sich eine Fülle von Anwendungen ergeben, von der Messung physikalischer Gesetzmäßigkeiten über die Initiierung, Messung und Steuerung "schneller" Reaktionen in der Chemie und Biologie bis zu Anwendungen in der Medizin, Umwelttechnologie, Nachrichtentechnik und Industrietechnik. Der Versuch vermittelt an einem einfachen System das Verständnis der wesentlichen Komponenten eines kontinuierlichen (Dauerstrich oder cw - continuous wave) Lasers.

2. Theoretische Grundlagen

Gemäß der sogenannten **zweiten Quantisierung**^{*} ist das elektromagnetische Feld quantisiert. Die Feldquanten (**Photonen**) gehorchen als Bosonen der **Bose-Einstein-Statistik**, die sich in der **Planckschen Strahlungsformel** niederschlägt. Die Photonen können nur in bestimmten Zuständen (**Moden**) existieren, die durch räumliche Feldverteilung, Frequenz und Polarisierung charakterisiert sind. Welche Moden konkret existieren, hängt von den vorliegenden Randbedingungen (Stichwort **Resonator**) ab.

Neben der Quantisierung des Strahlungsfeldes beruht das Laserprinzip auf der Quantisierung der Energieniveaus des **aktiven Mediums**. Durch Licht können Übergänge zwischen den Niveaus ausgelöst werden, wobei Photonen erzeugt (emittiert) oder vernichtet (absorbiert) werden. Die für den Laser relevanten Prozesse niedrigster Ordnung sind **Absorption**, **spontane Emission** und **stimulierte Emission**. Die Wahrscheinlichkeit dieser Prozesse wird durch die **Einstein-Koeffizienten** B_{12} , A_{21} und B_{21} beschrieben. Ein Koeffizientenvergleich für ein System im thermischen Gleichgewicht ergibt, dass B_{12} und B_{21} im Falle gleicher Entartung der beteiligten Niveaus gleich sind. Das Verhältnis von A_{21} zu B_{21} skaliert mit ν^3 (ν = Frequenz) - ein Grund dafür, dass Laser mit kurzen Wellenlängen schwierig zu realisieren sind.

Bei der stimulierten Emission wird ein zweites Photon erzeugt, das mit dem induzierenden Photon in allen Eigenschaften übereinstimmt. Das Licht wird hier also verstärkt (LASER = Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation). Damit die Lichtverstärkung gegenüber der Absorption überwiegt, muss **Besetzungsinversion** im Medium vorliegen. Für eine stationäre Besetzungsinversion ist ein Kreisprozess notwendig, an dem mindestens drei Niveaus des Mediums beteiligt sind. Die Energiezufuhr, die diesen Kreisprozess aufrecht erhält, wird als **Pumpen** bezeichnet. Die wichtigsten Pumpquellen sind: Licht, oft von anderen Lasern (optisches Pumpen, z.B. bei Festkörper- und Flüssigkeitslasern), elektrischer Strom (Halbleiterlaser), **Gasentladungen** (Gaslaser) und chemische Reaktionen (Excimer-Laser).

In einem Laser wird das verstärkende (aktive) Medium in einen Resonator gebracht, so dass es zur positiven **Rückkopplung** und zum Anschwingen derjenigen Moden kommt, für die die Verstärkung die **Laserschwelle** erreicht. Da dies in der Regel nur eine oder wenige Moden sind, ist Laserlicht einzigartig kollimiert, monochromatisch und kohärent.

^{*} Die Themenkreise zu den **fett** gedruckten Stichworten sollten Sie zum Versuchsbeginn beherrschen

3. Technik des He-Ne-Lasers

Der He-Ne-Laser [3] ist ein kleines, kompaktes Gerät, das mit moderater Pumpleistung den kontinuierlichen Betrieb bei einer ganzen Reihe von festen Wellenlängen mit einigen mW Ausgangsleistung ermöglicht. Die meisten kommerziellen und auch die in diesem Versuch verwendeten He-Ne-Laser arbeiten auf der stärksten Laserlinie von 633 nm.

Zunächst muss das Lasermedium angeregt werden. Beim He-Ne-Laser werden durch Elektronenstoß (Gasentladung) zunächst Heliumatome in metastabile Zustände angeregt. Dies ist notwendig, weil der Wirkungsquerschnitt für die Stoßanregung durch Elektronen beim Neon recht klein ist. Durch **Stöße zweiter Art** zwischen Helium- und Neonatomen kommt es zu einem resonanten Energieaustausch zwischen Übergängen mit nahezu gleichem Energieabstand vom Helium zum Neon. Licht der richtigen Wellenlänge wird dann im Lasermedium durch stimulierte Emission verstärkt.

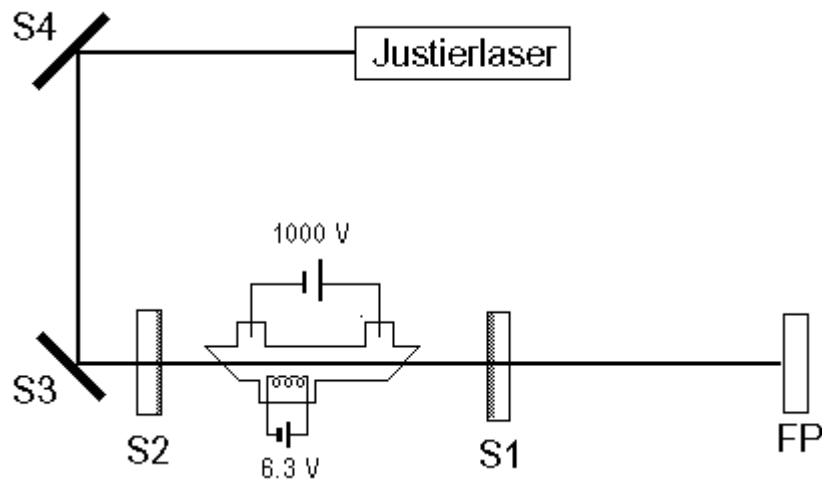
Durch Einfügen des Lasermediums in einen optischen Resonator wird aus dem Verstärker ein von selbst anschwingender Oszillator. Der Resonator besteht im einfachsten Fall (so auch in diesem Versuch) aus zwei hochreflektierenden dielektrischen Spiegeln, von denen mindestens einer zu wenigen Prozent oder Promille teildurchlässig ist. Außerdem ist meist mindestens ein Spiegel gekrümmt (sphärisch). Durch letzteres erreicht man leichtere Justierbarkeit, sowie (bei richtigen Spiegelabständen) einen **"stabilen" Resonator**, aus dem das Licht trotz Beugungseffekten nicht seitlich entweichen kann. Die Frequenzen der Moden eines solchen Resonators sind gegeben durch [4]:

$$\nu_{qmn} = \frac{c}{2d} \left[q + (m + n + 1) \frac{1}{\pi} \arccos \left(\sqrt{\left(1 - \frac{d}{R_1}\right) \left(1 - \frac{d}{R_2}\right)} \right) \right]$$

R_1 und R_2 sind die Krümmungsradien der Spiegel, d deren Abstand, q , m und n bezeichnen die Anzahl der longitudinalen und transversalen (radiale und azimutale bei kreisrunden Spiegeln) Knotenflächen. Für bestimmte Werte von R_1 und R_2 spricht man von planaren, konfokalen und sphärischen Resonatoren. Weitere Angaben zu den Eigenfrequenzen, **Stabilitätsbedingungen** und Feldverteilungen auch für kompliziertere Resonatortypen sind in [4] zu finden.

Der laseraktive Übergang ist im Prinzip eine Spektrallinie mit einer recht kleinen **natürlichen Linienbreite**. Der He-Ne-Laser sollte deshalb nur auf einer einzigen festen Frequenz anschwingen können. Beobachtet wird jedoch im allgemeinen eine vielfältige **Modenstruktur**. Dies liegt an zwei Mechanismen, die eine Spektrallinie verbreitern können, nämlich der **Dopplerverbreiterung** und der **Stoßverbreiterung**. Bei den vorliegenden Verhältnissen überwiegt die Dopplerverbreiterung. Diese bestimmt im wesentlichen das **Verstärkungsprofil**. Das Verstärkungsprofil und die Lage der Laserschwelle bestimmen Anzahl und Lage der anschwingenden Resonatormoden.

4. Versuchsaufbau



Der Versuchsaufbau besteht im wesentlichen aus dem He-Ne-Justierlaser sowie dem He-Ne-Entladungsrohr mit Stromversorgung und Hochspannungsnetzteil. Des weiteren sind vorhanden: Umlenkspiegel S3 und S4, Resonatorspiegel S1 und S2, Diode mit Leistungsmessgerät [1], Scanning-Fabry-Perot-Interferometer FP (*Freier Spektralbereich* = 2 GHz) mit Steuergerät [2] und digitalem Oszilloskop, Polarisator, Bandpassfilter, div. Linsen, Schirm und Irisblende.

5. Sicherheitshinweise

- Laserstrahlung ist schädlich für Haut und Augen! Niemals direkt in den Laserstrahl blicken!
- Achtung Hochspannung! Bei Arbeiten an der Plasmaröhre immer erst das Netzgerät ausschalten und einige Minuten die Entladung der Kondensatoren abwarten!
- Dielektrische Spiegel sind sehr empfindlich und dürfen nicht berührt oder unsachgemäß "geputzt" werden. Sollte eine Reinigung notwendig erscheinen, zunächst Rücksprache mit dem betreuenden Assistenten treffen. Dasselbe gilt für die Fenster der Gasentladungsröhre und die restlichen optischen Komponenten.
- Einige Sekunden nach Einschalten des Laser-Netzgerätes schaltet sich die Hochspannung dazu. Sollte die Gasentladung längere Zeit (Minuten) flackern oder ein hoher Pfeifton auftreten, muss das Netzgerät abgeschaltet werden, damit die Laserröhre keinen Schaden nimmt.

6. Aufgaben

1. Ausrichten des Justierlaserstrahls entlang der optischen Bank mit Hilfe der Umlenkspiegel. Der Strahl muss mittig durch die hintere Öffnung des Resonatorplanspiegels bei Aufstellung an beiden Enden der optischen Bank gehen.
2. Messung der Justierlaserleistung und -polarisation und der Transmission der später für den Resonator verwendeten Spiegel.
3. Messung der Modenstruktur des Justierlasers und darüber Bestimmung der Resonatorlänge.

4. Aufbau und Justage des passiven Resonators, Beobachtung der Moden auf dem Schirm, Grobbestimmung der Radien über das Stabilitätskriterium.
Warum flackern die Moden bei stillstehenden Spiegeln? Warum nicht bei bewegten Spiegeln?
5. Justage der Plasmaröhre ohne Resonator und Messung der Laserverstärkung $\Delta I/I$ (Messung von ΔI bei Ein- oder Ausschalten der Gasentladung). Hierbei wird das Leuchten der Gasentladung durch den Bandpassfilter unterdrückt (der Filter ist um die 633 nm-Linie zentriert). Überprüfen Sie, ob die Unterdrückung ausreichend ist. Diskutieren Sie das Ergebnis im Vergleich mit dem von Aufgabenteil 2.
6. Inbetriebnahme und Optimierung des Messlasers. Messung der Ausgangsleistung und der Polarisation (Diskussion!).
7. Bestimmung der Spiegelradien über das Stabilitätskriterium.
8. Beobachtung der Moden auf dem Schirm und mit dem Fabry-Perot-Interferometer. Unterdrückung höherer transversaler Moden mit Hilfe der Irisblende.
9. Messung des Abstands der Longitudinalmodenfrequenzen in Abhängigkeit vom Spiegelabstand.
10. Messung des kompletten Modenspektrums (ein "Schuss" mit dem digitalen Oszilloskop) bei offener Irisblende für einen der unter 9. verwendeten Spiegelabstände. Versuchen Sie eine Zuordnung der gemessenen Linien gemäß der obigen Formel für die Modenfrequenzen des stabilen Resonators.
11. Bestimmung der Linienbreite und der Plasmatemperatur (Diskussion!). Eventuelle Beobachtung des *power dips*.

7. Literatur

Lehrbücher/Monographien

- W. DEMTRÖDER, *Laser Spectroscopy, Basic Concepts and Instrumentation*, Springer (Berlin 1981).
- C. GERTHSEN, H.O. KNESER, H. VOGEL; *Physik*, 14. Auflage, Springer (Berlin 1982).
- F.K. KNEUBÜHL, M.W. SIGRIST, *Laser*, Teubner (Stuttgart 1988).
- W. KLEEN, R. MÜLLER, *Laser*, Springer (Berlin 1969).
- A. WINNACKER, *Physik von Maser und Laser*, BI (Mannheim 1984).
- A.L. BLOOM, *Gas Lasers*, John Wiley (New York 1968).
- C.S. WILLETT, *Introduction to Gas Lasers: Population Inversion Mechanisms*, Pergamon Press (Oxford, 1974).
- E. HECHT, A. ZAJAC, *Optics*, Addison Wesley (Reading Mass. 1980).

- A.E. SIEGMAN, *An Introduction to Lasers and Masers*, McGraw Hill (New York 1971).
- J. EICHLER, H.J. EICHLER, *Laser*, 3. Auflage, Springer (Berlin 1998).

Bedienungsanleitungen

- [1] Bedienungsanleitung für das Leistungsmessgerät der Firma Liconix.
- [2] Bedienungsanleitung für das Steuergerät des Scanning-Fabry-Perot-Interferometers der Firma Spectra Physics.

Primärliteratur

- [3] A. JAVAN, W.R. BENNET, Jr., D.R. HERRIOTT, *Physical Review Letters* 6, 106 (1961).
- [4] S.A. COLLINS, *Applied Optics* 3, 1263 (1964).

Einige ausgewählte Artikel zu aktuellen Themen

Attosekundenlaser:

- A. BALTUSKA, T. UDEM, M. UIBERACKER, M. HENTSCHEL, E. GOULIELMAKIS, C. GOHLE, R. HOLZWARTH, V.S. YAKOVLEV, A. SCRINZL, T.W. HÄNSCH, F. KRAUSZ, *Nature* 421, 611 (2003).
- M. DRESCHER, M. HENTSCHEL, R. KIENBERGER, M. UIBERACKER, V. YAKOVLEV, A. SCRINZI, T. WESTERWALBESLOH, U. KLEINEBERG, U. HEINZMANN, F. KRAUSZ, *Nature* 419, 803 (2002).

Röntgenlaser:

- P.V. NICKLES, K.A. JANULEWICZ, W. SANDNER, *Physik Journal* 6, 43 (2000).

Freie-Elektronen-Laser:

- P.G. O'SHEA, H.P. FREUND, *Science* 292, 1853 (2001).
- J.A. ZAKRZEWSKI, *Physik Journal* 7, 95 (2001).

Quantenkaskadenlaser:

- M. BECK, D. HOFSTETTER, T. AELLEN, J. FAIST, U. OESTERLE, M. ILEGEMS, E. GINI, H. MELCHIOR, *Science* 295, 301 (2002).