

Gaslaser

Total Laser!

Valentin Boettcher

January 19, 2020

Gaslaser

Total Laser!

Valentin Boettcher

January 19, 2020

1 Allgemeines zum Versuch

2 Theoretische Grundlagen

- Grundlegender Aufbau und Funktionsweise eines Lasers
- Besetzungsinversion und Laserbedingungen
- Optischer Resonator
- Modenstruktur und Linienverbreiterung
- Fabry-Pérot-Interferometer

3 Durchführung und Ergebnisse

- Berechnung des Stabilitätsbereichs
- Justage und Messung der Verstärkung im Einfachdurchgang
- Aufbau des Hemisphärischen Resonators
- Messung der Polarisationsseigenschaften
- Messung der Kaustik
- Messung des Spektrums mit dem Faserspektrometer
- Messung von Spektren mit dem FPI

4 Fazit/Quellen

1 Allgemeines zum Versuch

2 Theoretische Grundlagen

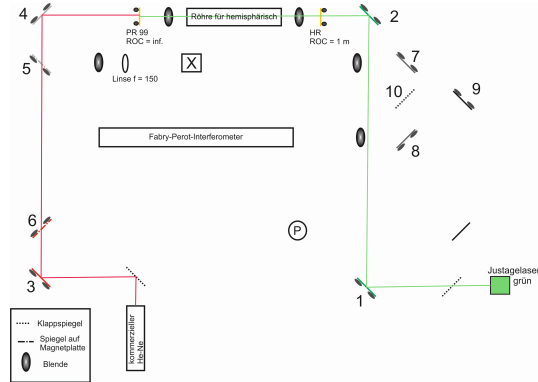
- Grundlegender Aufbau und Funktionsweise eines Lasers
- Besetzungsinversion und Laserbedingungen
- Optischer Resonator
- Modenstruktur und Linienverbreiterung
- Fabry-Pérot-Interferometer

3 Durchführung und Ergebnisse

- Berechnung des Stabilitätsbereichs
- Justage und Messung der Verstärkung im Einfachdurchgang
- Aufbau des Hemisphärischen Resonators
- Messung der Polarisationsseigenschaften
- Messung der Kaustik
- Messung des Spektrums mit dem Faserspektrometer
- Messung von Spektren mit dem FPI

4 Fazit/Quellen

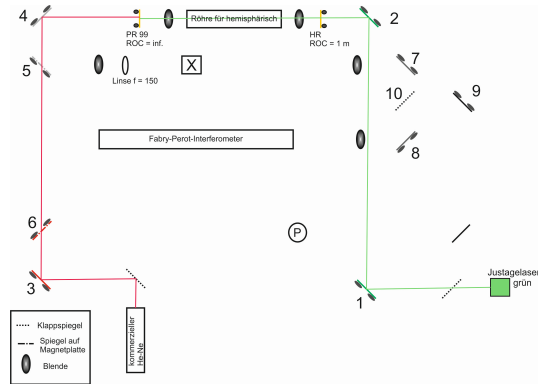
Versuchsziel und Aufbau



Ziel des Versuches

Justierung, Inbetriebnahme und Untersuchung eines HeNe Lasers.

Versuchsziel und Aufbau



Ziel des Versuches

Justierung, Inbetriebnahme und Untersuchung eines HeNe Lasers.

Zur Verfügung stehendes Material

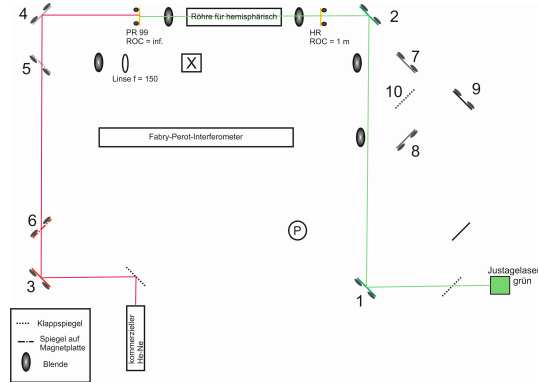
Optische Komponenten Spiegel, Blenden, Linsen, Plofilter

Laser kommerzieller HeNe und grüner Justagelaser

Laserröhre HeNe Entladungsröhre

Leistungsmessgerät Zur Leistungsmessung und als Justagehilfe.

Versuchsziel und Aufbau



Zur Verfügung stehendes Material

Fabry Perot Interferometer Festaufbau,
Konfokal

Faserspektrometer Ocean Optics HR2000+ als
Referenzmessgerät.

Oszilloskop Digital, mit PC

1 Allgemeines zum Versuch

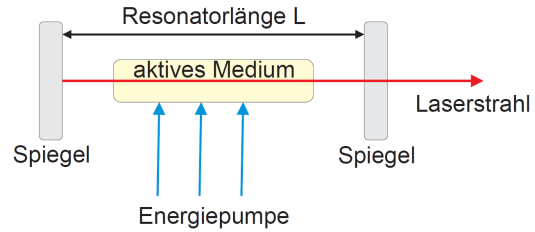
2 Theoretische Grundlagen

- Grundlegender Aufbau und Funktionsweise eines Lasers
- Besetzungsinversion und Laserbedingungen
- Optischer Resonator
- Modenstruktur und Linienverbreiterung
- Fabry-Pérot-Interferometer

3 Durchführung und Ergebnisse

- Berechnung des Stabilitätsbereichs
- Justage und Messung der Verstärkung im Einfachdurchgang
- Aufbau des Hemisphärischen Resonators
- Messung der Polarisationsseigenschaften
- Messung der Kaustik
- Messung des Spektrums mit dem Faserspektrometer
- Messung von Spektren mit dem FPI

4 Fazit/Quellen



Aufbau

- ▶ Aktives Medium
 - ▶ Gase Festkörper
- ▶ Optischer Resonator
 - ▶ meist rotationssymmetrische, sphärische Spiegel
- ▶ Energiepumpe
 - ▶ Lichtblitze, Elektronenstöße

Funktionsweise

Acronym

Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation.

1. Energiepumpe erzeugt Ungleichgewichtsbesetzung von Energieniveaus im aktiven Medium

Funktionsweise

Acronym

Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation.

1. Energiepumpe erzeugt Ungleichgewichtsbesetzung von Energieniveaus im aktiven Medium
2. Photonen oszillieren im Resonator mehrfach, werden bei jedem Durchlauf verstärkt \implies

Funktionsweise

Acronym

Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation.

1. Energiepumpe erzeugt Ungleichgewichtsbesetzung von Energieniveaus im aktiven Medium
2. Photonen oszillieren im Resonator mehrfach, werden bei jedem Durchlauf verstärkt \implies
3. Bruchteil des Lichtes wird ausgekoppelt und genutzt

Funktionsweise

Acronym

Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation.

1. Energiepumpe erzeugt Ungleichgewichtsbesetzung von Energieniveaus im aktiven Medium
2. Photonen oszillieren im Resonator mehrfach, werden bei jedem Durchlauf verstärkt \implies
3. Bruchteil des Lichtes wird ausgekoppelt und genutzt

Achtung

Große Vielfalt in der Implementierung (Materialien, Energiepumpen)

- ▶ betrachte ein Zweiniveausystem 1, 2, Besetzungszahlen N_1, N_2
- ▶ für elektromagnetische atomare Übergänge gilt:

$$h\nu = E_2 - E_1 \quad (1)$$

1. Häufigkeit proportional zu spektraler Energiedichte

- ▶ betrachte ein Zweiniveausystem 1, 2, Besetzungszahlen N_1, N_2
- ▶ für elektromagnetische atomare Übergänge gilt:

$$h\nu = E_2 - E_1 \quad (1)$$

Absorptions und Emissionsprozesse

Absorption Absorption eines Photons wird von Atom absorbiert, Anregung $1 \rightarrow 2$

1. unabhängig von der umgebenden spektralen Energiedichte

- ▶ betrachte ein Zweiniveausystem 1, 2, Besetzungszahlen N_1, N_2
- ▶ für elektromagnetische atomare Übergänge gilt:

$$h\nu = E_2 - E_1 \quad (1)$$

Absorptions und Emissionsprozesse

Absorption Absorption eines Photons wird von Atom absorbiert, Anregung $1 \rightarrow 2$

Spontane Emission Aussendung eines Photons, Spontane Abregung des Atoms $2 \rightarrow 1$

- ▶ betrachte ein Zweiniveausystem 1, 2, Besetzungszahlen N_1, N_2
- ▶ für elektromagnetische atomare Übergänge gilt:

$$h\nu = E_2 - E_1 \quad (1)$$

Absorbtions und Emissionsprozesse

Absorption Absorption eines Photons wird von Atom absorbiert, Anregung $1 \rightarrow 2$

Spontane Emission Aussendung eines Photons, Spontane Abregung des Atoms $2 \rightarrow 1$

Stimulierte Emission Photon mit passender Energie stimuliert angeregtes Atom zur Abregung $2 \rightarrow 1$, Aussendung eines identischen Photons

1. siehe obige Formel
2. Phase, Polar. etc
3. Häufigkeit dieses Prozesses ist proportional zur spektralen Energiedichte.

Besetzungsinversion

- ▶ im thermischen Gleichgewicht überwiegt die spontane Emission gegenüber der Induzierten
⇒ Erzeugung eines Ungleichgewichts durch “Pumpen” I

1. im folgenden Spontane Emission vernachlässigt, erzeugt aber neue Moden, siehe später, konzentriert man verstärkung auf best. Moden überwiegt stim e
2. Negative Temp

Besetzungsinversion

- ▶ im thermischen Gleichgewicht überwiegt die spontane Emission gegenüber der Induzierten
 \implies Erzeugung eines Ungleichgewichts durch "Pumpen" I
- ▶ Ratengleichung für Photonenzahl ergibt:

$$N_2 > N_1 \quad (\text{Erste Laserbedingung})$$

\implies Besetzungsinversion

1. im folgenden Spontane Emission vernachlässigt, erzeugt aber neue Moden, siehe später, konzentriert man verstärkung auf best. Moden überwiegt stim e
2. Negative Temp
3. Modell der Einsteinkoeffizienten, als Bedingung der Verstärkung
4. Besetzungsinversion ist erst mit Vierniveausystem realisierbar (metastabile Zustände halten Grundzustand leer),sonst grosse Pumpleistung notwendig, 2 da pumpen mit emission konkurriert, 3 da unteres Niveau Grundzustand, vierniveau hat niveau unter unterem laser niv, pumpen an laserübergang vorbei

Besetzungsinversion

- ▶ im thermischen Gleichgewicht überwiegt die spontane Emission gegenüber der Induzierten
 \implies Erzeugung eines Ungleichgewichts durch "Pumpen" I
- ▶ Ratengleichung für Photonenanzahl ergibt:

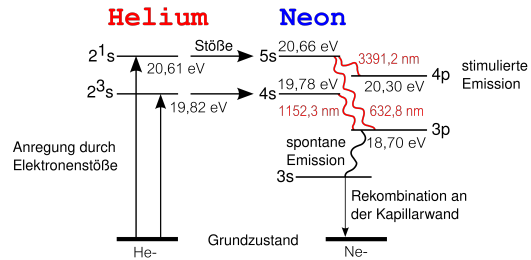
$$N_2 > N_1 \quad (\text{Erste Laserbedingung})$$

\implies Besetzungsinversion

- ▶ Zweite Laserbedingung: Verstärkung > Dämpfung

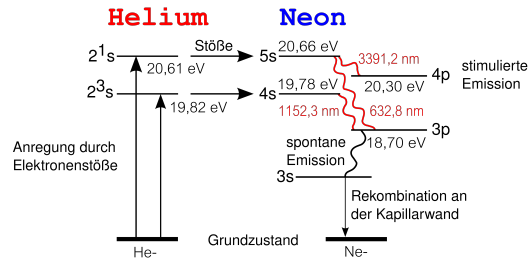
1. im folgenden Spontane Emission vernachlässigt, erzeugt aber neue Moden, siehe später, konzentriert man verstärkung auf best. Moden überwiegt stim e
2. Negative Temp
3. Modell der Einsteinkoeffizienten, als Bedingung der Verstärkung
4. Definiert Verlustgrenze
5. Besetzungsinversion ist erst mit Vierniveausystem realisierbar (metastabile Zustände halten Grundzustand leer),sonst grosse Pumpleistung notwendig, 2 da pumpen mit emission konkurriert, 3 da unteres Niveau Grundzustand, vierniveau hat niveau unter unterem laser niv, pumpen an laserübergang vorbei

HeNe System



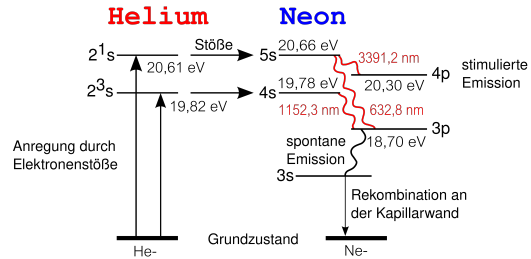
► Pumpen von Helium durch Elektronenstoß

HeNe System



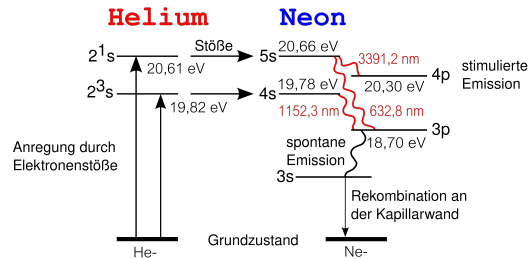
- Pumpen von Helium durch Elektronenstoß
- Helium regt durch Stöße ähnlich gelegene Niveaus im Neon an (Zufall)

HeNe System



- Pumpen von Helium durch Elektronenstoß
- Helium regt durch Stöße ähnlich gelegene Niveaus im Neon an (Zufall)
- Nutzung des Übergangs $5S \rightarrow 3P$ (sichtbar)

HeNe System

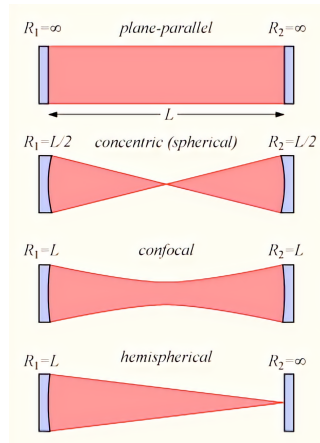


- ▶ Pumpen von Helium durch Elektronenstoß
- ▶ Helium regt durch Stöße ähnlich gelegene Niveaus im Neon an (Zufall)
- ▶ Nutzung des Übergangs $5S \rightarrow 3P$ (sichtbar)
- ▶ Lebensdauer des P Niveaus ausreichend kurz

Optischer Resonator

- ▶ Erzeugung eines stabilen Strahlungsfeldes durch oftmalige Reflexion

Optischer Resonator



- ▶ Erzeugung eines stabilen Strahlungsfeldes durch oftmalige Reflexion
- ▶ oft durch zwei Spiegel realisiert
- ▶ in diesem Versuch: hemisphärische Konfiguration

Resonanz und Modenstruktur

1. stehende Welle, in realität nur ein paar Moden ausgeprägt, Modenkonkurrenz

- longitudinale Resonanzbedingung:

$$L = n \cdot \frac{\lambda}{2} \implies \Delta\nu = \frac{c}{2L} \quad (2)$$

Resonanz und Modenstruktur

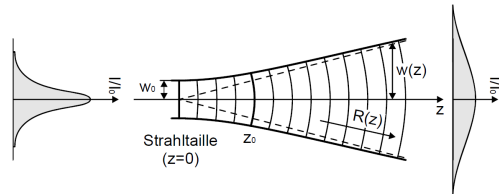
1. stehende Welle, in realität nur ein paar Moden ausgeprägt, Modenkonkurrenz
2. Vakuum, anpassen der RB an Spiegel Radien

- ▶ longitudinale Resonanzbedingung:

$$L = n \cdot \frac{\lambda}{2} \implies \Delta\nu = \frac{c}{2L} \quad (2)$$

- ▶ Beschreibung des gesamten Feldes durch paraxiale Lösung der Maxwellgleichungen

Resonanz und Modenstruktur



- ▶ longitudinale Resonanzbedingung:

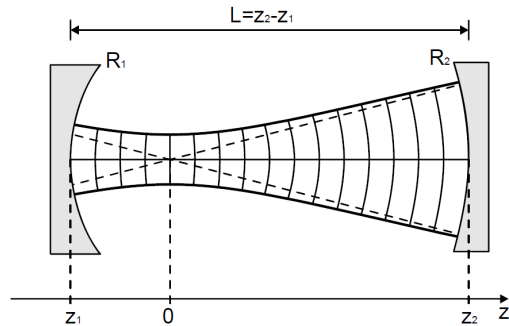
$$L = n \cdot \frac{\lambda}{2} \implies \Delta\nu = \frac{c}{2L} \quad (2)$$

- ▶ Beschreibung des gesamten Feldes durch paraxiale Lösung der Maxwellgleichungen
- ▶ ergibt als Grundmode sog. **Gauss-Strahl** (Querschnitt ist Gaussfunktion)

1. stehende Welle, in realität nur ein paar Moden ausgeprägt, Modenkonzurrenz
2. Vakuum, anpassen der RB an Spiegel Radien
3. höhere Moden weiter aufgeweitet und leicht mit Blenden zu unterdrücken

Stabilität im Resonator

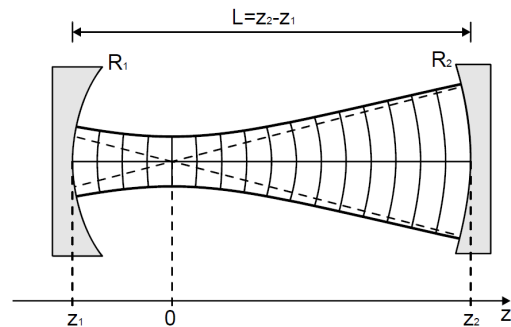
1. keine Matrizenoptik



- Passe Gausstrahl so an, dass
 $R(z_1) = R_1$, $R(z_2) = R_2$, definiere:

$$g_i = 1 - \frac{L}{R_i}; \quad i = 1, 2 \quad (3)$$

Stabilität im Resonator



- Passe Gausstrahl so an, dass $R(z_1) = R_1$, $R(z_2) = R_2$, definiere:

$$g_i = 1 - \frac{L}{R_i}; \quad i = 1, 2 \quad (3)$$

- es folgt durch Anpassen der Lösung dass Resonator stabil falls:

$$0 \leq g_1 g_2 \leq 1 \quad (4)$$

1. keine Matrizenoptik

- ▶ prinzipiell Verstärkung von allen Moden, die:
 - ▶ die longitudinale Frequenzbedingungg erfüllen
 - ▶ über der Verlustgrenze liegen

1. unbedingt Konkurrenz erklären
2. nur wenige longitudinale und nicht-Gauss Moden werden verstärkt (Konkurrenz, Aufweitung) [4, p. 171]

- ▶ prinzipiell Verstärkung von allen Moden, die:
 - ▶ die longitudinale Frequenzbedingungg erfüllen
 - ▶ über der Verlustgrenze liegen
- ▶ stimulierte Emission akzeptiert aufgrund der sog. *Linienverbreiterung* Frequenzintervalle

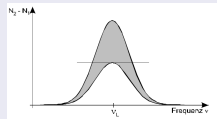
1. unbedingt Konkurrenz erklären
2. nur wenige longitudinale und nicht-Gauss Moden werden verstärkt (Konkurrenz, Aufweitung) [4, p. 171]

- ▶ prinzipiell Verstärkung von allen Moden, die:
 - ▶ die longitudinale Frequenzbedingungg erfüllen
 - ▶ über der Verlustgrenze liegen
- ▶ stimulierte Emission akzeptiert aufgrund der sog. *Linienverbreiterung* Frequenzintervalle
- ▶ dadurch Aufweichung von longitudinaler Frequenzbedingung

1. unbedingt Konkurrenz erklären
2. nur wenige longitudinale und nicht-Gauss Moden werden verstärkt (Konkurrenz, Aufweitung) [4, p. 171]

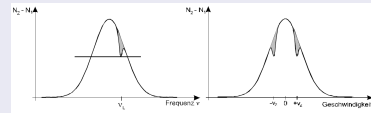
Mechanismen Linienverbreiterung

Homogen



- ▶ wirkt auf gesamtes aktives Medium

Inhomogen

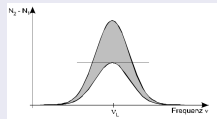


- ▶ wirkt nur auf bestimmte Atomgruppen

1. kann sog. *Hole-Burning* bewirken: Besetzungsinversion auf bestimmten Atomgruppen abgebaut
 ⇒ stehen nicht mehr für den Laserprozess zur Verfügung

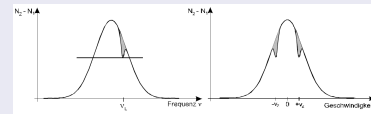
Mechanismen Linienverbreiterung

Homogen



- ▶ wirkt auf gesamtes aktives Medium
- ▶ Ursachen: Energie-Zeit Unschärfe, strahlungsfreie Übergänge, elastische Stöße (Druckverbreiterung)

Inhomogen

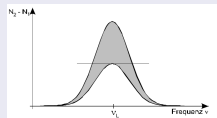


- ▶ wirkt nur auf bestimmte Atomgruppen
- ▶ Ursachen: Dopplereffekt (Dopplerverbreiterung) beim HeNe-Laser dominant

1. unter anderem
2. kann sog. *Hole-Burning* bewirken: Besetzungsinversion auf bestimmten Atomgruppen abgebaut
 ⇒ stehen nicht mehr für den Laserprozess zur Verfügung

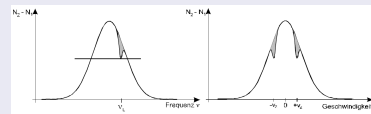
Mechanismen Linienverbreiterung

Homogen



- ▶ wirkt auf gesamtes aktives Medium
- ▶ Ursachen: Energie-Zeit Unschärfe, strahlungsfreie Übergänge, elastische Stöße (Druckverbreiterung)

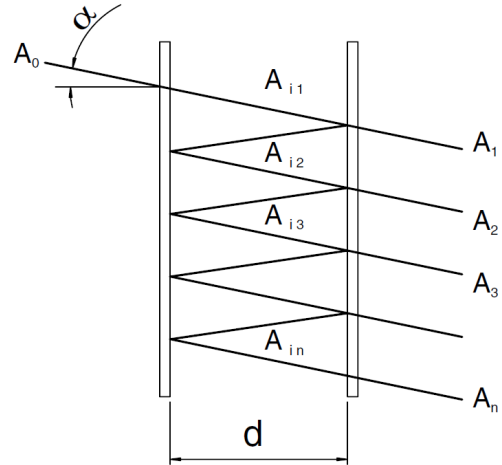
Inhomogen



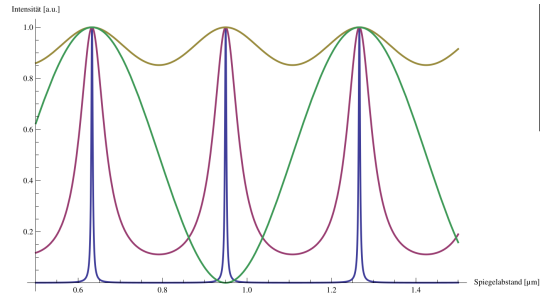
- ▶ wirkt nur auf bestimmte Atomgruppen
- ▶ Ursachen: Dopplereffekt (Dopplerverbreiterung) beim HeNe-Laser dominant
- ▶ Breite: abhängig von der Temperatur

1. unter anderem
2. kann sog. *Hole-Burning* bewirken: Besetzungsinversion auf bestimmten Atomgruppen abgebaut
 ⇒ stehen nicht mehr für den Laserprozess zur Verfügung

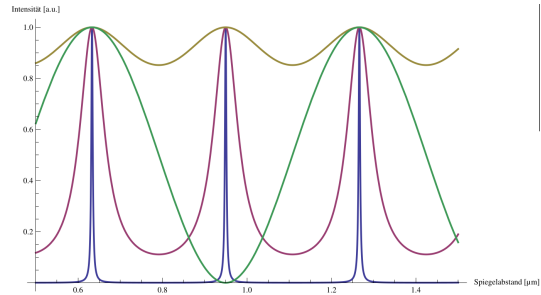
1. wieder ein Resonator



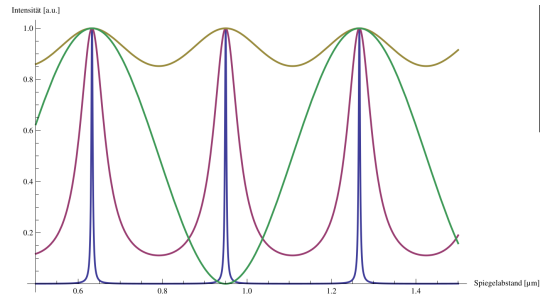
- Vielstrahlinterferenz durch Reflexion zwischen zwei ebenen Spiegeln (Etalon)
 - bestimmt durch Abstand d , Reflexionsvermögen R

1. **wieder ein Resonator**2. nur für $d = n \cdot \frac{\lambda}{2}$ 100 % Transmission

- Vielstrahlinterferenz durch Reflexion zwischen zwei ebenen Spiegeln (Etalon)
 - bestimmt durch Abstand d , Reflexionsvermögen R

1. **wieder ein Resonator**2. nur für $d = n \cdot \frac{\lambda}{2}$ 100 % Transmission

- ▶ Vielstrahlinterferenz durch Reflexion zwischen zwei ebenen Spiegeln (Etalon)
 - ▶ bestimmt durch Abstand d , Reflexionsvermögen R
- ▶ sehr scharfe Maxima \Rightarrow hohe Auflösung

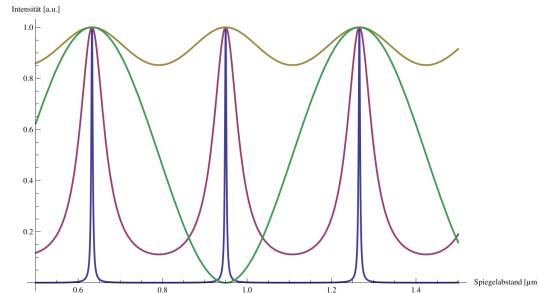


Charakterisierung eines FPI

Free Spectral Range (FSR) Abstand der transm. Maxima, genutzt zur Kalibrierung

$$\text{FSR} = \frac{c}{2 \cdot d} = \delta\nu \quad (5)$$

1. Breite Unterscheidbarer Frequenzen, genutzt zur



Charakterisierung eines FPI

Free Spectral Range (FSR) Abstand der transm. Maxima, genutzt zur Kalibrierung

$$\text{FSR} = \frac{c}{2 \cdot d} = \delta\nu \quad (5)$$

Finesse Quotient aus FSR und Halbwertsbreite

$$\mathfrak{F} = \frac{\pi\sqrt{R}}{1-R} \quad (6)$$

1. Breite Unterscheidbarer Frequenzen, genutzt zur
2. es sollte $R \rightarrow 1$

1 Allgemeines zum Versuch

2 Theoretische Grundlagen

- Grundlegender Aufbau und Funktionsweise eines Lasers
- Besetzungsinversion und Laserbedingungen
- Optischer Resonator
- Modenstruktur und Linienverbreiterung
- Fabry-Pérot-Interferometer

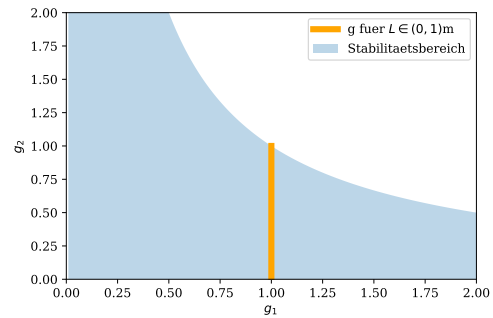
3 Durchführung und Ergebnisse

- Berechnung des Stabilitätsbereichs
- Justage und Messung der Verstärkung im Einfachdurchgang
- Aufbau des Hemisphärischen Resonators
- Messung der Polarisationsseigenschaften
- Messung der Kaustik
- Messung des Spektrums mit dem Faserspektrometer
- Messung von Spektren mit dem FPI

4 Fazit/Quellen

Da $g_1(R_1 = \infty) = 1$ folgt mit $R_2 = 1 \text{ m}$ und $0 \leq g_2 \leq 1$ durch 4:

$$g_2 = 1 - \frac{L}{1 \text{ m}} \implies 0 \text{ m} \leq L \leq 1 \text{ m} \quad (7)$$



- ▶ Justage der beiden Justagelaser parallel zur Optischen Achse (OA) der HeNe-Röhre

1. Ein wenig zur technik...
2. Reflexe an Kapillarwänden

- ▶ Justage der beiden Justagelaser parallel zur Optischen Achse (OA) der HeNe-Röhre
- ▶ Untersuchung des Verstärkungseffektes im Einfachdurchgang mithilfe eines kommerziellen HeNe Lasers \implies Messung der Leistung vor und nach der Röhre

1. Ein wenig zur Technik...
2. Reflexe an Kapillarwänden

- ▶ Justage der beiden Justagelaser parallel zur Optischen Achse (OA) der HeNe-Röhre
- ▶ Untersuchung des Verstärkungseffektes im Einfachdurchgang mithilfe eines kommerziellen HeNe Lasers \implies Messung der Leistung vor und nach der Röhre
- ▶ Messzeit 150 s festgelegt, da Schwankung ab dieser Zeit annähernd konstant

1. Ein wenig zur Technik...
2. Reflexe an Kapillarwänden
3. zu wenig Zeit für noch länger

- ▶ Justage der beiden Justagelaser parallel zur Optischen Achse (OA) der HeNe-Röhre
- ▶ Untersuchung des Verstärkungseffektes im Einfachdurchgang mithilfe eines kommerziellen HeNe Lasers \implies Messung der Leistung vor und Nach der Röhre
- ▶ Messzeit 150 s festgelegt, da Schwankung ab dieser Zeit annähernd konstant

1. Ein wenig zur technik...
2. Reflexe an Kapillarwänden
3. zu wenig zeit für noch laenger
4. Syst. vernachl. fehler aus stat

	Mittelwert [μW]	σ [μW]	Minimum [μW]	Maximum [μW]
Untergrund	0.839	0.031	0.771	0.888
Röhre aktiv	965.161	4.2	958.229	973.112
Röhre inaktiv	907.161	17.5	885.229	949.112
vor Röhre	1319.161	2.0	1319.229	1329.112

Table: Leistungsmessung des Einfachdurchgangs mit abgezogenem Untergrund

- ▶ Justage der beiden Justagelaser parallel zur Optischen Achse (OA) der HeNe-Röhre
- ▶ Untersuchung des Verstärkungseffektes im Einfachdurchgang mithilfe eines kommerziellen HeNe Lasers \implies Messung der Leistung vor und Nach der Röhre
- ▶ Messzeit 150 s festgelegt, da Schwankung ab dieser Zeit annähernd konstant

	Mittelwert [μW]	σ [μW]	Minimum [μW]	Maximum [μW]
Untergrund	0.839	0.031	0.771	0.888
Röhre aktiv	965.161	4.2	958.229	973.112
Röhre inaktiv	907.161	17.5	885.229	949.112
vor Röhre	1319.161	2.0	1319.229	1329.112

Table: Leistungsmessung des Einfachdurchgangs mit abgezogenem Untergrund

- ▶ Untergrund ist Vernachlässigbar

1. Ein wenig zur technik...
2. Reflexe an Kapillarwänden
3. zu wenig zeit für noch laenger
4. Syst. vernachl. fehler aus stat

- ▶ Justage der beiden Justagelaser parallel zur Optischen Achse (OA) der HeNe-Röhre
- ▶ Untersuchung des Verstärkungseffektes im Einfachdurchgang mithilfe eines kommerziellen HeNe Lasers \implies Messung der Leistung vor und Nach der Röhre
- ▶ Messzeit 150 s festgelegt, da Schwankung ab dieser Zeit annähernd konstant

	Mittelwert [μW]	σ [μW]	Minimum [μW]	Maximum [μW]
Untergrund	0.839	0.031	0.771	0.888
Röhre aktiv	965.161	4.2	958.229	973.112
Röhre inaktiv	907.161	17.5	885.229	949.112
vor Röhre	1319.161	2.0	1319.229	1329.112

Table: Leistungsmessung des Einfachdurchgangs mit abgezogenem Untergrund

- ▶ Untergrund ist Vernachlässigbar
- ▶ aktive Röhre verstärkt nur um 6 %

1. Ein wenig zur technik...
2. Reflexe an Kapillarwänden
3. zu wenig zeit für noch laenger
4. Syst. vernachl. fehler aus stat
5. Notwendigkeit Resonator

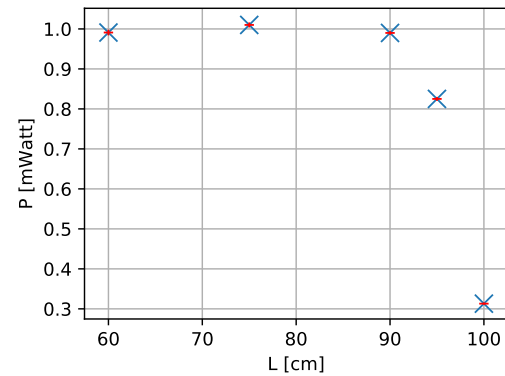
- ▶ Einbau der Resonatorspiegel (planar und sphärisch)

- ▶ Einbau der Resonatorspiegel (planar und sphärisch)
- ▶ Justage mittels Rückreflexen

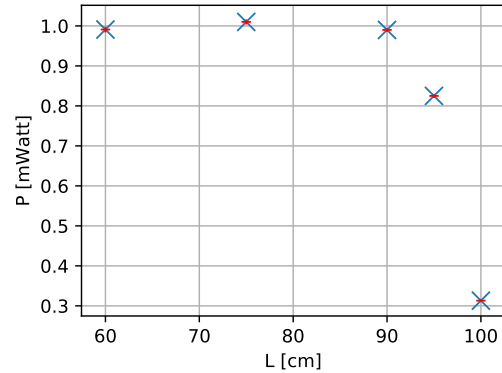
- ▶ Einbau der Resonatorspiegel (planar und sphärisch)
- ▶ Justage mittels Rückreflexen
- ▶ Feinjustage durch Beamwalken (iteratives Feinjustieren der Stellschrauben an den Spiegel)
⇒ Maximalleistung auf 1 mW

1. Jeweils leistungsmaximierung durch Beamwalk

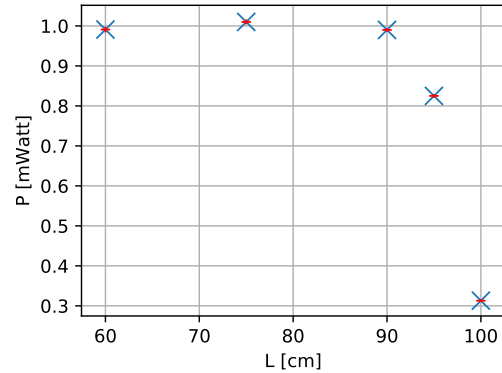
- ▶ Einbau der Resonatorspiegel (planar und sphärisch)
- ▶ Justage mittels Rückreflexen
- ▶ Feinjustage durch Beamwalken (iteratives Feinjustieren der Stellschrauben an den Spiegel)
⇒ Maximalleistung auf 1 mW
- ▶ Variation der Resonatorlänge und Leistungsmessung
 - ▶ Ableseschwierigkeiten ergeben eine geschätzte Unsicherheit $\Delta L = 0.5 \text{ cm}$



- Leistungseinbruch bei 1 m deutlich zu erkennen



- ▶ Leistungseinbruch bei 1 m deutlich zu erkennen
- ▶ Frühes Einsetzen des Einbruch:
 - ▶ zunehmende Ungültigkeit der paraxialen Näherung
 - ▶ Justage empfindlicher: Leistungsmaximum nicht gefunden



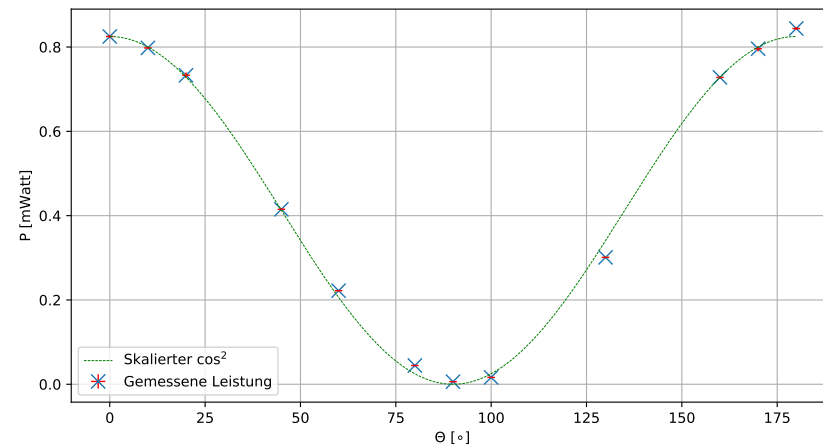
- ▶ Leistungseinbruch bei 1 m deutlich zu erkennen
- ▶ Frühes Einsetzen des Einbruch:
 - ▶ zunehmende Ungültigkeit der paraxialen Näherung
 - ▶ Justage empfindlicher: Leistungsmaximum nicht gefunden
- ▶ Festlegung $L = 80$ cm

1. Ein wenig zum Brewsterfenster

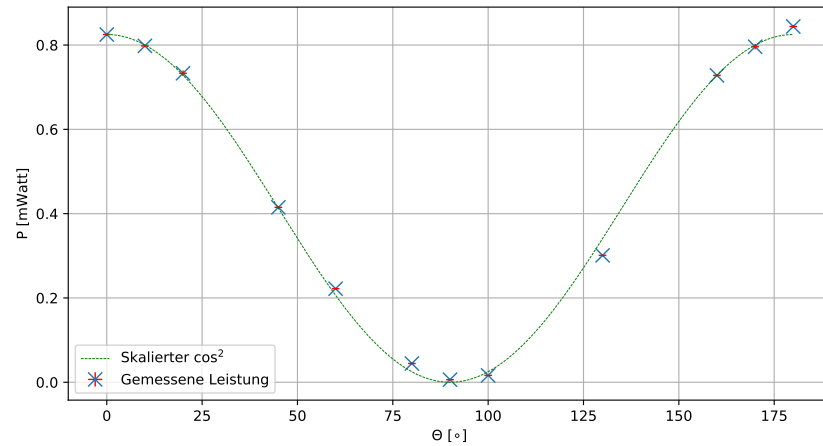
► Einbringen eines Polarisationsfilters in den Strahlengang

1. Ein wenig zum Brewsterfenster

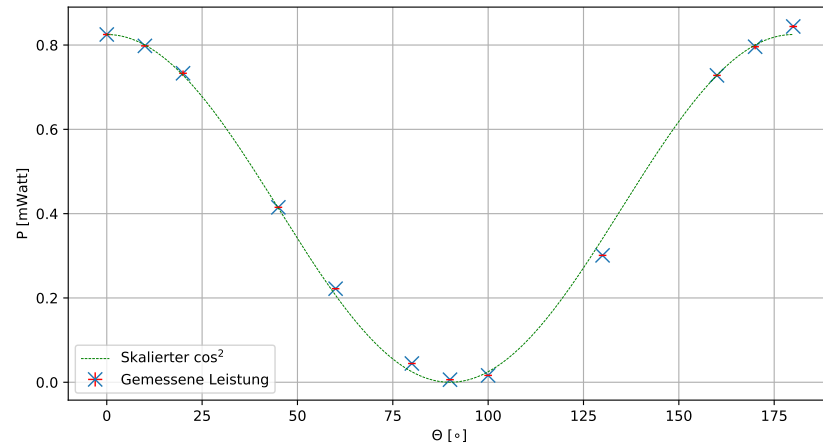
- ▶ Einbringen eines Polarisationsfilters in den Strahlengang
- ▶ Messen der Ausgangsleistung bei versch. Polfiltereinstellungen
 - ▶ Messzeit 1 min
 - ▶ $\Delta\phi \approx 1^\circ$



► Theoretische Kurve aus $I(\Theta) = I_0 \cdot \cos^2 \Theta$



- ▶ Theoretische Kurve aus $I(\Theta) = I_0 \cdot \cos^2 \Theta$
- ▶ gute Übereinstimmung mit der Theorie \Rightarrow Licht ist linear polarisiert



- ▶ Theoretische Kurve aus $I(\Theta) = I_0 \cdot \cos^2 \Theta$
- ▶ gute Übereinstimmung mit der Theorie \Rightarrow Licht ist linear polarisiert
- ▶ nicht richtig polarisierte Moden werden unterdrückt

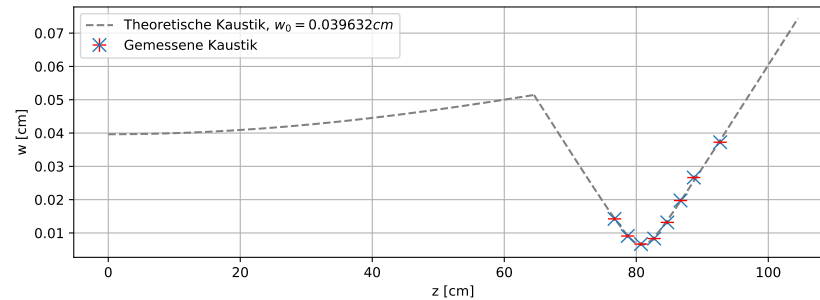
- ▶ Einbringen einer Linse mit $f = 15 \text{ cm}$ im Abstand $s = 64.5(20) \text{ cm}$ in den Strahlengang

- ▶ Einbringen einer Linse mit $f = 15 \text{ cm}$ im Abstand $s = 64.5(20) \text{ cm}$ in den Strahlengang
- ▶ Ausblendung der höheren transversalen Moden

- ▶ Einbringen einer Linse mit $f = 15 \text{ cm}$ im Abstand $s = 64.5(20) \text{ cm}$ in den Strahlengang
- ▶ Ausblendung der höheren transversalen Moden
- ▶ Aufnehmen der Strahlkaustik mit CCD Kamera
 - ▶ Anpassen der Belichtung sodass eine Sättigung 200/255 erreicht wurde
 - ▶ Bestimmung des FWHM mit Gauss-Fit durch Software Laser Light Inspector

- ▶ Einbringen einer Linse mit $f = 15 \text{ cm}$ im Abstand $s = 64.5(20) \text{ cm}$ in den Strahlengang
- ▶ Ausblendung der höheren transversalen Moden
- ▶ Aufnehmen der Strahlkaustik mit CCD Kamera
 - ▶ Anpassen der Belichtung sodass eine Sättigung 200/255 erreicht wurde
 - ▶ Bestimmung des FWHM mit Gauss-Fit durch Software Laser Light Inspector
- ▶ Unsicherheiten:
 - ▶ Δs aus Ableseschwierigkeiten
 - ▶ Auflösung der Kamera $1 \text{ px} = 5.6 \mu\text{m}$

1. w ist 2 sigma, umrechnung noetig

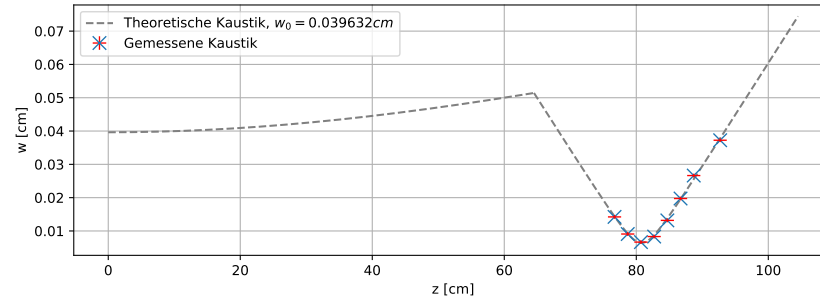


► Fit von w_0 (initialer Beamwaist) und einem Mess-Offset δ

$$w_0 = 396(16) \mu\text{m}$$

$$\delta = 1.2 \text{ cm}$$

1. w ist 2 sigma, umrechnung noetig
2. artefakt des fits, aber nur 2 param

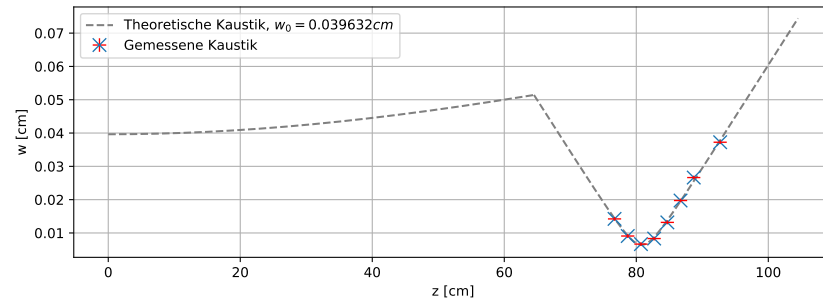


- Fit von w_0 (initialer Beamwaist) und einem Mess-Offset δ

$$w_0 = 396(16) \mu\text{m}$$

$$\delta = 1.2 \text{ cm}$$

- extrem gute Übereinstimmung mit der Theorie \implies verifiziert Matrizenoptik und Gausstrahlösung



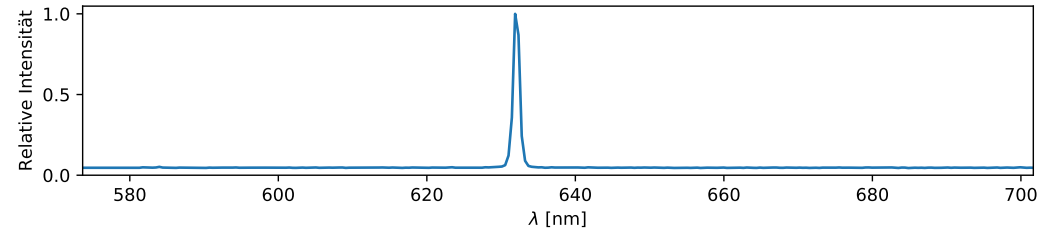
1. w ist 2 sigma, umrechnung noetig
2. artefakt des fits, aber nur 2 param
3. Unbekannte Optik in Kamera, geometrie der Spiegel etc, Rechenfehler

- Fit von w_0 (initialer Beamwaist) und einem Mess-Offset δ

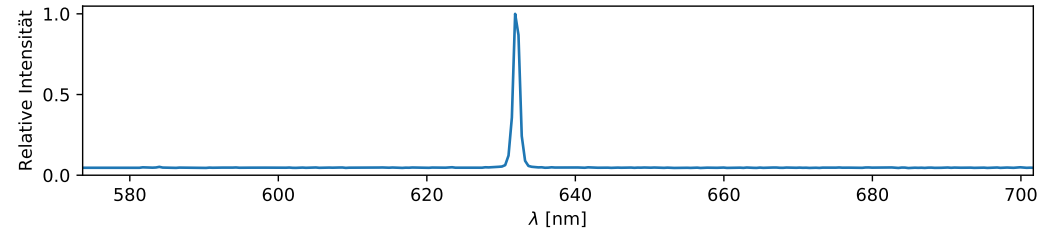
$$w_0 = 396(16) \mu\text{m}$$

$$\delta = 1.2 \text{ cm}$$

- extrem gute Übereinstimmung mit der Theorie \Rightarrow verifiziert Matrizenoptik und Gausstrahlösung
- theoretischer Wert für Beamwaist: $284 \mu\text{m}$

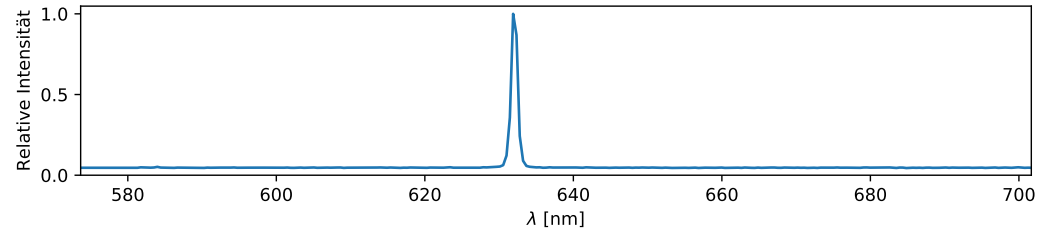


- ▶ Aufnahme des Spektrums des Lasers mit einem Faserspektrometer (Ocean Optics HR+C1743)
 - ▶ erlaubt absolute Frequenzmessung



- ▶ Aufnahme des Spektrums des Lasers mit einem Faserspektrometer (Ocean Optics HR+C1743)
 - ▶ erlaubt absolute Frequenzmessung
- ▶ großer Peak bei $\lambda_0 = 631.9$ nm

1. spricht gegen bias als statistik da peak symetr.



- ▶ Aufnahme des Spektrums des Lasers mit einem Faserspektrometer (Ocean Optics HR+C1743)
 - ▶ erlaubt absolute Frequenzmessung
- ▶ großer Peak bei $\lambda_0 = 631.9 \text{ nm}$
 - ▶ bei 632.8 nm deutlich unter der Peakhöhe \Rightarrow Spektrometer schlecht kalibriert

- ▶ Abstand der Messpunkte $\Delta\lambda = 0.5 \text{ nm}$

- ▶ Abstand der Messpunkte $\Delta\lambda = 0.5 \text{ nm}$
⇒ bestmögliche Auflösung:

$$\Delta\nu = c \cdot \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0^2} = 3.30 \times 10^{11} \text{ Hz} \quad (8)$$

1. Ungenauigkeit war sehr klein

- ▶ Abstand der Messpunkte $\Delta\lambda = 0.5 \text{ nm}$
⇒ bestmögliche Auflösung:

$$\Delta\nu = c \cdot \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0^2} = 3.30 \times 10^{11} \text{ Hz} \quad (8)$$

- ▶ aus $L = 80.0(5) \text{ cm}$ ergibt sich

$$\delta\nu = 1.87 \times 10^8 \text{ Hz} < \Delta\nu \quad (9)$$

1. Ungenauigkeit war sehr klein

- ▶ Abstand der Messpunkte $\Delta\lambda = 0.5 \text{ nm}$
 \Rightarrow bestmögliche Auflösung:

$$\Delta\nu = c \cdot \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0^2} = 3.30 \times 10^{11} \text{ Hz} \quad (8)$$

- ▶ aus $L = 80.0(5) \text{ cm}$ ergibt sich

$$\delta\nu = 1.87 \times 10^8 \text{ Hz} < \Delta\nu \quad (9)$$

\Rightarrow einzelne Moden können nicht aufgelöst werden

- ▶ wiederum Justage des Strahlengangs durch Rückreflexe

1. Ungenauigkeit geschätzt

- ▶ wiederum Justage des Strahlengangs durch Rückreflexe
- ▶ Bestimmung des Abstandes der Spiegel zu

$$d = 7.50(25) \text{ cm}$$

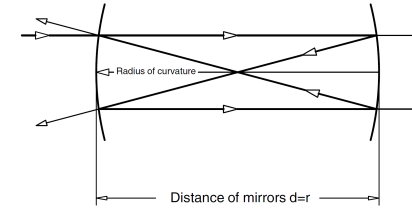
- ▶ wiederum Justage des Strahlengangs durch Rückreflexe
- ▶ Bestimmung des Abstandes der Spiegel zu

$$d = 7.50(25) \text{ cm}$$

Mehrfachumläufe

Falls der Strahl nicht exakt senkrecht auf die Spiegel trifft kommt es zu Mehrfachumläufen und einer Verdopplung des Wegunterschiedes.

1. Ungenauigkeit geschätzt



2. da konfokales fpi,

- ▶ wiederum Justage des Strahlengangs durch Rückreflexe
- ▶ Bestimmung des Abstandes der Spiegel zu

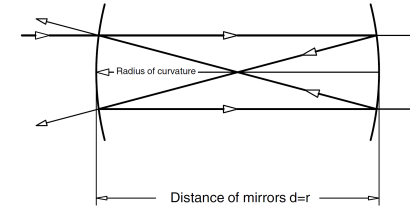
$$d = 7.50(25) \text{ cm}$$

Mehrfachumläufe

Falls der Strahl nicht exakt senkrecht auf die Spiegel trifft kommt es zu Mehrfachumläufen und einer Verdopplung des Wegunterschiedes.

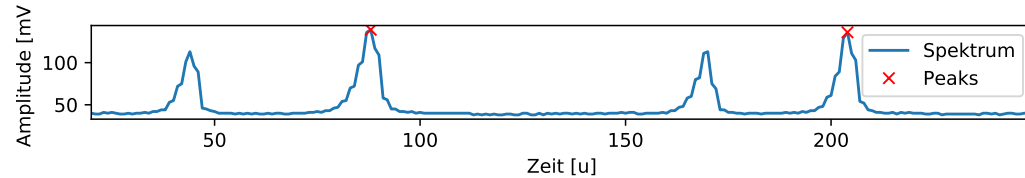
- ▶ Aufnahme des Spektrums des kommerziellen und des offenen Lasers durch Modulation (Sägezahn) des Spiegelabstandes

1. Ungenauigkeit geschätzt



2. da konfokales fpi,

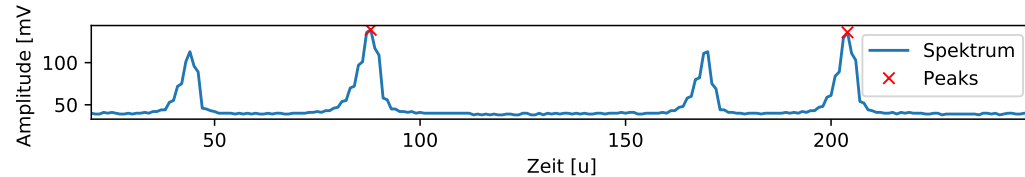
Kalibrierung der Zeitachse (kommerzieller Laser)



- der FSR berechnet sich aus der Länge des FPI zu

$$\text{FSR} = 2.00(7) \text{ GHz} \quad (10)$$

Kalibrierung der Zeitachse (kommerzieller Laser)



- der FSR berechnet sich aus der Länge des FPI zu

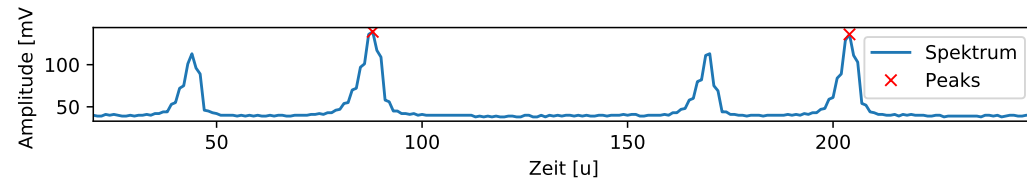
$$\text{FSR} = 2.00(7) \text{ GHz} \quad (10)$$

- Kalibrierung der willkürlichen Zeiteinheit u ($\Delta t = 1 u$, 1 Digit) durch Abstands der Peaks

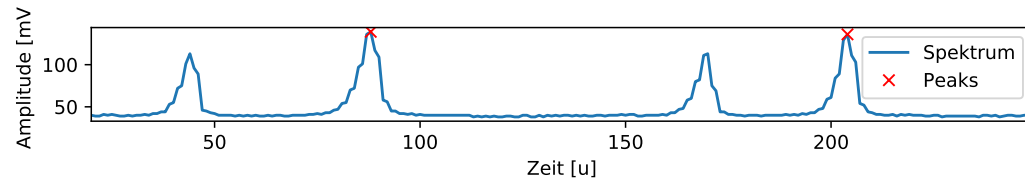
$$u = \frac{\text{FSR}}{t_2 - t_1} = 0.172 \text{ MHz} \quad (11)$$

$$\Delta u = \sqrt{\left(\frac{\Delta \text{FSR}}{x_2 - x_1}\right)^2 + 2 \cdot \left(\frac{\text{FSR}}{(x_2 - x_1)^2} \Delta t\right)^2} = 0.07 \text{ MHz} \quad (12)$$

Bestimmung der Finesse



Bestimmung der Finesse

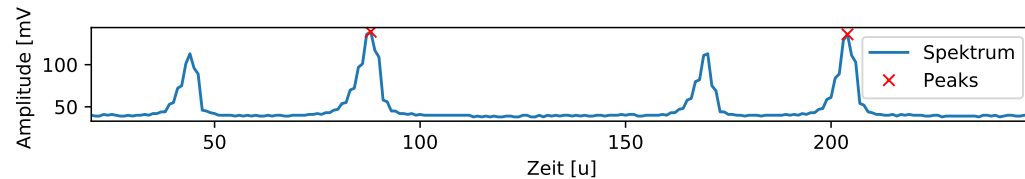


- Bestimmung der Finesse durch Mittlung über 4 Peaks

$$\overline{\text{FWHM}} = 4.72 \text{ u} = 81(6) \text{ MHz} \quad (13)$$

$$\mathfrak{F} = \frac{\text{FSR}}{\text{FWHM}} = 24.6(20) \quad (14)$$

Bestimmung der Finesse



- Bestimmung der Finesse durch Mittlung über 4 Peaks

$$\overline{\text{FWHM}} = 4.72 \text{ u} = 81(6) \text{ MHz} \quad (13)$$

$$\mathfrak{F} = \frac{\text{FSR}}{\text{FWHM}} = 24.6(20) \quad (14)$$

- nicht überragend (typischerweise > 50 bei kleinem Strahldurchmesser[2]) aber ausreichend zur Auflösung individueller Moden

Modenstruktur des kommerziellen Lasers

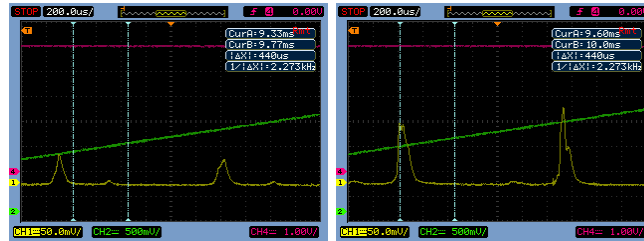
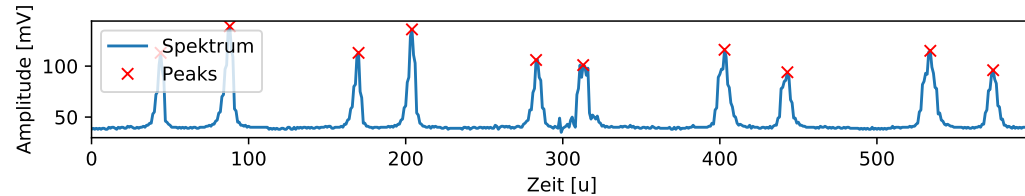


Figure: Spektrum des kommerziellen HeNe für zwei orthogonale Polarisationsrichtungen

- ▶ beide sichtbaren Moden genau orthogonal polarisiert

Modenstruktur des kommerziellen Lasers

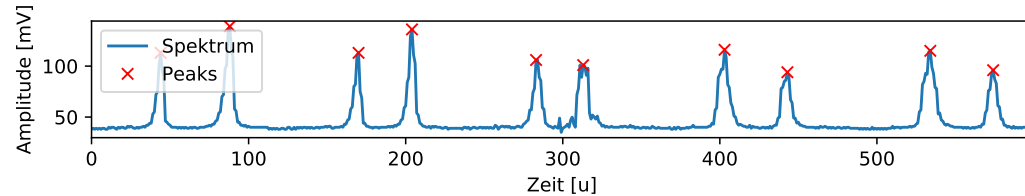


- Bestimmung des Modenabstandes durch Mittlung über alle 5 sichtbaren Gruppen

$$\overline{\delta\nu_k} = 37.6(22) \text{ u} = 650(40) \text{ MHz} \quad (15)$$

1. interessanterweise: Umkehrung der Peakhöhen
2. ungenauigkeit aus Statistik

Modenstruktur des kommerziellen Lasers



- Bestimmung des Modenabstandes durch Mittlung über alle 5 sichtbaren Gruppen

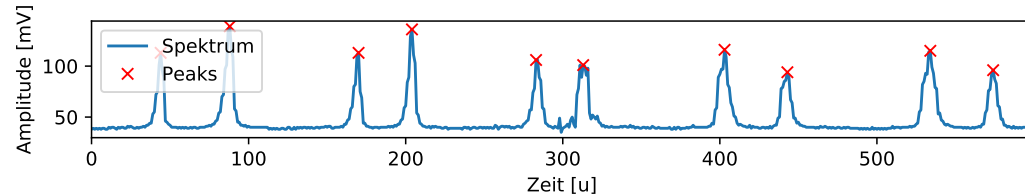
$$\overline{\delta\nu_k} = 37.6(22) \text{ u} = 650(40) \text{ MHz} \quad (15)$$

- daraus berechnet sich die Resonatorlänge

$$L_k = c / (2 \cdot \delta\nu_k) = 23.1(16) \text{ cm} \quad (16)$$

- interessanterweise: Umkehrung der Peakhöhen
- ungenauigkeit aus Statistik

Modenstruktur des kommerziellen Lasers



1. interessanterweise: Umkehrung der Peakhöhen
2. ungenauigkeit aus Statistik

- Bestimmung des Modenabstandes durch Mittlung über alle 5 sichtbaren Gruppen

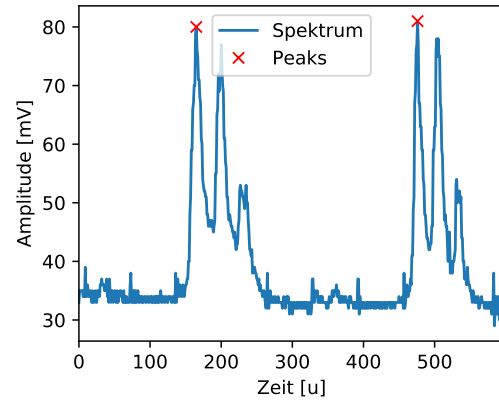
$$\overline{\delta\nu_k} = 37.6(22) \text{ u} = 650(40) \text{ MHz} \quad (15)$$

- daraus berechnet sich die Resonatorlänge

$$L_k = c / (2 \cdot \delta\nu_k) = 23.1(16) \text{ cm} \quad (16)$$

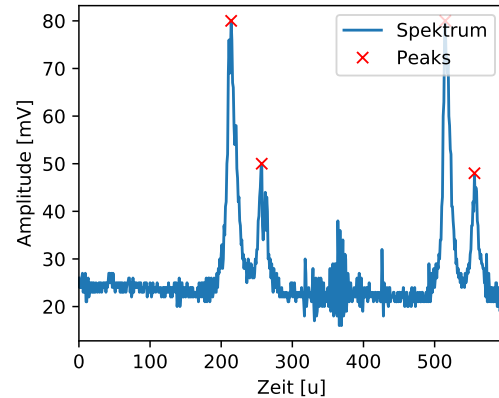
- erscheint plausibel
- Präzision der Länge vergleichbar mit vorherigen Ergebnissen

Modenstruktur des offenen Lasers



► analoge Bestimmung des Modenabstandes

Modenstruktur des offenen Lasers



- ▶ analoge Bestimmung des Modenabstandes
- ▶ Anzahl der Peaks für $L = 60$ cm sehr gering

Modenstruktur des offenen Lasers

L [cm]	$\delta\nu$ Theorie [MHz]	$\delta\nu$ experimentell [MHz]
80	187.4(12)	201(14)
60	249.8(21)	279(11)

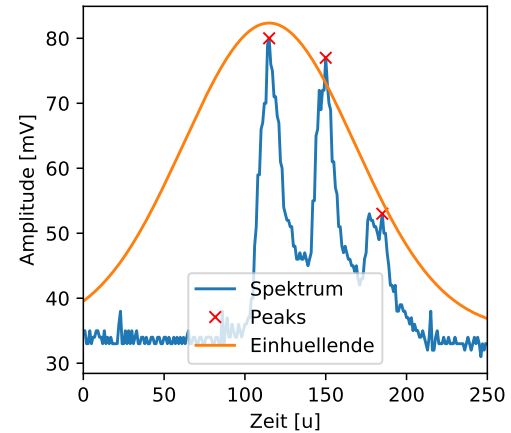
- akzeptable Übereinstimmung mit der Theorie \implies keine unaufgelöste Mode dazwischen

Modenstruktur des offenen Lasers

L [cm]	$\delta\nu$ Theorie [MHz]	$\delta\nu$ experimentell [MHz]
80	187.4(12)	201(14)
60	249.8(21)	279(11)

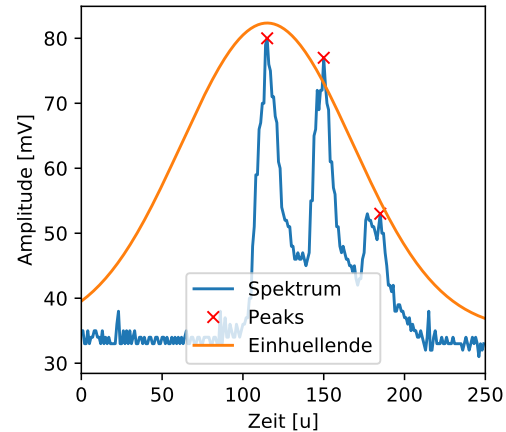
- ▶ akzeptable Übereinstimmung mit der Theorie \implies keine unaufgelöste Mode dazwischen
- ▶ bei $L = 60$ cm ist die Abweichung unterschätzt

Betrachtung der Linienverbreiterung



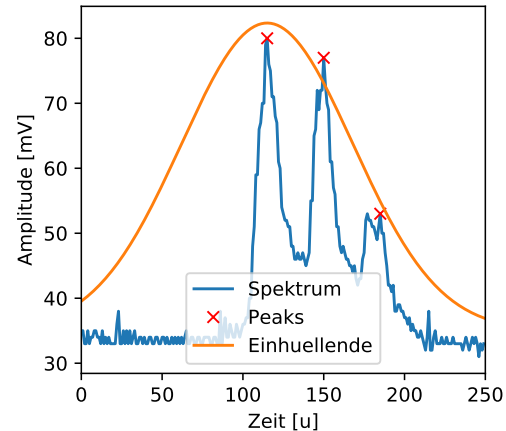
► Dopplerverbreiterung ist dominant

Betrachtung der Linienverbreiterung



- ▶ Dopplerverbreiterung ist dominant
- ▶ Einhüllende des Modenspektrums sollte Gausskurve entsprechen \Rightarrow Bestimmung der Temperatur möglich

Betrachtung der Linienverbreiterung



- ▶ Dopplerverbreiterung ist dominant
- ▶ Einhüllende des Modenspektrums sollte Gaußskurve entsprechen \Rightarrow Bestimmung der Temperatur möglich
- ▶ Fit symmetrisch angesetzt, Amplitude und Breite als freie Parameter

Betrachtung der Linienverbreiterung

$$m = 3.350\,92 \times 10^{-26} \text{ kg [3] und } \nu_0 = 473.755 \text{ THz [4, p. 226]}$$

$$\sigma_{\text{Doppler}} = \nu_0 \left(\frac{kT}{mc^2} \right)^{1/2} \quad (17)$$

$$\sigma = 53(20) \text{ u} = 340(130) \text{ MHz} \quad (18)$$

$$T = \left(\frac{\sigma \cdot c}{\nu_0} \right)^2 \cdot \frac{m}{k_B} = 110(90) \text{ K} \quad (19)$$

► Unsicherheit von σ abgeschätzt

Betrachtung der Linienverbreiterung

$$m = 3.350\,92 \times 10^{-26} \text{ kg [3] und } \nu_0 = 473.755 \text{ THz [4, p. 226]}$$

$$\sigma_{\text{Doppler}} = \nu_0 \left(\frac{kT}{mc^2} \right)^{1/2} \quad (17)$$

$$\sigma = 53(20) \text{ u} = 340(130) \text{ MHz} \quad (18)$$

$$T = \left(\frac{\sigma \cdot c}{\nu_0} \right)^2 \cdot \frac{m}{k_B} = 110(90) \text{ K} \quad (19)$$

- ▶ Unsicherheit von σ abgeschätzt
- ▶ Temperatur viel zu gering (für realistische Temperaturen doppelte Breite)
 - ▶ 3 Peaks und 2 freie Parameter lassen keinen genauen fit zu

1. σ **Fit Param**

2. da andere Mechanismen vernachl. eher zu hohe temp erwartet!

1 Allgemeines zum Versuch

2 Theoretische Grundlagen

- Grundlegender Aufbau und Funktionsweise eines Lasers
- Besetzungsinversion und Laserbedingungen
- Optischer Resonator
- Modenstruktur und Linienverbreiterung
- Fabry-Pérot-Interferometer

3 Durchführung und Ergebnisse

- Berechnung des Stabilitätsbereichs
- Justage und Messung der Verstärkung im Einfachdurchgang
- Aufbau des Hemisphärischen Resonators
- Messung der Polarisationsseigenschaften
- Messung der Kaustik
- Messung des Spektrums mit dem Faserspektrometer
- Messung von Spektren mit dem FPI

4 Fazit/Quellen

Fazit

- ▶ spannender Versuch (aber aufwendig in der Auswertung)

Fazit

- ▶ spannender Versuch (aber aufwendig in der Auswertung)
- ▶ größtenteils vernünftige Ergebnisse

Fazit

- ▶ spannender Versuch (aber aufwendig in der Auswertung)
- ▶ größtenteils vernünftige Ergebnisse
- ▶ großer Wissenszuwachs (Matrizenoptik, Gausstahlen etc.)

Fazit

- ▶ spannender Versuch (aber aufwendig in der Auswertung)
- ▶ größtenteils vernünftige Ergebnisse
- ▶ großer Wissenszuwachs (Matrizenoptik, Gausstahlen etc.)
- ▶ toller Betreuer

Ausgesuchte Quellen I

-  Laura Garwin and Tim Lincoln (eds.) *A Century of Nature - Twenty-One Discoveries that Changed Science and the World*. Chicago: University of Chicago Press, 2010. isbn: 978-0-226-28416-3.
-  Sami T. Hendow. “12 - Optical Materials and Devices”. In: *Atomic, Molecular, and Optical Physics: Electromagnetic Radiation*. Ed. by F.B. Dunning and Randall G. Hulet. Vol. 29. Experimental Methods in the Physical Sciences. Academic Press, 1997, pp. 343–367. doi: [https://doi.org/10.1016/S0076-695X\(08\)60621-3](https://doi.org/10.1016/S0076-695X(08)60621-3). url: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0076695X08606213>.
-  Juris Meija et al. “Atomic weights of the elements 2013 (IUPAC Technical Report)”. In: *Pure and Applied Chemistry* 88 (Jan. 2016), pp. 265–291. doi: [10.1515/pac-2015-0305](https://doi.org/10.1515/pac-2015-0305).
-  Markus Werner Sigrist. *Laser: Theorie, Typen und Anwendungen*. 8. Aufl. 2018. Wiesbaden: Springer Berlin Heidelberg, 2018. isbn: 978-3-662-57514-7.

Crashkurs Matrizenoptik

- Annahmen: Paraxiale Optik, alle Winkel Klein

Crashkurs Matrizenoptik

- ▶ Annahmen: Paraxiale Optik, alle Winkel Klein
- ▶ stelle strahl als 2er Vektor da:

$$\begin{pmatrix} d \\ \alpha \end{pmatrix} \hat{=} \begin{pmatrix} \text{Abstand zur Achse} \\ \text{Winkel zur Achse} \end{pmatrix} \quad (20)$$

Crashkurs Matrizenoptik

- ▶ Annahmen: Paraxiale Optik, alle Winkel Klein
- ▶ stelle strahl als 2er Vektor da:

$$\begin{pmatrix} d \\ \alpha \end{pmatrix} \hat{=} \begin{pmatrix} \text{Abstand zur Achse} \\ \text{Winkel zur Achse} \end{pmatrix} \quad (20)$$

- ▶ optisches System dargestellt durch Matrix als Produkt der Komponenten:

$$\mathfrak{M}_{\text{System}} = \mathfrak{M}_1 \cdot \dots \cdot \mathfrak{M}_n = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \quad (21)$$

$$\begin{pmatrix} d' \\ \alpha' \end{pmatrix} = \mathfrak{M}_{\text{System}} \cdot \begin{pmatrix} d \\ \alpha \end{pmatrix} \quad (22)$$

Einige Optische Komponenten

Element	Matrix	Parameter
freie Ausbreitung	$\begin{pmatrix} 1 & s \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$	Weglänge s
dünne Linse	$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{pmatrix}$	Brennweite f
sphärischer Spiegel	$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -2/R & 1 \end{pmatrix}$	Radius R

Gausstrahlen und Matrizenoptik

Achtung, High-Level

Sieht komisch aus ist aber so.

1. Ursprünge ein wenig erklären.

Gausstrahlen und Matrizenoptik

Achtung, High-Level

Sieht komisch aus ist aber so.

► definiere $\frac{1}{q(z)} = \frac{1}{R(z)} + i \frac{\lambda}{\pi w^2(z)} = a + i \cdot b$

1. Ursprünge ein wenig erklären.
2. ist exponent der e funktion in mathem. Darstellung Gausstrahl

Gaussstrahlen und Matrizenoptik

Achtung, High-Level

Sieht komisch aus ist aber so.

- ▶ definiere $\frac{1}{q(z)} = \frac{1}{R(z)} + i \frac{\lambda}{\pi w^2(z)} = a + i \cdot b$
- ▶ mit $\mathfrak{M}_{\text{System}} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}$ transformiert sich q wie folgt:

$$q' = \frac{Aq + B}{Cq + D} \quad (23)$$

1. Ursprünge ein wenig erklären.
2. ist exponent der e funktion in mathem. Darstellung Gausstrahl

Gausstrahlen und Matrizenoptik

Achtung, High-Level

Sieht komisch aus ist aber so.

- ▶ definiere $\frac{1}{q(z)} = \frac{1}{R(z)} + i \frac{\lambda}{\pi w^2(z)} = a + i \cdot b$
- ▶ mit $\mathfrak{M}_{\text{System}} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}$ transformiert sich q wie folgt:

$$q' = \frac{Aq + B}{Cq + D} \quad (23)$$

- ▶ für den Beamwaist im vorliegenden Resonator ergibt sich mit R (Radius Spiegel):

$$w_0^4 = \left(\frac{\lambda}{\pi} \right)^2 L(R - L) \quad (24)$$

1. Ursprünge ein wenig erklären.
2. ist exponent der e funktion in mathem. Darstellung Gausstrahl

Gaussstrahlen und Matrizenoptik

Achtung, High-Level

Sieht komisch aus ist aber so.

- ▶ definiere $\frac{1}{q(z)} = \frac{1}{R(z)} + i \frac{\lambda}{\pi w^2(z)} = a + i \cdot b$
- ▶ mit $\mathfrak{M}_{\text{System}} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}$ transformiert sich q wie folgt:

$$q' = \frac{Aq + B}{Cq + D} \quad (23)$$

- ▶ der Beamwaist des Austretenden strahls, verschoben zu Linse fokussiert durch Linse mit Brennweite (A,B,C,D entsprechend Tabelle):

$$b' = b \cdot \frac{AD - CB}{A^2 + B^2 b^2} \quad (24)$$

$$w' = \sqrt{\frac{\lambda}{\pi \cdot b'(x)}} \quad (25)$$

1. Ursprünge ein wenig erklären.
2. ist exponent der e funktion in mathem. Darstellung Gausstrahl

Zweite Laserbedingung

- Betrachtung der dämpfung des Strahlungsfeldes im Laser

Zweite Laserbedingung

- ▶ Betrachtung der dämpfung des Strahlungsfeldes im Laser
- ▶ Intensität verringert sich pro doppeltem Umlauf um Faktor $e^{-\kappa}$

1. Extinktionsfaktor

Zweite Laserbedingung

- ▶ Betrachtung der dämpfung des Strahlungsfeldes im Laser
- ▶ Intensität verringert sich pro doppeltem Umlauf um Faktor $e^{-\kappa}$
- ▶ Verstärkung muss größer sein als Verlust

1. Extinktionsfaktor

Zweite Laserbedingung

- ▶ Betrachtung der dämpfung des Strahlungsfeldes im Laser
- ▶ Intensität verringert sich pro doppeltem Umlauf um Faktor $e^{-\kappa}$
- ▶ Verstärkung muss größer sein als Verlust
- ▶ mit Wirkungsquerschnitt $\sigma_{21} = B_{21} \frac{h \cdot \nu}{c}$ ergibt sich:

$$\sigma_{21} \cdot (N_2 - N_1) \cdot 2L \geq \kappa \quad (\text{zweite Laserbedingung})$$

1. Extinktionsfaktor
2. Wir nehmen an dass sie gilt.

Resonanz und Modenstruktur

1. stehende Welle, in realität nur ein paar moden ausgepraegt, Modenkonkurrenz

- longitudnale Resonanzbedingungg:

$$L = n \cdot \frac{\lambda}{2} \implies \Delta\nu = \frac{c}{2L} \quad (26)$$

Resonanz und Modenstruktur

1. stehende Welle, in realität nur ein paar moden ausgepraegt, Modenkonkurrenz
2. Vakuum, anpassen der RB an Spiegel Radien

- ▶ longitudnale Resonanzbedingungg:

$$L = n \cdot \frac{\lambda}{2} \implies \Delta\nu = \frac{c}{2L} \quad (26)$$

- ▶ Beschreibung des gesamten Feldes durch paraxiale Lösung des Maxwell gleichungen

Resonanz und Modenstruktur

1. stehende Welle, in realität nur ein paar moden ausgepraegt, Modenkonzurrenz
2. Vakuum, anpassen der RB an Spiegel Radien
3. höhere Moden weiter aufgeweitet und leicht mit Blenden zu unterdrücken

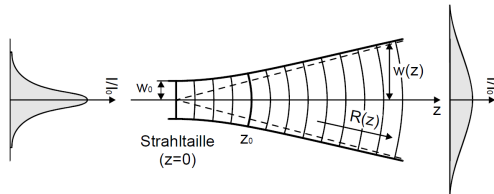
- ▶ longitudinale Resonanzbedingung:

$$L = n \cdot \frac{\lambda}{2} \implies \Delta\nu = \frac{c}{2L} \quad (26)$$

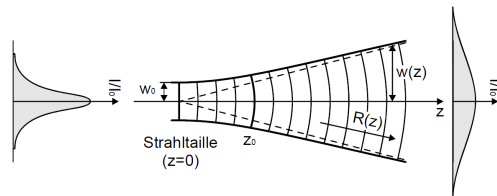
- ▶ Beschreibung des gesamten Feldes durch paraxiale Lösung des Maxwell gleichungen

- ▶ ergibt als Grundmode sog. **Gauss-Strahl** (Querschnitt ist Gaussfunktion)

- ▶ charakterisiert durch Strahldicke $w(z)$, Radius der Wellenfronten $R(z)$
- ▶ freie Parameter: Amplitude, Strahltaile $w(z=0) = w_0$ und Wellenlänge



Resonanz und Modenstruktur



- ▶ longitudinale Resonanzbedingung:

$$L = n \cdot \frac{\lambda}{2} \implies \Delta\nu = \frac{c}{2L} \quad (26)$$

- ▶ Beschreibung des gesamten Feldes durch paraxiale Lösung des Maxwell gleichungen
- ▶ ergibt als Grundmode sog. **Gauss-Strahl** (Querschnitt ist Gaussfunktion)
- ▶ meist wird eine Polarisierung mit einem Brewsterfenster ausgewählt

1. stehende Welle, in realität nur ein paar moden ausgepraegt, Modenkonkurrenz
2. Vakuum, anpassen der RB an Spiegel Radien
3. höhere Moden weiter aufgeweitet und leicht mit Blenden zu unterdrücken
4. TAFEL
5. Auswahl und Verstärkung erklären

Besetzungsinversion

- ▶ im thermischen Gleichgewicht überwiegt die spontane Emission gegenüber der Induzierten
⇒ Erzeugung eines Ungleichgewichts durch “Pumpen” und Auswahl bestimmter Moden im optischen Resonator

1. im folgenden Spontane Emission vernachlässigt, erzeugt aber neue Moden, siehe später, konzentriert man verstärkung auf best. moden überwiegt stim e
2. Negative Temp

Besetzungsinversion

- ▶ im thermischen Gleichgewicht überwiegt die spontane Emission gegenüber der Induzierten
 \implies Erzeugung eines Ungleichgewichts durch “Pumpen” und Auswahl bestimmter Moden im optischen Resonator
- ▶ Ratengleichung mit ρ als spektraler Energiedichte, B_{21} als Übergangswahrscheinlichkeit der stim. Emission ergibt:

$$\frac{dq}{dt} = \rho(\nu) B_{21} (N_2 - N_1) \implies N_2 > N_1 \quad (\text{Erste Laserbedingung})$$

\implies Besetzungsinversion

1. im folgenden Spontane Emission vernachlässigt, erzeugt aber neue Moden, siehe später, konzentriert man Verstärkung auf best. Moden überwiegt stim. e
2. Negative Temp
3. Modell der Einsteinkoeffizienten, als Bedingung der Verstärkung

Besetzungsinversion

- ▶ im thermischen Gleichgewicht überwiegt die spontane Emission gegenüber der Induzierten
 \implies Erzeugung eines Ungleichgewichts durch “Pumpen” und Auswahl bestimmter Moden im optischen Resonator
- ▶ Ratengleichung mit ρ als spektraler Energiedichte, B_{21} als Übergangswahrscheinlichkeit der stim. Emission ergibt:

$$\frac{dq}{dt} = \rho(\nu) B_{21} (N_2 - N_1) \implies N_2 > N_1 \quad (\text{Erste Laserbedingung})$$

\implies Besetzungsinversion

- ▶ Besetzungsinversion ist erst mit Vierniveausystem realisierbar (metastabile Zustände halten Grundzustand leer)

1. im folgenden Spontane Emission vernachlässigt, erzeugt aber neue Moden, siehe später, konzentriert man Verstärkung auf best. Moden überwiegt stim e
2. Negative Temp
3. Modell der Einsteinkoeffizienten, als Bedingung der Verstärkung
4. sonst grosse Pumpleistung notwendig, 2 da pumpen mit emission konkurriert, 3 da unteres Niveau Grundzustand, vierniveau hat Niveau unter unterem Laser niv, pumpen an Laserübergang vorbei
5. ZWEITE LB ERWÄHNEN

Acronym

Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation.

Acronym

Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation.

Basic Facts

- ▶ erster Laser um 1960 von Theodore H. Maiman
 - ▶ bezeichnet als “Lösung auf der Suche nach einem Problem” [1]
- ▶ kann sehr fokussiertes und kohärentes Licht erzeugen
- ▶ findet Anwendung in breiten Bereichen der Technik und Wissenschaft
 - ▶ Barcode Scanner, CD-Spieler, Optische Telekommunikationstechnik
 - ▶ Erzeugung tiefer Temperaturen, Schockwellen, großen Energiedichten, Holographie, Interferometrie, Teilchenbeschleuniger