

Gaslaser

Total Laser Man!

Valentin Boettcher

January 5, 2020

1 Allgemeines zum Versuch

- Begriffsklärung Laser
- Grundlegender Aufbau und Funktionsweise eines Lasers

2 Theoretische Grundlagen

- Besetzungsinversion und Laserbedingungen
- Optischer Resonator
- Modenstruktur und Linienverbreiterung
- Faby-Perot-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

- Begriffsklärung Laser
- Grundlegender Aufbau und Funktionsweise eines Lasers

2 Theoretische Grundlagen

- Besetzungsinversion und Laserbedingungen
- Optischer Resonator
- Modenstruktur und Linienverbreiterung
- Faby-Perot-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

- Begriffsklärung Laser
- Grundlegender Aufbau und Funktionsweise eines Lasers

2 Theoretische Grundlagen

- Besetzungsinversion und Laserbedingungen
- Optischer Resonator
- Modenstruktur und Linienverbreiterung
- Faby-Perot-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

- Begriffsklärung Laser
- Grundlegender Aufbau und Funktionsweise eines Lasers

2 Theoretische Grundlagen

- Besetzungsinversion und Laserbedingungen
- Optischer Resonator
- Modenstruktur und Linienverbreiterung
- Faby-Perot-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

- Begriffsklärung Laser
- Grundlegender Aufbau und Funktionsweise eines Lasers

2 Theoretische Grundlagen

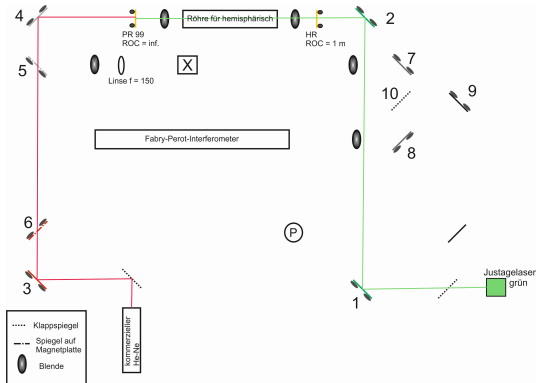
- Besetzungsinversion und Laserbedingungen
- Optischer Resonator
- Modenstruktur und Linienverbreiterung
- Faby-Perot-Interferometer

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

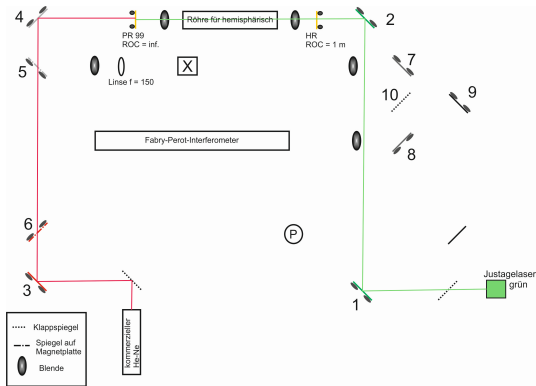
Versuchsziel und Aufbau



Ziel des Versuches

Jusierung, Inbetriebnahme und Untersuchung eines HeNe Lasers.

Versuchsziel und Aufbau



Ziel des Versuches

Jusierung, Inbetriebnahme und Untersuchung eines HeNe Lasers.

Zur verfügung stehendes Material

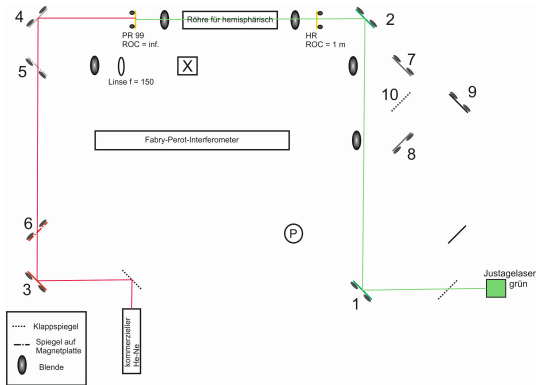
Spiegel Nummeriert von 1 bis 10.

Laser Kommerzieller HeNe und grüner Justagelaser.

Laserröhre HeNe Entladungsröhre

Blenden Als Justagehilfe und zum Ausblenden von unerwünschten Moden.

Versuchsziel und Aufbau



Zur verfügung stehendes Material

Linsen und Filter Zur Untersuchung der Strahleigenschaften.
(Sammellinse, Polfilter, Graufilter)

Fabry Perot Interferometer Festaufbau, Konfokal

Leistungsmessgerät Zur Leistungsmessung und als Justagehilfe.

Faserspektrometer OCEAN OPTICS HR2000+ als Referenzmessgerät.

Acronym

LIGHT AMPLIFICATION BY STIMULATED EMISSION OF RADIATION.

Basic Facts

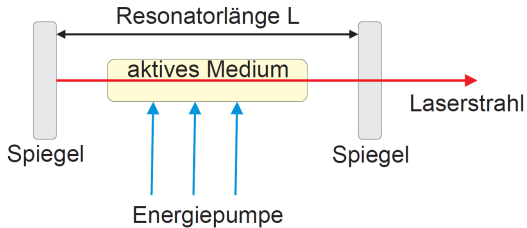
- ▶ erster Laser um 1960 von Theodore H. Maiman
 - ▶ bezeichnet als "Lösung auf der Suche nach einem Problem" [1]
- ▶ kann sehr fokussiertes und kohärentes Licht erzeugen
- ▶ findet Anwendung in breiten Bereichen der Technik und Wissenschaft
 - ▶ Barcode Scanner, CD-Spieler, Optische Telekommunikationstechnik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

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



Aufbau

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

Funktionsweise

Energiepumpe erzeugt Ungleichgewichtsbesetzung von Energieniveaus im aktiven Medium

⇒ Photonen oszillieren im Resonator mehrfach, werden bei jedem Durchlauf verstärkt

⇒ Bruchteil des Lichtes wird ausgekoppelt und genutzt

Achtung

Große Vielfalt in der Implementierung (Materialien, Energiepumpen)

Funktionsweise

Energiepumpe erzeugt Ungleichgewichtsbesetzung von Energieniveaus im aktiven Medium

⇒ Photonen oszillieren im Resonator mehrfach, werden bei jedem Durchlauf verstärkt

⇒ Bruchteil des Lichtes wird ausgekoppelt und genutzt

Achtung

Große Vielfalt in der Implementierung (Materialien, Energiepumpen)

Funktionsweise

Energiepumpe erzeugt Ungleichgewichtsbesetzung von Energieniveaus im aktiven Medium
⇒ Photonen oszillieren im Resonator mehrfach, werden bei jedem Durchlauf verstärkt
⇒ Bruchteil des Lichtes wird ausgekoppelt und genutzt

Achtung

Große Vielfalt in der Implementierung (Materialien, Energiepumpen)

Funktionsweise

Energiepumpe erzeugt Ungleichgewichtsbesetzung von Energieniveaus im aktiven Medium

⇒ Photonen oszillieren im Resonator mehrfach, werden bei jedem Durchlauf verstärkt

⇒ Bruchteil des Lichtes wird ausgekoppelt und genutzt

Achtung

Große Vielfalt in der Implementierung (Materialien, Energiepumpen)

1 Allgemeines zum Versuch

- Begriffsklärung Laser
- Grundlegender Aufbau und Funktionsweise eines Lasers

2 Theoretische Grundlagen

- Besetzungsinversion und Laserbedingungen
- Optischer Resonator
- Modenstruktur und Linienverbreiterung
- Faby-Perot-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

- ▶ 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 $2 \rightarrow 1$

Stimulierte Emission: Photon mit passender Energie stimuliert angeregtes Atom abregung $2 \rightarrow 1$, aussendung eines identischen Photons

- ▶ 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

Absorbtion Absorbtion 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 abregung $2 \rightarrow 1$, aussendung eines Idenischen photons

- ▶ 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 $2 \rightarrow 1$

Stimulierte Emission Photon mit passender Energie stimuliert angeregtes Atom abregung $2 \rightarrow 1$, aussendung eines identischen photons

- ▶ 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

Absorbtion Absorbtion 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 abregung $2 \rightarrow 1$, aussendung eines Idenischen photons

Besetzungsinversion

- ▶ im thermischen Gleichgewicht überwiegt die spontane Emission gegenüber der Induzierten
⇒ 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:

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

⇒ Besetzungsinversion

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

Besetzungsinversion

- ▶ im thermischen Gleichgewicht überwiegt die spontane Emission gegenüber der Induzierten
⇒ 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:

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

⇒ Besetzungsinversion

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

Besetzungsinversion

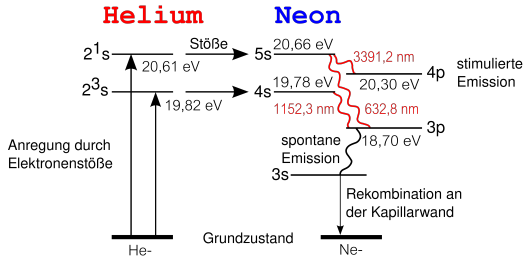
- ▶ im thermischen Gleichgewicht überwiegt die spontane Emission gegenüber der Induzierten
⇒ Erzeugung eines Ungleichgewichts durch “Pumpen” und Auswahl bestimmter Moden im optischen Resonator
- ▶ Ratengleichung mit ρ als spektraler Energiedichte, B_{21} als Übergangswahrscheinlichkeit der stim. Emission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

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

⇒ Besetzungsinversion

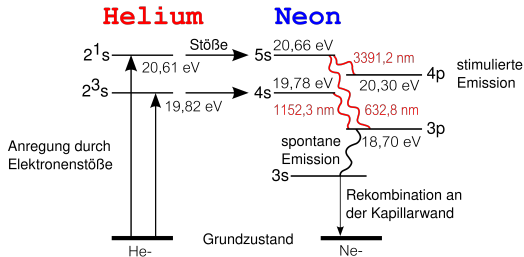
- ▶ Besetzungsinversion ist erst mit Vierniveausystem realisierbar (metastabile Zustände halten Grundzustand leer)

HeNe System



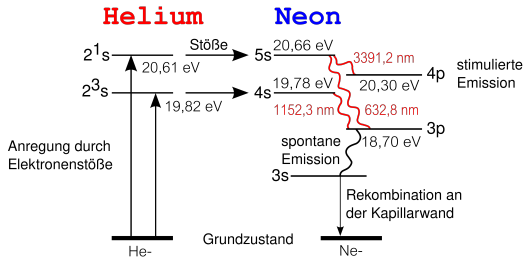
- Pumpen von Helium durch Elektronenstoß
- Helium regt durch Stöße ähnlich gelegene Niveaus im Neon an (Zufall)
- Nutzung des Übergangs $5S \rightarrow 3P$ (sichtbar)
- Lebensdauer des P Niveaus ausreichend Kurz

HeNe System



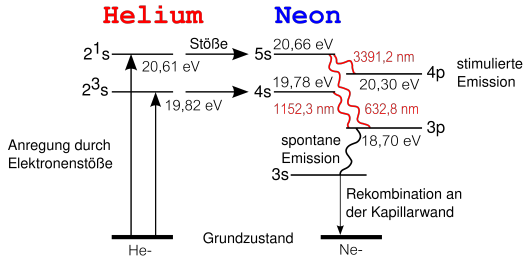
- ▶ Pumpen von Helium durch Elektronenstoß
- ▶ Helium regt durch Stöße ähnlich gelegene Niveaus im Neon an (Zufall)
- ▶ Nutzung des Übergangs $5S \rightarrow 3P$ (sichtbar)
- ▶ Lebensdauer des P Niveaus ausreichend Kurz

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

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

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:

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

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:

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

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:

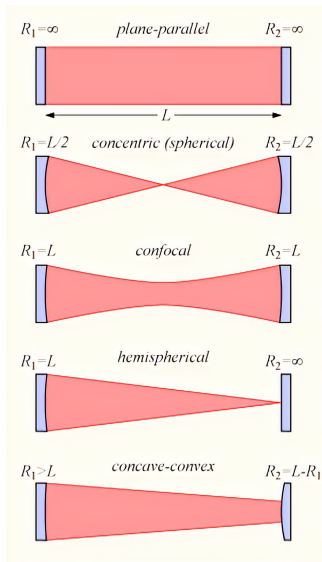
$$\sigma_{21} \cdot (N_2 - N_1) \cdot 2L \geq \kappa \quad (\text{zweite Laserbedingung})$$

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:

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

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



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

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 des Maxwell Gleichungen
- ▶ ergibt als Grundmode sog. **Gauss-Strahl** (Querschnitt ist Gaussfunktion) ,
- ▶ meist wird eine Polarisation mit einem Brewsterfenster ausgewählt

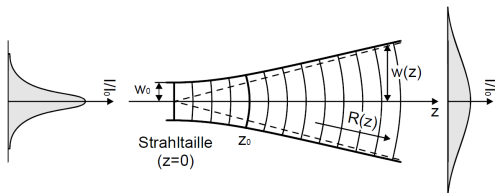
Resonanz und Modenstruktur

- ▶ longitudinale Resonanzbedingung:

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

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

Resonanz und Modenstruktur

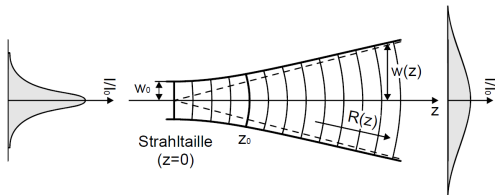


- ▶ longitudinale Resonanzbedingung:

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

- ▶ Beschreibung des gesamten Feldes durch paraxiale Lösung 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, Strahltaille $w(z=0) = w_0$ und Wellenlänge
- ▶ meist wird eine Polarisation mit einem Brewsterfenster ausgewählt

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 des Maxwell gleichungen
- ▶ ergibt als Grundmode sog. **Gauss-Strahl** (Querschnitt ist Gaussfunktion) ,
- ▶ meist wird eine Polarisation mit einem Brewsterfenster ausgewählt

Crashkurs Matrizenoptik

- Annahmen: Paraxiale Optik, alle Winkel Klein

- stelle strahl als 2er Vektor da:

$$\begin{pmatrix} d \\ \alpha \end{pmatrix} \hat{=} \begin{pmatrix} \text{Abstand zur Achse} \\ \text{Winkel zur Achse} \end{pmatrix} \quad (3)$$

- optisches System dargestellt durch Matrix als Produkt der Komponenten:

$$\mathfrak{M}_{\text{System}} = \mathfrak{M}_1 \cdot \dots \cdot \mathfrak{M}_n = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{pmatrix} d' \\ \alpha' \end{pmatrix} = \mathfrak{M}_{\text{System}} \cdot \begin{pmatrix} d \\ \alpha \end{pmatrix} \quad (5)$$

Crashkurs Matrizenoptik

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

$$\begin{pmatrix} d \\ \alpha \end{pmatrix} \hat{=} \begin{pmatrix} \text{Abstand zur Achse} \\ \text{Winkel zur Achse} \end{pmatrix} \quad (3)$$

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

$$\mathfrak{M}_{\text{System}} = \mathfrak{M}_1 \cdot \dots \cdot \mathfrak{M}_n = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{pmatrix} d' \\ \alpha' \end{pmatrix} = \mathfrak{M}_{\text{System}} \cdot \begin{pmatrix} d \\ \alpha \end{pmatrix} \quad (5)$$

Crashkurs Matrizenoptik

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

$$\begin{pmatrix} d \\ \alpha \end{pmatrix} \hat{=} \begin{pmatrix} \text{Abstand zur Achse} \\ \text{Winkel zur Achse} \end{pmatrix} \quad (3)$$

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

$$\mathfrak{M}_{\text{System}} = \mathfrak{M}_1 \cdot \dots \cdot \mathfrak{M}_n = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{pmatrix} d' \\ \alpha' \end{pmatrix} = \mathfrak{M}_{\text{System}} \cdot \begin{pmatrix} d \\ \alpha \end{pmatrix} \quad (5)$$

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

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:

$$q' = \frac{Aq + B}{Cq + D} \quad (6)$$

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:

$$q' = \frac{Aq + B}{Cq + D} \quad (6)$$

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:

$$q' = \frac{Aq + B}{Cq + D} \quad (6)$$

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:

$$q' = \frac{Aq + B}{Cq + D} \quad (6)$$

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

$$w_0^4 = \left(\frac{\lambda}{\pi} \right)^2 L(R - L) \quad (7)$$

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:

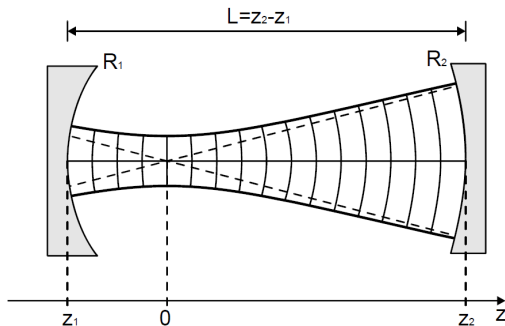
$$q' = \frac{Aq + B}{Cq + D} \quad (6)$$

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

$$b' = b \cdot \frac{AD - CB}{A^2 + B^2 b^2} \quad (7)$$

$$w' = \sqrt{\frac{\lambda}{\pi \cdot b'(x)}} \quad (8)$$

Stabilität im Resonator



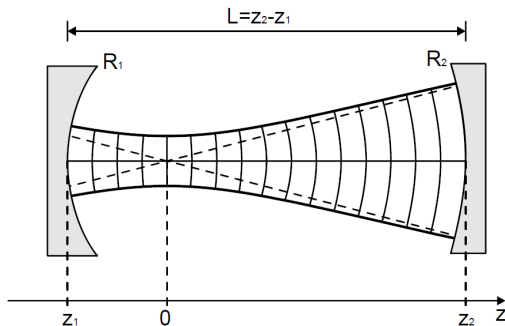
- Passe Gausstrahl so an, dass $R(z_1) = R_1$, $R(z_2) = R_2$, definiere:

$$g_i = 1 - \frac{L}{R_i}; \quad i = 1, 2 \quad (9)$$

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

$$0 \leq g_1 g_2 \leq 1 \quad (10)$$

Stabilität im Resonator



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

$$g_i = 1 - \frac{L}{R_i}; \quad i = 1, 2 \quad (9)$$

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

$$0 \leq g_1 g_2 \leq 1 \quad (10)$$

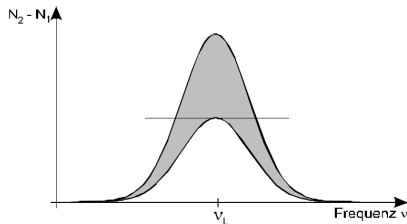
- ▶ prinzipiell Verstärkung von allen Moden, die:
 - ▶ die Longitudinale frequenzbedingung erfüllen
 - ▶ über der Verlustgrenze liegen
- ▶ nur wenige longitudinale und nicht-Gauss Moden werden verstärkt (Konkurrenz, Aufweitung) [4, p. 171]
- ▶ Stimulierte Emission akzeptiert aufgrund der sog. *Linienverbreiterung* mehrere Frequenzen
- ▶ dadurch aufweichung von longitudinaler Frequenzbedingung

- ▶ prinzipiell Verstärkung von allen Moden, die:
 - ▶ die Longitudinale frequenzbedingung erfüllen
 - ▶ über der Verlustgrenze liegen
- ▶ nur wenige longitudinalen und nicht-Gauss Moden werden verstärkt (Konkurrenz, Aufweitung) [4, p. 171]
- ▶ Stimulierte Emission akzeptiert aufgrund der sog. *Linienverbreiterung* mehrere Frequenzen
- ▶ dadurch aufweichung von longitudinaler Frequenzbedingung

- ▶ prinzipiell Verstärkung von allen Moden, die:
 - ▶ die Longitudinale frequenzbedingung erfüllen
 - ▶ über der Verlustgrenze liegen
- ▶ nur wenige longitudinalen und nicht-Gauss Moden werden verstärkt (Konkurrenz, Aufweitung) [4, p. 171]
- ▶ Stimulierte Emission akzeptiert aufgrund der sog. *Linienverbreiterung* mehrere Frequenzen
- ▶ dadurch aufweichung von longitudinaler Frequenzbedingung

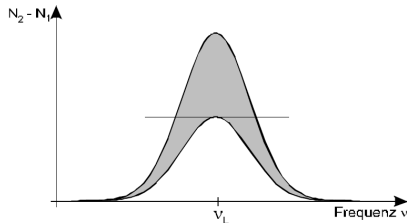
- ▶ prinzipiell Verstärkung von allen Moden, die:
 - ▶ die Longitudinale frequenzbedingung erfüllen
 - ▶ über der Verlustgrenze liegen
- ▶ nur wenige longitudinalen und nicht-Gauss Moden werden verstärkt (Konkurrenz, Aufweitung) [4, p. 171]
- ▶ Stimulierte Emission akzeptiert aufgrund der sog. *Linienverbreiterung* mehrere Frequenzen
- ▶ dadurch aufweichung von longitudinaler Frequenzbedingung

Homogene Linienverbreiterung



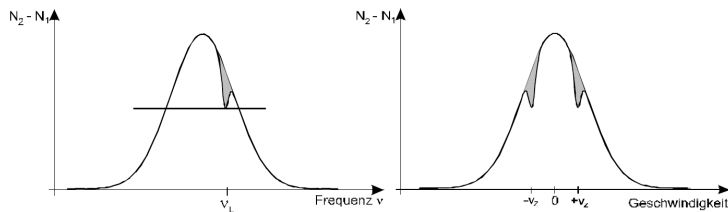
- ▶ wirkt auf gesamtes aktives Medium
- ▶ Ursachen: Energie-Zeit Unschärfe, strahlungsfreie Übergänge, elastische Stöße (Druckverbreiterung)

Homogene Linienverbreiterung



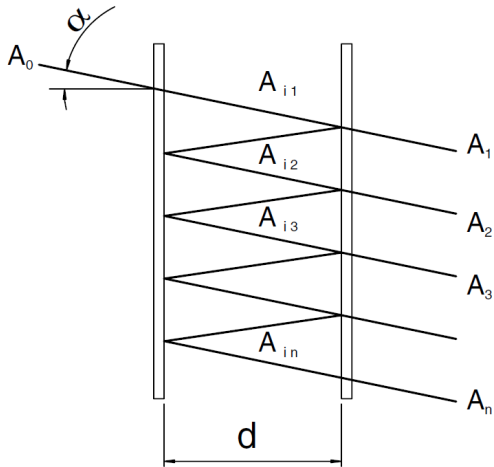
- ▶ wirkt auf gesamtes aktives Medium
- ▶ Ursachen: Energie-Zeit Unschärfe, strahlungsfreie Übergänge, elastische Stöße (Druckverbreiterung)

Inhomogene Linienverbreiterung

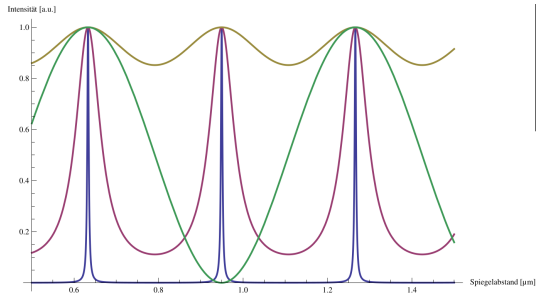


- ▶ wirkt nur auf Bestimmte Atomgruppen
- ▶ Dopplereffekt (Dopplerverbreiterung) beim HeNe-Laser dominant
- ▶ Halbwertsbreite (FWHM):

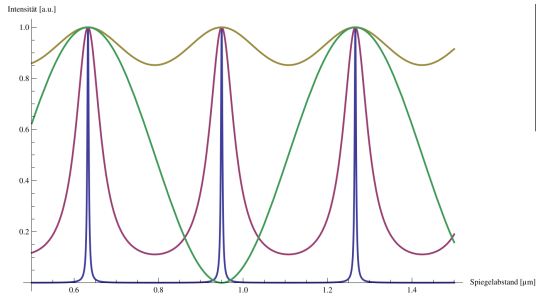
$$(\Delta\nu)_{\text{Doppler}} = 2 \cdot \nu_0 \left(\frac{2kT \ln 2}{mc^2} \right)^{1/2} \quad (11)$$



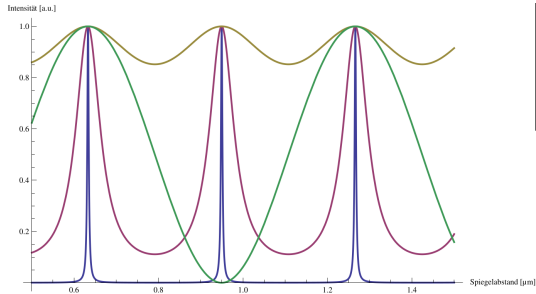
- ▶ Vielstrahlinterferenz durch Reflexion zwischen zwei ebenen Spiegeln (Etalon)
 - ▶ bestimmt durch Abstand d , Reflexionsvermögen R
- ▶ nur für $d = n \cdot \frac{\lambda}{2}$ 100 % Transmission
- ▶ sehr scharfe Maxima \implies hohe Auflösung



- ▶ Vielstrahlinterferenz durch Reflexion zwischen zwei ebenen Spiegeln (Etalon)
 - ▶ bestimmt durch Abstand d , Reflexionsvermögen R
- ▶ nur für $d = n \cdot \frac{\lambda}{2}$ 100 % Transmission
- ▶ sehr scharfe Maxima \Rightarrow hohe Auflösung



- ▶ Vielstrahlinterferenz durch Reflexion zwischen zwei ebenen Spiegeln (Etalon)
 - ▶ bestimmt durch Abstand d , Reflexionsvermögen R
- ▶ nur für $d = n \cdot \frac{\lambda}{2}$ 100 % Transmission
- ▶ sehr scharfe Maxima \Rightarrow hohe Auflösung



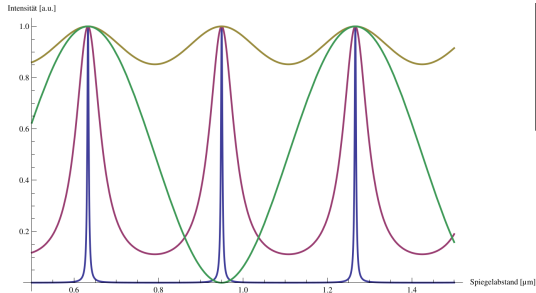
Charakterisierung eines FPI

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

$$\text{FSR} = \frac{c}{2 \cdot d} = \delta\nu \quad (12)$$

Finesse Quotient aus FSR und Halbwertsbreite

$$\mathfrak{F} = \frac{\pi\sqrt{R}}{1-R} \quad (13)$$



Charakterisierung eines FPI

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

$$\text{FSR} = \frac{c}{2 \cdot d} = \delta\nu \quad (12)$$

Finesse Quotient aus FSR und Halbwertsbreite

$$\mathfrak{F} = \frac{\pi\sqrt{R}}{1-R} \quad (13)$$

1 Allgemeines zum Versuch

- Begriffsklärung Laser
- Grundlegender Aufbau und Funktionsweise eines Lasers

2 Theoretische Grundlagen

- Besetzungsinversion und Laserbedingungen
- Optischer Resonator
- Modenstruktur und Linienverbreiterung
- Faby-Perot-Interferometer

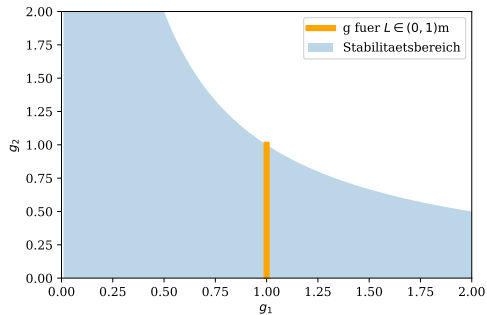
3 Durchführung und Ergebnisse

- 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 10:

$$g_2 = 1 - \frac{L}{1 \text{ m}} \implies 0 \text{ m} \leq L \leq 1 \text{ m} \quad (14)$$



- ▶ Justage der beiden Justage Laser 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: Leistungsmessungen des Einfachdurchgangs mit abgezogenem Untergrund

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

- ▶ Justage der beiden Justage Laser 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: Leistungsmessungen des Einfachdurchgangs mit abgezogenem Untergrund

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

- ▶ Justage der beiden Justage Laser 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: Leistungsmessungen des Einfachdurchgangs mit abgezogenem Untergrund

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

- ▶ Justage der beiden Justage Laser 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: Leistungsmessungen des Einfachdurchgangs mit abgezogenem Untergrund

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

- ▶ Justage der beiden Justage Laser 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: Leistungsmessungen des Einfachdurchgangs mit abgezogenem Untergrund

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

- ▶ Justage der beiden Justage Laser 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: Leistungsmessungen des Einfachdurchgangs mit abgezogenem Untergrund

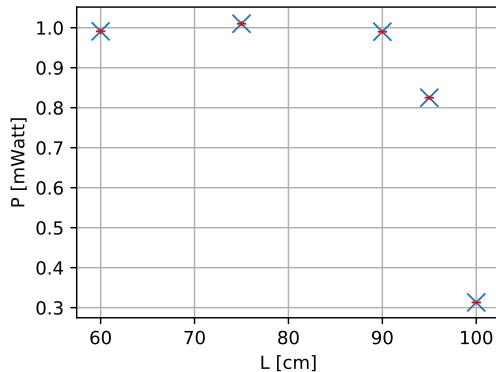
- ▶ Untergrund ist Vernachlässigbar
- ▶ Aktive Röhre verstärkt nur um 6 %

- ▶ 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 $\Delta L = 0.5 \text{ cm}$

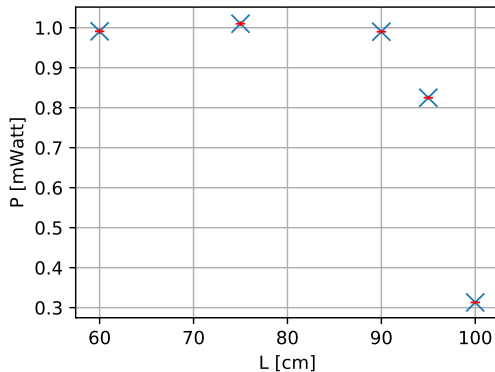
- ▶ Einbau der Resonatorspiegel (planar und sphärisch)
- ▶ Justage mittels Rückreflexen
- ▶ Feinjustage durch Beamwalken (iteratives Feinjustieren der Stellschrauben an den Spiegel)
⇒ Maximalleistung auf 1 mW
- ▶ Variation der Resonatorlänge und Leistungsmessung
 - ▶ Ableseschwierigkeiten ergeben eine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

- ▶ 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 $\Delta L = 0.5 \text{ cm}$

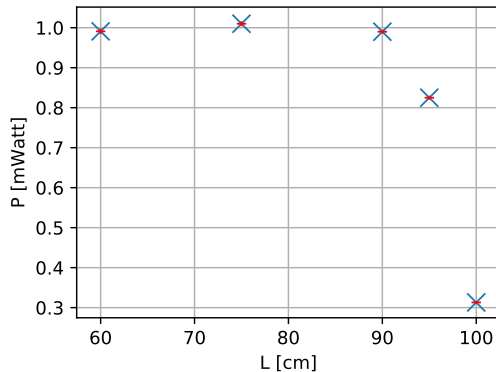
- ▶ Einbau der Resonatorspiegel (planar und sphärisch)
- ▶ Justage mittels Rückreflexen
- ▶ Feinjustage durch Beamwalken (iteratives Feinjustieren der Stellschrauben an den Spiegel)
⇒ Maximalleistung auf 1 mW
- ▶ Variation der Resonatorlänge und Leistungsmessung
 - ▶ Ableseschwierigkeiten ergeben eine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



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



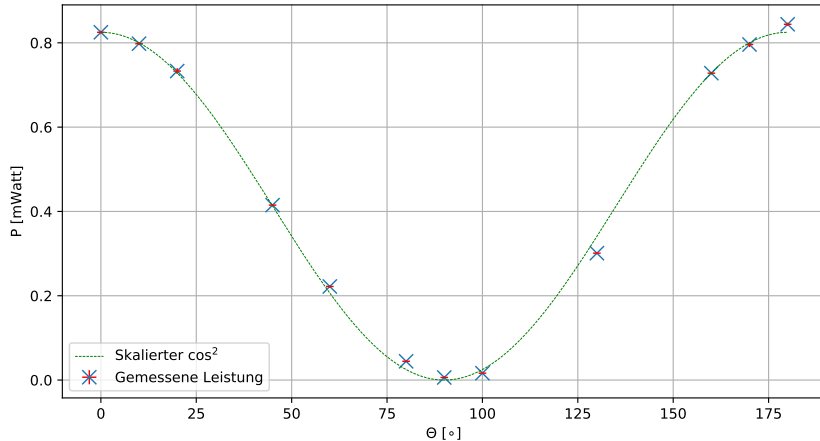
- ▶ Leistungseinbruch bei 1 m deutlich zu erkennen
- ▶ Frühes Einsetzen des Einbruch:
 - ▶ zunehmende Ungültigkeit der paraxialen Näherung
 - ▶ Justage empfindlicher: Leistungsmaximum nicht gefunden
- ▶ Festlegung $L = 80$ cm



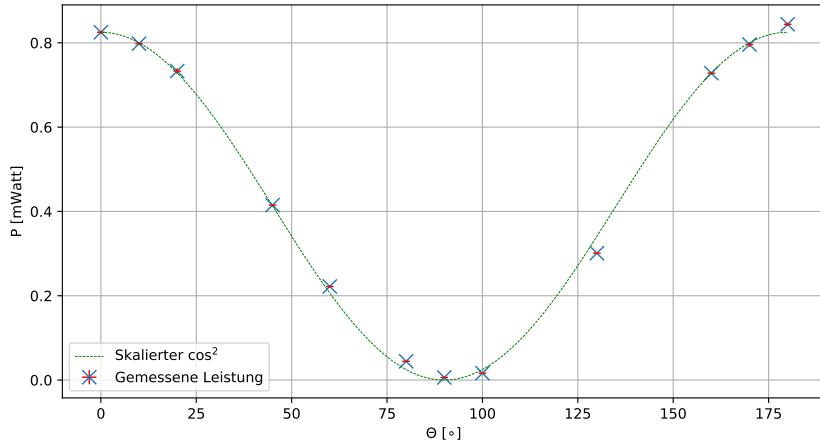
- ▶ Leistungseinbruch bei 1 m deutlich zu erkennen
- ▶ Frühes Einsetzen des Einbruch:
 - ▶ zunehmende Ungültigkeit der paraxialen Näherung
 - ▶ Justage empfindlicher: Leistungsmaximum nicht gefunden
- ▶ Festlegung $L = 80$ cm

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

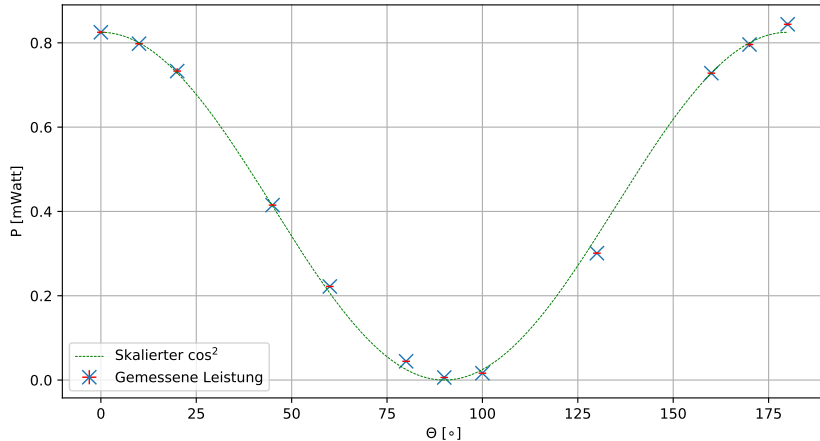
- ▶ Einbringen eines Polarisationsfilters in den Strahlengang
- ▶ Messen der Ausgangsleistung bei versch. Polfiltereinstellungen
 - ▶ Messzeit 1 min
 - ▶ $\Delta\phi \approx 1^\circ$



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



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



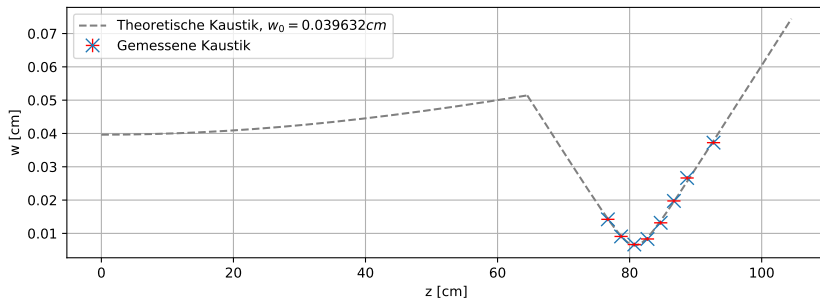
- ▶ Theoretische Kurve aus $I(\Theta) = I_0 \cdot \cos^2 \Theta$
- ▶ Gute Übereinstimmung mit der Theorie \implies Licht ist linear polarisiert
- ▶ Nicht richtig polarisierte Moden werden unterdrückt

- ▶ Einbringen einer Linse mit $f = 15 \text{ cm}$ im Abstand $s = 64.5(20) \text{ cm}$ in den Strahlengang
- ▶ 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 $1 \text{ px} = 5.6 \mu\text{m}$

- ▶ 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 $1 \text{ px} = 5.6 \mu\text{m}$

- ▶ Einbringen einer Linse mit $f = 15 \text{ cm}$ im Abstand $s = 64.5(20) \text{ cm}$ in den Strahlengang
- ▶ Ausblendung der höheren transversalen Moden
- ▶ Aufnahmen 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 $1 \text{ px} = 5.6 \mu\text{m}$

- ▶ 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 $1 \text{ px} = 5.6 \mu\text{m}$

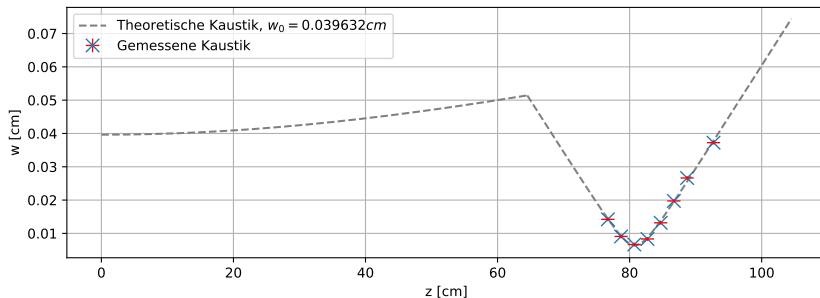


- Fit von w_0 (Initialer Beamwaist) und einem Mess-Offset δ

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

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

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

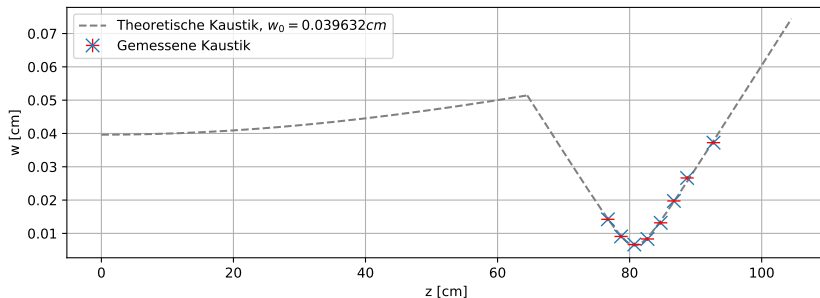


- Fit von w_0 (Initialer Beamwaist) und einem Mess-Offset δ

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

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

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

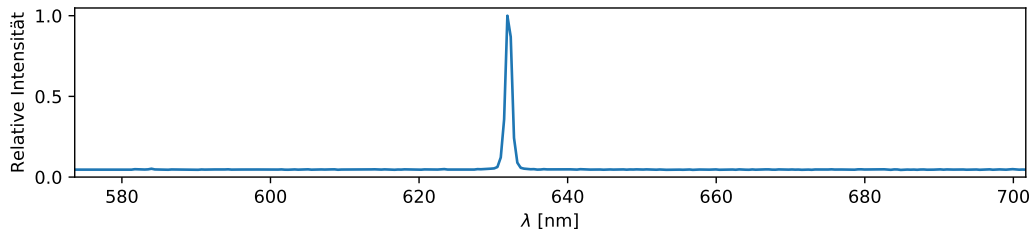


- Fit von w_0 (Initialer Beamwaist) und einem Mess-Offset δ

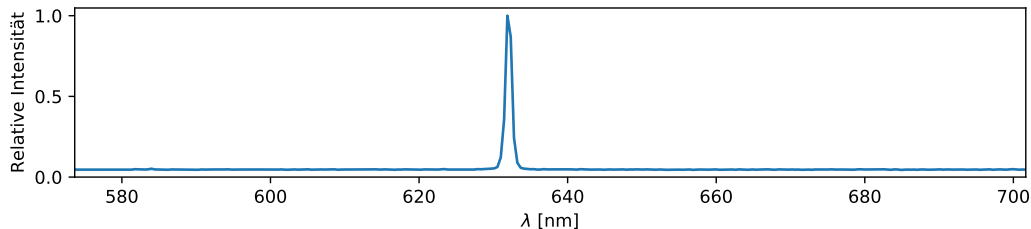
$$w_0 = 396(16) \mu\text{m}$$

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

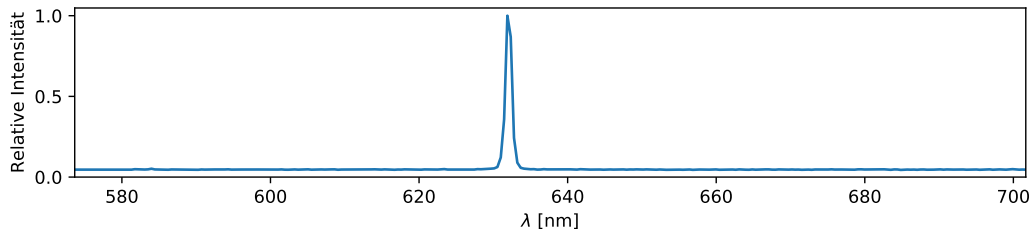
- extrem gute Übereinstimmung mit der Theorie \Rightarrow verifiziert Matrizenoptik und Gausstrahlösung
- theoretischer Wert für Beamwaist: $284 \mu\text{m}$



- ▶ als Referenz wurde das Spektrum des Lasers mit einem Faserspektrometer (OCEAN OPTICS HR+C1743) aufgenommen
 - ▶ erlaubt absolute Frequenzmessung
- ▶ großer Peak bei $\lambda_0 = 631.9$ nm
 - ▶ bei 632.8 nm deutlich unter der Peakhöhe \Rightarrow Spektrometer schlecht kalibriert



- ▶ als Referenz wurde das Spektrum des Lasers mit einem Faserspektrometer (OCEAN OPTICS HR+C1743) aufgenommen
 - ▶ erlaubt absolute Frequenzmessung
- ▶ großer Peak bei $\lambda_0 = 631.9$ nm
 - ▶ bei 632.8 nm deutlich unter der Peakhöhe \Rightarrow Spektrometer schlecht kalibriert



- ▶ als Referenz wurde das Spektrum des Lasers mit einem Faserspektrometer (OCEAN OPTICS HR+C1743) aufgenommen
 - ▶ erlaubt absolute Frequenzmessung
- ▶ großer Peak bei $\lambda_0 = 631.9$ nm
 - ▶ bei 632.8 nm deutlich unter der Peakhöhe \Rightarrow Spektrometer schlecht kalibriert

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

⇒ bestmögliche Auflösung:

$$\Delta\nu = c \cdot \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0^2} = 3.30 \times 10^{11} \text{ Hz} \quad (15)$$

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

$$\delta\nu = 1.87 \times 10^8 \text{ Hz} < \Delta\nu \quad (16)$$

⇒ einzelne Moden können nicht aufgelöst werden

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

$$\Delta\nu = c \cdot \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0^2} = 3.30 \times 10^{11} \text{ Hz} \quad (15)$$

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

$$\delta\nu = 1.87 \times 10^8 \text{ Hz} < \Delta\nu \quad (16)$$

⇒ einzelne Moden können nicht aufgelöst werden

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

$$\Delta\nu = c \cdot \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0^2} = 3.30 \times 10^{11} \text{ Hz} \quad (15)$$

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

$$\delta\nu = 1.87 \times 10^8 \text{ Hz} < \Delta\nu \quad (16)$$

⇒ einzelne Moden können nicht aufgelöst werden

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

$$\Delta\nu = c \cdot \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0^2} = 3.30 \times 10^{11} \text{ Hz} \quad (15)$$

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

$$\delta\nu = 1.87 \times 10^8 \text{ Hz} < \Delta\nu \quad (16)$$

⇒ einzelne Moden können nicht aufgelöst werden

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

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

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

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

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

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

- ▶ 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

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

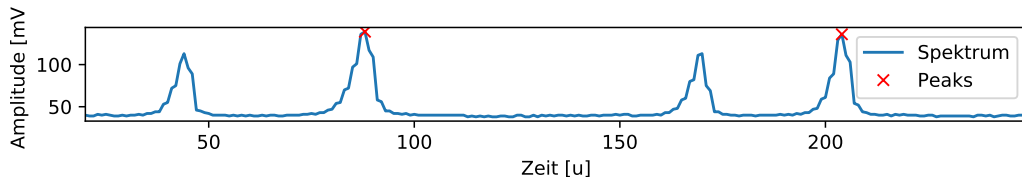
$$d = 7.50(25) \text{ cm}$$

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

Kalibrierung der Zeitachse (kommerzieller Laser)



- ▶ der FSR berechnet sich aus der Länge des FPI zu

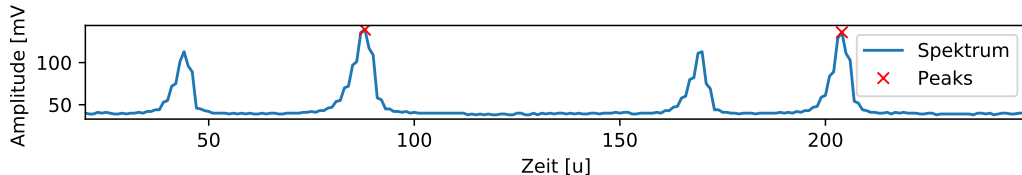
$$\text{FSR} = 2.00(7) \text{ GHz} \quad (17)$$

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

$$u = \frac{\text{FSR}}{t_2 - t_1} = 0.172 \text{ MHz} \quad (18)$$

$$\Delta u = \sqrt{\left(\frac{\Delta \text{FSR}}{x_2 - x_1}\right)^2 + 2 \cdot \left(\frac{\text{FSR}}{(x_2 - x_1)^2} \Delta t\right)^2} = 0.07 \text{ MHz} \quad (19)$$

Kalibrierung der Zeitachse (kommerzieller Laser)



- ▶ der FSR berechnet sich aus der Länge des FPI zu

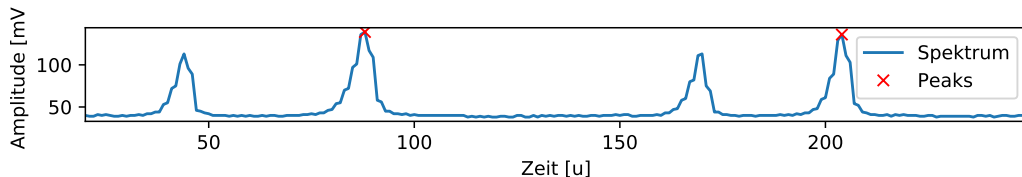
$$\text{FSR} = 2.00(7) \text{ GHz} \quad (17)$$

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

$$u = \frac{\text{FSR}}{t_2 - t_1} = 0.172 \text{ MHz} \quad (18)$$

$$\Delta u = \sqrt{\left(\frac{\Delta \text{FSR}}{x_2 - x_1}\right)^2 + 2 \cdot \left(\frac{\text{FSR}}{(x_2 - x_1)^2} \Delta t\right)^2} = 0.07 \text{ MHz} \quad (19)$$

Bestimmung der Finesse



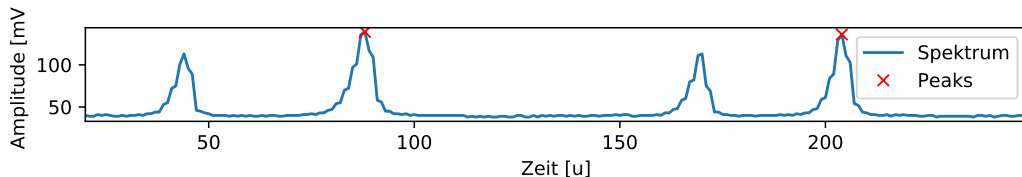
- Bestimmung der Finesse durch Mittlung über 4 Peaks

$$\overline{\text{FWHM}} = 4.72 \text{ u} = 81(6) \text{ MHz} \quad (20)$$

$$\mathfrak{F} = \frac{\text{FSR}}{\text{FWHM}} = 24.6(20) \quad (21)$$

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

Bestimmung der Finesse



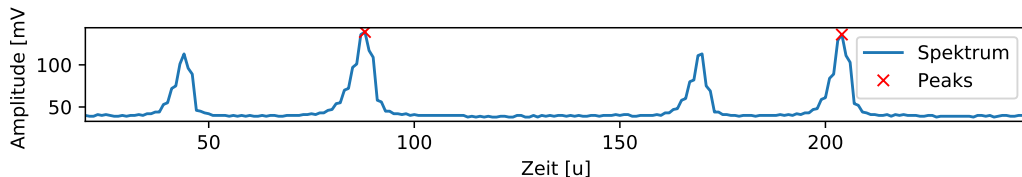
- Bestimmung der Finesse durch Mittlung über 4 Peaks

$$\overline{\text{FWHM}} = 4.72 \text{ u} = 81(6) \text{ MHz} \quad (20)$$

$$\mathfrak{F} = \frac{\text{FSR}}{\text{FWHM}} = 24.6(20) \quad (21)$$

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

Bestimmung der Finesse



- Bestimmung der Finesse durch Mittlung über 4 Peaks

$$\overline{\text{FWHM}} = 4.72 \text{ u} = 81(6) \text{ MHz} \quad (20)$$

$$\mathfrak{F} = \frac{\text{FSR}}{\text{FWHM}} = 24.6(20) \quad (21)$$

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

Modenstruktur des kommerziellen Lasers

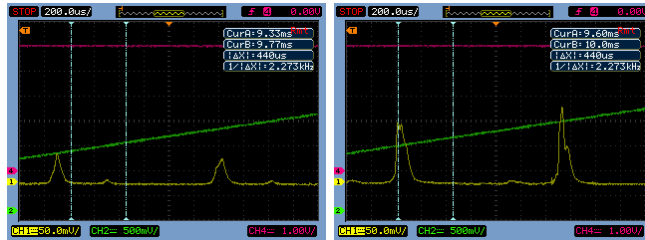
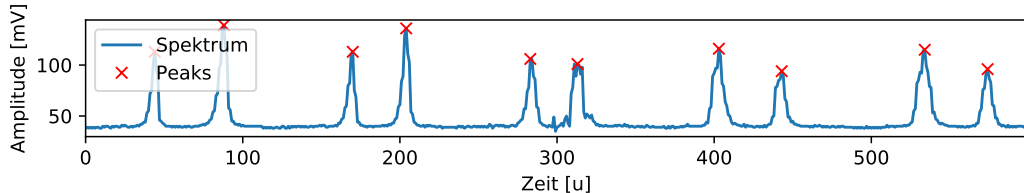


Figure: Spektrum des kommerziellen HeNeLasers für zwei orthogonale Polarisationen

- ▶ beide sichtbaren Moden genau orthogonal polarisiert

Modenstruktur des kommerziellen Lasers



- Bestimmung des Modenabstandes durch Mittlung über alle 5 sichtbaren Gruppen

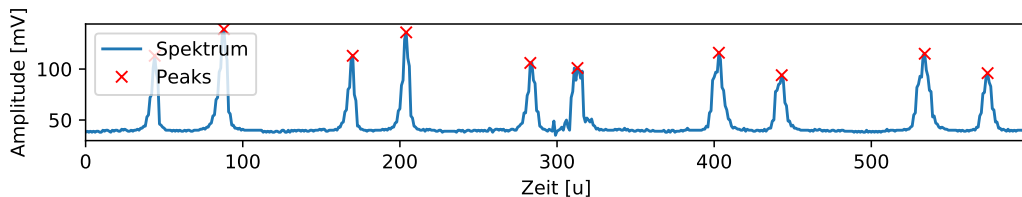
$$\overline{\delta\nu_k} = 37.6(22) \mu = 650(40) \text{ MHz} \quad (22)$$

- daraus berechnet sich die Resonatorlänge

$$L_k = c / (2 \cdot \delta\nu_k) = 23.1(16) \text{ cm} \quad (23)$$

- erscheint plausibel
- Präzision der Länge vergleichbar mit vorherigen Ergebnissen

Modenstruktur des kommerziellen Lasers



- Bestimmung des Modenabstandes durch Mittlung über alle 5 sichtbaren Gruppen

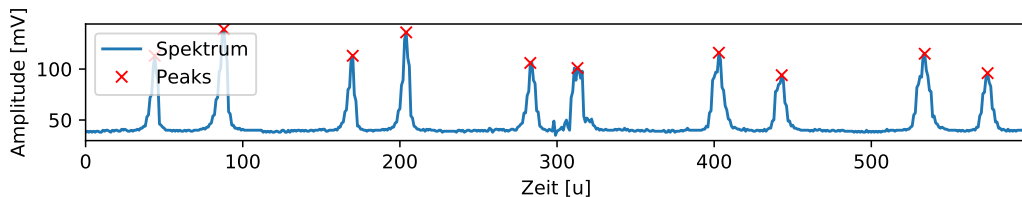
$$\overline{\delta\nu_k} = 37.6(22) \mu = 650(40) \text{ MHz} \quad (22)$$

- daraus berechnet sich die Resonatorlänge

$$L_k = c / (2 \cdot \delta\nu_k) = 23.1(16) \text{ cm} \quad (23)$$

- erscheint plausibel
- Präzision der Länge vergleichbar mit vorherigen Ergebnissen

Modenstruktur des kommerziellen Lasers



- ▶ Bestimmung des Modenabstandes durch Mittlung über alle 5 sichtbaren Gruppen

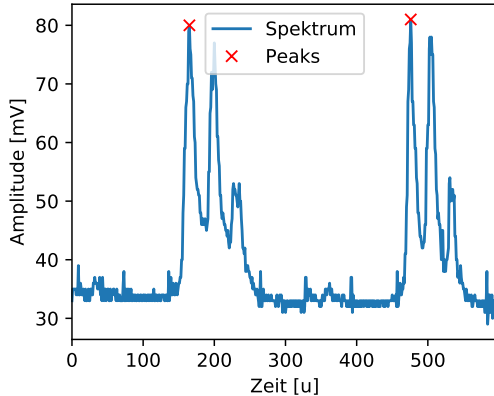
$$\overline{\delta\nu_k} = 37.6(22) \mu = 650(40) \text{ MHz} \quad (22)$$

- ▶ daraus berechnet sich die Resonatorlänge

$$L_k = c / (2 \cdot \delta\nu_k) = 23.1(16) \text{ cm} \quad (23)$$

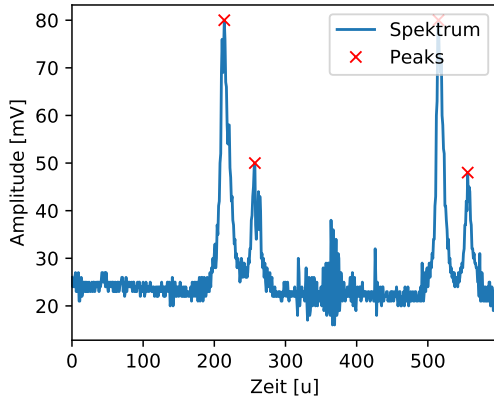
- ▶ erscheint plausibel
- ▶ Präzision der Länge vergleichbar mit vorherigen Ergebnissen

Modenstruktur des offenen Lasers



- ▶ analoge bestimmung des Modenabstandes
- ▶ anzahl der Peaks für $L = 60$ cm sehr gering

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)

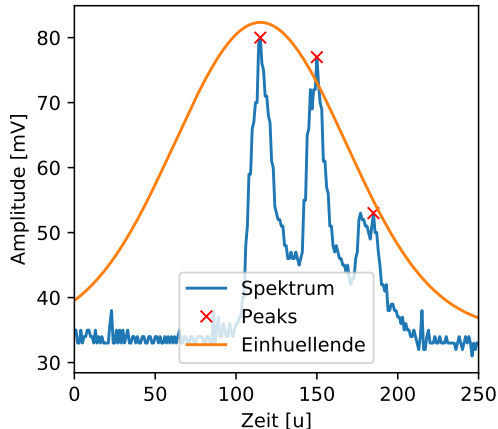
- ▶ akzeptable Übereinstimmung mit der Theorie *implies* keine unaufgelöste Mode dazwischen
- ▶ bei $L = 60$ cm ist die Abweichung unterschätzt

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)

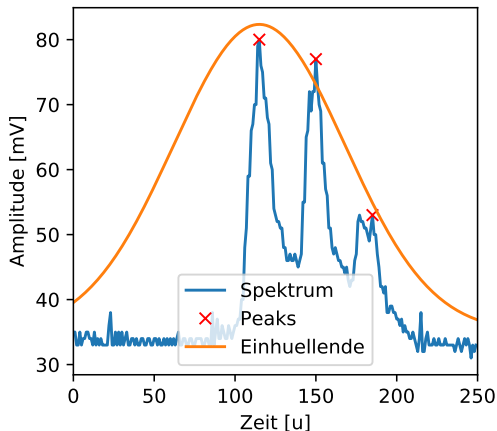
- ▶ akzeptable Übereinstimmung mit der Theorie *implies* keine unaufgelöste Mode dazwischen
- ▶ bei $L = 60$ cm ist die Abweichung unterschätzt

Betrachtung der Linienverbreiterung



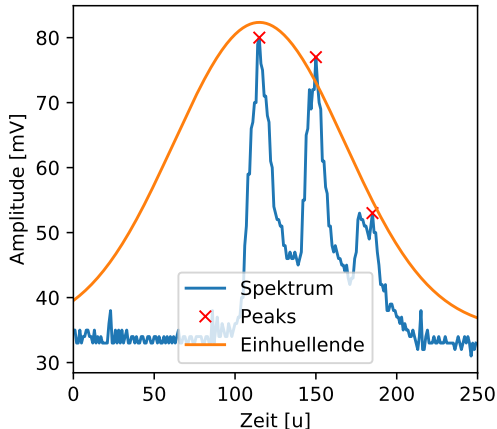
- ▶ Dopplerverbreiterung ist dominant (homogen)
- ▶ Einhüllende des Modenspektrums sollte Gaußskurve entsprechen \Rightarrow Bestimmung der Temperatur möglich
- ▶ Fit symmetrisch angesetzt, Amplitude und Breite als freie Parameter

Betrachtung der Linienverbreiterung



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

Betrachtung der Linienverbreiterung



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

Betrachtung der Linienverbreiterung

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

$$\sigma = 53(20) \text{ u} = 340(130) \text{ MHz} \quad (24)$$

$$T = \left(\frac{\sigma \cdot c}{\nu_0} \right)^2 \cdot \frac{m}{k_B} = 110(90) \text{ K} \quad (25)$$

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

Betrachtung der Linienverbreiterung

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

$$\sigma = 53(20) \text{ u} = 340(130) \text{ MHz} \quad (24)$$

$$T = \left(\frac{\sigma \cdot c}{\nu_0} \right)^2 \cdot \frac{m}{k_B} = 110(90) \text{ K} \quad (25)$$

- ▶ 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 Allgemeines zum Versuch

- Begriffsklärung Laser
- Grundlegender Aufbau und Funktionsweise eines Lasers

2 Theoretische Grundlagen

- Besetzungsinversion und Laserbedingungen
- Optischer Resonator
- Modenstruktur und Linienverbreiterung
- Faby-Perot-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 i
- ▶ größtenteils vernünftige Ergebnisse
- ▶ großer Wissenszuwachs (Matrizenoptik, Gausstahlen etc.)
- ▶ toller Betreuer M

Fazit

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





Fazit

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

Fazit

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

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.
-  Markus Werner Sigrist. *Laser: Theorie, Typen und Anwendungen*. 8. Aufl. 2018. Wiesbaden: Springer Berlin Heidelberg, 2018. ISBN: 978-3-662-57514-7.