

Lasertechnik VL-10

21.06.2023

Mechatronik 4.tes Semester

Vorlesung Sommersemester 2023

VL: Prof. Dr. Thomas Hebert (thebert@fb2.fra-uas.de)

Labor: Hans-Peter Tögel, Lutz Zimmermann, Prof. Kurt Jansen



Fachbereich 2 Informatik und Ingenieurwissenschaften

Kurze Zusammenfassung aus der letzten VL:

1.) Linienbreiten und axiale Resonator-Moden

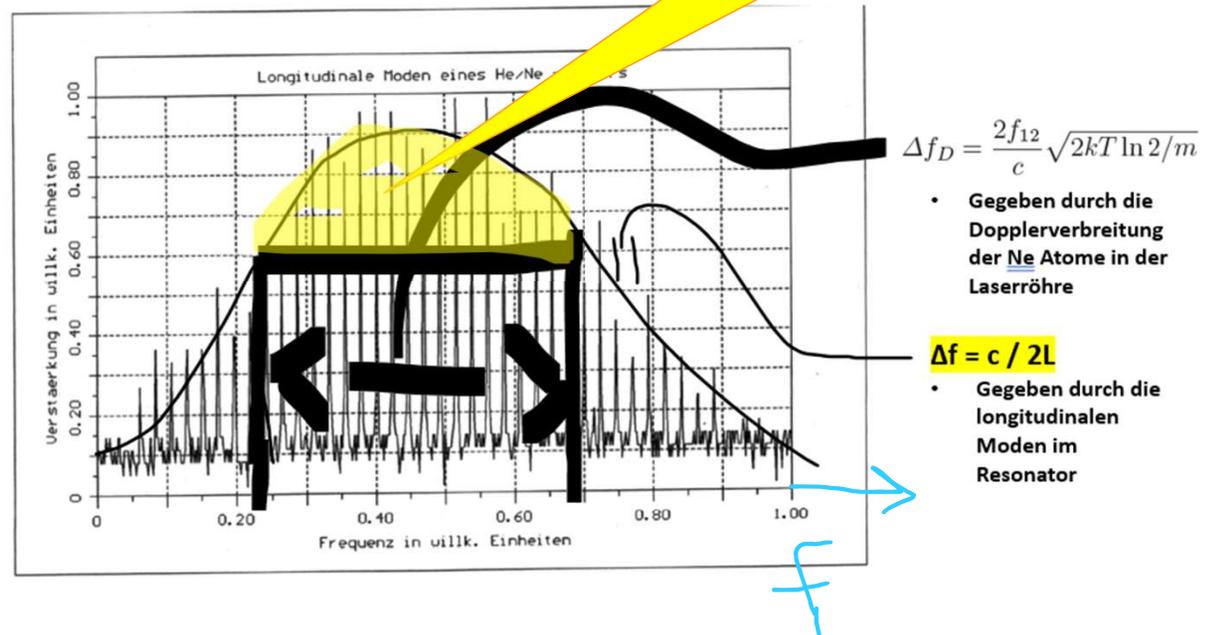
1. Ein Laserübergang ist keine exakt scharfe Linie sondern zeigt eine gewisse (Frequenz)breite → Linienbreite

- Natürliche Linienbreite, Stoßverbreiterung, Dopplerverbreiterung
- Weitere Verbreiterungsmechanismen in Festkörpern und Flüssigkeiten

2. Im Resonator bilden sich stehende Wellen aus.

- Die Resonanzfrequenzen $f_q = q * c / 2L$ der stehenden Wellen nennt man auch axiale (oder longitudinale) Moden ($q = 1, \dots, N$: Ordnungszahl der Moden).
- q im Laserresonator sehr hoch ($q \sim 10^6$ Bereich)
- Charakteristische Größe eines Resonators:
Modenabstand $\Delta f = c / 2L$
(oder „freier Spektralbereich“)

Die Moden, für die das Verstärkungsprofil oberhalb der Laserschwelle liegt, können im Laser anschwingen.

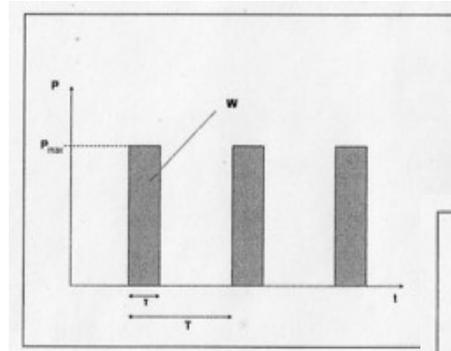


Kurze Zusammenfassung aus der letzten VL:

2.) Laserpulse, Erzeugung, Ultrakurzpulse durch Modenkopplung

Laser Betriebsarten

- **Kontinuierliche Laser (cw)**
 - Es stellt sich im Gleichgewicht eine konstante Laserleistung ein.
 - Dauerhaftes Pumpen
- **Gepulste Laser**
 - Besetzungsinversion wird „stoßweise“ abgebaut.
 - Hohe Puls-Spitzenleistung erreichbar
 - Puls-Energie auch auch mittlere Pulsleistung vergleichsweise gering
- **Puls Erzeugung**
 - Gepulstes Pumpen (Blitzlampen, HV Entladung...)
 - Modulation im Resonator (z.B. durch Kerrzellen)
 - Spezialverfahren für Ultrakurz-Pulse Modenkopplung



$$P_{\max} = \frac{W}{\tau}$$

$$P_m = \frac{W}{T} = W \cdot f$$

Daten von gepulsten Lasern

- W: Pulsenergie in Joule
- τ : Pulsdauer
- T : zeitlicher Pulsabstand
- f : Pulswiederholfrequenz
- P_{\max} : Pulsspitzenleistung in Watt
- P_m : mittlere Pulsleistung in Watt

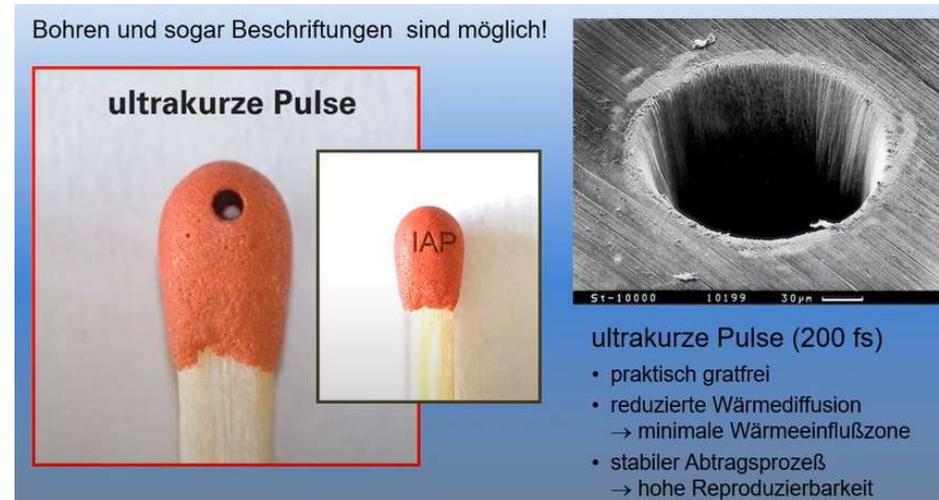
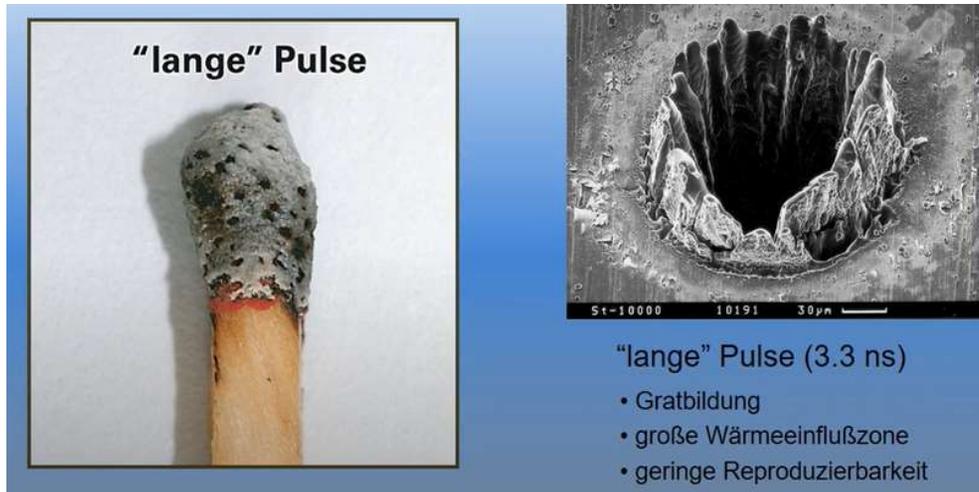
Tabelle 2.8 Betriebsarten und typische Parameter* /Kneu2008/

Anregung	Betriebsart	Pulsfrequenz	Pulsdauer	Leistung / Pulsleistung
kontinuierlich	cw	-	-	W - kW
kontinuierlich	Q-Switch	0 - 100 kHz	0,1 - 0,7 μ s	100 kW
kontinuierlich	Modenkopplung	200 kHz - 100 MHz	3 - 100 ps	15 MW
kontinuierlich	Modenkopplung (CPA)	200 kHz - 60 MHz	< 800 fs	1 MW
gepulst	pw (Standard)	200 Hz	0,1 - 10 ms	10 MW
gepulst	Q-Switch	200 Hz	3 - 30 ns	10 MW
gepulst	Cavity dumping	200 Hz	1 - 3 ns	10 MW
gepulst	Modenkopplung	200 Hz	30 ps	GW

* nur ausgewählte Werte. es gibt auch spezielle Lasersysteme mit gezielt optimierten Werten

Was kann man mit ultrakurzen Laserpulsen tun?

➔ Materialbearbeitung mit sehr feinen Strukturen



Ultrakurze Laserpulse:

- Minimaler Wärmeeinfluß auf das Material
- Praktisch gratfrei
- Sehr feine Strukturen sind möglich

Überblicksvideo zu Materialbearbeitung mit ultrakurzen Laserpulsen

Ultrakurze Laserpulse – Neue Möglichkeiten für hochpräzise Materialstrukturierung; Institute for Applied Physics; Universität Jena

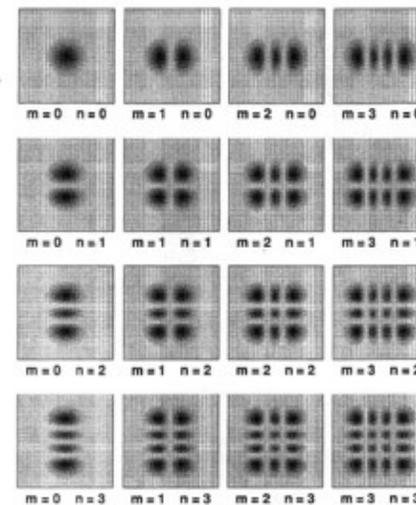


<https://www.youtube.com/watch?v=keP7MrdrGss>

Transversale Moden in Laser Resonatoren

Gauss'sche Strahlen

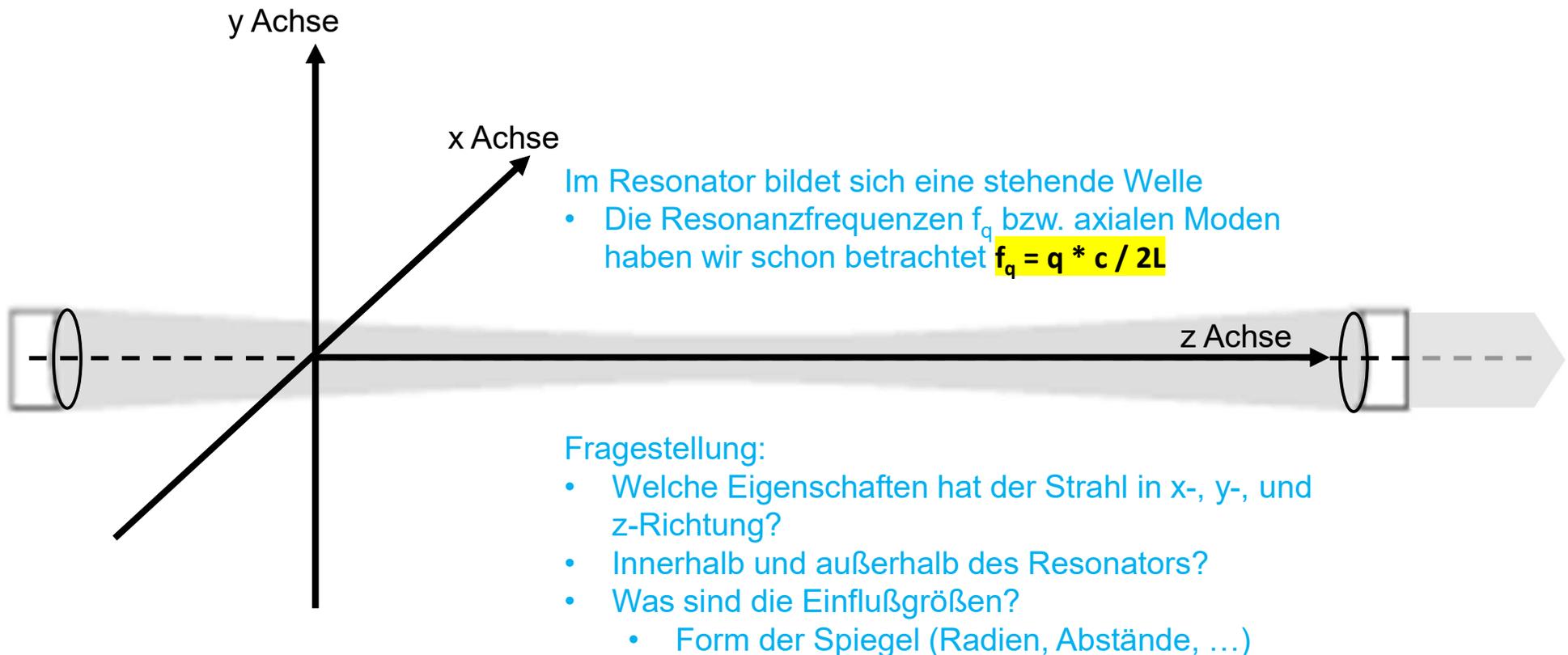
Laterale Modenstruktur in kartesischer Symmetrie:
Hermite'sche Funktionen



Mit den „**Longitudinalen bzw. axialen Moden**“ haben wir die im Resonator erlaubten Resonanzfrequenzen und ihre Eigenschaften kennen gelernt.

Jetzt wollen wir uns mit der „**Räumlichen Ausdehnung**“ des Laserstrahls im Resonator befassen und dabei „**Transversale Moden**“ und „**Gauss'sche Strahlen**“ kennenlernen.

Blick auf das Strahlungsfeld im Resonator hinsichtlich seiner räumlichen Ausdehnung



Transversale Moden TEM_{nm} können aus der Wellengleichung abgeleitet werden. Welche Ansätze stecken in der Herleitung?

1. Startpunkt ist die Wellengleichung $\frac{1}{c^2} * \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = \left(\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial z^2} \right)$
2. Lösungsansatz: $\mathbf{E}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}, \mathbf{t}) = \mathbf{E}_0 * \mathbf{X}(\mathbf{x}, \mathbf{z}) * \mathbf{Y}(\mathbf{y}, \mathbf{z}) * \mathbf{e}^{i(\mathbf{kr} - \omega \mathbf{t})}$
3. Randbedingungen:
 - a. Welle E muss an der kompletten Spiegelfläche = 0 sein.
 - b. D.h. die Form und Abstand L der Spiegel und insbesondere die Krümmungsradien der Hohlspiegels R1, R2 sind relevant
 - c. Für spätere Rechnungen werden die sog. Resonator-Parameter g₁ und g₂ mit $g_{1,2} = 1 - \frac{L}{R_{1,2}}$ eingeführt
4. Lösung: $\mathbf{E}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}, \mathbf{t}) = \mathbf{E}_0 * \mathbf{X}(\mathbf{x}, \mathbf{z}) * \mathbf{Y}(\mathbf{y}, \mathbf{z}) * \mathbf{e}^{i(\mathbf{kr} - \omega \mathbf{t})}$ mit

$$X_m(x, z) = \sqrt{\frac{w_0}{w(z)}} H_m \left(\frac{\sqrt{2}x}{w(z)} \right) \exp \left(-\frac{x^2}{w^2(z)} - i \frac{kx^2}{2R(z)} + i \frac{2m+1}{2} \zeta(z) \right)$$

$$Y_n(y, z) = \sqrt{\frac{w_0}{w(z)}} H_n \left(\frac{\sqrt{2}y}{w(z)} \right) \exp \left(-\frac{y^2}{w^2(z)} - i \frac{ky^2}{2R(z)} + i \frac{2n+1}{2} \zeta(z) \right)$$

H_m(x): sind die sog. Hermite Polynome

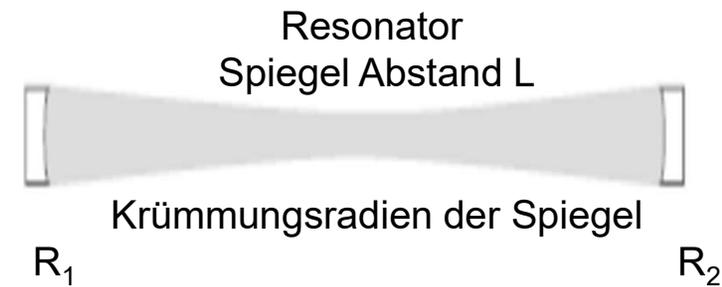
$$H_0(x) = 1$$

$$H_1(x) = 2x$$

$$H_2(x) = (2x)^2 - 2 = 4x^2 - 2$$

$$H_3(x) = (2x)^3 - 6(2x) = 8x^3 - 12x$$

w₀ und w(z) Strahlradien, R(z) Krümmungsradius der Wellenfront



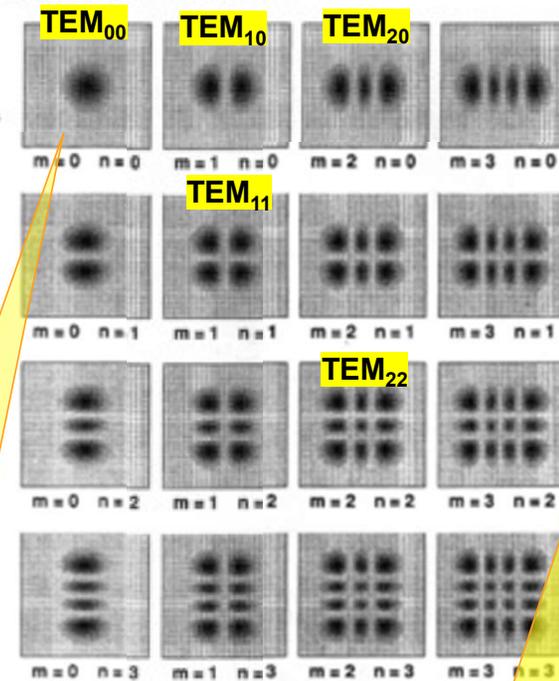
5. Das sind die Transversalen Moden TEM_{nm}

Neben dem Gauss'schen Strahl TEM_{00} gibt es in x-y-Richtung noch weitere Resonanzen, die sog. Höheren TEM_{mn} Moden (Transversale Elektromagnetische Moden)

Mit $n = m = 0$ erhalten wir unseren bereits bekannten Gauss'schen Strahl, bzw auch TEM_{00} Mode genannt.

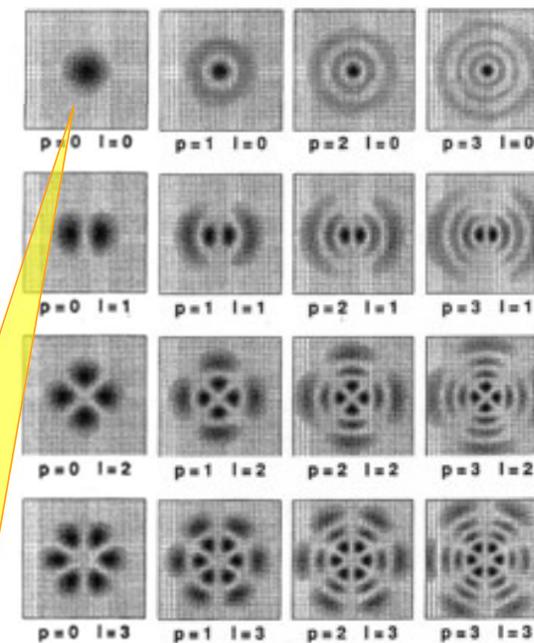
Es gibt aber auch höhere Moden $m, n \geq 0$, die auch in der Praxis beobachtet werden können.

Laterale Modenstruktur in kartesischer Symmetrie: Hermite'sche Funktionen

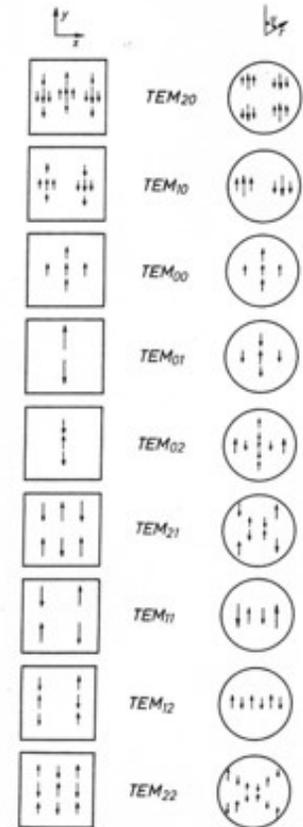


Quadratische Spiegel

Laterale Modenstruktur in polarer Symmetrie: Laguerre'sche Funktionen



Runde Spiegel



Orientierung der E-Feld Vektoren

TEM_{00} Mode = Gauss'scher Strahl

TEM_{00} Mode = Gauss'scher Strahl

Meistens will man mit TEM_{00} arbeiten. TEM_{00} wird auch Gauss'scher Strahl genannt

Wir setzen die Lösung für TEM_{00} nochmal zusammen

$$E(r,z,t) = E_0 * X(x,z) * Y(y,z) * e^{ikz} * e^{-i\omega t}$$

$$X_m(x,z) = \sqrt{\frac{w_0}{w(z)}} H_m\left(\frac{\sqrt{2}x}{w(z)}\right) \exp\left(-\frac{x^2}{w^2(z)} - i\frac{kx^2}{2R(z)} + i\frac{2m+1}{2}\zeta(z)\right)$$

$$Y_n(y,z) = \sqrt{\frac{w_0}{w(z)}} H_n\left(\frac{\sqrt{2}y}{w(z)}\right) \exp\left(-\frac{y^2}{w^2(z)} - i\frac{ky^2}{2R(z)} + i\frac{2n+1}{2}\zeta(z)\right)$$

$$H_0(x) = 1$$

$$H_1(x) = 2x$$

$$H_2(x) = (2x)^2 - 2 = 4x^2 - 2$$

$$H_3(x) = (2x)^3 - 6(2x) = 8x^3 - 12x$$

TEM_{00} Mode ergibt sich durch Einsetzen $n = m = 0$ bzw. $H_m(x) = H_n(x) = 1$

Lösungen: Der Gauss'sche Strahl,

Und erhalten
(nach längeren Rechnungen)

$$E(r,z,t) = E_0(0) \frac{w_0}{w(z)} e^{-\left(\frac{r}{w(z)}\right)^2} e^{j(\omega t - kz + \varphi_L - \varphi_T)}$$

mit

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}, \quad w(z) = w_0 \cdot \sqrt{1 + \frac{z^2}{z_R^2}}, \quad z_R = \pi w_0^2 / \lambda$$

$$\varphi_L = \arctan(z/z_R), \quad \varphi_T = \frac{kr^2}{2\rho(z)}, \quad \rho(z) = z + \frac{z_R^2}{z}$$

➔ Oder für die Intensität mit $I \sim \langle E^2 \rangle$: $I(r,z,t) \sim I_0 \frac{w_0^2}{w(z)^2} e^{-\left(\frac{2r}{w(z)}\right)^2} \langle e^{2j(\omega t - kz - \varphi_L - \varphi_T)} \rangle$

TEM₀₀ Mode hat ein Gauss-Profil als Intensitätsverteilung (daher der Name Gauss'scher Strahl)

$$I(r) \sim E(r)^2$$

Definitionen

Strahlradius w

ist der Radius, bei dem die Intensität (in r-Richtung auf $1/e^2$ abgefallen ist.

Dort $I/I_0 = 1/e^2 = 13.5\%$

$$e = 2.72$$

$$e^{-2} = 1/e^2 = 0.135$$

Strahltaile (waist) w_0

Ist der Strahlradius an der schmalsten Stelle (in z-Richtung)

Rayleigh Länge z_R

Strahl weitet sich in z-Richtung auf. Bei z_R ist der Strahlradius $\sqrt{2}$ größer als bei w_0

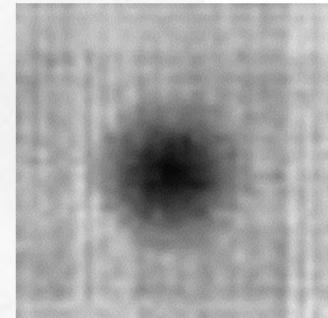
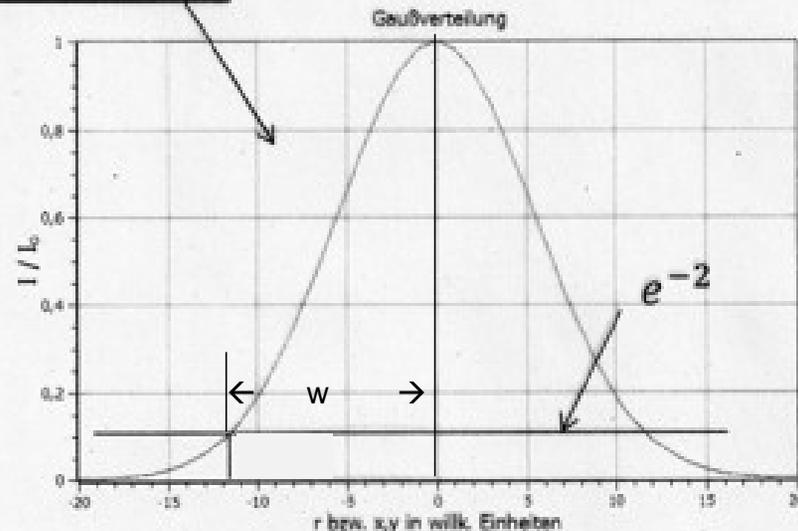
Intensitätsverteilung: Gaußverteilung!

$$I \sim \langle E^2 \rangle: I(r, z, t) \sim I_0 \frac{w_0^2}{w(z)^2} e^{-\frac{2r^2}{w(z)^2}} \langle e^{2j(\omega t - kz - \phi_L - \phi_T)} \rangle$$

$$I = I_0 e^{-\frac{2r^2}{w^2}}$$

$$w(z) = \sqrt{1 + z^2/z_R^2}$$

$$z_R = \frac{\pi w_0^2}{\lambda}$$



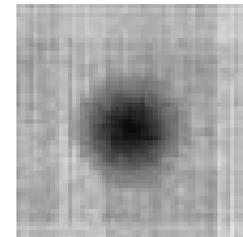
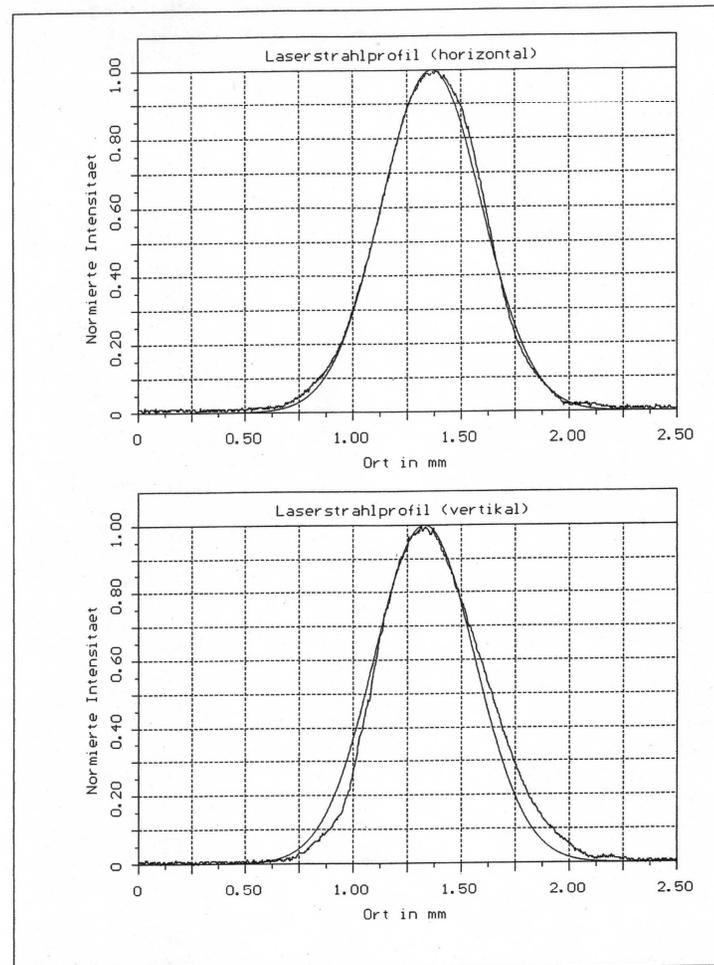
Gemessene (x,y) Intensitäts-Profile eines HeNe-Lasers

Ein He-Ne-Laser zeigt bei korrekter Justierung einen sog. Gauss'schen Strahl (auch TEM₀₀ Mode genannt)

- F: Warum heißt das Gauss'scher Strahl?
- A: Weil die Intensitätsverteilung (in der x, y Ebene) durch ein Gauss-Profil beschrieben wird.

$$f_{\text{Gauss}}(\mathbf{x}) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

$$I = I_0 e^{-\frac{2r^2}{w^2}}$$

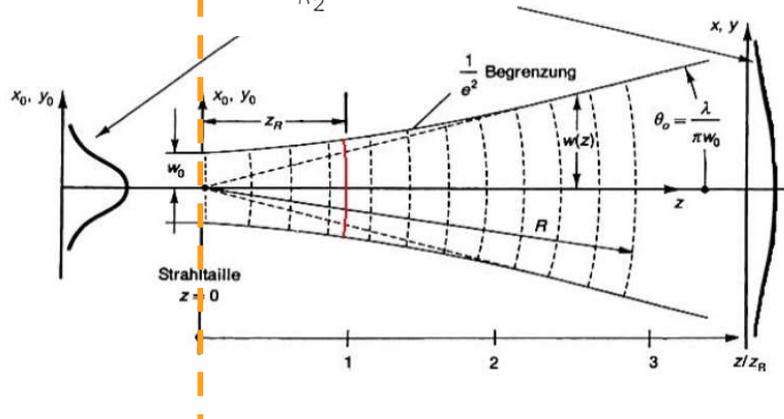
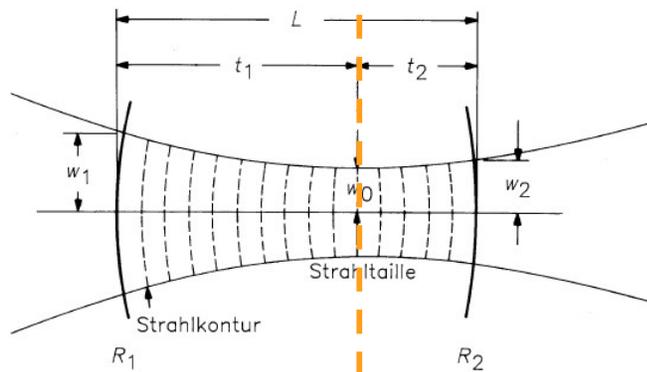


Für Gauss'sche Strahlen innerhalb und außerhalb des Resonators kann man folgende Gleichungen ableiten

Abkürzung: Resonator Parameter $g_{1,2} = 1 - \frac{L}{R_{1,2}}$

mit L = Spiegelabstand

R_1, R_2 = Krümmungsradien der Spiegel 1,2



Formeln für die Strahlgeometrie im Gauß-Mode

Strahltaile: $w_0 = \left(\frac{L \lambda}{\pi} \right)^{1/2} \left(\frac{g_1 g_2 (1 - g_1 g_2)}{(g_1 + g_2 - 2g_1 g_2)^2} \right)^{1/4}$

Strahlradien: (definiert durch Intensitätsabfall auf $1/e^2$)

$$w_1 = \left(\frac{L \lambda}{\pi} \right)^{1/2} \left(\frac{g_2 \cdot 1}{g_1 (1 - g_1 g_2)} \right)^{1/4}$$

$$w_2 = \sqrt{\frac{g_1}{g_2}} \cdot w_1$$

Tailenlage:

$$t_1 = \frac{g_2 (1 - g_1) L}{g_1 + g_2 - 2g_1 g_2}, \quad t_2 = L - t_1$$

Divergenzwinkel:

$$\Theta = \frac{\lambda}{\pi w_0}, \quad \text{tg}(\Theta) = \frac{\Delta R}{s}$$

Rayleighlänge:

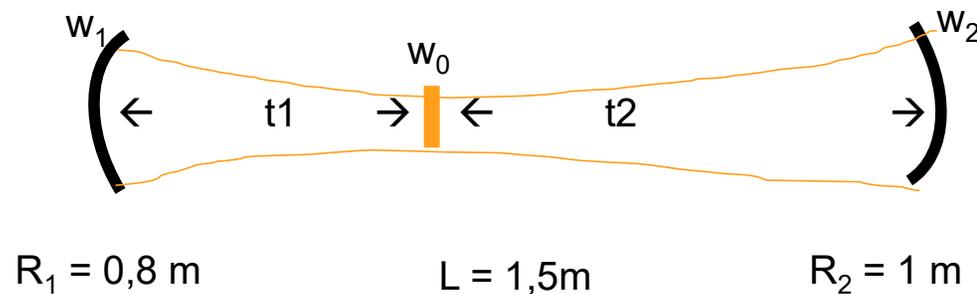
$$z_r = \frac{w_0^2 \cdot \pi}{\lambda}$$

Def. z_R :
Strahlradius Faktor
 $\sqrt{2}$ größer als w_0

Strahlaufweitung:

$$w(z) = w_0 \cdot \sqrt{1 + \frac{z^2}{z_r^2}}$$

31.)
 Wie groß ist für einen He/Ne - Laser (Resonatorspiegel $R_1 = 800$ mm und $R_2 = 1000$ mm, Resonatorlänge 1,5 m) der Strahltaillenradius, und wo liegt die Strahltaille?
 Geben Sie zusätzlich die Laserstrahlradien am Ort der Spiegel an.
 Zeichnen Sie eine Skizze der Strahlgeometrie.



$$\lambda = 633 \text{ nm}$$

$$g_1 = 1 - L/R_1 = 1 - 1,5 / 0,8 = -0,875$$

$$g_2 = 1 - L/R_2 = 1 - 1,5 / 1 = -0,5$$

$$g_1 * g_2 = 0,4375$$

Strahltaillen Radius:

$$w_0 = \left(\frac{L \lambda}{\pi} \right)^{1/2} \left(\frac{g_1 g_2 (1 - g_1 g_2)}{(g_1 + g_2 - 2g_1 g_2)^2} \right)^{1/4} = 0,0005499 * 0,469 = 0,258 \text{ mm}$$

Strahltaillen Lage:

$$t_1 = \frac{g_2 (1 - g_1) L}{g_1 + g_2 - 2g_1 g_2} = -1,406 / -2,25 = 0,625 \text{ m}, \quad t_2 = L - t_1 = 0,875 \text{ m}$$

Strahlradius auf Spiegeln

$$w_1 = \left(\frac{L \lambda}{\pi} \right)^{1/2} \left(\frac{g_2}{g_1} \cdot \frac{1}{1 - g_1 g_2} \right)^{1/4}$$

$$w_2 = \sqrt{\frac{g_1}{g_2}} \cdot w_1$$

w1	Part1	0,00054977
	Part2	1,00394485
		0,55193611 mm
w2		0,73014284 mm

Überblick verschiedene (2-Spiegel) Resonatortypen

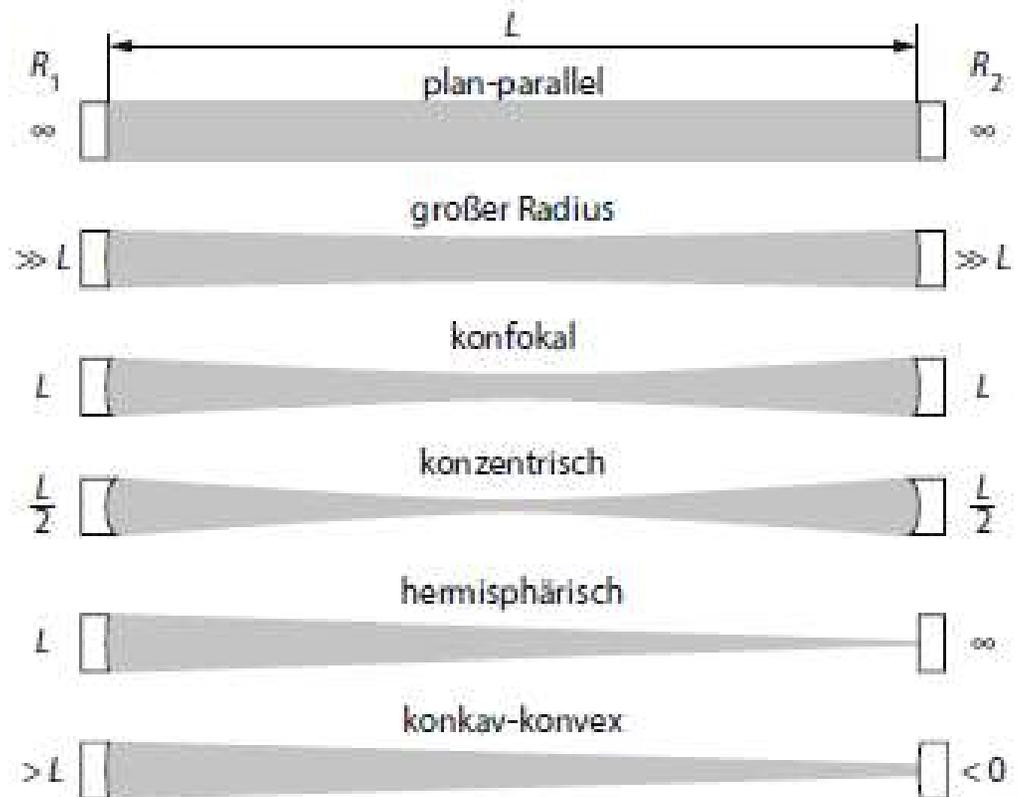
Abb. 13.9 Verschiedene Konfigurationen für Resonatoren

Plan-Parallel

- Strahlen können als ebene Welle beschrieben werden
- Großes Volumen des aktiven Mediums kann ausgenutzt werden
- **In der Praxis schwierig zu justieren (Spiegel müssen exakt parallel stehen)**
- **Beugungsverluste**
- **Keine Gauss'schen Strahlen**

Mindestens ein Hohlspiegel

- Strahlen als Kugelwelle beschrieben
- Haben einen Fokusbereich
- **Leichter zu justieren**
- **Nahezu keine Beugungsverluste**
- **Gauss'sche Strahlen**



Laserstrahlgeometrien bei verschiedenen Resonatortypen

($L = 1 \text{ m}$; $\lambda = 632,8 \text{ nm}$)

Beispielwerte
für
verschiedene
Resonatortypen

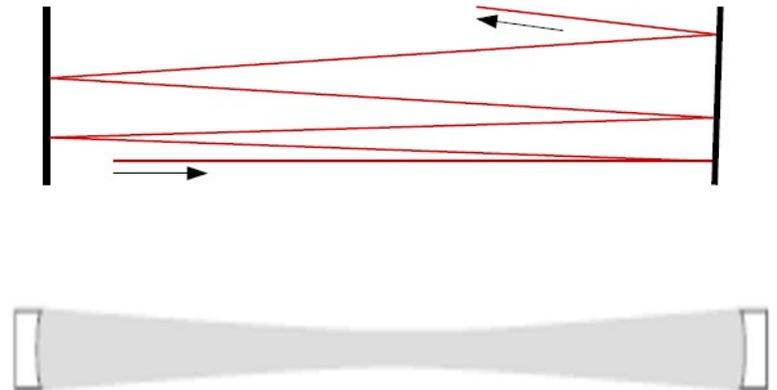
	Planar	Konkav*	Fokal	Konfokal	Sphärisch
w_0 / mm	∞	0,75	0,42	0,32	0,0032
w_1 / mm	wie w_0	0,75	0,48	0,45	31,7
w_2 / mm	wie w_0	0,78	0,48	0,45	31,7
t_1 / m	0,5	0,155	0,5	0,5	0,5
t_2 / m	0,5	0,845	0,5	0,5	0,5
$\Theta / 10^{-4} \text{ rad}$	0	2,69	4,82	6,35	635
$\Delta R_{100} / \text{mm}$	0	26,9	48,2	63,5	6347
g_1	1	0,98	0,5	0	-1
g_2	1	0,90	0,5	0	-1
$g_1 * g_2$	1	0,882	0,25	0	1

* $R_1 = 50 \text{ m}$; $R_2 = 10 \text{ m}$.

Planspiegel
Resonatoren
haben streng
genommen keine
Gauss Strahlen

Wann ist ein Resonator stabil und wann instabil und was kann man mit einem instabilen Resonator anfangen?

- **Wann ist ein Resonator stabil?**
Anschaulich dann, wenn der Strahl den Resonator nicht verlässt.
- Beispiel für einen instabilen Resonator. Einer der Spiegel steht schief und dadurch verlassen die Photonen den Resonator schon nach wenigen Umläufen → hohe Verluste
- Gekrümmte Spiegel (konkav) fokussieren ins Resonator-Innere und verbessern damit die Stabilität → geringe Verluste



- Mit den folgenden Größen:
 r_1, r_2 = Krümmungsradien Spiegel 1, 2 ($r > 0$ wenn Spiegel konkav, $r < 0$ wenn konvex)
 L = Spiegelabstand (Resonator Länge) und $g_1 = 1 - L/R_1$ und $g_2 = 1 - L/R_2$

• Ist ein Resonator dann stabil, wenn

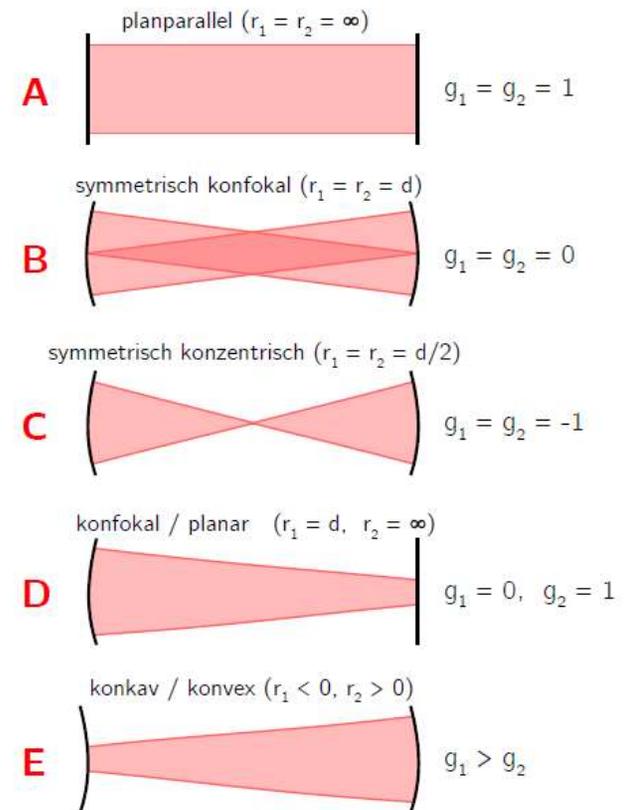
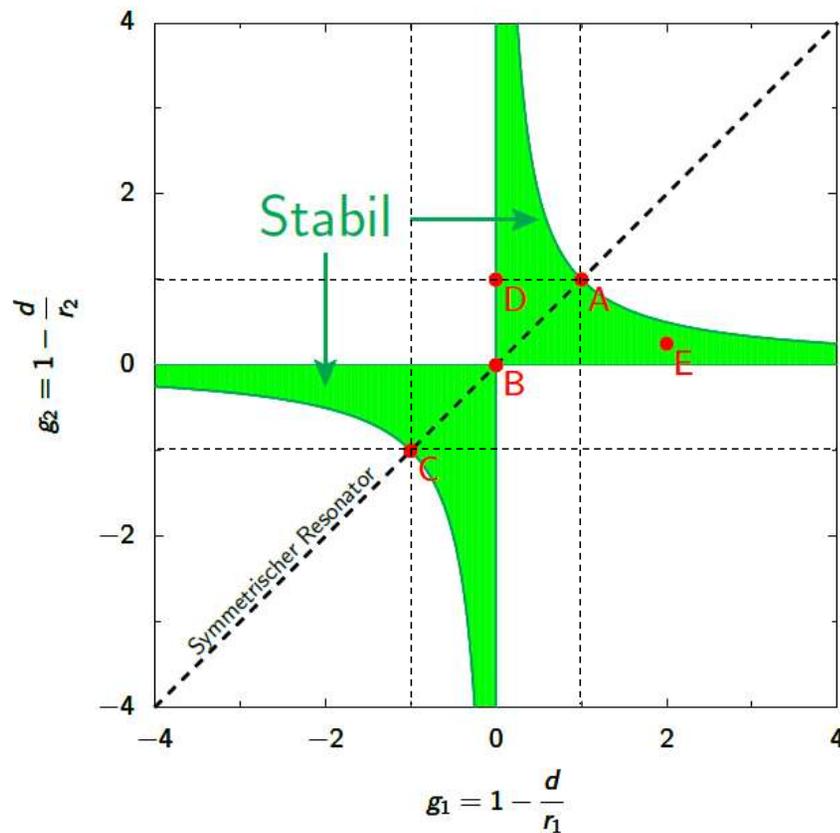
- Beispiel: $R_1 = 80\text{cm}$, $R_2 = 100\text{cm}$, $L = 160\text{cm}$
 $g_1 = 1 - 160 / 80 = 1 - 2 = -1$, $g_2 = 1 - 160 / 100 = -0,6$
 $g_1 * g_2 = -1 * -0,6 = 0,6$ → Resonator wäre stabil

$$0 \leq g_1 g_2 \leq 1$$

$$w_1 = \left(\frac{L \lambda}{\pi} \right)^{1/2} \left(\frac{g_2}{g_1} \cdot \frac{1}{1 - g_1 g_2} \right)^{1/4}$$

Math.: w_1 soll reell sein, d.h. das Argument der Wurzel ≥ 0

Stabilitätsbereich optischer Resonatoren, bzw. grafische Darstellung von $0 \leq g_1 g_2 \leq 1$



Herleitung des Stabilitätskriteriums durch Strahl-Matrizen

Laser Beams and Resonators

H. KOGELNIK AND T. LI

October 1966 / Vol. 5, No. 10 / APPLIED OPTICS 1551

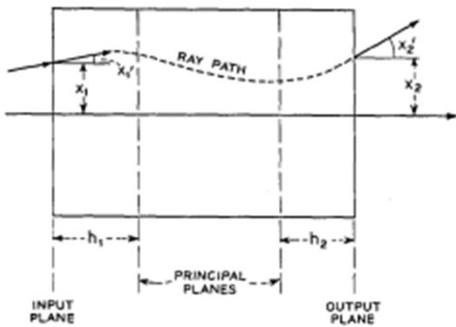
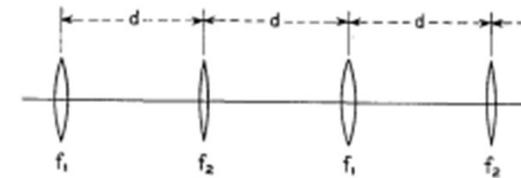


Fig. 1. Reference planes of an optical system. A typical ray path is indicated.

$$\begin{vmatrix} x_2 \\ x_2' \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} A & B \\ C & D \end{vmatrix} \begin{vmatrix} x_1 \\ x_1' \end{vmatrix}$$

RAY TRANSFER MATRICES OF SIX ELEMENTARY OPTICAL STRUCTURE

NO	OPTICAL SYSTEM	RAY TRANSFER MATRIX
1		$\begin{vmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{vmatrix}$
2		$0 < \left(1 - \frac{d}{R_1}\right) \left(1 - \frac{d}{R_2}\right) < 1$ $\begin{vmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{vmatrix}$
3		$\begin{vmatrix} 1 & d \\ -\frac{1}{f} & 1 - \frac{d}{f} \end{vmatrix}$



$$R_1 = 2f_1 \quad R_2 = 2f_2$$

Fig. 3. Spherical-mirror resonator and the equivalent sequence of lenses.

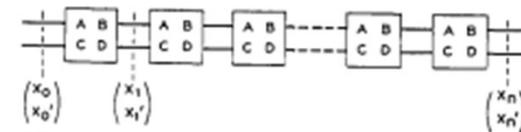


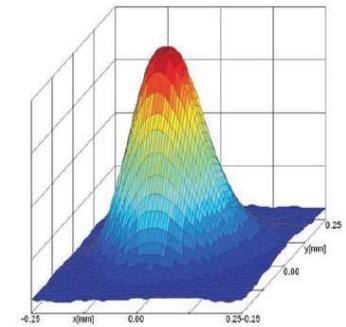
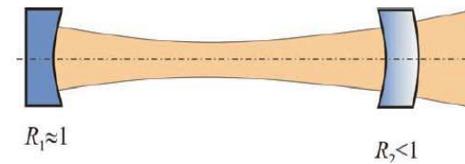
Fig. 2. Periodic sequence of identical systems, each characterized by its ABCD matrix.

$$0 < \left(1 - \frac{d}{R_1}\right) \left(1 - \frac{d}{R_2}\right) < 1$$

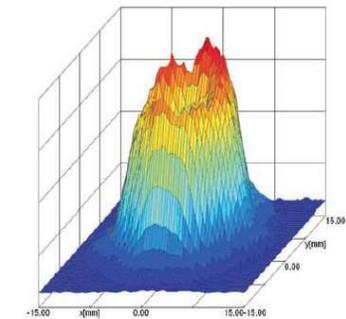
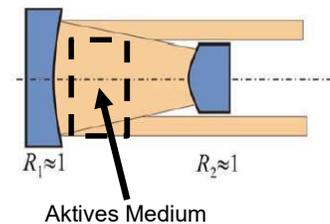
Stabile versus instabile Resonatoren

- **Resonator stabil:** $0 \leq g_1 g_2 \leq 1$,
 - Gauß Strahl
 - geringe Beugungsverluste im Resonator
- **Resonator instabil** wenn: $g_1 g_2 > 1$ oder $g_1 g_2 < 0$
 - Dann existiert KEIN Gaußstrahl als Grundmode
 - Hohe Beugungsverluste
- **Trotzdem können auch instabile Resonatoren vorteilhaft eingesetzt werden.**
 - Typischerweise für Lasermedien mit sehr hoher Verstärkung und großem Querschnitt des aktiven Mediums
 - z.B. bei Lasern mit großen Verstärkungsfaktoren
 - Excimer-Lasern oder
 - CO₂-Lasern
 - Geeignet für sehr hohe Laserleistungen, da Spiegel nur auf Reflektion ausgelegt sein müssen.

Stabiler Resonator



Instabiler Resonator



b)

Bild 2.11 Resonator Grundformen und dazugehörige Intensitätsverteilungen. a) stabiler Resonator, b) instabiler Resonator

In der Praxis werden i.d.R. programmgestützte Werkzeuge zum Laser- und Resonator Design genutzt



The unique combination of simulation tools for LASer Cavity Analysis and Design

During the last 15 years **LASCAD™** has become industry-leading software for LASer Cavity Analysis and Design. The feedback from a large community of users has helped us gather experience for improving laser resonator design.

To optimize laser resonator design, **LASCAD™** provides a unique combination of simulation tools:

- **Thermal and Structural Finite Element Analysis (FEA)** of thermal effects in laser crystals
- **ABCD Gaussian Beam Propagation Code** taking into account thermal lensing, gain guiding, etc.
- **Dynamic Analysis of Multimode and Q-switched operation (DMA)** analyzing the dynamic, 3D behavior of laser beams
- **3D Physical Optics Beam Propagation Code (BPM)** including diffraction, gain dynamics, etc.

https://www.las-cad.com/files/lascad_brochure.pdf

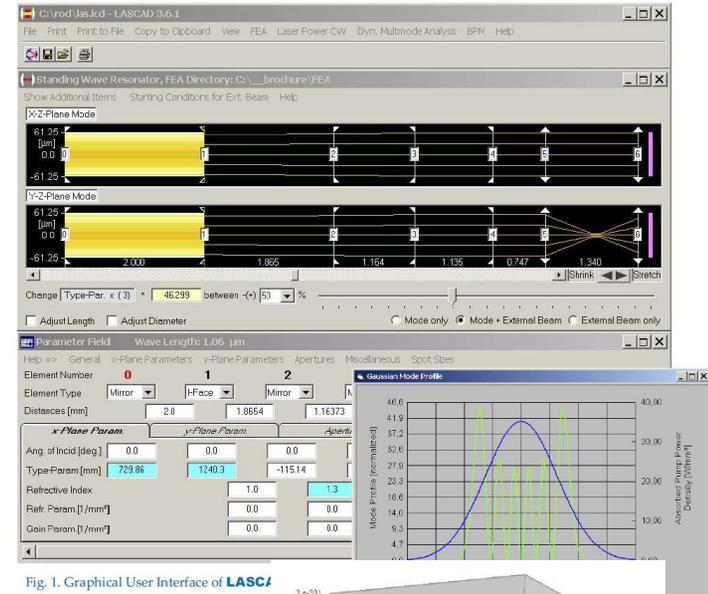


Fig. 1. Graphical User Interface of LASCAD

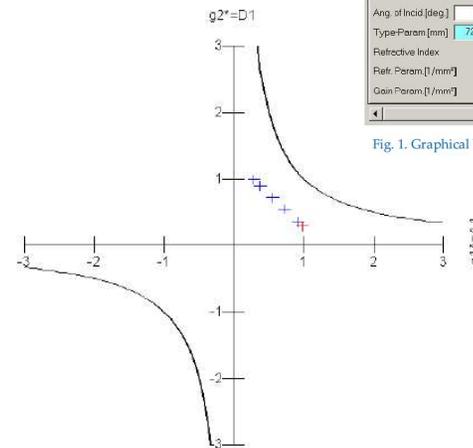


Fig. 5. Stability Diagram

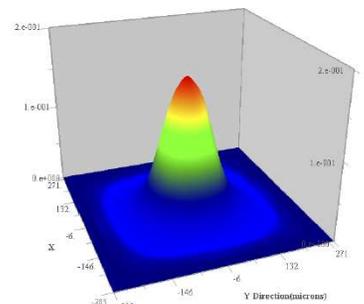


Fig. 9. BPM Beam Profile

Übungsaufgaben

Aufgaben „Linienbreiten“, „Resonator“

24.) E2.5

Berechnen Sie die Dopplerverbreiterung im He-Ne-Laser (bei 100 °C) und vergleichen Sie das Ergebnis mit der gemessenen Linienbreite von 1,5 GHz.

[Lösung: 1,4 GHz] (++)

47.) Ein Argon-Laser mit 3000 K Gastemperatur besitzt die Wellenlänge 488 nm. Die spektrale Linienbreite ist durch den Doppler-Effekt verursacht. Die Molmasse von Argon beträgt 39,95 g/mol. 1 Mol Gas besitzt genau $6,023 \cdot 10^{23}$ Atome (Loschmidtsche Zahl). Wie groß muß die Resonatorlänge sein, damit höchstens drei longitudinale Moden existieren? Welche Voraussetzung muß noch erfüllt sein, damit sie anschwingen?

[Lösung: ~11,8 cm] (+) (Wert korrigiert 06.12.22)

28.) E13.1

Welche Längenänderungen dürfen bei einem 50 cm langen He-Ne-Laser auftreten, damit die Frequenzschwankung höchstens 1 MHz beträgt?

[Lösung: 1 nm] (+)

Übungsaufgaben „Resonator“

47c.) Wie hoch sind für einen Laser-Resonators der Länge von $L = 0,5$ m und einem Auskoppelspiegel mit einem Reflexionsgrad von $R = 95$ %

- a) der freie Spektralbereich
- b) die Finesse
- c) die Linienbreite der longitudinalen Resonatormoden?

[Lösung: 300 MHz; 61,2; 4,9 MHz] (+)

28.) E13.1

Welche Längenänderungen dürfen bei einem 50 cm langen He-Ne-Laser auftreten, damit die Frequenzschwankung höchstens 1 MHz beträgt?

[Lösung: 1 nm] (+)

Aufgaben „Pulse“

49.) E17.1

Ein Festkörperlaser liefert normale Pulse von 0,5 ms Dauer mit 10 mJ.

- Wie groß ist die Pulsleistung?
- Wie steigt die Leistung im Q-switch-Betrieb an (Pulsdauer 5 ns)?
- Wie groß ist die mittlere Leistung bei einer Pulsfolgefrequenz von 100 Hz?

50.) E17.2

Schätzen Sie die minimale Pulsdauer im Q-switch-Betrieb zweier Festkörperlaser mit Resonatoren von 1 m und 0,3 m Länge ab.

9.5 Ein Nd-Festkörperlaser wird mit einem Kondensator von 10 μF und einer Spannung von 1 kV betrieben. Der Wirkungsgrad beträgt 1 %.

$$W = \frac{1}{2} C U^2$$

- Wie hoch sind Pulsenergie und Pulsleistung für normale Pulse von 0,1 ms Dauer?
- Berechnen Sie die mittlere Leistung bei einer Pulsfolgefrequenz von 10 Hz.

Aufgaben „Resonator2

35.) E12.5

Ein He-Ne-Laser von 1 m Länge besitzt am Ausgangsspiegel einen Strahlradius von $w = 0,6$ mm. Der Resonator besteht aus zwei Spiegeln mit gleichen Krümmungsradien. Wie groß ist die Strahltaile?

36.) Im Laserlabor kann man einen Resonator mit zwei Spiegeln der Krümmungsradien $R_1 = 700$ mm und $R_2 = 1000$ mm aufbauen. Schwingt ein Laser bei den folgenden Spiegelabständen L an?

Antworten Sie nicht nur mit ja/nein, sondern geben Sie die Rechnung dazu an!

37.) E13.3

Wie groß ist die Divergenz eines He-Ne-Lasers (TEM_{00} -Mode) mit einem Strahltaillendurchmesser von 0,7 mm? Welcher Strahldurchmesser tritt in einem Abstand von 10 m vom Laser auf?

39.) E13.6

Berechnen Sie bei einem 1 m langen He-Ne-Laser mit fokalem Resonator die Strahldurchmesser in der Mitte und am Ausgang des Lasers ($\lambda = 632,8$ nm).

Vielen Dank – bis nächste
Woche