

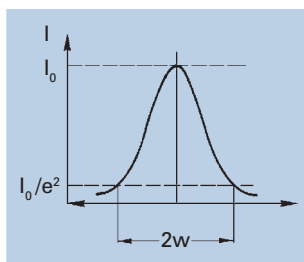
## Fokussierung und Aufweitung von Laserstrahlung

### Strahlprofil

Laserstrahlung besteht wie jedes Strahlungsfeld aus einem oder mehreren Strahlungsmoden. In der Lasertechnik ist die Entwicklung des Strahlungsfeldes nach transversalen elektromagnetischen Moden, den sogenannten TE-Moden (TEM) gebräuchlich, weil die meisten Laser in nur einem dieser Moden emittieren. Diese TE-Moden werden durch zwei Indizes unterschieden, die angeben, wie viele Nullstellen das elektrische Feld in x- und y-Richtung aufweist, wobei z die Ausbreitungsrichtung der Strahlung ist. Ein TEM<sub>mn</sub> hat also m Nullstellen in x-Richtung und n Nullstellen in y-Richtung.

Strahlung im Modus TEM<sub>00</sub> hat keine Nullstellen in transversaler Richtung. Dieser Strahlungsmodus ist beugungsbegrenzt; das bedeutet, dass bei ihm das Produkt aus Strahldivergenz und minimalem Strahlradius längs der Ausbreitungsrichtung konstant ist und - im Vergleich zu jedem anderen Strahlungsmodus - den minimal möglichen Wert annimmt. Deshalb werden Laser nach Möglichkeit so konstruiert, dass sie Strahlung im TEM<sub>00</sub> emittieren. Die meisten Gaslaser und viele Festkörperlaser niedriger Leistung (z.B. HeNe- und Ionenlaser) emittieren diesen Strahlungsmodus, Diodenlaser häufig in asymmetrischer (astigmatischer) Form; dagegen strahlen Hochleistungslaser, speziell Materialbearbeitungslaser, im allgemeinen höhere Strahlungsmoden oder eine Überlagerung solcher Moden aus. Der TEM<sub>00</sub> hat also erhebliche Bedeutung für die Praxis, wird aber häufig auch als Näherung für höhere Strahlungsmoden verwendet.

Die Intensitätsverteilung des TEM<sub>00</sub> wird durch eine Gaußverteilung beschrieben (gaußscher Strahl):



Strahlprofil

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

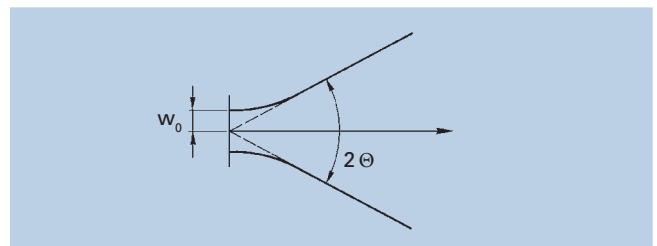
Dabei sind  $I_0$  die Intensität in der optischen Achse, also die Maximalintensität, und  $r$  der Abstand von der optischen Achse. Als Strahlradius  $w$  (Strahldurchmesser:  $2w$ ) wird der Abstand von der optischen Achse definiert, bei dem die Intensität auf  $1/e^2$  der Maximalintensität abgefallen ist.

Zur Berechnung der Ausbreitung und Formung gaußscher Strahlen eignet sich besonders unser Optik-Design-Programm **WinLens™** (siehe Kapitel Optiksoftware). Eine kompakte Behandlung der Ausbreitung und Formung von Laserstrahlung findet sich in H. Kogelnik, T. Li: Appl. Optics 5 (1966) 1550-1567.

### Strahlausbreitung

Jeder gaußsche Strahl hat entlang seiner Ausbreitungsrichtung eine Strahltaille, in der sein Strahlradius den Minimalwert  $w_0$  annimmt; die Strahltaille kann eine virtuelle Strahltaille sein, sich also z.B. innerhalb oder jenseits der Strahlungsquelle befinden. Beiderseits der Strahltaille wächst der Strahlradius mit zunehmendem Abstand  $z$  an:

$$w(z) = w_0 \cdot \sqrt{1 + \left( \frac{\lambda \cdot z}{\pi \cdot w_0^2} \right)^2} = w_0 \cdot \sqrt{1 + \left( \frac{\Theta \cdot z}{w_0} \right)^2}$$



Strahldivergenz

Dabei ist  $\lambda$  die Laserwellenlänge,  $z$  der Abstand von der Strahltaille und  $\Theta$  die Strahldivergenz, die durch

$$\Theta = \frac{\lambda}{\pi \cdot w_0}$$

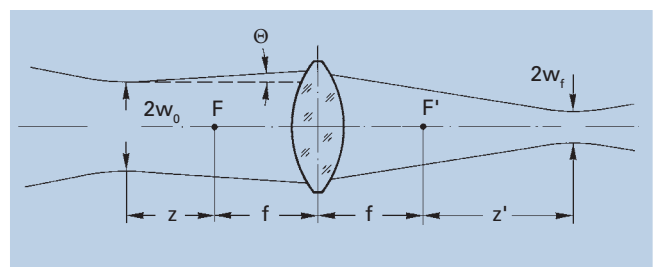
gegeben ist. In der Nähe der Strahltaille verhält sich der gaußsche Strahl also näherungsweise wie ein paralleles Strahlenbündel (mit möglicherweise geringem Querschnitt), weit entfernt von der Strahltaille wie eine sphärische Welle (mit möglicherweise geringem Öffnungswinkel); der Übergang zwischen den beiden Bereichen erfolgt etwa im Abstand  $z_R$  (Rayleigh-Länge):

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

Für größere Abstände gilt in guter Näherung:

$$w(z) = \Theta \cdot z$$

### Strahlfokussierung



Wird ein TEM<sub>00</sub>-Strahl durch eine Linse geführt, bildet sich eine neue (reelle oder virtuelle) Strahltaille am Ort z' aus:

$$z' = \frac{z \cdot f^2}{z^2 + z_R^2}$$

Spezialfälle:

1. Liegt die Strahltaille des einfallenden Strahls im eingangsseitigen Brennpunkt der Linse (z=0), so liegt die neue Strahltaille im bildseitigen Brennpunkt der Linse (z'=0). Dieser Fall zeigt den Unterschied zwischen geometrischer und beugungsbegrenzter Optik am deutlichsten: In der geometrischen Optik wird in dieser Situation ein paralleles Strahlenbündel erzeugt, in der beugungsbegrenzten Optik nur die bestmögliche Annäherung eines gaußschen Strahls an einen Parallelstrahl.
2. Im Grenzfall z<sub>R</sub> << z, wobei z<sub>R</sub> die Rayleigh-Länge vor der Linse ist, ist z' = f<sup>2</sup>/z, es gilt dann also das Abbildungsgesetz der geometrischen Optik. Dieser Fall liegt vor, wenn ein relativ stark fokussierter Strahl abgebildet wird, dessen Strahltaille vom Brennpunkt der Linse deutlich entfernt ist.
3. Im Grenzfall z<sub>R</sub> >> z ist z' = z · f<sup>2</sup>/z<sub>R</sub><sup>2</sup>. Dieser Fall ist häufig realisiert, wenn ein gut kollimierter Laserstrahl durch eine Linse fokussiert wird.
4. Ist zusätzlich zu z<sub>R</sub> >> z noch z<sub>R</sub> >> f, so gilt z' = 0. Wird also ein gut kollimierter Laserstrahl durch eine kurzbrennweitige Linse fokussiert, so liegt die erzeugte Strahltaille wieder im bildseitigen Brennpunkt der Linse.

Der Radius w<sub>f</sub> der bildseitigen Strahltaille kann mit Hilfe der Formel

$$w_f^2 = w_0^2 \cdot \frac{z'}{z} = w_0^2 \cdot \frac{f^2}{z^2 + z_R^2}$$

berechnet werden. Für den in der Praxis besonders wichtigen 4. Fall gilt näherungsweise:

$$w_f = \frac{\lambda \cdot f}{\pi \cdot w_0}$$

### Kollimierung von Laserstrahlen

Laserstrahlen werden kollimiert, um möglichst ebene Wellen zu erzeugen oder um den Laserstrahl bei möglichst konstantem Querschnitt über große Entfernungen zu transportieren. Dies wird erreicht, indem mittels eines optischen Systems der Strahltaillenradius vergrößert und eine reelle Strahltaille erzeugt wird.

Grundsätzlich ist dies nach den Formeln zur Strahlfokussierung mit einer einzelnen Linse möglich. In den meisten Fällen führt dieses Verfahren aber zu unpraktikablen

Linsenbrennweiten und Strahltaillenlagen sowie zu extrem hohen Anforderungen an die Toleranz der Strahltaillenlage. Daher werden in der Praxis (wie auch in der klassischen Optik) überwiegend Teleskope (zwei Linsen mit einem Abstand, der der Summe ihrer Brennweiten entspricht) zur Kollimierung verwendet.

Die Strahlparameter des austretenden Laserstrahls können durch zweimalige Anwendung der obigen Formeln zur Fokussierung von Laserstrahlung ermittelt werden. Meist genügt aber die Kenntnis des Aufweitungsfaktors des Teleskops, der durch

$$A = \frac{f_1}{f_2}$$

gegeben ist, wobei f<sub>2</sub> die ausgangsseitige und f<sub>1</sub> die eingangsseitige Linsenbrennweite ist. In den praktisch bedeutsamen Fällen "3" und "4" wird die Strahltaille um diesen Faktor vergrößert und damit die Divergenz entsprechend verringert. Variationen von Strahltaillenlage und -radius des einfallenden Strahls können durch geringfügige Veränderung des Linsenabstands im Teleskop kompensiert werden.

### Schärfentiefe

Die Schärfentiefe Δz ist der Bereich um die Strahltaillenlage, innerhalb dessen sich der Strahltaillenradius innerhalb eines definierten Bereichs bewegt:

$$\Delta z = \pm \frac{\pi \cdot w_f^2}{\lambda} \cdot \sqrt{\left(\frac{w}{w_f}\right)^2 - 1}$$

wobei w/w<sub>f</sub> die tolerierbare Änderung des Strahltaillenradius ist. Ist w >> w<sub>f</sub>, so gilt näherungsweise:

$$\Delta z = \pm \frac{\pi \cdot w \cdot w_f}{\lambda}$$

### Höhere Moden

Während sich für einen gaußschen Strahl (TEM<sub>00</sub>) das Produkt aus Strahltaillenradius und Divergenz zu

$$w_0 \cdot \Theta = \frac{\lambda}{\pi}$$

ergibt, lauten die entsprechenden Größen für einen TEM<sub>mn</sub>

$$w_{0,x} \cdot \Theta_x = \frac{\lambda}{\pi} \cdot (2 \cdot m + 1) \quad \text{und} \quad w_{0,y} \cdot \Theta_y = \frac{\lambda}{\pi} \cdot (2 \cdot n + 1)$$

Das Radius-Divergenz-Produkt ist also in jedem Fall größer als bei einem TEM<sub>00</sub> und kann in x- und y-Richtung unterschiedlich sein. Daraus ergibt sich, dass höhere Moden unter gleichen Verhältnissen schlechter fokussierbar und kollimierbar sind als gaußsche Strahlen.