



Normativer Rahmen der Laserstrahlvermessung

Für die Beschreibung von Laserstrahlen gibt es historisch bedingt viele unterschiedliche Ansätze und Definitionen. Sollen Daten zwischen verschiedenen Akteuren ausgetauscht werden, ist eine Verständigung auf einheitliche Definitionen jedoch essentiell. Um eine Standardisierung für die Kenngrößen von Laserstrahlung zu schaffen, wurden nationale und internationale Normen definiert. Die Normung durch DIN und ISO bildet somit den formalen Rahmen für die reproduzierbare Vermessung von Laserstrahlen nach international anerkannten Regeln.

Durch die Normen werden Standards in der Interpretation von Messergebnissen definiert. PRIMES ist als führender und unabhängiger Messmittel-Hersteller maßgeblich an der Definition der Normen beteiligt. Die relevanten DIN-Normen für die Vermessung und Charakterisierung von Laserstrahlen sind: 11145, 11146, 11554, 11670 und 13694.

Diese Normen stellen die Grundlagen für Messungen mit höchster Genauigkeit dar. Alle PRIMES Messungen beruhen auf diesen Normen. Im Folgenden sind die wichtigsten Formeln für die Interpretation der Messergebnisse und Kenngrößen zusammengefasst.

Zentrale Formeln zur Strahlvermessung und -bewertung

Strahlparameterprodukt SPP

Das Strahlparameterprodukt (englisch beam parameter product, BPP) ist eine physikalische Kenngröße, die die Strahlqualität und mithin die Fokussierbarkeit eines Laserstrahls beschreibt.

$$\frac{\Theta \cdot d_0}{4} = \frac{\Theta \cdot r_0}{2} = \frac{\lambda \cdot M^2}{\pi}$$

Θ = Voller Strahldivergenzwinkel
 d_0 = Durchmesser der Strahltaile
 r_0 = Radius der Strahltaile
 M^2 = Beugungsmaßzahl
 λ = Wellenlänge

Beugungsmaßzahl M^2

Die Beugungsmaßzahl M^2 ist eine dimensionslose Größe, die einen Laserstrahl charakterisiert: je größer M^2 , umso schlechter ist der Strahl zu fokussieren, d.h. umso größer ist der kleinste mögliche Fokusedurchmesser.

$$M^2 = \frac{1}{k}$$

$$k = \frac{4 \cdot \lambda}{\pi} \cdot \frac{F}{d_0}$$

$$r_0 = \frac{2 \cdot \lambda}{\pi} \cdot \frac{f}{d_s} \cdot M^2$$

λ = Wellenlänge
 d_0 = Durchmesser der Strahltaile (siehe auch **Strahlparameterprodukt SPP**)
 k = $1/M^2$ = Strahlpropagationsfaktor
 f = Brennweite der Fokussieroptik
 d_s = Rohstrahldurchmesser = Strahldurchmesser vor der Optik
 F = F-Zahl = f/d_s

Ein Gauß-Strahl hat $M^2 = 1$, ein realer Single-Mode Strahl hat ein M^2 zwischen 1 und 1,2. Multi-Mode Strahlen haben typischerweise $M^2 > 5$. M^2 ist eine universelle Kenngröße der Strahlqualität, mit der sich unterschiedliche Strahlquellen vergleichen lassen.



Rayleighlänge z_R (umgangssprachlich: Tiefenschärfe)

Die Rayleighlänge ist die Distanz entlang der optischen Achse, die ein Laserstrahl braucht, bis sich seine Querschnittsfläche, ausgehend von der Strahltaile, verdoppelt.

$$z_R = \frac{\pi \cdot r_0^2}{\lambda \cdot M^2}$$

- z_R = Rayleighlänge
- λ = Wellenlänge
- r_0 = Radius der Strahltaile

Formeln für Pulsanwendungen

$$P_p = \frac{E_p}{t_p}$$

$$\bar{p} = E_p \cdot f_p$$

$$I = \frac{P_p}{A}$$

- P_p = Pulsleistung
- E_p = Pulsenergie
- t_p = Pulsdauer
- \bar{p} = Mittlere Leistung
- f_p = Pulsfrequenz
- I = Leistungsdichte
- A = Geometrische Bestrahlungsfläche

Formeln für Faseranwendungen

$$NA = n \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)$$

- NA = Numerische Apertur
- n = Brechzahl vor der Faser
- α = Ganzer Öffnungswinkel der Faser

Elliptizität, Aspektverhältnis ε

Parameter zur Quantifizierung der Kreisförmigkeit oder Quadrat-Ärtheit einer Leistungs-/Energiedichteverteilung.

$$\varepsilon = \frac{\min\{d_x, d_y\}}{\max\{d_x, d_y\}}$$

$$0 < \varepsilon \leq 1$$

- $d_{x,y}$ = Strahldurchmesser entlang der Hauptachse eines elliptischen Strahls

Bei einem elliptischen Strahl entspricht ε dem Verhältnis der Hauptachsen und wird als Elliptizität bezeichnet. Bei rechteckigen Strahlen entspricht ε dem Verhältnis der Seitenkanten und wird als Aspektverhältnis bezeichnet. $\varepsilon = 1$ entspricht einem runden bzw. quadratischen Strahl.



Formeln für Tophat-Strahlen

Flankensteilheit $s_{\eta,\rho}$

Normierte Differenz der eingegrenzten Bestrahlungsflächen A_η und A_ρ .

$$s_{\eta,\rho} = \frac{A_\eta - A_\rho}{A_\eta}$$

$$0 \leq \rho < \eta \leq 1$$

$$0 < s_{\eta,\rho} < 1$$

$A_{\eta,\rho}$ = Geometrische Bestrahlungsfläche bei Clipsevel η, ρ

ρ, η = Clipsevel. Maximale Intensität wird auf 1 gesetzt, 0 entspricht dem Offset der Messung. In PRIMES Messungen gilt: $\rho = 0,1$ und $\eta = 0,9$.

Umso steiler die Flanke, desto kleiner wird s . Eine senkrechte Flanke (idealer Tophat Strahl) hat den Wert $s = 0$. Ein Gauß-Strahl hat den Wert $s = 0,96$.

Ebenheit F_η

Verhältnis der eingegrenzten mittleren Leistungsdichte (Energiedichte) zur maximalen Leistungs-/Energiedichte der Verteilung. Die Ebenheit beschreibt die Höhe der höchsten Ausreißer über dem mittleren Plateau der Leistungsdichte.

$$F_\eta = \frac{E_{\eta\text{ave}}}{E_{\text{max}}}$$

$$0 < F_\eta \leq 1$$

η = Clipsevel 0,9 (siehe **Flankensteilheit**)

$E_{\eta\text{ave}}$ = Mittlere Leistungsdichte ab Clipsevel η

E_{max} = Maximale Leistungsdichte

Für ein perfekt homogenes Profil wird $F = 1$. Umso höher die Ausreißer, desto kleiner wird F .

Gleichförmigkeit U_η

Normierte Standardabweichung (en: root mean square, rms) der Leistungs-/Energieverteilung von ihrem eingegrenzten Mittelwert.

$$U_\eta = \frac{1}{E_{\eta\text{ave}}} \frac{1}{A_\eta} \sqrt{\iint [E(x, y) - E_{\eta\text{ave}}]^2 dx dy}$$

η = Clipsevel 0,9 (siehe **Flankensteilheit**)

E = Leistungsdichte am Ort x, y

A_η = Geometr. Bestrahlungsfläche (siehe **Flankensteilheit**)

$E_{\eta\text{ave}}$ = Mittlere Leistungsdichte ab Clipsevel η

U wird in % bezogen auf $E_{\eta\text{ave}}$ angegeben. Ein perfekt homogenes Profil hat $U = 0$ %.

**Neigung $N_{x,y}$**

Neigung der Leistungsdichte im Bereich maximaler Strahlintensität, normiert auf die mittlere Leistungsdichte.

$$E(x, y) = a \cdot x + b \cdot y + c$$

$$N_x = \frac{a \cdot d_x}{E_{ave}}$$

$$N_y = \frac{b \cdot d_y}{E_{ave}}$$

E = Leistungsdichte am Ort x,y

$d_{x,y}$ = Strahldurchmesser in den Richtungen x und y

E_{ave} = $E_{0,9ave}$ Mittlere Leistungsdichte (siehe **Ebenheit**)

N gibt die Neigung einer Ebene an, die die Verteilung der Leistungsdichte oberhalb eines Clipsevels von 0,9 beschreibt. Der Zahlenwert von N entspricht der absoluten Differenz zwischen den Extremalwerten der Leistungsdichte, in % bezogen auf die mittlere Leistungsdichte E_{ave} . Eine Neigung von 2 % bedeutet, dass sich die Krone der Tophatverteilung von der einen Seite des Strahls zur anderen um 2 % der mittleren Strahlintensität E_{ave} ändert.