PRIMES

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 Messergebisse 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.

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

Θ = Voller Strahldivergenzwinkel

d_0 = Durchmesser der Strahltaille

r_0 = Radius der Strahltaille

M^2 = Beugungsmaßzahl

λ = Wellenlänge

Beugungsmaßzahl M²

Die Beugungsmaßzahl M² ist eine dimensionslose Größe, die einen Laserstrahl charakterisiert: je größer M², umso schlechter ist der Strahl zu fokussieren, d.h. umso größer ist der kleinste mögliche Fokusdurchmesser.

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

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

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

λ = Wellenlänge

d_0 = Durchmesser der Strahltaille (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 Strahltaille, verdoppelt.

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

z_R = Rayleighlänge

λ = Wellenlänge

r_0 = Radius der Strahltaille

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-Artigkeit 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 $s_{\eta,\varepsilon}$

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 Cliplevel η, ρ

ρ, η = Cliplevel. 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.

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

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

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

$E_{\eta ave}$ = Mittlere Leistungsdichte ab Cliplevel 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.

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

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

E = Leistungsdichte am Ort x, y

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

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

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

Neigung N_{xy}

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

N gibt die Neigung einer Ebene an, die die Verteilung der Leistungsdichte oberhalb eines Cliplevels von 0,9 beschreibt. Der Zahlenwert von N entspricht der absoluten Differenz zwischen den Extremalwerten der Leistungdichte, 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.

Formeln für Auswertungen

Schwerpunkt ⟨x⟩,⟨y⟩

Erstes Moment der Flächen-Intensitätsverteilung zur Bestimmung des Schwerpunkts.

$$\langle x \rangle = \frac{\iint x \cdot E(x, y)\, dxdy}{\iint E(x, y)\, dxdy}$$

$$\langle y \rangle = \frac{\iint y \cdot E(x, y)\, dxdy}{\iint E(x, y)\, dxdy}$$

E = Leistungsdichte am Ort x, y

Radius aus Momente zweiter Ordnung r_x, r_y

Zweites zentrales Moment der Flächen-Intensitätsverteilung zur Bestimmung der Varianz und des Strahlradius.

$$\langle x^2 \rangle = \frac{\iint (x - \langle x \rangle)^2 \cdot E(x, y)\, dxdy}{\iint E(x, y)\, dxdy}$$

$$\langle y^2 \rangle = \frac{\iint (y - \langle y \rangle)^2 \cdot E(x, y)\, dxdy}{\iint E(x, y)\, dxdy}$$

$$r_x = 2 \cdot \sqrt{\langle x^2 \rangle}$$

$$r_y = 2 \cdot \sqrt{\langle y^2 \rangle}$$

$$r = 2 \cdot \sqrt{½ \cdot (\langle x^2 \rangle + \langle y^2 \rangle)}$$

E = Leistungsdichte am Ort x, y

$\langle x \rangle, \langle y \rangle$ = Strahlschwerpunkt

$\langle x^2 \rangle, \langle y^2 \rangle$ = Zweites zentrales Moment, Varianz