

Photonisches Instrument zur präzisen Strahlprofilmessung

Steffen Reichel*, Karlheinz Blankenbach*, Andreas Reber*, Evrim Erel*

* Hochschule Pforzheim, Tiefenbronner Str. 65, D-75175 Pforzheim

<mailto:steffen.reichel@hs-pforzheim.de>

Die Kollimation von beispielsweise Diodenlasern benötigt die genaue Kenntnis des Strahlprofils. Wir präsentieren ein photonisches Instrument zur Strahlprofilmessung zusammen mit den notwendigen Maßnahmen für eine hohe Präzision. Wir erzielen eine Schwankung von weniger als 0,78 % (2 Stichprobenstandardabweichungen) um den Mittelwert.

1 Einführung

Für die Bestimmung der Beugungsmaßzahl M^2 (beam quality parameter [1]) benötigt man die Messung der transversale Intensitätsverteilung von Lasern (Strahlprofil). Ebenso erfordert die Kollimation von Diodenlasern die präzise Messung des Strahlprofils. Wir stellen ein photonisches Instrument zur präzisen Strahlprofilmessung vor. Das Grundprinzip zeigt Abb. 1 (links) bei der das Strahlprofil in einem einstellbaren Abstand d auf einem Beobachtungsschirm gemessen wird (vgl. [2]). Diese Messung erfolgt durch Abtastung in x - und y -Richtung (rechts).

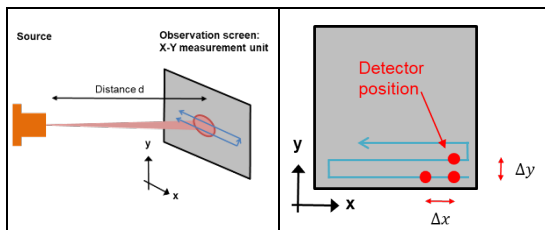


Abb. 1 Prinzip der Strahlprofilmessung (links) und Abtastung (Messung) in x - und y -Richtung (rechts). Der Detektor ist nicht gezeichnet (vgl. auch mit [2]).

2 Aufbau des photonischen Instruments

Der vollständig computer-gesteuerte Aufbau besteht aus (vgl. Abb. 2, Daten Tab. 1, Details: [3]):

- zwei Lineartischen mit Schrittmotoren - 90° zueinander montiert auf schwerem Aluminiumhalter zur Unterdrückung von Vibrationen und für präzise Wiederholpositionen,
- geschwärztem Aluminiumhalter zur Unterdrückung von Streulicht,
- zwei Schrittmotoren, mit dem Steuercomputer verbunden und mittels Labview bzw. Python angesteuert,
- einer Lochblende gefolgt von einer Photodiode und einem Operationsverstärker (OPV als Transimpedanz-Verstärker) als Detektor,
- Messaufbau im Dunkelraum mit schwarzem Teppich zur Streulichtreduktion,
- einer Granitbank um Vibrationen zu unterdrücken (darauf ist der XY-Verschiebetisch montiert).

Die Spezifikation des Aufbaus zeigt Tab. 1.

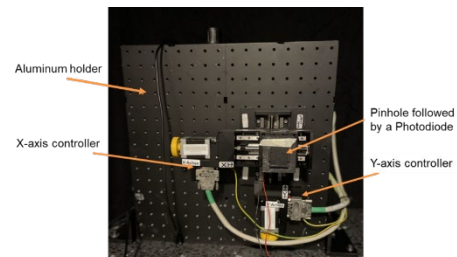


Abb. 2 Aluminium Halter mit zwei um 90° montierten Lineartischen sowie der Lochblende, der eine Photodiode (mit OPV) als Detektor folgt.

Characteristic	Specification
Max. scan area in x - and y -direction	52.0 mm
Lowest step size Δx and Δy	0.2 μm
Unidirectional repeatability	0.5 μm
Diameter aperture of pinhole	\varnothing 0.45 / 0.30 mm
Detector wavelength	400 nm ... 900 nm
Delay time (between 2 measured data)	Adjustable - 2 s

Tab. 1 Gegenwärtige Spezifikation des Messaufbaus.

3 Aspekte zur präzisen Strahlprofilmessung

Der komplette Messaufbau montiert auf einem Granitisch (optische Bank) im Dunkelraum mit schwarzem Teppich befindet sich zusätzlich in einem fensterlosen Kellerraum. Die Lichtquellen sind Halbleiterdiodenlaser mit weniger als 5 mW CW optischer Leistung, um die Laserklasse 3R einzuhalten. Die hier untersuchten Diodenlaser haben die gemessenen Wellenlängen 447 nm, 518 nm und 637 nm. Die Laserdioden werden mit einer stabilen Stromquelle betrieben, um Stromschwankungen und damit Laserleistungsschwankungen zu verhindern. Die Ausgangsleistung aller Laser wurde mit einer Ulbrichtkugel gemessen (10 Wiederholmessungen) und ergaben keine Schwankungen im Rahmen der Genauigkeit der Ulbrichtkugel von 1/100 mW. Alle elektrischen Geräte wurden außerhalb der Dunkelkammer platziert, da die Displays Streulicht erzeugen.

Eine Photodiode mit geringem Dunkelstrom (Hamamatsu S1226-18BK) detektiert nach der Lochblende

die optische Leistung als Photostrom I_{Ph} und ein OPV in Transimpedanzkonfiguration (mit Rückkoppelwiderstand R_1) verstärkt das schwache Signal als Ausgangsspannung V_{out} gemäß:

$$V_{out} = -R_1 \cdot I_{Ph} \quad (1)$$

Auch hier ist eine stabile Spannungsquelle für den OPV notwendig sowie ein OPV-low-noise Design in metallischem Gehäuse zur Abschirmung [3]. Den gesamten Aufbau zeigt Abb. 3.

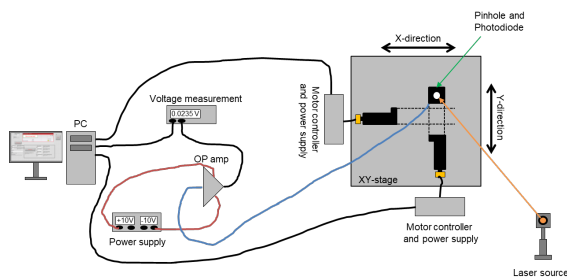


Abb. 3 Messaufbau mit elektrischer Versorgung, Photodiode mit OPV und Datenauslesung.

Eine Kalibrierung ergibt den Zusammenhang zwischen optischer Leistung und gemessener Spannung V_{out} . Dabei wird zuerst die optische Leistung der Laserdiode mit einer Linse und einer Ulbrichtkugel gemessen. In einer zweiten Messung wird die gesamte Laserleistung mit der Linse auf die aktive Photodiodenfläche fokussiert und die Spannung V_{out} nach dem OPV gemessen. Die Ergebnisse der Kalibrierung zeigt Tab. 2.

Laser source	Output voltage V_{out}	Optical power
Red laser diode (637 nm)	$6.03 \text{ V} \pm 0.02 \text{ V}$	4.35 mW
Green laser diode (518 nm)	$5.44 \text{ V} \pm 0.02 \text{ V}$	4.55 mW
Blue laser diode (447 nm)	$4.43 \text{ V} \pm 0.02 \text{ V}$	4.38 mW

Tab. 2 Ergebnisse der Kalibrierung ($R_1 = 5.010 \text{ k}\Omega$).

Mit Hilfe der Kalibrierung kann nun die nach der Lochblende gemessene Spannung V_{meas} in eine optische Leistung umgerechnet werden:

$$P_{opt} = \frac{P_{cal}}{V_{cal}} \cdot \frac{R_{cal}}{R_{used}} \cdot V_{meas} \quad (2)$$

Dabei ist V_{cal} (P_{cal}) die gemessene Kalibrierspannung (Leistung) nach Tab. 2. Die Rückkoppelwiderstände wurden gemessen zu: $R_{cal} = 5.010 \text{ k}\Omega$ (bei der Kalibrierung verwendet) und zum höheren (wegen Lochblende) Widerstand $R_{used} = 100.45 \text{ k}\Omega$.

4 Messergebnisse der Strahlprofilmessung

Mit Hilfe einer Wiederholungsmessung wurde die Genauigkeit des beschriebenen Messaufbaus bestimmt.

Dazu wurden $N = 50$ Wiederholungsmessungen bei einer Auflösung von $\Delta x = \Delta y = 0.5 \text{ mm}$ und der roten Diodenlaser durchgeführt. Ergebnis war eine

Schwankung von $\leq 0.78\%$ (2 Stichprobenstandardabweichungen) um das Maximum des Mittelwertes. Unter Annahme einer Gaußverteilung bedeutet dies, dass 95.4% der Messwerte im folgenden Intervall erwartet werden: $\overline{V_{out}} \pm 0.78\% \cdot \overline{V_{out}}$.

Die verwendete Lochblende hatte einen Durchmesser von $D = 0,45 \text{ mm}$ (Fläche $A = \pi D^2/4$), so dass die Intensität $I = \frac{P_{opt}}{A}$ aus der gemessenen Leistung (Spannung) P_{opt} an jeder Stelle bestimmt werden kann. Das Ergebnis einer transversalen Leistungsverteilung und Intensitätsverteilung zeigt Abb. 4.

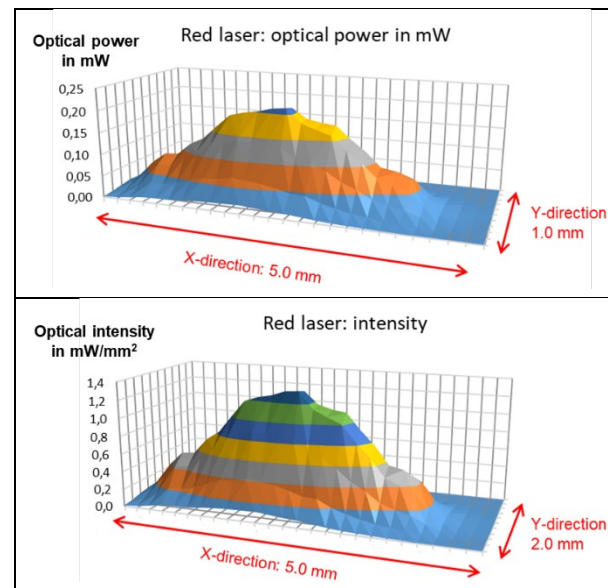


Abb. 4 Leistungsverteilung (oben) und Intensitätsverteilung (unten) der roten Laserdiode gemessen mit einem Abstand $d = 50 \text{ cm}$ und der Auflösung $\Delta x = \Delta y = 0.2 \text{ mm}$.

5 Zusammenfassung

Es wurde ein optisches Instrument zur präzisen Strahlprofilmessung entwickelt. Die dafür erforderlichen Maßnahmen wurden ebenso vorgestellt wie die Messung typischer Strahlprofile (weitere Ergebnisse in [3]). Die erreichte Schwankung von weniger als 0,78% (2 Stichprobenstandardabweichungen) zeigt die mit den entwickelten Maßnahmen erzielte Präzision.

Literatur

- [1] A. Siegman, „Defining, measuring, and optimizing laser beam quality“ in Proc. SPIE 1868, doi: 10.1117/12.150601 (1993).
- [2] S. Reichel et al, „Zuverlässigkeitsanalyse einer ortsaufgelösten Intensitätsmessung mittels eines voll-automatisierten x-y-Verschiebetisches“ in DGaO Proceedings 2019 – urn:nbn:de:0287-2019-P026-7 (2019).
- [3] S. Reichel et al, „Development and evaluation of a photonics instrument for precise beam profile measurements by a XY-stage“ in Proc. SPIE 12428, Photonic Instrumentation Engineering X, 1242804, doi: 10.1117/12.2647730 (8 March 2023).