

Beurteilung der Wellenfront von CO₂-Lasern mittels phase retrieval

Hembd Ch. , Tiziani, H.J.
Institut für Technische Optik
Pfaffenwaldring 9
D-7000 Stuttgart 80

Abstract

Wavefront quality of high power lasers in material processing is among the properties which have not yet been thoroughly investigated. This is particularly due to inherent difficulties in the use of interferometry at very high powers. Nevertheless focus quality is affected by wavefront-distortion as well as mode-distribution. Wavefront errors may be introduced by the laser resonator itself or by thermal effects in the beam guiding system.

Phase retrieval may offer a solution for industrial applications to gain phase information from pure intensity measurements. First results from CO₂ lasers are presented.

Zusammenfassung

Zu den bislang wenig untersuchten Aspekten der Strahlqualität an Bearbeitungslasern gehört die Vermessung der Wellenfront. Dies liegt an grundsätzlichen Schwierigkeiten bei der Anwendung interferometrischer Methoden im Hochleistungsbereich. Die Phasenverteilung ist jedoch neben der Intensitätsverteilung mitentscheidend für eine gute Fokusqualität. Sowohl durch den Laserresonator als auch durch das Strahlführungssystem können Wellenfrontdeformationen verursacht werden.

Wir stellen ein robustes Verfahren vor, um aus Intensitätsmessungen Information über die Wellenfront zu gewinnen. Erste Ergebnisse, die mit dieser Methode an CO₂-Lasern gewonnen wurden, werden vorgestellt und diskutiert.

Einleitung

Die Messung der Phasenverteilung an Hochleistungslasern stellt schon allein auf Grund der hohen Leistungen im Strahl große Anforderungen an die Meßtechnik. Zusätzlich kann das Auftreten höherer Moden und dadurch bedingte partielle Kohärenz interferometrische Messungen erschweren.

Für interferometrische Messungen kann man versuchen, über Strahlteiler ein sehr genaues sample des Strahls zu erhalten. Dies stellt hohe thermische Anforderungen an die Strahlteiler, die sich nicht unter thermischer Belastung verformen dürfen. Eine andere, hier untersuchte Möglichkeit der Wellenfrontmessung stellt die Methode des phase retrieval dar /1-4/, bei der aus Messungen des Intensitätsprofils die Phase ermittelt wird. Dieses Verfahren arbeitet prinzipiell auch noch bei partiell kohärentem Laserlicht. /6/

Grundlagen

In den vergangenen Jahren sind verschiedene Algorithmen entwickelt worden, die aus Intensitätsmessungen Phaseninformation gewinnen. Eine Vielzahl von Algorithmen arbeitet dabei mit Informationen in der Bild und Fourierebene. Für Laserstrahlen erfordert dies eine genaue Auflösung der Fokusstruktur und stellt damit sehr hohe Anforderungen an die Meßtechnik. Zudem sind die Algorithmen in der Regel iterativ und somit enorm zeitaufwendig. Im Gegensatz dazu bietet die Transportgleichung für die Intensität /1,2/

$$dI/dz = \text{grad}_t (I \text{ grad}_t \phi)$$

I: Intensität, ϕ : Phase, grad_t Gradient in tangentialer Richtung

einen Zugang , bei dem der unfokussierte Laserstrahl in zwei Ebenen z_1, z_2 gemessen wird. Eine geschlossene Lösung der Transportgleichung wurde von TEAGUE /1/ angegeben.

Experimentelle Ergebnisse

Die experimentelle Umsetzung erfolgte mit einer pyroelektrischen Zeile mit 64 Elementen, die durch mechanische Translation ein Feld der Größe 64 x 64 Pixel erfaßt. Bei einer Pixelbreite von 100 μm ergibt das ein Bildfeld von 6,4 x 6,4 mm. Die Dynamik beträgt 12 bit. Zunächst wurde in Simulationsrechnungen mit Gaußstrahlen getestet in welchem Bereich von Strahldurchmesser und Bildabstand dz der Algorithmus korrekte Ergebnisse liefert. Demnach sollte der mit dz anwachsende Kontrast dI/I nicht kleiner als 0,1 werden. Zu große Werte von dz sind dagegen unkritisch . Der Bereich des erfaßten Strahls sollte zumindest den zweifachen Strahldurchmesser (definiert beim $1/e^2$ Wert) umfassen.

Erste Messungen wurden an einem 20 Watt CO₂-Wellenleiterlaser durchgeführt. Der Ausgangsstrahl entspricht in guter Näherung einem TEM₀₀-Mode (EH₁₁-Mode). Die Detektorzeile wurde direkt in der Strahltaile des Lasers positioniert und schrittweise verschoben. Eine berechnete Wellenfront ist in Bild 1 gezeigt.

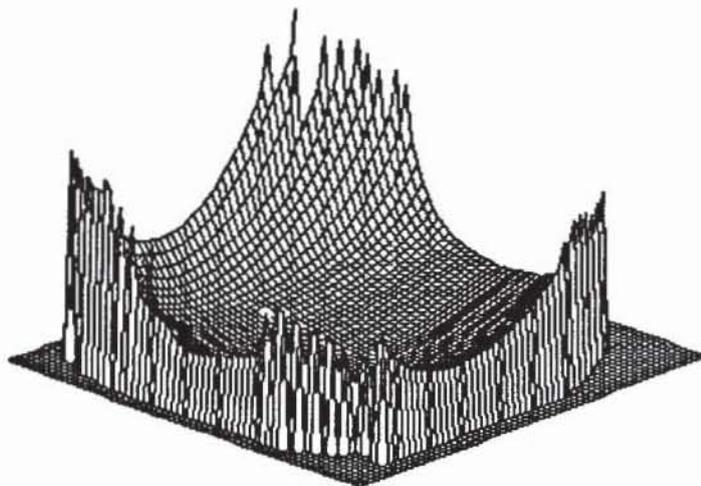
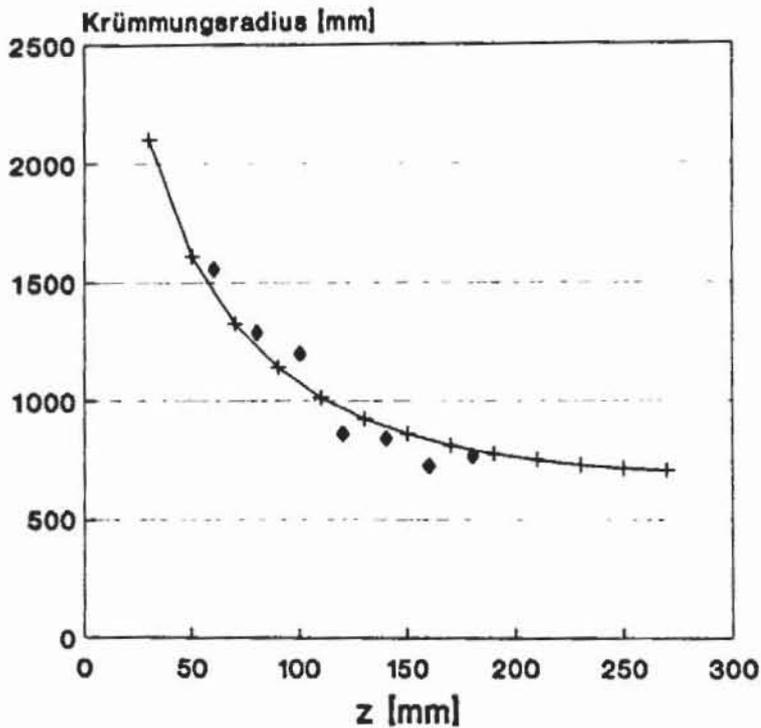


Bild 1: Wellenfront eines 20 Watt CO₂-Lasers

Einen Vergleich der gemessenen Krümmungsradien mit dem theoretischen Verlauf gibt Bild 2. Die durchgezogene Kurve entspricht dem erwarteten Tailenverlauf für einen reinen Gaußstrahl.



◆ Meßwerte + theoret. Verlauf Bild 2: Gemessene Krümmungsradien im Tailenverlauf

Messungen wurden ebenso an einem 1,5 kW CO₂-Laser durchgeführt. Mit Hilfe eines wassergekühlten Reflexionsgitters aus Kupfer wurden 0,2 % der Strahlleistung in die erste Ordnung ausgekoppelt. Die erste Ordnung wurde auf die pyroelektrische Zeile abgebildet. Im rekonstruierten Phasenbild (Bild3) ist eine Struktur zu erkennen, die deutlich vom Grundmode abweicht.

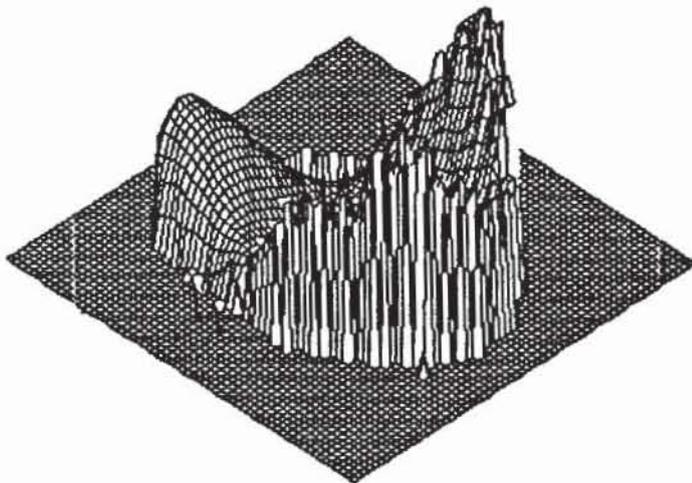


Bild 3: Wellenfront eines 1,5 kW CO₂-Lasers

Die Simulation eines Grundmodes mit ca. 10% Anteil (Amplitude) an TEM_{03} -Laguerre-Mode (Bild 4) gibt näherungsweise Übereinstimmung mit der experimentellen Phasenverteilung.

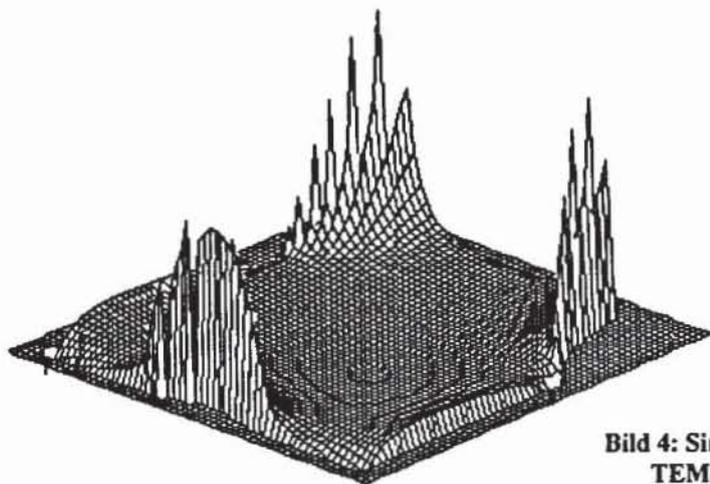


Bild 4: Simulation eines Grundmodes mit 10% Anteil an TEM_{03} -Laguerre-Mode

Danksagung

Die Autoren danken dem "Institut für Strahlwerkzeuge", Stuttgart für die freundliche Unterstützung bei Messungen an einem Hochleistungslaser. Besonderer Dank gilt der "Deutschen Forschungsgemeinschaft" für die finanzielle Unterstützung der Arbeiten im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 349.

Literatur:

- /1/ Teague, M.R.: Deterministic phase retrieval: a Green's function solution, JOSA 73 (11) 1434-1441 (1983)
- /2/ Streibl, N.: Phase Imaging by the Transport Equation of Intensity, Opt. Comm. 49 (1) 6-10 (1984)
- /3/ Baltes: Inverse Source Problems in optics, Springer (1980)
- /4/ Fienup: Phase Retrieval Algorithms: a comparison, Applied Optics 21 (15) (1982)
- /5/ Dooghin, A.; Kundikova, N. D.; Zel'dovich, B. Ya.: Phase retrieval from laser beam intensity profiles, Optics Comm. 91 193-196 (1992)
- /6/ Roddier, F. Wavefront Sensing and the Irradiance Transport Equation, Applied Optics 29 (10) 1402-3 (1990)