

# Charakterisierung von Laserstrahlung mittels Hartmann-Shack-Wellenfrontsensor

Marc Kunzmann, L.O.T.-Oriol GmbH & Co. KG, Darmstadt  
Bernd Schäfer, Klaus Mann, Laser-Laboratorium Göttingen e.V.

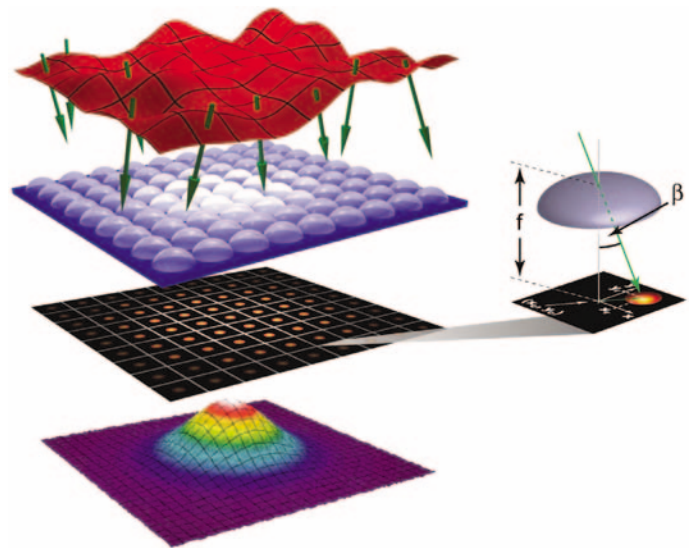
Die Strahldiagnose mit Hartmann-Shack-Wellenfrontsensoren ermöglicht eine umfassende Laser-Strahlcharakterisierung in nur einer Messung, was vor allem bei gepulsten oder fluktuierenden Quellen von großer Bedeutung ist. Aus der Wellenfront und dem Nahfeldprofil lassen sich Strahlkenngrößen wie Durchmesser, Divergenz und  $M^2$  in Echtzeit mit einer Genauigkeit im Prozentbereich ermitteln. Zusätzlich ist eine Diagnose des Propagationsverhaltens der untersuchten Strahlung möglich. So lassen sich z.B. die Intensitätsverteilungen im Fernfeld oder in der Strahltaile berechnen. Mittels Zernike-Analyse kann die Wellenfront in Echtzeit korrigiert und der Strahl somit optimal fokussiert werden.

## 1 Einleitung

Mit steigenden Anforderungen an die Qualität lasergestützter Produktionsprozesse kommt den Messmethoden zur Charakterisierung von Laserstrahlung wachsende Bedeutung zu. Dabei sind für den Einsatz in der industriellen Praxis vor allem schnelle und einfach einsetzbare Methoden gefragt. Neben Leistung bzw. Pulsenergie benötigen Laserentwickler und Anwender in vielen Fällen präzise Angaben über das Strahlprofil, den Strahlpropagationsfaktor  $M^2$ , der typischerweise über die Kaustik gemessen wird, und die Wellenfront (Messung mit Hartmann-Shack-Sensor).

Die Wellenfront beschreibt die lokale Richtung des Energieflusses und beinhaltet detaillierte Information über Strahl-Aberrationen: sowohl intrinsische als auch solche, die von Optiken im Strahlengang herrühren. Andererseits bestimmt  $M^2$  die minimal erreichbare Strahlbreite (Fokussierbarkeit) und stellt im Falle aberrationsfreier paraxialer Optiken eine Invariante des Strahls dar. Das Standardverfahren zur Bestimmung von  $M^2$  ist die Vermessung der Strahlbreiten mit einem im Bereich der Kaustik zu verfahrenen Detektor [1]. Naturgemäß ist der erforderliche zeitliche Aufwand hierbei recht hoch, und eine Echtzeit-Charakterisierung gepulster Quellen ist nicht möglich. Außerdem lässt sich nicht unterscheiden, ob ein  $M^2$ -Wert  $>1$  von geometrischen Aberrationen stammt und somit korrigierbar ist, oder ob er statistischer Natur ist und mit der endlichen räumlichen Kohärenz des Strahls zusammenhängt. Alternativ zum Kaustikverfahren existiert

**Bild 1:** Messprinzip des Hartmann-Shack-Sensors: Die Richtungsverteilung (Wellenfront) einer Strahlquelle kann aus den genauen Positionen der von einer Mikrolinsenplatte erzeugten Foki rekonstruiert werden. Eine Integration über diese Spotverteilung liefert zusätzlich das Strahlprofil (vgl. Text)

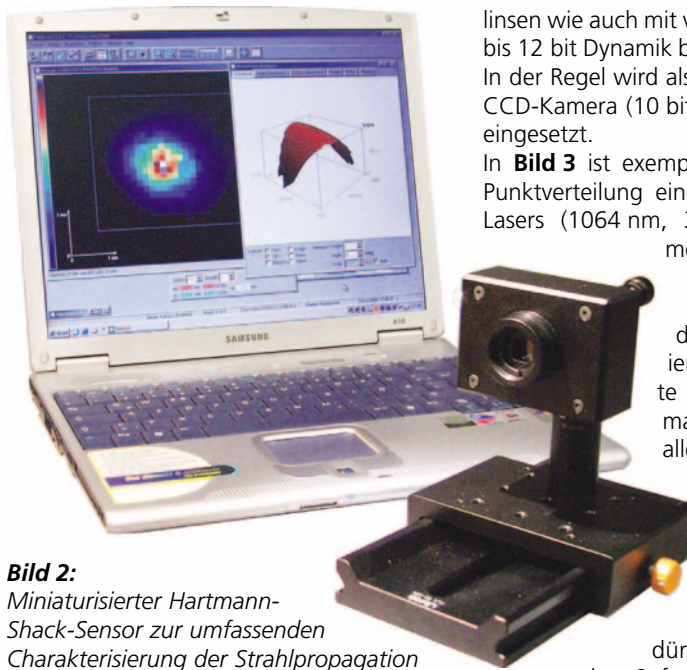


seit kurzem eine Normvorschrift zur Messung der Laserstrahl-Wellenfront nach dem Hartmann-Shack-Prinzip [2]. In diesem Artikel soll das Hartmann-Shack-Verfahren anhand eines am Laser-Laboratorium Göttingen neu entwickelten Sensors vorgestellt werden, der auf die speziellen Belange der Laser-Strahlcharakterisierung zugeschnitten ist und aus einer Einzelmessung sowohl die Wellenfront als auch das Strahlprofil liefert. Im Falle kohärenter Quellen<sup>1</sup> können daraus sämtliche relevanten Strahlpropagationsparameter in Echtzeit berechnet werden.

<sup>1</sup> Bei Multimodelasern mit geringer räumlicher Kohärenz ist zur genauen Bestimmung von  $M^2$  eine zusätzliche Fernfeldmessung erforderlich (vgl. Abschnitt 6).

## 2 Prinzip und Aufbau des Hartmann-Shack-Sensors

Die Wellenfront  $w(x,y;z_0)$  eines Strahls ist definiert als eine Fläche senkrecht zu seiner lokalen Ausbreitungsrichtung, also zum Poynting-Vektor  $\vec{S}(x, y)$  am Ort  $z_0$  auf der optischen Achse [2]. Die Wellenfrontmessung nach dem Hartmann-Shack-Verfahren beruht auf der geometrisch-optischen Bestimmung der lokalen Abstrahlwinkel  $(\beta_x, \beta_y)_{ij}$  mit Hilfe einer Mikrolinsenplatte [3], die die einfallende Wellenfront in eine große Anzahl von Einzelstrahlen aufteilt (vgl. Bild 1). Ein ortsauflösender Detektor im Abstand  $f$  hinter der Platte ermöglicht die Aufnahme einer Punktverteilung, aus



**Bild 2:** Miniaturisierter Hartmann-Shack-Sensor zur umfassenden Charakterisierung der Strahlpropagation und der Wellenfrontaberrationen von gepulster und cw-Laserstrahlung (Spektralbereich 193-1064 nm, Wellenfront-Empfindlichkeit bis  $\lambda/250$ )

der die genaue Lage der Teilstrahlen durch Berechnung der jeweiligen Schwerpunkte bestimmt werden kann. Die Abweichung der Schwerpunktlage  $(x_c, y_c)_{ij}$  der Einzelstrahlen von einer zuvor mit einer ebenen Wellenfront bestimmten Referenzposition  $(x_r, y_r)_{ij}$  beschreibt dann den lokalen Abstrahlwinkel  $(\beta_x, \beta_y)_{ij}$  und damit den Wellenfrontgradienten

$$\left( \frac{\partial w}{\partial x} \right)_{ij} = \beta_x = \frac{1}{f} (x_c - x_r)_{ij} \quad \text{(Gl. 1)}$$

Aus dieser Information lässt sich die Wellenfront mit Hilfe mathematischer Algorithmen rekonstruieren. Bei annähernd runden Profilen bietet sich in vielen Fällen eine modale Entwicklung nach Zernike-Polynomen an. Deren Entwicklungskoeffizienten entsprechen den Bildfehlern der Seidelschen Aberrationstheorie [4], so dass der Hartmann-Shack-Sensor in Analogie zur Qualitätsbeurteilung optischer Komponenten auch zur Vermessung der Strahlaberrationen eingesetzt werden kann. Zusätzlich lässt sich aus der gemessenen Punktverteilung durch Summation der Pixelinhalte auch das Strahlprofil, also die diskrete Energiedichteverteilung des Strahls bestimmen (vgl. **Bild 1**), wobei die laterale Auflösung durch die Breite der Mikrolinsen gegeben ist und typischerweise etwa 100  $\mu\text{m}$  beträgt.

**Bild 2** zeigt den hier näher beschriebenen Hartmann-Shack-Wellenfrontsensor, der je nach Bedarf mit unterschiedlichen Mikro-

linsen wie auch mit verschiedenen Kameras bis 12 bit Dynamik betrieben werden kann. In der Regel wird als Detektor eine digitale CCD-Kamera (10 bit) mit USB-Schnittstelle eingesetzt.

In **Bild 3** ist exemplarisch die gemessene Punktverteilung eines gepulsten Nd:YAG-Lasers (1064 nm, 30 kHz, 40 W, 'single mode') gezeigt, aus der die Wellenfront sowie das Strahlprofil am Ort des Sensors rekonstruiert wurden. Die korrekte Auswertung der Hartmann-Shack-Daten setzt allerdings eine geeignete Unterteilung der Detektorfläche in Subaperturen voraus, die jeweils nur einen einzigen Teilstrahl enthalten dürfen. Dies kann von der Software durch 'Tracking' gewährleistet werden, und zwar auch bei fluktuierenden oder wandernden Laserstrahlen.

### 3 Strahlparameterbestimmung in Echtzeit

Im Falle kohärenter Quellen gestatten die Hartmann-Shack-Messdaten neben der Rekonstruktion von Wellenfront und Strahlprofil auch die Berechnung der Strahlmomente [2], aus denen gemäß ISO-Standard die für die Strahlpropagation wesentlichen Parameter Durchmesser, Divergenz und  $M^2$  bestimmt werden können [1]. So beschreiben z.B. die zweiten Ortsmomente  $\langle x^2 \rangle$  die Strahlbreiten  $d_\sigma$  und die zweiten Winkelmomente  $\langle u^2 \rangle$  die Strahldivergenzen  $\theta_\sigma$ :

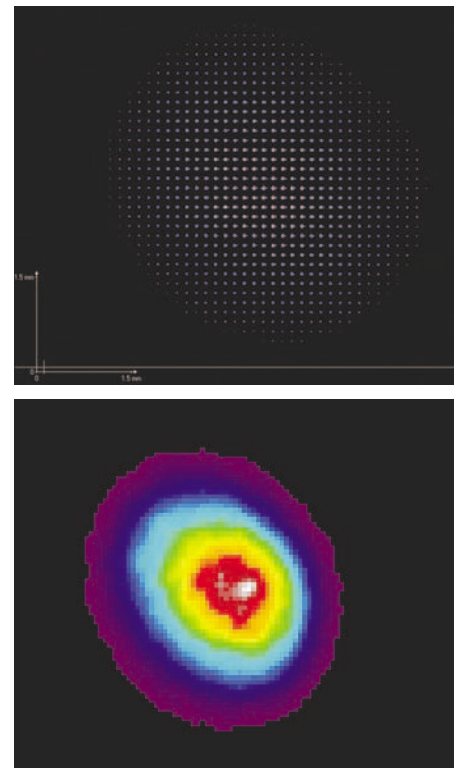
$$\begin{aligned} d_{\sigma_x} &= 4\sqrt{\langle x^2 \rangle} & d_{\sigma_y} &= 4\sqrt{\langle y^2 \rangle} \\ \theta_{\sigma_x} &= 4\sqrt{\langle u_x^2 \rangle} & \theta_{\sigma_y} &= 4\sqrt{\langle u_y^2 \rangle} \end{aligned} \quad \text{(Gl. 2)}$$

Ferner liefert die Messung auch sämtliche Informationen zur Bestimmung der gemischten Momente und damit nach [5] zur Auswertung des Strahlpropagationsfaktors  $M^2$ , z.B.:

$$M_x^2 = \frac{4\pi}{\lambda} \sqrt{\langle x^2 \rangle \langle u_x^2 \rangle - \langle x \cdot u_x \rangle^2} \quad \text{(Gl. 3)}$$

Im Gegensatz zur Kaustikmessung kann man mit Hartmann-Shack-Sensoren also sämtliche Parameter aus einer einzigen Messung gewinnen. Die Methode ist somit wesentlich schneller und auch einfacher zu handhaben.

Diese aus der Theorie abgeleiteten Erwartungen an den Wellenfrontsensor konnten



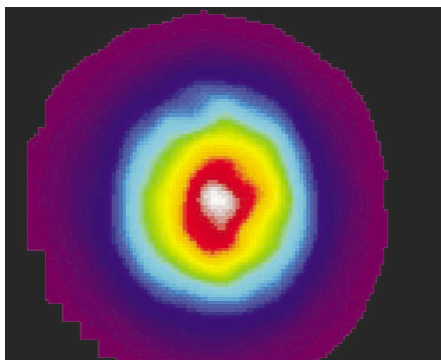
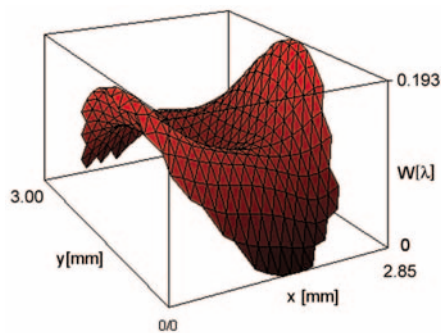
**Bild 3:** Vermessung eines Nd:YAG-Lasers mit dem Hartmann-Shack-Sensor: aufgenommene Punktverteilung, integriertes Strahlprofil und rekonstruierte Wellenfront

durch zahlreiche vergleichende Experimente an verschiedenen Lasern voll bestätigt werden. So wurden z.B. die Strahlparameter des oben angesprochenen diodengepumpten Nd:YAG-Lasers einerseits aus den in Bild 3 gezeigten Strahlprofil- und Wellenfrontdaten, andererseits aber auch aus einer sorgfältig durchgeführten Kaustikmessung nach ISO 11146 ausgewertet. Die Ergebnisse sind einander in **Tab. 1** gegenübergestellt.

Für alle Strahlpropagationskenngrößen kann von einer sehr guten Übereinstimmung gesprochen werden: Die gemäß Gl. 2 und 3 berechneten Werte weichen um weniger als 5% von den Kaustikdaten ab, ein Wert, der sich auch für andere Laser mit  $M^2$ -Werten  $< 2$  bestätigt hat. Die hohe Genauigkeit der Propagationsparameter wurde u.a. durch eine spezielle Auswerte-

	Hartmann-Shack	Vergleich: Kaustik
$M_x^2$	1,147	1,18
$M_y^2$	1,127	1,13
Taillendurchmesser $d_x$ [mm]	1,94	1,85
Taillendurchmesser $d_y$ [mm]	1,71	1,80
Divergenz (x) [mrad]	0,83	0,86
Divergenz (y) [mrad]	0,87	0,85

**Tab. 1:** Strahlengrößen des Nd:YAG-Lasers aus Bild 3, ermittelt einerseits aus der Wellenfrontmessung und zum Vergleich aus einer Kaustikmessung



**Bild 4:** Wellenfrontaberrationen und Strahlprofil eines IR-fs-Lasers (Fa. Time Bandwidth Products)

methode zur Reduktion störender Rausch-  
effekte bei den 2. Momenten erreicht, auf  
die aber im Rahmen dieses Artikels nicht  
näher eingegangen werden kann. Voraus-  
setzung für präzise Messwerte ist weiterhin  
die Qualität der verwendeten Mikrolinsen,  
die zur Vermeidung von Übersprecheffek-  
ten möglichst gaußförmige Foki auf einem  
homogenem Untergrund liefern müssen.

**Bild 4** zeigt zum Vergleich Wellenfront  
und Profil eines diodengepumpten Nd:  
Glas-Lasers (150 fs, 1054 nm, Fa. Time  
Bandwidth Products). Für diese mit einem  
Halbleiterspiegel (SESAM [6]) betriebene  
Strahlquelle ergibt die Hartmann-Shack-  
Messung eine sehr geringe Wellenfronta-  
berrations ( $w_{pv} \approx 0,2 \lambda$ ,  $w_{rms} \approx \lambda/20$ );  
der Strahl ist also praktisch beugungsbegrenzt,  
was sich in einem  $M^2$ -Wert von 1,03 wider-  
spiegelt (Taillendurchmesser 1,59 mm,  
Divergenz 0,88 mrad).

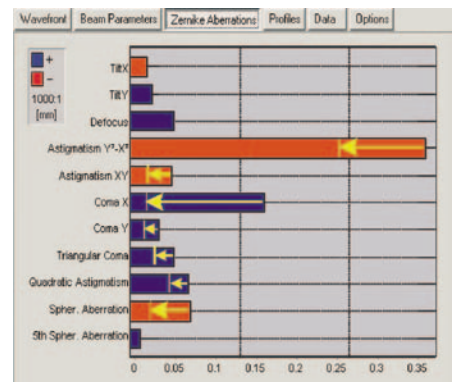
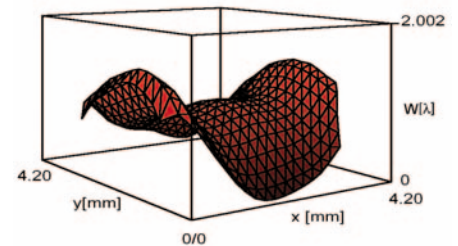
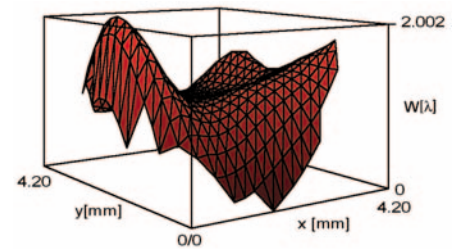
## 4 Minimierung von Strahl aberrationen

Neben der Bestimmung von Strahlpara-  
metern bietet der Wellenfrontsensor auch  
die Möglichkeit einer einfachen Echtzeit-  
Justage komplexer optischer Aufbauten  
sowie deren Qualifizierung hinsichtlich pri-  
märer Abbildungsfehler. Als Beispiel zeigt  
**Bild 5** die Wellenfronten im Nahfeld eines  
frequenzverdreifachten und excimerlaser-  
verstärkten Ti:Saphir-Femtosekundenlasers  
( $\lambda = 248 \text{ nm}$ , 400 fs, Laser-Laboratorium  
Göttingen). Die Messung wurde hier mit  
einem für den tiefen UV-Bereich mittels  
Quantenkonverter-Beschichtung sensibili-  
sierten CCD-Kamerachip durchgeführt  
und ergab zunächst eine 'peak-to-valley'-  
Wellenfrontaberration von ca.  $2 \lambda$ . Durch  
eine Feinjustage des komplexen Lasersys-  
tems unter Zuhilfenahme des Hartmann-  
Shack-Sensors konnte eine Glättung der  
Wellenfront auf  $1,37 \lambda$  erreicht werden.  
Diese Reduktion von über 30% Prozent  
korrespondiert mit der Abnahme der ent-  
sprechenden Zernike-Koeffizienten, die  
aus den Sensordaten während des laufen-  
den Laserbetriebs berechnet werden.  
Insbesondere konnten die astigmatischen  
Fehler sowie die Koma-Terme stark verrin-  
gert werden (vgl. Balkendiagramm der Zer-  
nike-Koeffizienten in Bild 5), so dass sich  
insgesamt eine deutlich höhere Spitzenin-  
tensität des UV-fs-Lasers erzielen ließ.

## 5 Strahlpropagation

Die Kenntnis von Strahlprofil  $(x,y)$  und Wel-  
lenfront  $w(x,y)$  erlaubt für kohärente Strah-  
lung auch eine Berechnung des Propagati-  
onsverhaltens, also z.B. des Fernfeldprofils  
oder der Verteilung in der Strahltaile, und  
zwar durch numerische Berechnung des  
Fresnel-Integrals [4] gemäß:

$$I(x, y; z_1) \sim \left| \iint_{-\infty}^{\infty} \sqrt{I(x', y'; z_0)} e^{ikw(x', y'; z_0)} e^{\frac{ik}{2(z_1 - z_0)} [(x-x')^2 + (y-y')^2]} dx' dy' \right|^2 \quad (\text{Gl. 4})$$



**Bild 5:** Aus Hartmann-Shack-Daten re-  
konstruierte Wellenfrontaberrationen  
eines UV- Femtosekunden-Lasersystems  
(248 nm, 400 fs), oben vor und Mitte nach  
Justage mit Hilfe des Hartmann-Shack-Sen-  
sors. Die Aufnahme erfolgte mit einer für  
den UV-Bereich sensibilisierten Kamera. Im  
Balkendiagramm der Zernike-Koeffizienten  
ist die erzielte Reduktion der einzelnen  
Aberrationsterme durch Pfeile angedeutet.

Durch diese in das Messprogramm imple-  
mentierte Auswertung ist es also möglich,  
aus einer einzelnen Hartmann-Shack-Messung  
am Ort  $z_0$  auf der optischen Achse das Strahl-  
profil an einer beliebigen anderen Stelle  $z_1$   
vorherzusagen, welche u.U. der Messung  
nicht zugänglich ist.

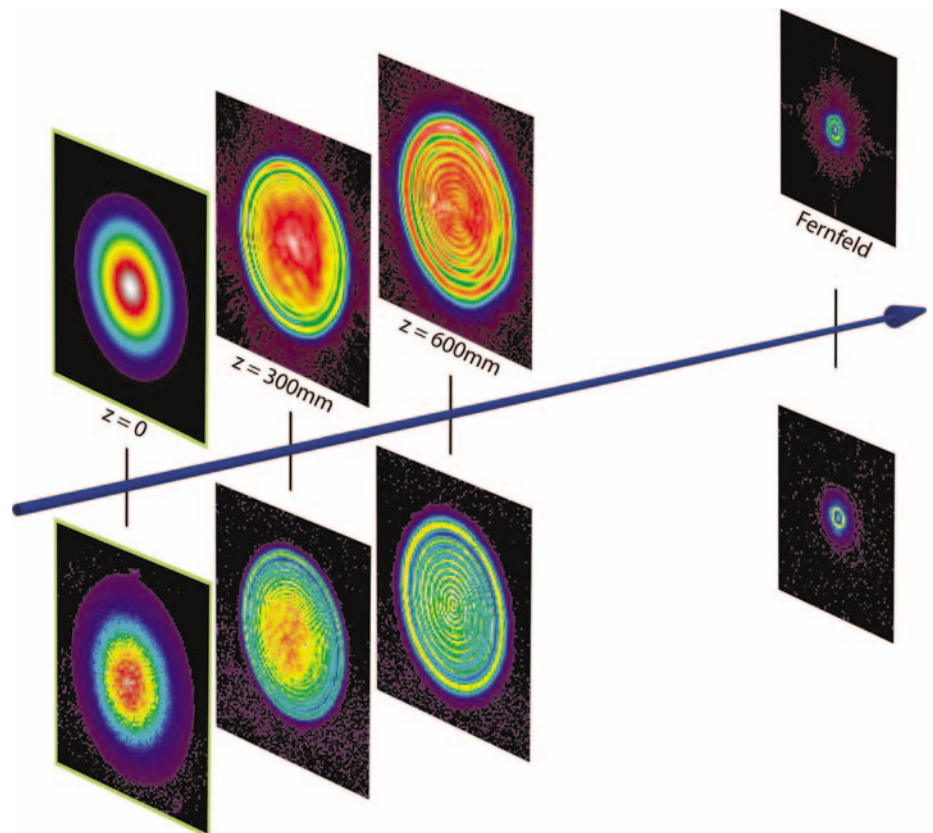
In **Bild 6** ist als Beispiel der Vergleich  
zwischen berechneten und gemessenen  
Strahlprofilen eines kollimierten He-Ne-  
Lasers (633 nm, 5 mW) dargestellt, in  
dessen Strahlverlauf ein optisches Element  
zur kontrollierten Einführung einer sphä-  
rischen Aberration eingefügt wurde. Den  
Profilberechnungen lag eine Wellenfront-  
messung am Ort  $z_0 = 0$  auf der optischen  
Achse zugrunde. Die obere Reihe zeigt  
die nach Gl. 4 „propagierten“ Profile an  
den Positionen  $z_1 = 300 \text{ mm}$  und  $z_1 = 600 \text{ mm}$   
sowie im Fernfeld. Der Vergleich ergibt  
eine gute bis sehr gute Übereinstimmung  
der

Theorie mit der tatsächlichen Profilmessung (untere Reihe). So werden z.B. sowohl die durch Selbstinterferenz hervorgerufenen Ringstrukturen wie auch das 'Donut'-Profil im Fernfeld korrekt vorhergesagt, was die Eignung des Verfahrens als Ausgangsbasis für die numerische Propagation kohärenter Strahlen demonstriert. Voraussetzung ist allerdings, dass sowohl die Wellenfront als auch das Profil in der Messebene glatt genug verlaufen, so dass sie mit einer dem Mikrolinsendurchmesser entsprechenden Ortsauflösung genau approximiert werden können.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Das beschriebene Hartmann-Shack-Verfahren ist universell zur Bestimmung der Wellenfronten von Laserstrahlung einsetzbar, da es im Gegensatz zu alternativen (z.B. interferometrischen) Verfahren nahezu keine Anforderungen an die Monochromasie und räumliche Kohärenz des Strahlungsfeldes stellt. Ein hierauf basierendes System erlaubt eine Echtzeit-Zernike-Analyse der Strahl aberrationen und kann somit zur Optimierung der Fokussierbarkeit genutzt werden, entweder durch Feinjustage von Optiken im Laserbetrieb oder aber in Verbindung mit adaptiven Elementen (z.B. Piezo-Aktuatoren oder 'Spatial Light' Modulatoren).

Für kohärente Strahlung liefert das System zudem aus einer Einzelmessung sämtliche relevanten Propagationsparameter wie Durchmesser, Divergenz,  $M^2$ , Rayleighlänge etc. und somit eine vollständige Strahlcharakterisierung in Echtzeit. Das Auswerteverfahren wurde vom Laser-Laboratorium Göttingen im Rahmen des EUREKA-Normungsprojekts CHOCLAB qualifiziert. Die Übereinstimmung mit dem vergleichsweise eingesetzten Standardverfahren der Kaustikmessung kann mittlerweile als sehr gut bezeichnet werden, die Abweichungen liegen in der Regel deutlich unter 5%. Ferner erlaubt die Kenntnis von Wellenfront und Strahlprofil für kohärente Quellen eine numerische Propagation des Strahls. Damit können Intensitätsverteilungen für beliebige z-Positionen mit hoher Präzision angegeben werden. Eine derartige „Profilverfolgung“ ist z.B. besonders interessant für die Strahltaile, an der in vielen Fällen keine hochauflösenden Messungen möglich sind. Für teilkohärente Quellen steht eine erweiterte Version des Sensors zur Verfügung, bei der aus einer simultan durchgeführten Fernfeldmessung neben den korrekten Werten für Divergenz und  $M^2$  auch die globale räumliche Kohärenz der Strahlung ausgewertet werden kann [7]. Gegenstand zukünftiger Untersuchungen wird es sein, mit Hilfe dieser Informationen auch das Propagationsverhalten von Multimode-Strahlung genau vorherzusagen.



**Bild 6:** Vorhersage des Propagationsverhaltens eines aberrierten He-Ne-Laserstrahls; obere Reihe: aus Wellenfrontmessung am Ort  $z = 0$  berechnete Strahlprofile für die Positionen  $z = 0$ ,  $z = 300$  mm,  $z = 600$  mm und für das Fernfeld (rechts); untere Reihe: zum Vergleich durchgeführte Kamermessung an den entsprechenden Positionen (siehe auch Text)

### Literaturhinweise:

- [1] ISO/DIS 11146: *Test methods for laser beam parameters – Beam widths, divergence angle and beam propagation factor* (1999)
- [2] ISO/DIS 15367: *Test methods for laser beam wavefronts – Part I: Terminology and fundamental aspects* (2000), Part II: *Phase gradient methods* (2002)
- [3] B. Platt, R. Shack, *Lenticular Hartmann screen*, Optical Science Center Newsletters, Vol. 5, No. 1, 15 (1971)
- [4] M. Born, E. Wolf, *Principles of Optics*, 6<sup>th</sup> ed., Cambridge (1985)
- [5] B. Schäfer, K. Mann, *Investigation of the propagation characteristics of excimer lasers using a Hartmann-Shack sensor*, Rev. Sci. Instrum. **71**, 2663 (2000)
- [6] U. Keller, *Sättigbare Halbleiter-Absorberspiegel für Ultraschnelle Festkörperlaser*, Photonik 4/2004, 44-47
- [7] B. Schäfer, K. Mann, *Determination of beam parameters and coherence properties of laser radiation by use of an extended Hartmann-Shack wavefront sensor*, Appl. Optics, **41** No. 15, 2809 (2002)

### Ansprechpartner:

Dr. Marc Kunzmann  
L.O.T.-Oriel GmbH & Co. KG  
Im Tiefen See 58  
D-64293 Darmstadt  
Tel. 06151/8806-46  
Fax 06151/896667  
eMail: kunzmann@lot-oriel.de  
Internet: www.lot-oriel.de



Dr. Bernd Schäfer  
Laser-Laboratorium Göttingen e.V.  
Optik- und Dünnschichtlabor  
Hans-Adolf-Krebs-Weg 1  
D-37077 Göttingen  
Tel. 0551/5035-12 / -41  
Fax 0551/5035-99  
eMail: bschae@llg.gwdg.de  
Internet: www.llg.gwdg.de



Dr. Klaus Mann  
Laser-Laboratorium Göttingen e.V.  
Optik- und Dünnschichtlabor  
Hans-Adolf-Krebs-Weg 1  
D-37077 Göttingen  
Tel. 0551/5035-12 / -41  
Fax 0551/5035-99  
eMail: kmann@llg.gwdg.de  
Internet: www.llg.gwdg.de