

Shack-Hartmann-Sensoren für Qualitätskontrolle in klassischer und Laser-Optik

042 Dr. Johannes Pfund, Dr. Mathias Beyerlein, OPTOCRAFT GmbH

In diesem Beitrag werden zunächst Detektionsprinzip und Eigenschaften von Shack-Hartmann-Sensoren beschrieben. In der Folge werden verschiedene Anwendungen herausgearbeitet, bei denen die Leistungsmerkmale solcher Detektoren besonders gut zum Tragen kommen.

Einleitung

Die Oberflächenqualität optisch wirksamer Grenzflächen wird meist mit interferometrischen Verfahren gemessen. Die Interferometrie erfordert immer eine Referenzfläche, da nur Phasendifferenzen von Wellenfronten in Form von periodischen Intensitätsverteilungen messbar sind. Historisch wurde hauptsächlich mit sogenannten Probegläsern gearbeitet. Dabei wird der Prüfling mit einem geeignet gekrümmten Probeglas gepaart, so dass ein kleiner Luftspalt entsteht. Dieser Luftspalt zeigt bei Beleuchtung mit Licht einer schmalbandigen Quelle Interferenzen an und zwar die Summe der Abweichungen von Prüfling und Probeglas.

Seit der Erfindung des Lasers hat die berührungslose Interferometrie [1] in zunehmendem Maße Einzug in die Optikfertigung und in Prüflabors gehalten. Das generelle Stabilitätsproblem der berührungslosen Interferometrie ist allerdings so gravierend, dass in vielen Fällen stabilere Lösungen erforderlich sind. Hier ermöglicht der Hartmann-Sensor – bzw. in moderner Ausführung der Shack-Hartmann-Sensor – eine Wellenfrontdetektion ohne Wellenfront-Referenz. Durch den Wegfall der interferometrischen Referenzierung gewinnt man einen enormen Zuwachs an Stabilität.

1 Detektionsprinzip des Shack-Hartmann-Sensors

Das Detektionsprinzip beruht auf der Möglichkeit, eine Wellenfront aus ihrem Gradientenfeld mittels geeigneter Integrationsverfahren zu rekonstruieren. Im Falle des Shack-Hartmann-Sensors wird das Gradientenfeld wie in **Bild 1** mit Hilfe eines Mikrolinsenfeldes und eines Arraydetektors (z.B. CCD- oder CMOS-Kamera) gemessen. (Beim älteren Hartmann-Sensor-Prinzip stand anstelle des Mikrolinsenfeldes eine einfache Lochplatte.)

Das Mikrolinsenfeld „tastet“ die Wellenfront ab und bildet in einer parallelen Ebene ein Feld von Fokusflecken. Die geometrischen Lagen der Fokusflecke in der Ebene des Array-Detektors werden über eine Schwerpunktsberechnung mit den Intensitätsgewichten der einzelnen Pixel des Arrays gewonnen. Die Komponenten des Gradientenvektors α_x , α_y folgen aus den Verschiebungen σ_x , σ_y und der Brennweite f nach der exakten Formel:

$$\alpha_x = \frac{\sigma_x}{\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + f^2}}; \alpha_y = \frac{\sigma_y}{\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + f^2}}$$

Aus diesem Gradientenfeld ergibt sich die Wellenfläche durch Anfitzen eines geeigneten Polynoms an die Gradientenwerte (**Bild 2**).

Prinzip: Shack-Hartmann Sensor

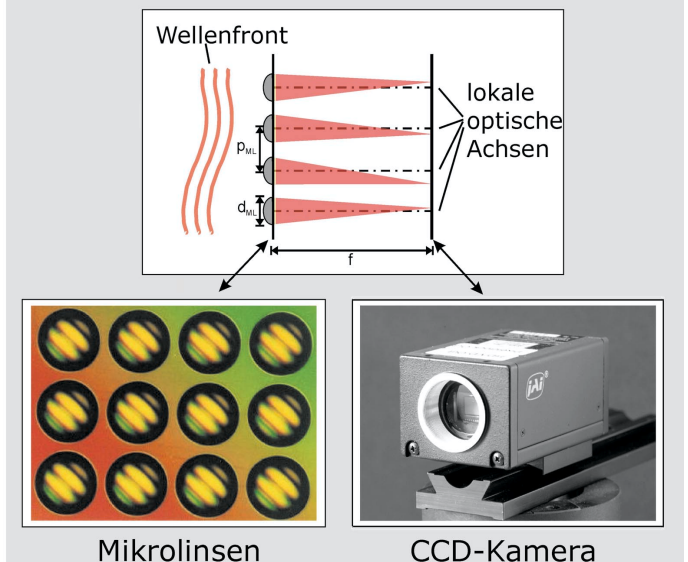


Bild 1: oben: Detektionsprinzip des Shack-Hartmann-Sensors; links unten: Ausschnitt aus einem Mikrolinsen-Feld; rechts unten: CCD-Kamera für die Detektion des Spotfeldes

2 Leistungsmerkmale moderner Shack-Hartmann-Sensoren

Mit der Entwicklung von Kameras, Bildspeichersystemen und mikrooptischen Komponenten hat auch die Leistungsfähigkeit moderner Shack-Hartmann-Sensoren zugenommen. Im Zusammenspiel mit einer umfangreichen, auf die Bedürfnisse der Anwender zugeschnittenen Software ist der Shack-Hartmann-Sensor ein universelles Werkzeug für Fertigung, Labor und Diagnostik.

In diesem Kapitel sollen einige typische Leistungsmerkmale herausgearbeitet werden.

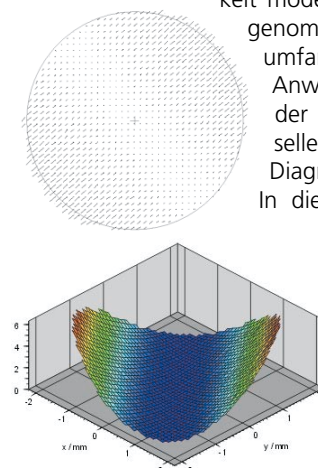


Bild 2: oben: Spotfeld einer zylindrischen Wellenfront, die Spotverschiebungen sind als Vektoren eingezeichnet; unten: Darstellung der Wellenfront

2.1 Laterale Auflösung und Empfindlichkeit

Die laterale Auflösung und damit die Subaperturgröße hängt einerseits von der angestrebten Zahl von Messpunkten im Durchmesser der Wellenfront und andererseits von der gewünschten Empfindlichkeit ab. Je größer die Brennweite der Mikrolinsen ist, desto größer ist auch die Empfindlichkeit des Shack-Hartmann-Sensors.

Der Bereich sinnvoller Brennweiten wird bei gegebener lateraler Auflösung durch folgende Abschätzungen eingegrenzt:

- Die maximale Brennweite wird physikalisch durch die Beugung an der Mikrolinsenapertur beschränkt (Durchmesser: d_{ML}). Damit benachbarte Spots gut getrennt bestimmt werden können, sollten diese in etwa halb so groß sein wie der Abstand der Mikrolinsenmittelpunkte.
- Die minimale Brennweite ist technisch aufgrund der Bestimmbarkeit der Spotpositionen gegeben. Wird der Spot zu klein, so befinden sich in seinem Bereich zu wenige Pixel der CCD-Kamera, so dass eine Positionsbestimmung mit Subpixelgenauigkeit nicht mehr erzielbar ist. Die Spots sollten im Durchmesser größer als 5 CCD-Pixel sein [2].

2.2 Extremer Messbereich

Der Messbereich des Shack-Hartmann-Sensors wird einerseits durch die Voraussetzung limitiert, dass die Spots nicht ineinander laufen dürfen, sowie andererseits durch die Erfordernis, die Spots eindeutig ihren Referenz-Punkten zuordnen zu können. Diese Problematik hat ihre Ursache darin, dass die Mikrolinsen und damit auch ihre einzelnen Spots ununterscheidbar sind.

Durch spezielle Algorithmen lässt sich bei hinreichend glatten Wellenfeldern ein extremer Messbereich erreichen. Der minimale messbare lokale Krümmungsradius einer Wellenfront kann damit reduziert werden auf etwa die doppelte Brennweite der Mikrolinsen. Liegt diese z. B. bei $f = 5$ mm, dann bedeutet dies, dass die lokale Brechkraft der Wellenfront bei $1 \text{ m} / (2 \cdot 0,005 \text{ m}) = 100 \text{ Dptr}$ liegt. Dieser enorme Messbereich eröffnet völlig neue Wege in einer Vielzahl von Anwendungen. Beispielsweise können asphärische Oberflächen ohne eine exakte Null-Linse geprüft werden, ebenso wie z. B. die Wellenfront an nahezu jeder beliebigen Stelle in einem optischen System oder auch die Güte von menschlichen Augen mit sehr starker Fehlsichtigkeit.

2.3 Stabilität

Im Gegensatz zu interferometrischen Methoden wird keine Referenzwelle benötigt. Das hat zunächst einmal eine erhöhte Stabilität des Sensors gegenüber mechanischen Erschütterungen zur Folge. Da es sich um ein Verfahren handelt, bei welchem die Ableitungen der Wellenfronten, d. h. die Spotpositionen, detektiert werden, spielt außerdem ein konstanter Phasen-Offset (sogenannte „Piston-Movements“) innerhalb eines optischen Messsystems beim Shack-Hartmann-Sensor keine Rolle.

Um Missverständnissen vorzubeugen sei allerdings erwähnt, dass auch bei Messungen mit einem Shack-Hartmann-Sensor die Verwendung von Kalibriermessungen meist zu empfehlen ist.

2.4 Kohärenz des Lichtes

Auch die Kohärenzanforderungen an das detektierte Lichtbündel sind beim Shack-Hartmann-Sensor geringer als bei den meisten interferometrischen Methoden. Wenn das Linsenarray vor dem CCD-Array refraktiver Natur ist, kann de facto mit weißem Licht bzw. mit einer großen Bandbreite bei der gewünschten Schwerpunktwellenlänge gearbeitet werden.

Darüber hinaus sind auch die Anforderungen an die räumliche Kohärenz äußerst gering. Es ist völlig ausreichend, wenn die Größe des lateralen Kohärenzbereichs von der Größenordnung einer Subapertur des Linsenarrays ist, da dann der Fokusfleck nicht noch zusätz-

lich durch die Lichtquellengröße verbreitert wird und womöglich benachbarte Spots überlappen und nicht mehr getrennt detektiert werden können.

2.5 Anwendungsfreundlichkeit

Durch die hohe Geschwindigkeit bei online-Auswertung mittels Shack-Hartmann-Sensoren (z. B. etwa 10 Hertz) erhält der Anwender schnell qualitative und quantitative Aussagen über die Wellenfront. Dabei sind die Referenzierung auf eine Kalibrierwellenfront, die Subtraktion verschiedener Zernike-Terme, die Entwicklung nach Zernike und viele andere Funktionen Stand der Technik.

3 Einsatzfelder des Sensors

Ursprünglich wurde der Hartmann-Test für die Justierung und Prüfung optischer Systeme eingesetzt [3]. In den siebziger Jahren wurden für die Astronomie auch Kompensationsmethoden in Form von aktiver Optik entwickelt [4], bei denen seither der Shack-Hartmann-Sensor die Messung der Wellenfrontdeformationen aufgrund stochastischer Fluktuationen in der Atmosphäre übernimmt (das sogenannte „seeing“). Damit wird die Wellenfrontdeformation mit hoher Messrate gemessen, so dass die Korrekturdaten zur Kompensation mit einem adaptiven Spiegel genutzt werden können [5].

Durch den Erfolg dieser Methoden in der Astronomie hat sich der Shack-Hartmann-Sensor auch für andere Anwendungen qualifiziert [6, 7, 8, 9]. Die Deformationen optischer Wellenfronten können auf unterschiedlichste Weise hervorgerufen worden sein, sei es (1) aus der Lichtquelle wie bei der Charakterisierung von Laserstrahlung oder (2) durch Reflexion, Brechung, Beugung oder Streuung an optischen Flächen oder Objekten, deren geometrische Form oder Brechzahlverteilung gemessen werden soll. Die Wellenfront „tastet das zu messende Objekt ab“, und anhand der Deformationen kann auf die Kenngrößen des Objekts rückgeschlossen werden. Objekte können dabei optische Flächen, Komponenten und Systeme sein, oder unter Beachtung besonderer Vorbedingungen auch mechanische Bauteile mit technischen Oberflächen.

Im folgenden sind einige wichtige Anwendungen von Shack-Hartmann-Sensoren aufgeführt:

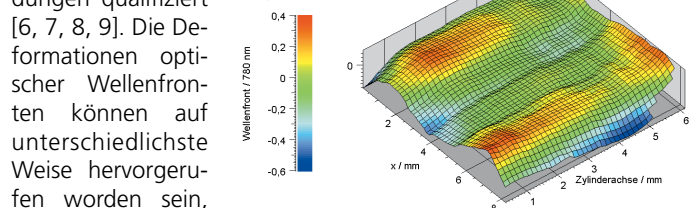


Bild 3: Mikrozyklinderlinsen für die Kollimation von Dioden-Laserstrahlung. Oben: Funktionsprinzip; Mitte: Prüfanordnung mit Computer-generiertem Hologramm (CGH); unten: Messergebnis der Wellenfront-Aberrationen mit einem Shack-Hartmann-Sensor vom Typ SHSLab

lich durch die Lichtquellengröße verbreitert wird und womöglich benachbarte Spots überlappen und nicht mehr getrennt detektiert werden können.

Im folgenden sind einige wichtige Anwendungen von Shack-Hartmann-Sensoren aufgeführt:

- Justage optischer Systeme
- Laserstrahlcharakterisierung (M^2 etc.)
- Optikprüfung in Auflicht und Durchlicht (z. B. Planflächen, Sphären, Asphären)

4. Prüfung technischer Oberflächen in streifender Inzidenz
 5. Detektion der Wellenfront-Aberrationen des Auges
 6. Sensorik für die adaptive Optik insbes. in der Astronomie
- Die ersten drei Einsatzfelder sollen im folgenden kurz erläutert werden.

3.1 Justage optischer Systeme

In vielen optischen Geräten wird das Licht eines Lasers über optische Systeme und Komponenten wie etwa Spiegel geführt und in eine Zielebene transformiert. Bei der Montage solcher Geräte muss der Strahl durch das System verfolgt werden und seine lokale Wellenfrontform mit den Sollwerten verglichen werden. Gerade bei Justage-Anwendungen ist ein Wellenfront-Sensor mit großem Dynamikbereich und hoher Folgefrequenz (einige Hertz) erforderlich, da stark deformierte Wellenfronten vorkommen können und der Justageprozess in Echtzeit ablaufen sollte. Durch die schnelle Bereitstellung der Wellenfront-Daten ist außerdem eine automatische Regelung der Justage möglich.

3.2 Laserstrahlcharakterisierung

Beim Shack-Hartmann-Sensor kann das Intensitätsprofil eines Strahls über die Messung der Spot-Intensitäten bestimmt werden. Durch Berechnung der Varianz des Strahldurchmessers (entsprechend den zweiten Momenten der so gewonnenen Verteilung) können in Verbindung mit der berechneten Wellenfront verschiedene charakteristische Strahl-Parameter wie die Halbwertsbreite, der Fernfeld-Öffnungswinkel oder das M^2 ermittelt werden. Letzteres gibt Auskunft darüber, wie „nahe“ ein gegebener Strahl einem TEM_{00} Gauß-Mode ist.

Bei der Laserstrahlcharakterisierung mit Shack-Hartmann-Sensoren muss allerdings eine im Vergleich zu anderen Verfahren (z. B. knifedge-Methode, scanning-slit-Methode etc.) reduzierte laterale Auflösung in Kauf genommen werden. Außerdem ist die Charakterisierung von Laserstrahlen mit sehr hohen M^2 -Werten schwierig, da die Information bezüglich der Kohärenz der Strahlen bei Standard-Auswertungen verloren geht.

3.3 Optikprüfung in Auflicht und Durchlicht

Bei der Prüfung optischer Elemente mittels Shack-Hartmann-Sensoren im Auflicht kann die Abweichung der Prüflingsgestalt von ihrer Soll-Form gemessen werden. Prüft man dagegen im Durchlicht, so lässt sich die Abweichung der Prüflings-Wirkung von ihrem Soll ermitteln. Auch charakteristische Übertragungsfunktionen wie Punktbildfunktion (PSF) und Modulationsübertragungsfunktion (MTF) können berechnet werden. Hervorzuheben sei außerdem noch die Flexibilität des Shack-Hartmann-Sensors bezüglich verschiedener Wellenlängen.

Als Beispiel sei hier die Messung der Wellenfront-Aberrationen einer hochaperturigen Zylinderlinse bei einer Wellenlänge von 790 nm beschrieben, wie sie zur Strahlformung von Laserdioden eingesetzt wird (**Bild 3** oben). Wegen des sehr hohen Seitenverhältnisses von ca. 10 : 1 und der hohen numerischen Apertur von 0,85 musste bei der Beleuchtung des Prüflings besondere Sorgfalt angewandt werden. So kam ein Computer-generiertes Hologramm für die Strahlformung und die anamorphotische Entzerrung zum Einsatz (**Bild 3** Mitte). In **Bild 3** unten sind die Wellenfront-Aberrationen einer solchen Linse dargestellt.

4 Zusammenfassung

Es wurden Detektionsprinzip und Anwendungsfelder von Shack-Hartmann-Sensoren diskutiert. Sie zeichnen sich im Vergleich zur Interferometrie durch höhere Stabilität, höhere Geschwindigkeit, höhere Messdynamik und einen extremen Messbereich aus. Laterale

Auflösung und Empfindlichkeit des Shack-Hartmann-Sensors lassen sich durch geeignete Wahl der Design-Parameter der Mikrolinsen in einem weiten Bereich an die speziellen Anforderungen verschiedener Anwendungen anpassen. Bereits mit wenigen Standard-Arrays kann den meisten Aufgaben entsprochen werden. Auf Grund des Detektionsprinzips mittels Mikrolinsen muss gegenüber der Interferometrie allerdings grundsätzlich eine geringere laterale Auflösung in Kauf genommen werden. Die Einbußen liegen in beiden Achsen jeweils bei etwa einer Größenordnung. Dennoch überwiegen die Vorzüge von Shack-Hartmann-Sensoren in vielen Anwendungen so deutlich, dass diese sich dort als Standard-Messgerät durchgesetzt haben bzw. durchsetzen werden.

Literaturhinweise

- [1] D.Malacara; „Optical shop testing“, pp. 323-349, Wiley, 1978, New York.
- [2] G.Cao, X.Yu, „Accuracy analysis of a Hartmann-Shack wavefront sensor operated with a faint object“, Opt. Eng. 33, 2331-2335 (1994).
- [3] J.Hartmann, „Bemerkungen über den Bau und die Justierung von Spektrographen“, Zeitschrift für Instrumentenkunde, S. 2ff, Januar 1900.
- [4] B.Platt, R.Shack; „Lenticular Hartmann Screen“ Optical Sciences Center Newsletter, Vol. 5, No.1, March 1971 p. 15.
- [5] R.K.Tyson; „Principles of Adaptive Optics“ sec. ed. Academic Press, 1998, Boston.
- [6] J.W.Hardy, „Active Optics: a new technology for the control of light“, Proceedings of the IEEE, 66, 651-697 (1978).
- [7] J.A.Koch, R.W.Presta, R.A.Sacks, R.A.Zacharias, E.S.Bliss, M.J.Dailey, M.Feldmann, A.A.Grey, F.R.Holdener, J.T.Salmon, L.G.Seppala, J.S.Toeppen, L.Van Atta, B.M.Van Wonterghem, W.T.Whistler, S.E.Winters, B.W.Woods, „Experimental comparison of a Shack-Hartmann-Sensor and a phase-shifting interferometer for large-optics metrology applications“, Appl. Opt. 39, 4540-4546 (2000).
- [8] D.R.Neal, W.J.Alford, J.K.Gruetzner, M.E.Warren, „Amplitude and phase beam characterization using a two dimensional wavefront sensor“, SPIE 2870, 72 (1996).
- [9] J.Pfund, N.Lindlein, J.Schwider, R.Burow, Th.Blümel, K.-E.Elßner, „Absolute sphericity measurement: a comparative study on the use of interferometry and a Shack-Hartmann sensor“, Optics Letters, 23, 742-744 (1998).

Ansprechpartner:

Dr. Johannes Pfund
 Dr. Mathias Beyerlein
 OPTOCRAFT GmbH
 Hofmannstr. 118
 D-91052 Erlangen
 Tel. / Fax 09131/8528396
 eMail: pfund@optocraft.de
 Internet: www.optocraft.de

