

OPTOCRAFT

## Effiziente Qualitätssicherung mittels multifunktionaler Optikprüfung

Die stark zunehmende Zahl an optischen Systemen und der immer häufigere Einsatz von Asphären zwingt die Industrie zur automatisierten Herstellung bei gleichzeitig steigenden Anforderungen an die Qualität. Unabkömmlich sind hier Prüfverfahren, die einen weiten Bereich optischer Messwerte zugänglich machen und sich flexibel an die jeweilige Messaufgabe anpassen lassen.

**Ralf Dorn, Johannes Pfund, OPTOCRAFT GmbH, Erlangen**

Ob Handykameras, Head-up-Displays, Rückfahrkameras oder Inspektionsinstrumente: immer häufiger werden in Geräten und Systemen Optiken eingesetzt. Besonders Asphären sind auf dem Vormarsch, denn mit ihnen lassen sich optische Systeme deutlich kompakter und leichter gestalten. Dank moderner Anlagentechnik ist heute die automatisierte Herstellung von solchen komplexen Optiken Stand der Technik, und die Produktionsvolumina wachsen. Obwohl die funktionalen wie auch die Qualitätsanforderungen an die Optiken kontinuierlich steigen, hinkt das Qualitätsmanagement mangels ausreichend flexibler Messtechnik oft hinterher. Für die Quali-

tätsprüfung von Flächen stehen hierbei verschiedene Methoden zur Verfügung, z.B. die taktile Abtastung. Der Nachteil: die Optik kann beschädigt werden und das Verfahren ist sehr langsam. Die Interferometrie ist ein etabliertes Verfahren, das sowohl für die Flächen- als auch für die Funktionsprüfung eingesetzt wird. Bis zu mittleren Krümmungen der zu messenden Wellenfront ist das Ergebnis direkt optisch wahrzunehmen (z.B. im klassischen Probenglas), aber es braucht eine Referenz und bei zunehmender Krümmung kommt dieses Verfahren auch mit Zusatzelementen wie speziell an den Prüfling angepassten Computer-generierten Hologrammen (CGHs) an seine Grenzen.

Eine weitere Methode ist die Messung mit einem Shack-Hartmann-Wellen-

frontsensor, dessen Auswertung mittels aktueller Rechnerleistung sehr schnell arbeitet und vergleichbare Ergebnisse liefern kann [1]. Da das Messprinzip keine externe Referenz benötigt um eine Wellenfront auszuwerten, ist der Sensor-kopf weitgehend unempfindlich gegenüber Vibrationen und eignet sich daher exzellent für Maschinenumgebungen.

### Der Shack-Hartmann-Wellenfront-Sensor

Ein Wellenfrontsensor besteht aus einem 2D-Array von Mikrolinsen und einem Detektor, z.B. einer CCD-Kamera. Eine ebene Wellenfront erzeugt nach Durchlaufen des Mikrolinsenfeldes auf dem Detektor ein regelmäßiges Punkteraster, dessen Spots denselben Abstand wie die

Mikrolinsen haben. Weicht die Wellenfront  $W(x,y)$  von einer Planwelle ab, dann wandern die von den Mikrolinsen erzeugten Spots entsprechend stark von der optischen Achse der zugehörigen Mikrolinse weg (Bild 1). Die Spotverschiebung  $\sigma$  ist proportional zur lokalen Neigung der Wellenfront an der jeweiligen Mikrolinse und enthält die Information über die Ausbreitungsrichtung des auf die Mikrolinse treffenden Strahls. Letztlich erhält man also ein Raster aus Neigungsinformationen (1. Ableitung) der Wellenfront. Durch einen Integrationsalgorithmus kann dann die Wellenfront rekonstruiert werden [2].

Allerdings kommt es zu einem Zuordnungsproblem, wenn sich die Spots bei stark gekrümmten Wellenfronten aus ihrer ‚Heimatapertur‘ in den Bereich benachbarter Spots verschieben. Normalerweise ist dann der Dynamikbereich eines Shack-Hartmann-Sensors ausgeschöpft. Häufig wird das Problem umgangen, indem Spots (ausgehend von einem unproblematischen Messfeld) im zeitlichen Verlauf verfolgt werden. Durch geschickte, auf Bildverarbeitung basierende Algorithmen kann jedoch auch auf Basis eines einzigen Kamerabildes eine eindeutige Zuordnung der Spots zu ihren Referenzpunkten erreicht werden. Dieses Verfahren kommt erst dann an seine Grenzen, wenn der lokale Krümmungsradius kleiner als die doppelte Brennweite der Mikrolinsen wird (Krümmungsradius  $< 2 \cdot f_{ML}$ ). Wellenfronten mit extremen lokalen Krümmungsradien bis hinab zu 5 mm lassen sich so am Mikrolinsenarray messen. Dies ist entscheidend für die Auswertung stark asphärischer Wellenfronten.

**Prüfsysteme basierend auf Wellenfrontensoren**

Optische Systeme zur Prüfung der Funktion lassen sich grundsätzlich in zwei Kategorien einteilen: In der ersten werden die Prüflinge in Transmission nur einmal vom Messstrahl durchlaufen, man spricht von Prüfung im einfachen Durchgang (Bild 2 oben). Auf dem Weg von der Quelle bis zum Wellenfrontensensor sammelt die Wellenfront jedoch nicht nur die vom Prüfling eingeführten Aberrationen auf, sondern wird durch die Fehler aller Komponenten modifiziert. Das Grundproblem dieser optischen Schaltung ist daher die eingeschränkte Kalibrierbarkeit. Hat man

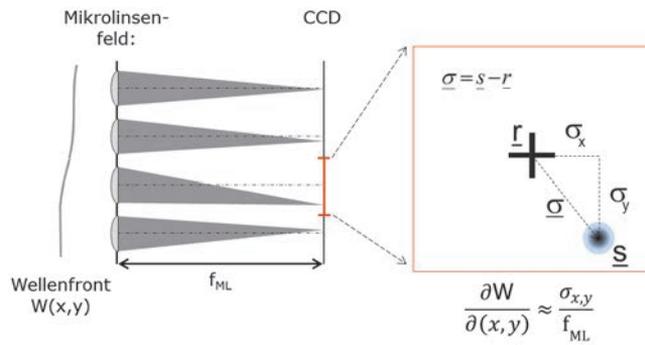


Bild 1: Die Spotverschiebung  $\sigma$  ist ein Maß für die lokale Neigung der Wellenfront  $W$ . Durch Integration kann die Wellenfront rekonstruiert werden

keinen perfekten Referenzprüfling („goldenen Master“) zur Verfügung, so muss man sich in der Regel zumindest auf die Qualität der Beleuchtungseinheit vor dem Prüfling verlassen können.

Eine Ausnahme stellt die Prüfung von planparallelen Platten dar: Nach dem Motto „Kein Prüfling (oder eine dünne Luftschicht) ist ein idealer Prüfling“ steht hier auf triviale Weise ein idealer Referenzprüfling zur Verfügung. Handelt es sich bei der zu messenden Planparalleplatte zudem um einen stark absorbierenden Graufilter, so zeigt sich ein auf einem Shack-Hartmann-Sensor basierender Aufbau einem herkömmlichen Interferometer deutlich überlegen. Im Interferometer sind nämlich ab einer gewissen optischen Dichte des Graufilters die Intensitäten im Mess- und Referenzstrahl so unterschiedlich, dass aufgrund des geringen Interferenzkontrastes keine Auswertung mehr möglich ist. Man könnte zwar die Intensität im Referenzarm wiederum mit einem Graufilter entsprechend abschwächen, jedoch ist dessen Qualität dann wiederum nicht bekannt. Man hat es mit einem Henne-Ei-Problem zu tun. Nutzt man jedoch einen Shack-Hartmann-Sensor, so können die Referenz- und die Prüflingsmessung zu unterschiedlichen Zeiten erfolgen und die Intensität der Lichtquelle und/oder die Belichtungszeit der Kamera lässt sich jeweils optimal anpassen. Damit wird die Messung von Graufiltern bis zu OD7 möglich.

Bei Aufbauten der zweiten Kategorie macht das Licht zwei Durchgänge durch den Prüfling und wird nach dem ersten Durchgang von einem (Kugel-)Spiegel (Referenzsphäre in Bild 2) zurückreflektiert; man spricht von Prüfung im doppelten Durchgang (Bild 2 unten). Im gezeigten Beispiel erzeugt der Prüfling (z.B. ein Mikroskopobjektiv) aus einer ebenen einlaufenden Welle eine Kugelle. Der dahinter angebrachte (Hohl-)Kugelspiegel ist so angeordnet, dass sich

der Kugelmittelpunkt im Fokus des zu prüfenden Objektivs befindet. Alle Strahlen treffen also jeweils lokal senkrecht auf die Kugeloberfläche und werden in sich zurückreflektiert.

Wegen des doppelten Durchgangs durch den Prüfling verdoppelt sich auch dessen Einfluss auf den Messstrahl und damit die Messempfindlichkeit. Schließlich passiert ein Strahl eine bestimmte fehlerhafte Stelle, an der z.B. eine Linsenfläche im Prüfling durch einen Fertigungsfehler lokal eingedellt ist, auf dem Hin- und Rückweg. Der damit verbundene optische Weglängenfehler wird entsprechend doppelt aufgesammelt. Verglichen mit der Prüfung im einfachen Durchgang ist der wesentliche Vorteil der Prüfung im doppelten Durchgang jedoch nicht die erhöhte Empfindlichkeit, sondern die gute Kalibrierbarkeit der Anordnung. Aus der Sicht des Restsystems verhält sich nämlich die korrekt zueinander justierte Kombination aus Prüfling und Kugelspiegel zusammen wie ein Planspiegel: Jeder auf den Prüfling einlaufende Strahl wird in sich zurückreflektiert, als würde er an einem Planspiegel reflektiert. Setzt man also für eine Kalibrationsmessung einen Planspiegel vor den Prüfling, so beinhaltet diese Messung alle Fehler der restlichen Komponenten des Aufbaus. Die Messgenauigkeit wird letztlich durch die Qualität von Planspiegel und Referenzsphäre begrenzt, die jeweils in guter Qualität erhältlich sind. In der Praxis werden Messgenauigkeiten von besser als  $\lambda/20$  PV erreicht.

Die gemessene Wellenfront mit den vom Prüfling aufgeprägten Aberrationen enthält eine Fülle von Informationen über die Abbildungsqualität des Prüflings. Neben dem direkt zugänglichen Wellenfrontbild lassen sich bei entsprechender Auswertung z.B. die Zernike-Koeffizienten, die Punktbildfunktion, die Strehlzahl und die Modulations-Transferfunktion gewinnen (Bild 3).

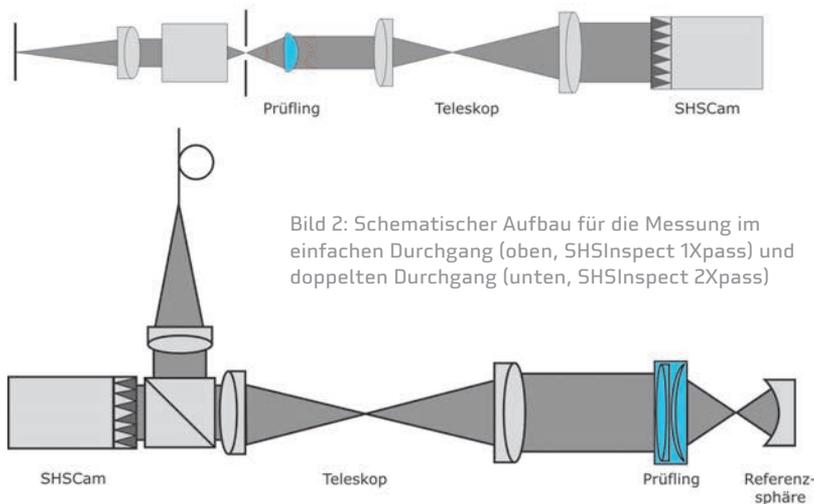


Bild 2: Schematischer Aufbau für die Messung im einfachen Durchgang (oben, SHSInspect 1Xpass) und doppelten Durchgang (unten, SHSInspect 2Xpass)

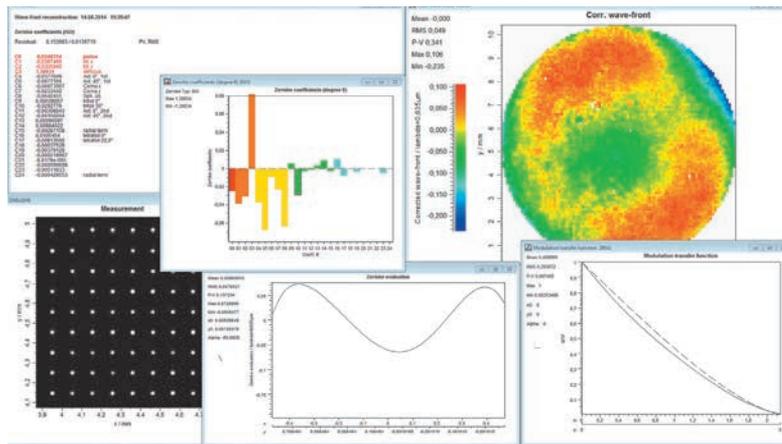


Bild 3: Ausgehend vom Kamerabild mit den Spots der Mikrolinsen können über die Software Wellenfront, Zernike-Koeffizienten, Punktbild- und Modulationstransferfunktion rekonstruiert werden

Mitunter können jedoch die Vorteile des doppelten Durchgangs auch zu einem Nachteil werden. Durch die Reflexion an der Referenzsphäre existieren aus Sicht des Sensors zwei Bilder des Prüflings, die man nicht gleichzeitig scharf abbilden kann. Dies stört insbesondere wenn der Pupillenrand und evtl. vorhandene Verschmutzungen oder Kratzer genau lokalisiert werden sollen. Insbesondere bei für sich gut korrigierten Prüflingen dominiert aber im Optikkaltrage die gute Kalibrierbarkeit über diesen Nachteil. Bei Prüflingen, die per Design nach dem doppelten Durchgang eine stark asphärische Wellenfront erzeugen, kann es passieren, dass es schwierig oder unmöglich wird, ein geeignetes Teleskopdesign zu finden, das die stark verzerrte Wellenfront ohne Überwerfungen vom Prüfling zum Sensor transportiert. In diesem Fall würde man, trotz schlechterer Kalibrierbarkeit, einen Prüfaufbau im einfachen Durchgang wählen. Da hier der Prüfling seine Aberrationen nur

einmal in die Wellenfront einbringt, ist diese weniger stark verzerrt und lässt sich leichter führen. Weiterhin ist bei geeigneten Abständen zwischen Teleskop, Prüfling und Wellenfrontsensor eine scharfe Abbildung des Prüflings auf den Sensor möglich; eine Voraussetzung für die visuelle Inspektion.

### Voraussetzungen für F&E- und Produktionseinsatz

Damit die Messsysteme für die optische Industrie interessant sind, müssen sie nicht nur gut messen, sondern sich auch gut in die automatisierte Produktion einfügen lassen. Wichtig ist dabei eine ausreichend schnelle Datenaufnahme, d.h. das Messsystem soll bezüglich des Produktionstaktes der Anlage in Echtzeit messen. Aktuelle Wellenfrontsensoren erreichen hier – je nach lateraler Auflösung – Messraten für die Wellenfrontaufnahme zwischen 1 Hz bis über 1 kHz. Produktionsumgebungen vibrieren in

der Regel, angeregt durch laufende Maschinen oder Motoren im Gerät selbst. Da die Messsysteme auf einem Wellenfrontsensor basieren, sind Vibrationen weniger störend als bei solchen, die auf einem Interferometer aufbauen. So kann auf aufwendige Schwingungsdämpfungen verzichtet werden.

Eine weitere wichtige Voraussetzung für den Einsatz in der Qualitätskontrolle der Produktion ist eine ausreichend hohe Genauigkeit. Bereits die reinen Sensorköpfe erreichen beim System mit Wellenfrontsensor eine typische Grundgenauigkeit von (unkalibriert)  $\lambda/15$  PV. Die Abweichungen von einem ausgewerteten Kamerabild zum nächsten, die durch das Rauschen im Sensorkopf selbst bedingt sind, liegen (ohne weitere Mittelung) in der Größenordnung  $\lambda/300$  rms. Sie stellen eine untere Grenze für die Genauigkeit dar, die realisierbar ist, wenn alle Kalibrationsmaßnahmen ideal greifen. Die in praktischen Anwendungen erreichbaren Genauigkeiten hängen vom optischen Schaltbild und der Qualität der Referenzobjekte ab. Bei Aufbauten im doppelten Durchgang werden typische Genauigkeiten von besser  $\lambda/20$  PV erreicht.

In Justageplätzen ist es wichtig, dass ein Objektivsetzer oder Justageroboter schon aus einem Zustand der schlechten Vorjustage heraus mit der Optimierung beginnen kann oder die Möglichkeit hat, gezielt auf einen sog. Nicht-Null-Zustand hin zu justieren [4]. Der Dynamikbereich der Sensoren lässt sich drastisch erhöhen, wenn die Möglichkeit einer erweiterten Spotzuordnung vorhanden ist. Bei der Prüfung chromatischer Effekte wie Farblängs- und Farbquerfehler ist es wichtig, dass ein einzelner Wellenfrontsensor in einem weiten Wellenlängenbereich einsetzbar ist. Das optische Grundprinzip erlaubt es, den Wellenfrontsensor nicht nur mit Lichtquellen unterschiedlicher Wellenlängen zu benutzen, sondern auch Lichtquellen geringer Kohärenz zu verwenden. Damit können kostengünstige LED-Quellen eingesetzt werden, die für einen großen Wellenlängenbereich bereitstehen.

### Multifunktionale Systeme

Auf Shack-Hartmann-Sensoren basierende Systeme erlauben u.a. auch die Messung der Bildfeldwölbung. Denn beim zukünftigen Objektiv sollen später die Bildpunkte idealerweise in einer Ebene

ne liegen, um ein scharfes Bild zu erhalten. Um die Form der Bildschale zu bestimmen wird der Messstrahl aus der optischen Achse gekippt und unter verschiedenen Feldwinkeln die Fokusslage gemessen.

Um chromatische Fehler zu ermitteln, muss mit Licht mehrerer Wellenlängen gemessen werden. Automatische Wechselsysteme erlauben Messzyklen zur Bestimmung der chromatischen Längs- und Queraberrationen.

Kunststoffoptik hat heute einen weiten Einsatzbereich gefunden und mit den früheren Billigteilen schlechter Qualität haben aktuelle Kunststoffobjektive nichts mehr zu tun, schließlich sollen die Linsen etwa der Handykamera hochwertige Bilder liefern. Hergestellt werden diese Linsen durch Spritzgießen bzw. Spritzprägeverfahren. Lunken oder andere produktionsbedingte Fehler mindern, ebenso wie Spannungsdoppelbrechung, die Abbildungsleistung. Letztere lässt sich durch Messung unter verschiedenen Polarisationszuständen ermitteln.

Viele Objektive haben an einer Stelle eine Schiebelinse vorgesehen, die gezielt verschoben und/oder verkippt werden kann um z.B. Form- und Positionsfehler der anderen, fest montierten Linsen zu kompensieren. Mit dem Wellenfrontsensor bei doppeltem Strahldurchgang ist das Ausjustieren solcher Schiebelinsen z.B. in Mikroskopobjektiven sehr einfach und schnell möglich. Allerdings muss man nach einer Anpassung der Schiebelinse im Objektiv die Referenzsphäre am Messgerät nachstellen, an der der Strahl nach dem ersten Durchgang durch den Prüfling reflektiert wird. Damit der Bediener dann nicht ständig zwischen Prüfling und Bedienfeld für die Referenzsphäre wechseln muss, gibt es einen Modus, bei dem diese Referenzsphäre automatisch in einem Regelkreis in die Idealposition verfahren wird, so dass sich der Bediener auf die Justage des Prüflings konzentrieren kann. Die Produktionsprozesse höherwertiger Systeme wie Mikroskop- oder F-Theta-Objektive profitieren von dieser Entlastung des Objektivsetzers und die gleichzeitig stattfin-



Bild 4: Messsystem für die Prüfung im doppelten Durchgang. Die Plattform kann an die Bedürfnisse bzgl. Pupillendurchmesser, Feldwinkel, Messwellenlängen und Automatisierungsgrad angepasst werden. Rechts: Der Prüfling wird von unten mit einer Planwelle beleuchtet, die Referenzsphäre befindet sich oberhalb des Prüflings

dende quantitative Ausgangskontrolle trägt zur Qualitätssicherung bei.

Die Messung in der Produktion kann teil- oder vollautomatisiert sein. Im ersten Fall wird der Prüfling manuell in das Messsystem eingelegt. Die Messungen erfolgen dann entsprechend eines Messprotokolls automatisch. Aber dieses Be- und Entladen kann auch mittels eines Roboters geschehen. Hier sind die Kosten entsprechend abzuwägen. Werden Objektive in geringen Batchgrößen gefertigt, dann schlägt hier natürlich der Umrüstaufwand des Roboters zu Buche. Zum anderen ist zum Korrigieren von z.B. Mikroobjektiven die menschliche Erfahrung wichtig. Bei der Prüfung von Massenprodukten wie Linsen für Handyobjektive und ähnlichen Sub-Millimeter-Elementen [5] wird man dagegen eine vollautomatisierte Prüfung anstreben [6].

Für die Umsetzung eines flexiblen und multifunktionalen Systems wurde für eine Plattform von optischen Prüfsystemen der Shack-Hartmann-Wellenfrontsensor als Kernkomponente eingesetzt. Mit diesem System sind momentan On- und Off-Axis-Messungen mit Feldwinkeln bis zu 50° möglich. Größere Werte sind nach Abwägung des ansteigenden Geräteaufwands realisierbar. **Bild 4** zeigt beispielsweise ein Messsystem für die Prüfung im doppelten

Durchgang. Das System ist für Mikroskopobjektive mit hoher numerischer Apertur ausgelegt und erlaubt auch die Prüfung an Feldpunkten bei verschiedenen Wellenlängen. Der Prüfling wird von unten mit einer Planwelle beleuchtet, die Referenzsphäre (Hohlspiegel) befindet sich oberhalb des Prüflings (Bild 4 rechts). Unterschiedliche Ausbaustufen erlauben die Motorisierung nahezu aller Funktionen und Achsen und damit automatische Messabläufe. Durch die Kombination mechanischer und optischer Messgrößen kann sowohl die Schnittweite (Engl.: back focal length, BFL) als auch die effektive Brennweite (Engl.: effective focal length, EFL) bestimmt werden.

**Fazit**

Auf Basis von Shack-Hartmann-Wellenfrontsensoren sind leistungsfähige Messsysteme für die Optikprüfung verfügbar. Sie sind flexibler und arbeiten kosteneffizienter als etwa ein Interferometer und decken einen großen Funktionsbereich ab. Zudem lassen sie sich an die Anforderungen verschiedener Produktionsumgebungen maßschneidern und ermöglichen somit eine sichere Qualitätsprüfung.

**Autorenkontakt**

Dr. Ralf Dorn  
 r.dorn@optocraft.de  
 OPTOCRAFT GmbH  
 Am Weichselgarten 7  
 D-91058 Erlangen  
 Tel. 09131 691500  
 Fax 09131 691511  
 www.optocraft.de



Dr. Johannes Pfund  
 j.pfund@optocraft.de  
 OPTOCRAFT GmbH  
 Am Weichselgarten 7  
 D-91058 Erlangen  
 Tel. 09131 691500  
 Fax 09131 691511  
 www.optocraft.de



Literaturhinweise:

[1] J. Pfund, N. Lindlein, J. Schwider, R. Burow, Th. Blümel, K.-E. Elssner, Absolute sphericity measurement: a comparative study of the use of interferometry and a Shack-Hartmann sensor, OPTICS LETTERS Vol. 23, No. 10 (1998), 742

[2] J. Pfund, M. Beyerlein, J. Schwider, Der Shack-Hartmann-Sensor - Eine wertvolle Ergänzung interferometrischer Prüfverfahren, LASER+PHOTONIK Juni 2003, 58

[3] R. Dorn, J. Pfund, M. Beyerlein, Effizient justieren mit Wellenfrontsensoren, LASER+PHOTONIK Mai 2005, 28

[4] J. Schwider, N. Lindlein, R. Schreiner, J. Lamprecht, G. Leuchs, J. Pfund, M. Beyerlein, Optikprüfung von refraktiven Mikrolinsen, Technisches Messen 69 (2002), 467

[5] M. Beyerlein, J. Pfund, R. Dorn, Automatisierte 100%-Charakterisierung mikrooptischer Bauelemente, Photonik 4/2005, 64