Spektralgesteuerte Interferometrie: **HOCHPRÄZISE OPTISCHE VERMESSUNG** planarer Optiken

Für die Vermessung von Optiken eignet sich die kohärente und inkohärente Interferometrie. Ein neuer Ansatz nutzt eine spektral gesteuerte Lichtquelle, die in einer anwenderfreundlichen Methode die Vorteile beider Techniken kombiniert. Optische Komponenten müssen dabei nicht bewegt werden.

AUTOR Johannes Doerfler | Mountain Photonics

#Laserinterferometrie
#Messtechnik
#Optikvermessung
#Fizeau-Interferometer

Bild: Mountain Photonics

Die optische Interferometrie ist eine der wichtigsten diagnostischen Methoden zur Charakterisierung und Analyse von Oberflächen optischer Komponenten. Hierbei gibt es zahlreiche Konfigurationen hinsichtlich des Interferometers und der verwendeten Lichtquelle. Dennoch kann man zwei grundsätzliche Typen von Lichtquellen und die damit verbundenen Interferometrie-Methoden unterscheiden: die kohärente oder Laser-Interferometrie und die inkohärente oder Weißlicht-Interferometrie. Zahlreiche Messaufgaben, wie die Vermessung der Oberflächenbeschaffenheit von Optiken oder die Vermessung der Homogenität des Brechungsindex, erfordern eine Interferometer-Konfiguration mit mehreren Ebenen auf der optischen Achse. Dies stellt besondere Herausforderungen sowohl für kohärente als auch für inkohärente Messsysteme dar. Die von Äpre Instruments entwickelte spektral gesteuerte Lichtquelle ist speziell für diese Art von Messungen und insbesondere für die Vermessung planarer Optiken entwickelt worden.

Kohärente Interferometrie

Bei der kohärenten Interferometrie wird für gewöhnlich als Lichtquelle ein sehr schmalbandiger monochromatischer Laser eingesetzt, dessen Kohärenzlänge aufgrund der sehr schmalen optischen Linienbreite mehrere Meter beträgt. Die Kohärenzlänge l_{coh} verhält sich dabei indirekt proportional zur Linienbreite $\Delta\nu$:

$$l_{coh} = \frac{c}{\Delta\nu}, \qquad (1)$$

wobei c die Lichtgeschwindigkeit ist. Dies hat den entscheidenden Vorteil, dass scharf erkennbare Interferenzmuster, sogenannte Fringes, selbst bei großer optischer Wegdifferenz in hohem Kontrast auftreten. Beschreiben lässt sich das mit dem Wiener-Khinchin-Theorem, wonach sich der Kontrast dieser Fringes $\gamma(\tau)$ in Abhängigkeit der optischen Zeitdifferenz der Wellenfronten der beiden interferierenden optischen Pfade aus der Fourier-Transformation der spektralen Intensitätsverteilung der Lichtquelle *S(ν)* in Abhängigkeit von der Frequenz ergibt:

$$\gamma(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} S(\nu) e^{2\pi i \tau \nu} d\nu = \mathcal{F}[S(\nu)] \qquad (2)$$

Somit erzeugt eine sehr schmalbandige Lichtquelle wie ein Laser einen hohen Fringe-Kontrast über einen großen Bereich der optischen Zeitdifferenz der Wellenfronten und damit der optischen Wegdifferenz beider Pfade an jedem Ort in der Cavity (**Bild 1**).

Solche Laserinterferometer befinden sich häufig in der sogenannten Fizeau-Anordnung und werden daher als Fizeau-Interferometer bezeichnet. Ähnlich dem Fabry-Pérot-Interferometer sind hier die beiden optischen Pfade deckungsgleich, sodass sich auftretende Abbildungsfehler gegenseitig aufheben. Den diagnostischen Aufbau für flache optische Komponenten zeigt **Bild 2**. Ein weiterer Vorteil der Fizeau-Interferometer mit Laserquelle ist die vergleichsweise einfache Ausrichtung der reflektierenden Oberflächen entlang der optischen Achse, da die Interferenzmuster bei jeder optischen Wegdifferenz auftreten, solange diese nicht die Kohärenzlänge übersteigt.

Bild: Mountain Photonics

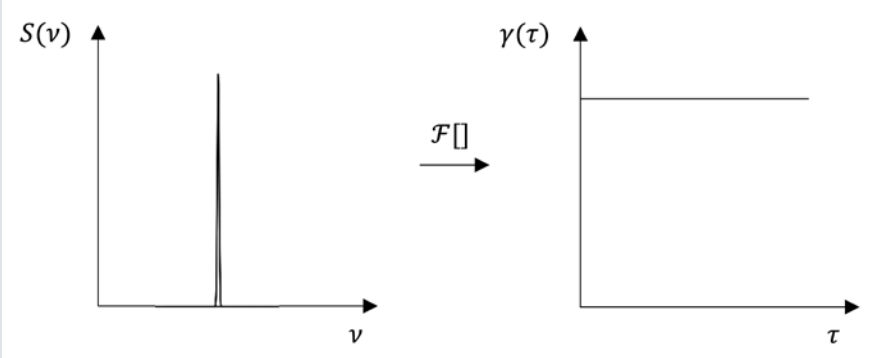

Bild 1. Spektrale Intensitätsverteilung einer monochromatischen Lichtquelle im Frequenzraum sowie die daraus resultierende Verteilung des Fringe-Kontrasts in Abhängigkeit von der optischen Zeitdifferenz der interferierenden Wellenfronten im Zeitraum

>>>

Daraus ergibt sich aber der größte Nachteil von Laserinterferometern: Es ist sehr schwierig, die verschiedenen Oberflächen zu unterscheiden, da alle reflektierenden Oberflächen auf der optischen Achse innerhalb der Kohärenzlänge des Lasers sich überlagernde Interferenzmuster (Fringes) erzeugen.

Bild: Mountain Photonics

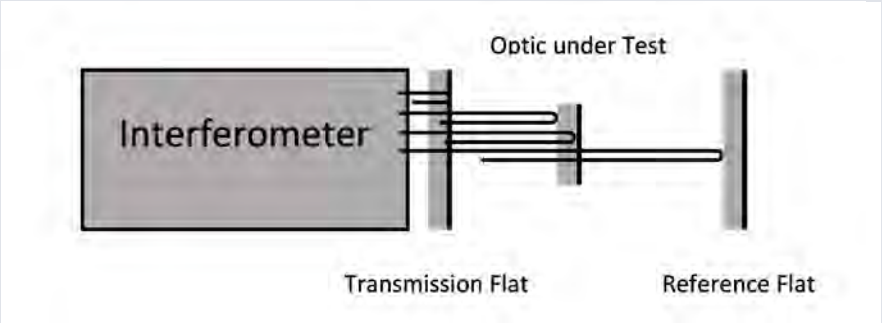

Bild 2. Schematischer Aufbau eines Fizeau-Interferometers für die Vermessung planarer Optiken

Für eine Oberflächenvermessung der zu messenden Testoptik (Optic under Test) sind vier Einzelmessungen notwendig:

1. Frontseite: Interferenz zwischen Transmission Flat und Frontseite der Testoptik,
2. Rückseite: Interferenz zwischen Transmission Flat und Rückseite der Testoptik durch die Testoptik,
3. Transmittierte Wellenfront: Interferenz zwischen Transmission Flat und Reference Flat durch die Testoptik,
4. leere Cavity: Interferenz zwischen Transmission Flat und Reference Flat ohne Testoptik.

Gerade bei den ersten drei Messungen sind drei Oberflächen gleichzeitig in der Cavity, die alle innerhalb der Kohärenzlänge des Lasers liegen und damit gleichzeitig mit der Transmission Flat interferieren.

Bild 3 zeigt ein typisches Interferenzbild einer solchen Messung, bei der die Interferenzmuster aller drei Oberflächen überlagert sind. Damit lässt sich die Oberflächenbeschaffenheit nicht gut messen. Durch Abkleben mit nicht-reflektierendem Material kann man unerwünschte Rückreflexionen an anderen Oberflächen im Aufbau unterdrücken und damit dieser Überlagerung zum Teil entgegenwirken. Dabei besteht aber oft die Gefahr der Verunreinigung und Beschädigung der zu vermessenden Optik.

Inkohärente Interferometerie

Eine andere weit verbreitete Methode ist die inkohärente oder Weißlicht-Interferometrie. Hierbei wird eine Weißlichtquelle, also eine Lichtquelle mit breitem spektralem Verlauf, eingesetzt. Ein kontrastreiches Interferenzmuster tritt nur an einer einzigen Position auf der optischen Achse auf, nämlich dort, wo die optische Wegdifferenz null ist. Das geht erneut aus dem Wiener-Khinchin-Theorem hervor (**Bild 4**). Hier wird wiederum ein Aufbau des Interferometers vorausgesetzt, bei dem die beiden interferierenden optischen Pfade exakt gleichlang sein müssen. Solche Interferometer bezeichnet man auch als balanciert. Ein Fizeau-Interferometer ist nicht balanciert, während zum Beispiel das Twyman-Green-Interferometer ein balanciertes Interferometer ist. Bei balancierten Interferometern können die optischen Pfade aber niemals wie beim Fizeau-Aufbau deckungsgleich sein, sondern müssen über einen Strahlteiler getrennt und anschließend wieder zusammengeführt werden. Damit ergeben sich deutlich mehr interne Abbildungsfehler und Wellenfrontverzerrungen, die sich nicht wie bei einem Fizeau-Interferometer gegenseitig aufheben.

Der große Vorteil dieser Methode ist jedoch die Erzeugung eines kontrastreichen Interferenzmusters ausschließlich auf der zu untersuchenden Oberfläche, ohne die Überlagerung von unerwünschten Rückreflexionen an anderen Oberflächen. Die Justage und Ausrichtung der zu untersuchenden Optik im Messaufbau gestaltet sich allerdings sehr aufwendig, da der extrem schmale Bereich auf der optischen Achse gefunden werden muss, in dem die optische Wegdifferenz verschwindet. Ein solcher Aufbau erfordert hochpräzise mechanische Ver-

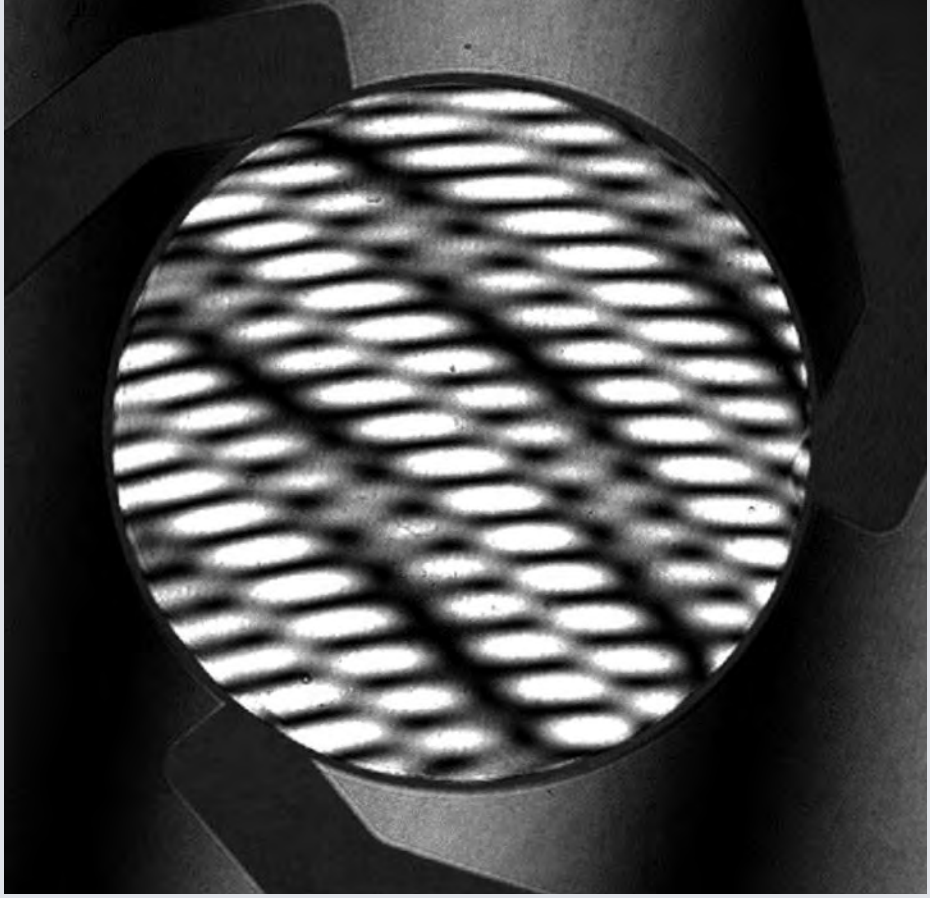

Bild: Äpre Instruments

Bild 3. Interferenzbild eines Fizeau-Interferometers mit monochromatischer Lichtquelle: Interferenzmuster von Transmission Flat, Optic under Test und Reference Flat. Die Testoptik ist eine 5 mm dicke und 50 mm im Durchmesser fassende Rolyn planparallele Platte.

schiebungseinrichtungen, und die Ausrichtung ist meist sehr zeitintensiv.

Die beiden Methoden Laser-Interferometrie und Weißlicht-Interferometrie haben somit Ihre Vorteile aber auch entscheidende Nachteile. Äpre Instruments hat eine Methode entwickelt, die die Vorteile beider Ansätze miteinander verbindet und die Nachteile vermeidet: die spektralgesteuerte Interferometrie (Spectrally Controlled Interferometry, SCI). Hierbei wird die spektrale Intensitätsverteilung der verwendeten Breitbandlichtquelle beeinflusst, um gezielt und lokalisiert kontrastreiche Interferenzmuster an bestimmten, einstellbaren Positionen auf der optischen Achse zu erzeugen und somit einzelne Oberflächen zu isolieren. Diese Position ist nicht wie bei der Weißlichtinterferometrie an die optische Wegdifferenz gleich null gebunden. Darüber hinaus lässt sich sowohl die Position der auftretenden Fringes als auch die Phase der Interferenz elektronisch steuern. Damit kann auf schwere und komplizierte mechanische Verschiebungseinrichtungen für die Optik sowie auf piezoelektrische Wandler für die Phasenverschiebung verzichtet werden.

Funktionsweise der SCI

Um sowohl die Lokalisierung der Fringes als auch die Phasenverschiebung zu ermöglichen, wird eine spezielle Kontrolle der spektralen Intensitätsverteilung der Lichtquelle notwendig. Die spektrale Verteilung der Lichtquelle besteht wie bei der Weißlicht-Interferometrie zunächst aus einer normalen Gauß-Verteilung $g_{nom}(\nu, \Delta\nu)$. Aus Gleichung 2 folgt, dass die Kohärenzfunktion ebenfalls gaußförmig und um $\tau = 0$ lokalisiert ist. Die zeitliche Halbwertsbreite ist nach Gleichung 1 außerdem indirekt proportional zur spektralen Halbwertsbreite der Lichtquelle.

Bei der SCI wird nun aber diese gaußförmige spektrale Verteilung der Lichtquelle mit einer weiteren Funktion $m(\nu, f, \Theta)$ moduliert, sodass sich eine Gesamtverteilung $g_{complete}$ ergibt:

$$\begin{aligned} g_{complete} &= g_{nom} \times m(\nu, f, \theta) \\ &= g_{nom} \times \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{2}\cos(f\nu + \theta)\right] \end{aligned} \qquad (3)$$

Die Modulationsfrequenz f sowie die Phase Θ der Modulation sind einstellbare Parameter. Nach dem Faltungstheo-

rem folgt für die Kohärenzfunktion des SCI-Spektrums $g_{complete}$:

$$\gamma(\tau) \propto G_{nom} \otimes M(\nu, f, \theta) = G_{nom} \otimes \left[\frac{1}{2}\delta(\tau) + \frac{1}{4}e^{-i\theta}\delta(\tau - f) + \frac{1}{4}e^{i\theta}\delta(\tau + f)\right] \quad (4)$$

$$= G(\tau) + \frac{1}{2}e^{-i\theta}G(\tau - f) + \frac{1}{2}e^{i\theta}G(\tau + f),$$

wobei G_{nom} die Fouriertransformierte g_{nom} und $M(\nu, f, \Theta)$ die Fouriertransformierte von $m(\nu, f, \Theta)$ ist.

Zusätzlich zum Kohärenzmaximum bei $\tau = 0$ gibt es im Gegensatz zur Weißlicht-Interferometrie zwei Nebenmaxima bei $\tau \neq 0$, wobei nur das im positiven τ-Bereich relevant ist. Die Position dieser Seitenbänder steht in direktem Zusammenhang mit der Modulationsfrequenz f der SCI-Lichtquelle. Darüber hinaus hängt die komplexe Phasenverschiebung der an den Seitenbändern auftretenden Fringes direkt von der Phase Θ der Modulation der spektral gesteuerten Lichtquelle ab. Aufgrund des Skalierungsfaktors ½ der Seitenbänder reduziert sich der maximale Kontrast der Fringes an dieser Position auf die Hälfte des Kontrasts bei $\tau = 0$ (**Bild 5**). Transformiert man die zeitliche Wegdifferenz τ auf die räumliche Wegdifferenz l, so lässt sich nach Vereinfachung von Gleichung 4 die Wegdifferenz der Position des maximalen Kontrasts des Seitenbandes l_{cav} in Abhängigkeit der mittleren Wellenlänge der Spektralverteilung der Lichtquelle γ_0 sowie der Modulationsperiode $\Delta\lambda$ ausdrücken:

$$l_{cav} = \frac{\lambda_0^2}{2\Delta\lambda}. \quad (5)$$

Mithilfe dieser beiden Parameter kann der Benutzer somit die Lokalisierung der Fringes auf der optischen Achse steuern und dadurch exakt auf die zu untersuchende Oberfläche setzen, ohne mechanische Bewegungen ausführen zu müssen. Weiterhin kann eine Phase Shifting Interferometry (PSI) betrieben werden, ohne dass die Phase über piezogesteuerte Phasenschieber mechanisch verschoben werden muss. Zusätzlich lässt sich über die Breite des spektralen Bereichs der SCI-Lichtquelle g_{nom} wie bei der Weißlicht-Interferometrie nach Gleichung 1 die Breite des Kohärenz-Seitenbands steuern. Damit kann man ähnlich einer Schärfentiefe den Grad der räumlichen Isolation des Kontrastmaximums einstellen.

Interferenzen klar getrennt

Da die SCI-Lichtquelle in der Lage ist, die Lokalisierung der Fringes, den Arbeitsabstand zur Testoptik und die Phase der Lichtquelle zu steuern, kann sie als externe Lichtquelle an jedes beliebige Standardinterferometer gekoppelt werden und dieses damit zu einem SCI-Interferometer aufrüsten. Dabei müssen keine weiteren Modifikationen unter-

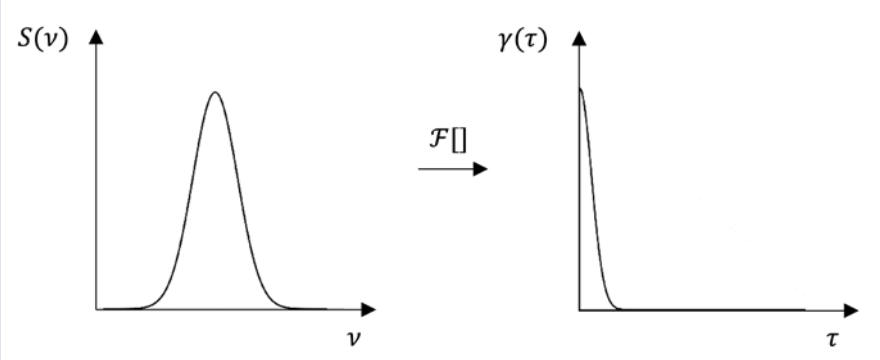

Bild: Mountain Photonics

Bild 4. Spektrale Intensitätsverteilung einer Weißlichtquelle im Frequenzraum sowie die daraus resultierende Verteilung des Fringe-Kontrasts in Abhängigkeit von der optischen Zeitdifferenz der interferierenden Wellenfronten im Zeitraum

Bild: Mountain Photonics

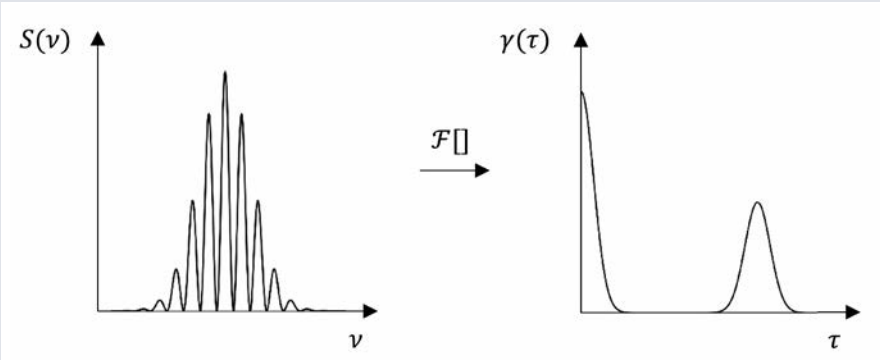

Bild 5. Spektrale Intensitätsverteilung einer SCI-Lichtquelle im Frequenzraum sowie die daraus resultierende Verteilung des Fringe-Kontrasts in Abhängigkeit von der optischen Zeitdifferenz der interferierenden Wellenfronten im Zeitraum

nommen werden. Das Fizeau-Interferometer S100-HR (Äpre Instruments) wurde mit einer SCI-Lichtquelle ausgestattet und damit dieselbe 5 mm dicke und 50 mm im Durchmesser fassende Rolyn planparallele Platte vermessen, die auch bereits in **Bild 3** mit einer monochromatischen Laserquelle vermessen wurde. Im Gegensatz zur laserinterferometrischen Vermessung, wo sich die Interferenzmuster sämtlicher sich in der Cavity befindenden Oberflächen gleichzeitig überlagern, können nun die Fringes der Oberflächen der Plattenvorderseite, der Plattenrückseite sowie der Reference Flat nacheinander und isoliert voneinander gemessen werden.

In **Bild 6** sind die Interferenzmuster der drei Oberflächen zu sehen, deren zugehörige Wegdifferenz jeweils über die Einstellparameter λ_0 und $\Delta\lambda$ der SCI-Lichtquelle eingestellt wurde. Es ist zudem erkennbar, dass der Kontrast der Fringes wie sich aus Gleichung 4 ergibt auf etwa die Hälfte des Kontrastes aus **Bild 3** abgefallen ist.

Durch die spektralgesteuerte Interferometrie lässt sich zusätzlich zur Lokalisierung der Position der Fringes zwischen einer kohärenten und einer inkohärenten Lichtquelle umschalten. So kann für die Ausrichtung der einzelnen optischen Komponenten in der Cavity für eine bestimmte Messaufgabe die spektrale Breite g_{nom} der SCI-Lichtquelle sehr schmal gewählt werden, um wie bei der Laser-Interferometrie einen großen Kohärenzbereich zu erzeugen und damit einen hohen Kontrast der Fringes über die gesamte Cavity. Dieser Alignment-Modus dient der Ausrichtung aller notwendigen Optiken, da man die Fringes im Kamerabild unabhängig von der Entfernung sofort erkennt. Anschließend kann die SCI-Lichtquelle im Measurement-Modus direkt auf einen deutlich breiteren spektralen Bereich g_{nom} umgeschaltet und über $m(\nu, f, \Theta)$ moduliert werden, um die Kohärenzlänge und den Kontrastbereich einzugrenzen sowie die Position der auftretenden Fringes auf die jeweilige zu untersuchende Oberfläche einzustellen.

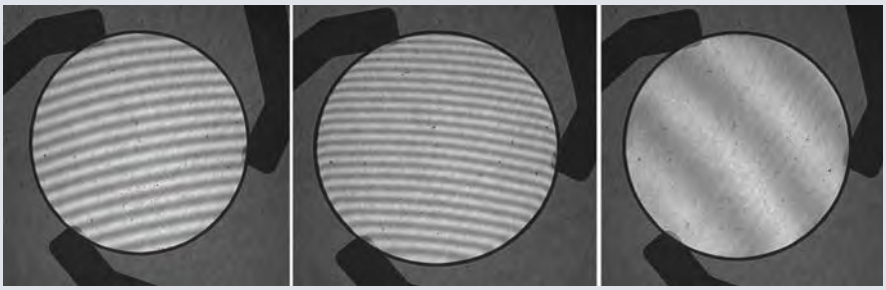

Bild: Äpre Instruments

Bild 6. Interferenzbild eines Fizeau-Interferometers mit SCI-Lichtquelle. Von links nach rechts: das Interferenzbild der Vorderseite der Optik, das Interferenzbild der Rückseite der Optik, das Interferenzbild der Reference Flat ohne Optik. Die Testoptik ist eine 5 mm dicke und 50 mm im Durchmesser fassende Rolyn planparallele Platte.

Bild: Mountain Photonics

Bild 7. Fizeau-Interferometer von Äpre Instruments für die flexible optische Qualitätsbeurteilung von Oberflächen und Optiken

Fazit: Vorteile im Überblick

Die von Äpre Instruments entwickelte spektralgesteuerte Interferometrie SCI ist vor allem für den Anwender ein technischer Fortschritt in der hochpräzisen optischen Vermessung planarer Optiken. Sie ermöglicht, beliebig viele einzelne Oberflächen in der Cavity getrennt und isoliert zu vermessen. Hier lässt sich die Position der für die Vermessung notwendigen Fringes auf die jeweilige Oberfläche einstellen, der räumliche Bereich des Kontrasts (Schärfentiefe) für die Oberfläche begrenzen oder aufweiten und die Phase für die PSI-Vermessung verschieben. Der Kontrast der Fringes ist allerdings nur halb so hoch wie bei einem Laser-Interferometer oder einem Weißlichtinterferometer. Im Alignment-Modus kann für eine schnelle und einfache Ausrichtung der optischen Komponenten auf eine monochromatische Lichtquelle gewechselt werden. Sämtliche dieser Einstellungen erfolgen ausschließlich durch spektrale Steuerung der Lichtquelle. Damit entfallen jegliche mechanische Verschiebungen und Ausrichtungen. Zudem lässt sich die SCI-Lichtquelle an jedes beliebige Standard-Fizeau-Interferometer faserkoppeln. Es sind keine aufwendigen Umbaumaßnahmen erforderlich. ■

www.mountainphotonics.de