

Messunsicherheit bei der interferometrischen Formvermessung

Engelbert Hofbauer, Horst Linthe, Roland Maurer,
TC-Teisnach, Hochschule für angewandte Wissenschaften, Deggendorf

Bei der Herstellung von Präzisionsoptiken spielt die Qualitätssicherung eine wichtige Rolle. Die Referenzflächen interferometrischer Geräte dürfen gewisse Grenzen nicht überschreiten, damit die Toleranzen in der Fertigung mit Sicherheit eingehalten werden können. Die Vermessung der Vergleichs- und Referenzoptiken der Messmittel ermöglicht die Klassifizierung der Referenzobjektive mit $\lambda/10$, $\lambda/20$, $\lambda/30$ oder $\lambda/40$ und damit eine zuverlässige Beurteilung der Fertigungsprozesse in der Produktion.

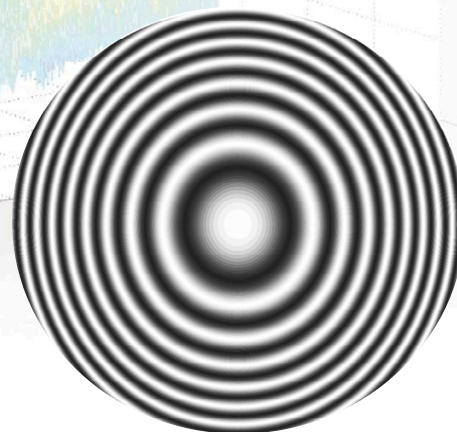
In der Messtechnik beschreibt die Fehlergrenze [1] der Messgeräte und Messmittel die maximale Abweichung vom wahren Wert. Um Bauteile mit ausreichender Genauigkeit prüfen zu können, sollten die Fehlergrenzen mindestens um den Faktor 10 kleiner sein als die Bauteiltoleranz und die Auflösung des Messmittels sollte mindestens um den Faktor 20 kleiner sein [2]. Außerdem wird vor allem in der Automobilindustrie und in der Medizin üblicherweise gefordert, dass der Messwert rückführbar, d.h. mit einem nationalen oder internationalen Standard („Normal“) für die betreffende Messgröße vergleichbar ist. Dieser Fachaufsatz soll die Problematik der Toleranzen und der Messgerätefähigkeit, d.h. die Eignung einer Messeinrichtung für präzise Messungen bei der interferometrischen Formvermessung aufzeigen sowie Möglichkeiten der Absolutkalibrierung in der Praxis beschreiben und die Grenzen der Genauigkeit diskutieren.

1 Messgerätefähigkeit an der physikalischen Grenze

Im Grenzbereich des physikalisch machbaren begnügt man sich in der Praxis mit dem Faktor 1/3 bis 1/5 der Toleranz, wenn es physikalisch und technisch nicht ohne weiteres möglich ist, die Fehlergrenzen deutlich zu senken. Dies bedeutet, dass die verbleibende Toleranz für den Fertigungsprozess nur noch zwischen 2/3 und 4/5 beträgt, um die Lieferbedingungen mit Sicherheit einhalten zu können. In den optischen Werkstätten werden bei der Herstellung von Optikauteilen vorzugsweise interferometrische Verfahren wie z. B. Probeglas, Fizeau- sowie Twyman-Green-Interferometer eingesetzt.

Dabei wird das reflektierte Licht einer Prüfungsfläche mit dem einer Vergleichsfläche überlagert. Die Kavität ist der Strahlenraum zwischen Referenz- und Prüfungsfläche. Die dabei entstehenden Interferenzstrukturen (Newton-Ringe) können visuell oder über bildgebende Verfahren digital ausgewertet werden. Für hohe Messauflösung wird die Referenzfläche einer Phasenschiebung von π oder $\lambda/2$ unterzogen und dabei in jedem Bildpunkt eine 2π -Intensitätsmodulation ermittelt. Mit speziellen Algorithmen kann damit die Phasenfront des Prüflings mit einem Bruchteil der Messwellenlänge rekonstruiert und anschließend die Prüflingsoberfläche mit doppelter Auflösung ermittelt werden.

Beim Vermessen des Bauteils unterscheidet man zwischen globalen Formabweichungen (z.B. der Radianabweichung SAG) und lokalen Formabweichungen, insbesondere Abweichungen von der Kugel- bzw. Asphärenform (Unregelmäßigkeit IRR) und rotationssymmetrische Abweichungen (RSI). Die genannten Größen werden nach speziell definierten Angaben zur Qualität von optischen Systemen und deren Abweichung von der Sollform (sogenannte Passe) nach DIN/ISO 10110 – Teil 5 bestimmt. Die Bauteile unterliegen oft Toleranzanforderungen von beispielsweise $\lambda/10$ für IRR und RSI. Diese Größen werden vorzugsweise mit Interferometern geprüft, welche in der Regel eine Vergleichsfläche (Fizeau-Objektiv mit Referenzfläche oder Referenzsphäre bei Twyman-Green Interferometer) mit einer zertifizierten Formabweichung von ebenfalls $\lambda/10$ oder bestenfalls $\lambda/20$ haben. Auf dem sogenannten „Zertifikat“, welches in der Regel nur einen 2D und/oder 3-D



Plot zeigt sowie die Werte für PV (Peak-to-Valley) und rms (Root Mean Square) des Oberflächenverlaufes enthält, fehlt meist ein Hinweis auf die Messunsicherheit des Ergebnisses. Auf Nachfrage beim „Zertifizierer“, mit welcher Unsicherheit die auf dem „Zertifikat“ angegebenen Werte zu beurteilen sind, bleibt die konkrete Antwort meist aus oder sie lautet: „Wird mit einer Referenzfläche von $\lambda/30$ kalibriert“. Für die Aufstellung eines Messunsicherheits-Budgets ist die Kenntnis von Abweichung und unbekannter systematischer Abweichung (Messunsicherheit) des Kalibriernormals (Referenzfläche) jedoch unerlässlich. Die Unsicherheit in der Messung bestimmt schließlich die Bandbreite der zulässigen Fertigungsstreuung. Die Abschätzung der Unsicherheit kann über die Gauß'sche Fehlerquadratsumme ermittelt werden, welche sich aus der Wurzel der Summe der quadratischen Anteile ergibt. Im vorliegenden Beispiel ergibt sich mit den Anteilen aus dem PV-Wert von $\lambda/20$ und der (erfragten) Unsicherheit beim Zertifizie-

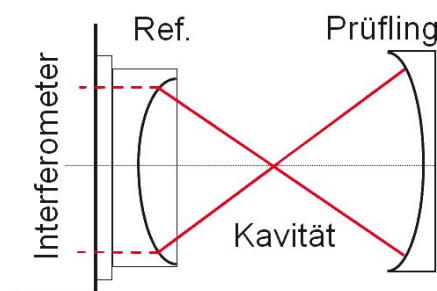


Bild 1: Prinzipieller interferometrischer Aufbau mit Fizeau-Objektiv und konkavem Prüfling in konfokaler Stellung

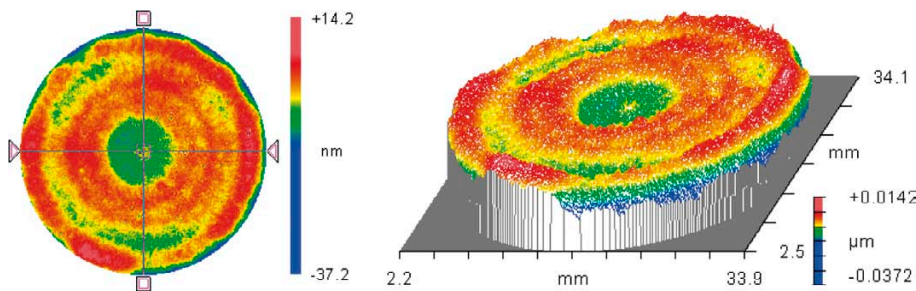


Bild 2: An einem sphärischer Prüfling mit Konkav-Radius $R = -47,011$ mm mit Prüfdurchmesser 31,7 mm werden 30 Messungen am Vertikalinterferometer mit einem F#1,1-Fizeau-Objektiv (Referenzradius $R = -65,50$ mm) durchgeführt. Ergebnis: $PV = 51,3$ nm, rms-Wert 3,56 nm

rer mit $\lambda/30$ die Unsicherheit U des Referenznormals zu $0,06 \lambda$ ($\lambda/16$). Dies bedeutet eine Einschränkung der Toleranz auf nur noch $0,04 \lambda$ ($\lambda/25$) anstatt $0,1 \lambda$, was für eine klassische Fertigung kaum zu bewerkstelligen ist. Aus diesem Grund ist sowohl eine verbesserte Fertigung der Referenzflächen (Richtung $\lambda/30$ und $\lambda/40$) als auch eine sichere Angabe der Messunsicherheit bei der Zertifizierung dieser Flächen für die gesamte Fertigungskette wichtig.

2 Zufällige und systematische Abweichungen

Bei der interferometrischen Formvermessung eines optischen Bauteils ergeben sich zufällige und systematische Abweichungen. Bei den zufälligen Abweichungen handelt es sich hierbei in erster Linie um

- Luftschlieren in der Kavität (**Bild 1**)
- Erschütterungen in der Umgebung und Schwingungen im Aufbau
- Unschärfe- und Beugungseffekte an den Prüflingsrändern
- Kamerarauschen (Photonenrauschen, Verstärkerrauschen ect.)

Die Luftschlieren hängen vor allem von der Größe der Kavität, also vom Abstand zwischen Referenzfläche und Prüflingsfläche ab. Sie verstärken sich bei langen negativen Radien, Temperaturgradienten in der Umgebung sowie Luftzirkulation.

Von den Gebäudewänden entkoppelte Fundamente und schwingungsgedämpfte Aufbauten reduzieren Erschütterungen. Unschärfereffekte und Beugung werden vermieden bzw. reduziert, indem der Auswerte- und Prüfbereich ca. 2% bis 5% kleiner gewählt wird als die Bauteilgröße.

Bei den systematischen Abweichungen handelt es sich um:

- Qualität der Referenzfläche des Fizeau-Objektivs
- Güte der Kalibrierfläche des Twyman-Green-Interferometers
- Wellenfrontabweichung des austretenden Strahlenbündels

- Fehler bei der Ausbreitung und Reflexion des divergenten Strahlenbündels in der Kavität

Die beiden letzten Punkte beeinflussen das Messergebnis ebenso, sollen hier aber quantitativ nicht weiter untersucht werden.

3 Untersuchung zufälliger Abweichungen

Um die zufälligen Einflüsse unter Umgebungsbedingungen zu untersuchen, werden zunächst Messungen unter Wiederholbedingungen an einem Fizeau-Interferometer durchgeführt. Durch konstante Parameter, u. a. festgelegte Prüfmethode, gleicher Prüfer, gleiche Prüfausstattung, identisches Objekt, kurze Zeitdifferenzen zwischen den Messungen und gleicher Ort [1,5] sollen systematische Messabweichungen für jeden Messwert identisch bleiben. Der Prüfling wird ausgerichtet und auf minimale Abweichung in Winkel und Fokus justiert. Anschließend wird der Mittelwert aus kurz nacheinander ausgeführten Messungen für jeden Messpunkt der Objektoberfläche ermittelt. Das Ergebnis der Messung ist ein PV-Wert der gemittelten Oberfläche, eine Beispielmessung zeigt **Bild 2**. Im nächsten Schritt wird die Standardabweichung der Einzelmessungen für alle Messpunkte ermittelt. Dies führt zur Darstellung des Rauschbildes (**Bild 3**), das durch die vorgenannten zufälligen Einflüsse hervorgerufen wird.

Der relativ hohe PV-Wert von ca. 5 nm im Vergleich zum rms-Wert von ca. 0,3 nm ist signifikant für jede Mehrfachmessung und lässt auf eine nicht gaußförmige Verteilung schließen, bei der hohe Kameraauflösung, nichtlineare Rauschanteile, Randeffekte durch Beugung und Unschärfe sowie Luft-Strömungsverhalten in der Kavität eine wesentliche Rolle spielen. In der Praxis werden diese Anteile in der Regel nicht voll wirksam, da die Ränder beschnitten und außerdem durch indirekte Tiefpaßfilterung über Zernike-Polynom-Generierung

reduziert werden. Durch diese Maßnahmen ist sichergestellt, dass die Messergebnisse unter Wiederholbedingungen mit einer Standardabweichung von $<0,3$ nm ($<\lambda/2000$) reproduzierbar sind.

4 Untersuchung systematischer Abweichungen

Um die systematischen Abweichungen zu untersuchen, werden u. a. Wiederholmessungen unter erweiterten Vergleichsbedingungen [1,5] durchgeführt. Bei Messungen unter diesen Bedingungen wird schnell klar, dass durch ein mangelhaftes Kalibrierteil eine Prüfung mit einer Toleranz von gleicher Größenordnung nicht zertifizierbar ist. Aus diesem Grund müssen alternative Verfahren mit der Möglichkeit der Absolutkalibrierung verwendet werden. In unserem Fall greifen wir auf zwei Standard-Absolutverfahren, dem Zwei-Sphären-Test [3] und dem Stitching-Verfahren [4], zurück.

4.1 Absolutkalibrierung

Bei den Absolutverfahren wird die Formabweichung der Referenzfläche ermittelt, welche dann zur Kalibrierung und zur Korrektur des Ergebnisses verwendet werden kann. In unserem Fall entspricht die Fizeau-Fläche der Referenzfläche.

4.1.1 Zwei-Sphären-Test

Für den Zwei-Sphären-Test werden mit einem Vertikalinterferometer (SSI-A) mit Fizeau-Objektiv mehrere Messreihen an einem Prüfling durchgeführt. Der Prüfling wird so justiert, dass in den beiden Stellungen CatsEye und konfokal (**Bild 4**) ein optimales Interferogramm mit voller Ausleuchtung (keine Vignettierung) bei minimaler Abweichung im Winkel (Null Streifen) vorliegt. Nun wird zunächst in der konfokalen und anschließend in der

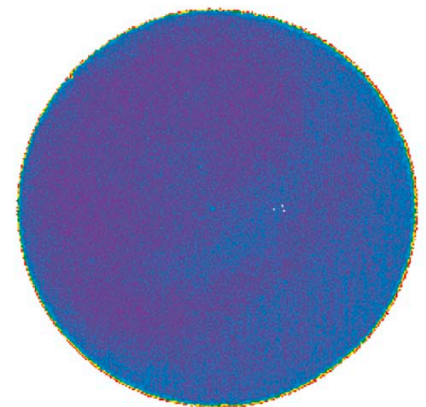


Bild 3: Rauschbild aller 574 145 Messpunkte aus 30 Mittelungen; $PV = 4,7$ nm, rms = 0,29 nm

CatsEye-Position gemessen. In der Konfokalposition wird der Prüfling jeweils um 90° verdreht, so dass in 4 Stellungen, also bei 0°, 90°, 180° und 270°, Messdaten ermittelt werden. Die Datensätze werden mit Hilfe spezieller Algorithmen ausgewertet und die absolute Abweichung von Prüfling und Referenzfläche rekonstruiert. Das Ergebnis einer Beispielmessung für ein 4"-Fizeau-Objektiv als Referenzfläche zeigt **Bild 5**. Um den Einfluß der Kavität einschätzen zu können, werden insgesamt 4 Prüflingsradien untersucht und in jeweils 10 Messreihen dem Zwei-Sphären-Test unterzogen. Aus den 4 Messreihen wird der Mittelwert für IRR und RSI gebildet und die Standardunsicherheit mit $s_{IRR} = 0,87 \text{ nm}$ und $s_{RSI} = 0,49 \text{ nm}$ ermittelt. Aufgrund der Algorithmen der Analysesoftware [3] werden die Ergebnisse auf Basis von 36 Zernike-Polynome generiert, also im wesentlichen gegenüber den Messungen aus Abschnitt 3 quasi mit einem Tiefpass gefiltert. **Tabelle 1** zeigt die Messergebnisse für das 4"-Fizeau-Objektiv.

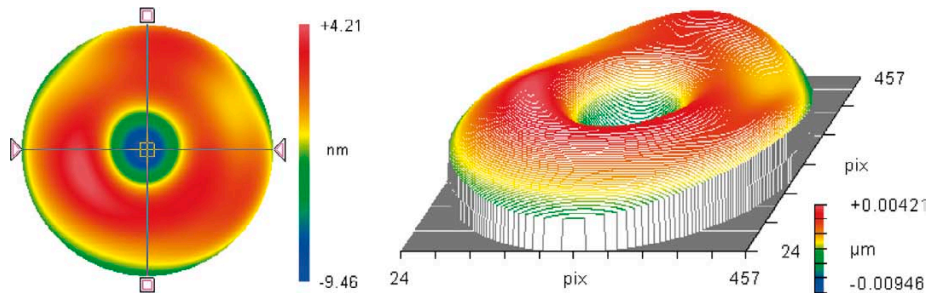


Bild 5: Referenzfläche des 4"-F#1,1-Fizeau-Objektivs über den Zwei-Sphären-Test mit Hilfe von 4 Prüflingsradien ($R = -80,584 \text{ mm}$ bis $R = +40,83 \text{ mm}$) und je 10 Messreihen ermittelt. $PV = 14,2 \text{ nm}$; $rms = 2,33 \text{ nm}$

4.1.2 Stitching-Methode

Durch die gezielte Anwendung des Stitching-Prinzips im Bereich der interferometrischen Präzisions-Messtechnik lässt sich das Spektrum der nutzbaren Linsengeometrien unter Verwendung eines gewöhnlichen Standardinterferometers auf größere Durchmesser sowie asphärische Oberflächen erweitern. Dabei wird

die gesamte zu testende Oberfläche in kleinere Teilbereiche (Subaperturen) segmentiert. Die interferometrisch auswertbaren Teilbereiche werden Schritt für Schritt abgearbeitet und mittels flexibler Algorithmen zu einem Gesamtinterferogramm rekonstruiert.

Zufällig auftretende Messspitzen können durch die mehrfache Vermessung der meisten Regionen auf der Linsenoberfläche abgefangen und somit das Risiko

eines fehlerhaften Messergebnisses verringert werden. Grundvoraussetzung für den erfolgreichen Einsatz der Stitching-Technologie sind möglichst konstante Messbedingungen während der Durchführung aller Teilmessungen. Sind die einzelnen Teilergebnisse von zufälligem Rauschen überlagert, beispielsweise verursacht durch Temperaturdrift oder Luftverwirbelungen, so gehen die verwertbaren Informationen aus den Überlappungsbereichen verloren und die Messabweichung und die Messunsicherheit steigen.

Gleichzeitig ermöglicht der Stitching-Prozess die Absolutvermessung der Prüflings- und Referenzfläche, in Bezug auf Unregelmäßigkeit IRR und rotationssymmetrische Unregelmäßigkeit RSI. Bei der Mittelung aller Subaperturen werden die Formabweichungen der Prüflingsfläche herausgemittelt und es bleibt die systematische Abweichung der Referenzfläche.

Im vorliegenden Fall wird ein konkaver Prüflingsradius von $-47,011 \text{ mm}$ ausgewählt und der Stitchingprozess 10 mal nacheinander durchgeführt. Das Ergebnis für die Referenzfläche des 4"-F#1,1-Fizeau-Objektiv am Vertikalinterferometer SSI-A zeigt **Bild 6**. Zur Bewertung der Unsicherheit und Ermittlung der zufälligen Streubreite beim Stitching-Prozess werden die Datensätze der 10 Durchläufe gemittelt und das Rauschbild (**Bild 7**) errechnet.

4.1.3 Messunsicherheitsbetrachtung

Die Abschätzung der erweiterten Messunsicherheiten U [5] erfolgt in einfacher Weise aus der empirischen Standardabweichung aus 4 mal 10 Messreihen beim Zwei-Sphären-Test und 10 Messdurchläufen beim Stitching-Verfahren. Die zufälligen Unsicherheiten aus den jeweiligen Messreihen betragen beim Zwei-Sphären-Test $0,9 \text{ nm}$ und beim Stitching $0,22 \text{ nm}$ (**Bild 7**).

Daraus ergeben sich die erweiterten Messunsicherheiten mit Erweiterungsfaktor $k = 2$ für eine Wahrscheinlichkeit von

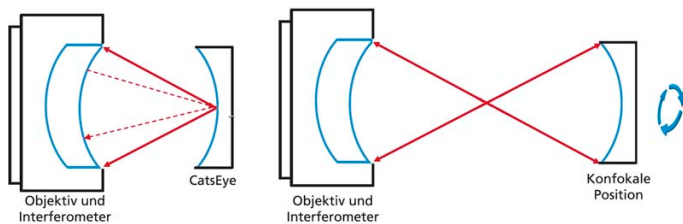


Bild 4: Zwei-Sphären-Test mit CatsEye-Position (links) sowie Konfokalposition (rechts)

	Zwei-Sphären-Test in nm (4 x n = 10)	Zwei-Sphären-Test in λ bei 633 nm (4 x n = 10)
Unregelmäßigkeit IRR	$14,2 \pm 1,8$	$0,0224 \pm 0,0028$
Rotationssymmetrische Unregelmäßigkeit RSI	$12,3 \pm 1,0$	$0,0193 \pm 0,0016$

Tabelle 1: Ergebnis für die Formabweichung der Referenzfläche eines 4"-F#1,1-Fizeau-Objektivs (TC-Teisnach) gemessen mit unterschiedlichen Kavitäten (4 unterschiedliche Prüflingsradien von $R = -80,584 \text{ mm}$ bis $R = +40,83 \text{ mm}$) mit erweiterter Messunsicherheit U (Wahrscheinlichkeit 95%)

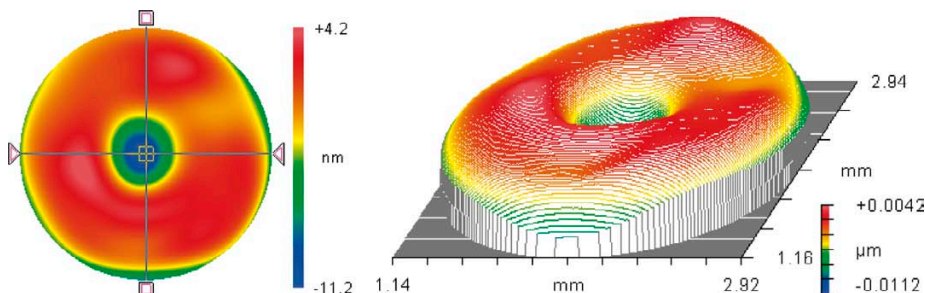


Bild 6: Referenzfläche des 4"-F#1,1-Fizeau-Objektivs über das Stitching-Verfahren mit einem Prüflingradius von $-47,011 \text{ mm}$ bei 10 Messreihen ermittelt. $PV = 15,40 \text{ nm}$; $rms = 2,65 \text{ nm}$

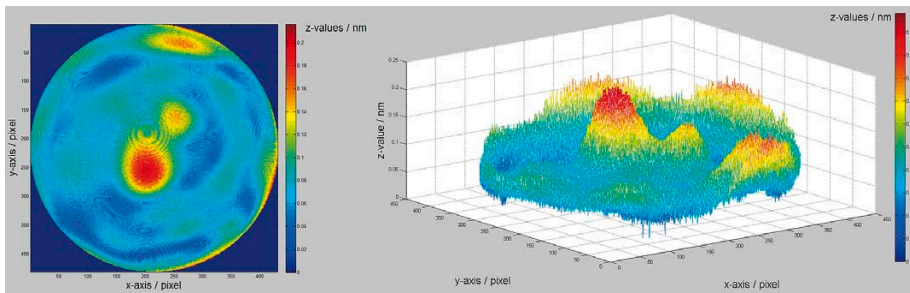


Bild 7: Rauschbild aus der Messung der Referenzfläche des 4''-F#1,1-Fizeau-Objektivs über das Stitching-Verfahren mit 10 Durchläufen; PV = 0,22 nm

95 % für die durchgeführten Messungen beim Zwei-Sphären-Test von 1,8 nm sowie beim Stitching-Verfahren von 0,45 nm.

4.2 Zusammenfassung

Der Vergleich der Ergebnisse aus den beiden Absolutmessverfahren mit Angaben der erweiterten Messunsicherheiten [5] ist als Übersicht in **Tabelle 2** gezeigt (Messwerte für Zwei-Sphären-Test aus Tabelle 1). Die Ergebnisse bezogen auf die Referenzfläche des 4''-F#1,1-Fizeau-Objektivs zeigen in unserer Untersuchung eine systematische Abweichung der PV-Mittelwerte von 1,2 nm (IRR) und 0,5 nm (RSI). In Wellenlängen ausgedrückt sind das 0,0019 λ IRR bzw. 0,0008 λ RSI bei einer Wellenlänge von 633 nm. Die gesamte Bandbreite der Unsicherheit innerhalb beider Verfahren liegt bei <2,25 nm und entspricht

0,0036 λ ($\lambda/275$). Die höhere Unsicherheit beim Zwei-Sphären-Test von 1,8 nm gegenüber 0,45 nm beim Stitching-Verfahren ist der Tatsache geschuldet, daß beim Zwei-Sphären-Test die Erweiterung der Messbedingungen auf 4 unterschiedliche Radien vorliegt und dabei als unbekannter systematischer Einfluss die unterschiedlichen Kavitäten eine Rolle spielen.

5 Fazit und Ausblick

Mit den vorliegenden Untersuchungen konnte erstmals gezeigt werden, daß innerhalb gewisser Kavitäts Grenzen, bei guten Umgebungsbedingungen und hoher Positioniergenauigkeit des Prüflings, eine Übereinstimmung der Ergebnisse zweier Absolutmessverfahren innerhalb von 1,2 nm (< $\lambda/500$) möglich ist. Weitere verfügbare

	Angaben in nm		Angaben in λ bei 633 nm	
	Zwei-Sphären-Test	Stitching-Verfahren	Zwei-Sphären-Test	Stitching-Verfahren
Unregelmäßigkeit IRR	14,2 \pm 1,8	15,4 \pm 0,45	0,0224 \pm 0,0028	0,0243 \pm 0,0007
Rotationssymmetr. Unregelmäßigkeit RSI	12,3 \pm 1,0	12,8 \pm 0,45	0,0193 \pm 0,0016	0,0198 \pm 0,0007

Tabelle 2: Vergleich der Formabweichungen der Referenzfläche eines 4''-F#1,1-Fizeau-Objektivs gemessen mit zwei unterschiedlichen Absolutmessverfahren bei jeweils 10 Messreihen mit erweiterter Messunsicherheit U (Wahrscheinlichkeit 95%)

Fizeau-Referenzobjektive sollen in Zukunft mit zusätzlichen, größeren Prüflingsradien untersucht und den gleichen Messprozeduren unterzogen werden. Damit werden sich zukünftig auch Linsen mit Radien von -3300 mm bis +2424 mm mit ähnlichen Unsicherheiten von voraussichtlich < $\lambda/100$ bis $\lambda/300$ zertifizieren lassen. Bedingung für diese hohen Ansprüche ist zum einen eine sehr gute Wellenfront des austretenden Strahlenbündels (keine starken Aberrationen), beherrschbare Luftturbulenzen, eine gute Positioniergenauigkeit des Prüflings und eine gute Prüflingsfläche, um die Strahlausbreitungseinflüsse über die Länge der Kavität in gewissen Grenzen zu halten.

Literaturhinweise:

- [1] DIN 1319 Grundlagen der Messtechnik, Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag, Januar 1995
- [2] VDA 5 Prüfprozesseignung, VDA-Verband der Automobilindustrie, VDA, Frankfurt, Juli 2001
- [3] ZYGO OMP-0388B, Two Sphere MetroPro Application, Rev. B
- [4] Marc Tricard, Subapertur-Stitching-Interferometrie: Messtechnik für die Asphären-Präzisionsfertigung, Photonik 6, 2008
- [5] Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, 1. Auflage 1995

Ansprechpartner:

Prof. Dr.-Ing.
Engelbert Hofbauer
Leitung Arbeitsgruppe
Messtechnik Optik
TechnologieCampus
Teisnach
Technologiecampus 1
D-94244 Teisnach
Tel. 09923/8045-410
Fax 09923/8045-421
eMail:
engelbert.hofbauer@fh-deggendorf.de
www.tc-teisnach.fh-deggendorf.de

