

Auslegung und Fehleranalyse einer Adaptionsoptik für sphärische Interferometrie

C. Fechtmann, J. Immohr, B. Sitte

ZARM – Universität Bremen, Am Fallturm, D – 28359 Bremen / Germany

Es ist möglich ohne den Einsatz von Tracer-Partikeln, die z.B. für den LDA Einsatz notwendig sind, mittels optischer Messverfahren die Temperaturverteilung in einem Fluid zu bestimmen. Grundlage der optischen Messverfahren ohne Tracer ist die Temperaturabhängigkeit des Brechungsindex des verwendeten Mediums, z. B. Silikonöls, in der Experimentzelle. Von den verschiedenen Verfahren erlauben Schattenverfahren, Schlierenverfahren, differentielle und normale Interferometrie es, die entlang der Beobachtungsrichtung gemittelte Temperaturverteilung zu bestimmen. Sie reagieren aber unterschiedlich auf die Ablenkung eines Lichtstrahls in einem inhomogenen Brechzahlfeld und unterscheiden sich teilweise erheblich in der Genauigkeit, der Eindeutigkeit bzw. Interpretierbarkeit sowie der Empfindlichkeit gegenüber Störungen im Strahlengang [1]. In ebenen Geometrien werden die oben genannten Verfahren bereits vielfach eingesetzt. Bei anderen Experimentgeometrien, wie etwa einer sphärischen Experimentzelle, ist jedoch eine aufwendige Adaptionsoptik erforderlich. In diesem Beitrag werden verschiedene Möglichkeiten einer entsprechenden sphärischen Adaptionsoptik untersucht, um auch unter widrigen Bedingungen und minimalen Platzverhältnissen optimale Ergebnisse zu erzielen, sowie die im Experimentbetrieb bzw. -aufbau vorhandenen Ungenauigkeiten mittels einer adaptiven Nachführung der Optik auszugleichen.

Abschätzung des Einflusses einer Defokussierung

Die meisten Messverfahren, mit Ausnahme der Interferometrie, sind weitgehend unempfindlich gegenüber einer Defokussierung. Geringe mechanische Verwindungen des optischen Strahlengangs führen zu einer linearen Veränderung der Fokusslage des Objektivs und damit im Wesentlichen zu einer Abbildungsverzerrung. Die eigentliche Messgröße bleibt davon weitgehend unberührt. Für alle Messverfahren, außer bei der Interferometrie, wirkt es sich dabei positiv aus, dass das Messsignal nicht durch Überlagerung zweier räumlich vollständig voneinander getrennter Strahlen gewonnen wird. Die Interferometrie ist jedoch *sehr* empfindlich gegenüber Änderungen der Fokusslage, da Mess- und Vergleichsstrahl räumlich vollständig voneinander getrennt sind. Derartige Abweichungen lassen sich durch größte Sorgfalt und Höchstpräzisionslager auf einige Mikrometer reduzieren. Sie sind aber aufgrund des nicht zu vermeidenden Lagerspiels zwischen den einzelnen rotierenden Teilen nicht gänzlich zu vermeiden. Selbst bei dem Verfahren der nicht ganz so empfindlichen differentiellen Interferometrie oder dem Schlierenverfahren

werden diese sichtbar sein, wenn nicht aktive Maßnahmen zum Ausgleich, etwa durch eine adaptive/aktive Optik, ergriffen werden.

Adaptionsoptik für sphärische interferometrische Anwendungen

Noch entscheidender als bei den anderen abbildenden Messverfahren ist bei diesen Methoden die Auslegung einer entsprechenden Adaptionsoptik von der sphärischen Experimentgeometrie zu dem von dem FSL zur Verfügung gestellten planen Strahlengängen. Die Erfahrung mit den bisherigen Versuchen am Boden und aus der Vorbereitung des GAS-KIK Space Shuttle Experimentes haben gezeigt, dass das Konzept einer Adaptionsoptik für starre (nicht rotierende) Kugelspaltexperimente bzw. bei einer mitrotierenden Optik funktioniert. Vergleichbare Konzepte für den Einsatz im Experiment Test Container (ETC) im FSL lassen sich so aber nicht realisieren, da die Optik, aufgrund der vorhandenen optischen Schnittstellen, nicht mitrotieren kann. Auf der ISS sollen in der angestrebten Endkonfiguration des Kugelspaltexperimentes sowohl Innen- als auch Außenkugel möglicherweise unabhängig voneinander rotieren (s. Abb. 1) [2].

Das Hauptziel war daher zum einen, eine Adaptionsoptik zu entwickeln, die - unter den gegebenen Randbedingungen - eine möglichst perfekte Transformation der von dem Optikmodul des FSL kommenden planen Wellenfront zu einer zum Experimentaufbau passenden sphärischen Wellenfront realisiert, und zum anderen die Konsequenzen möglicher Abweichungen für die jeweiligen optischen Verfahren zu untersuchen. Dabei galt es vor allem aber auch Verfahren zu finden, wie diesen Abweichungen - durch entsprechende Optikauslegung oder aktiver Kompensation - entgegengewirkt werden kann.

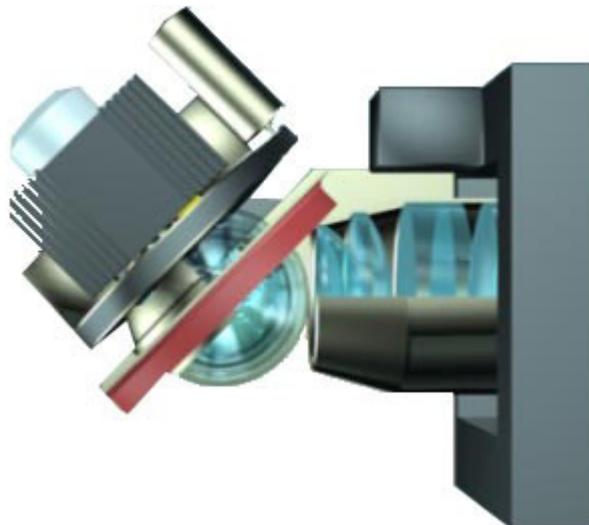


Abb. 1: Sphärische Interferometrie - Konzept zur Integration einer Kugelspaltzelle und der entsprechenden Adaptionsoptik im Experiment-Test-Container (ETC) des FSL.

Die maximale Apertur der Optik beträgt 80 mm und entspricht dem Strahlengang des Optical Diagnostics Module (ODM), sowie der Größe der optischen Fenster des Experiment Test Containers. Zwar erlaubt der optische Aufbau eine Vielzahl verschiedener Strahlengänge, die hier beschriebenen Verfahren (Hochgeschwindig-

keitskamera, PIV, Infrarot-Kamera, Sphärische Interferometrie etc.) verlangen jedoch einen optischen Zugang über die „Front“-Seite des ECs.

Da bereits alle Visualisierungstechniken im ODM des FSL integriert sind, muss für den Einsatz der sphärischen Interferometrie noch eine entsprechende Adaptionsoptik im ETC integriert werden, die die kollimierten Strahlengänge des ODM auf die sphärische Geometrie des Experimentes anpassen. Wenn jedoch das (Kugelspalt-) Experiment wie geplant in der Mitte des ETCs angeordnet wird, so darf diese Adaptionsoptik maximal 135 mm lang sein. Ferner sollte sie ein Beobachtungsfeld von mehr als 90° erlauben, so dass gleichzeitig Strömungsphänomene vom Äquator bis zu einem der Pole beobachtet werden können.

Das Licht vom ODM passiert dabei die Adaptionsoptik zweimal. Die innere Kugel ist verspiegelt, so dass das einfallende Licht reflektiert wird und auf dem gleichen Weg durch die Adaptionsoptik zurück zum ODM geht. Dies erfordert ein den allerhöchsten Ansprüchen genügendes optisches System, das nicht nur ein extrem kompaktes Baumaß haben muss, sondern gleichzeitig über einen relativ weiten Temperaturbereich (10° C bis 50°C) und über ein sehr großes Beobachtungsfeld (> 90°) eine für Interferometrie geeignete Anpassung des Strahlenganges realisiert.

Fortschritte in der Optikfertigung ermöglichen heute die Realisierung von asphärischen Linsen und sog. diffraktiven optischen Elementen (DOE). Mit beiden Verfahren kann mit einem einzigen optischen Element und daher sehr kurzer Bauform eine Adaptionsoptik realisiert werden. Die Fertigungskosten sind mit denen eines herkömmlichen Mehrlinsensystems vergleichbar.

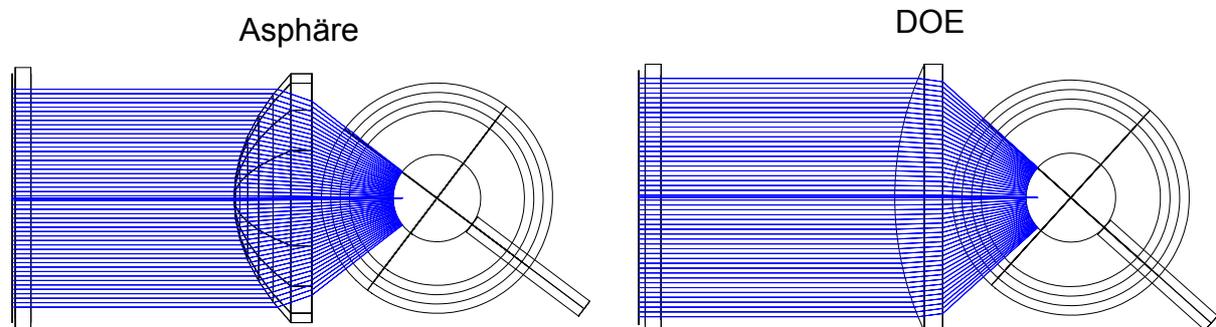


Abb. 2: Zwei unterschiedliche optische Lösungsmöglichkeiten.

Mit Hilfe des Optikdesign-Programms ZEMAX wurden verschiedene Möglichkeiten für die Realisierung der Adaptionsoptik entworfen und optimiert. Wie in Abb. 2 zu sehen ist, erlaubt die asphärische Optik – trotz Verwendung eines sehr hochbrechenden Glases - nur ein Beobachtungsfeld von ca. 75°.

Mit Hilfe eines DOE's lässt sich zwar immerhin ein Beobachtungsfeld von ca. 85° realisieren, allerdings fallen bei heutigen DOE's nur bis zu ca. 90% des Lichtes in die gewünschte Beugungsordnung, so dass auch andere Ordnungen zum Gesamtergebnis beitragen. Dies kann zu deutlich sichtbaren Abweichungen führen. Ferner zeigen DOE's aufgrund der verwendeten kleinen Gitterstrukturen des diffraktiven Teils eine je nach Glasart mehr oder weniger ausgeprägte Variation Qualität der Optik mit der Temperatur. Erschwerend kommt hinzu, dass die Effizienz

durch einen Flüssigkeitsfilm - z.B. durch austretendes Öl, Kondensation etc. - bis zur Funktionsuntüchtigkeit abnehmen kann.

Von einem Einsatz von DOEs unter den typischen Umständen im ETC im FSL muss daher abgeraten werden. Die Verwendung von Fresnellinsen – die bei Beleuchtungssystemen große Aperturen, kleine Brennweiten mit minimaler Bauhöhe verbinden – verbietet sich für interferometrische Anwendungen aufgrund ihrer schlechten optischen Qualitäten von selbst.

Diese Berechnungen zeigen allerdings bereits deutlich, dass ein Beobachtungsfeld von mehr als 90° nur dann erzielt werden kann, wenn entweder das Experiment selbst verkleinert (was nicht wünschenswert ist) oder der vom ODM kommende kollimierte Strahl zuerst im EC aufgeweitet wird. Dies ist aber mit einem einzigen optischen Element nicht mehr zu realisieren. Es stellt sich daher jetzt die Frage, ob mit Hilfe einer Mehrlinsenoptik dies trotz der Baulängenbeschränkung realisiert werden kann. Für den Fall herkömmlicher sphärischer Linsen wäre ein solches System auch preislich mit den oben dargestellten zu vergleichen. Aufwendige Rechnungen zeigen, dass dies bei Verwendung von hochbrechenden – aber sogar für den direkten Weltraumeinsatz geeigneter – Gläser tatsächlich zu realisieren ist.

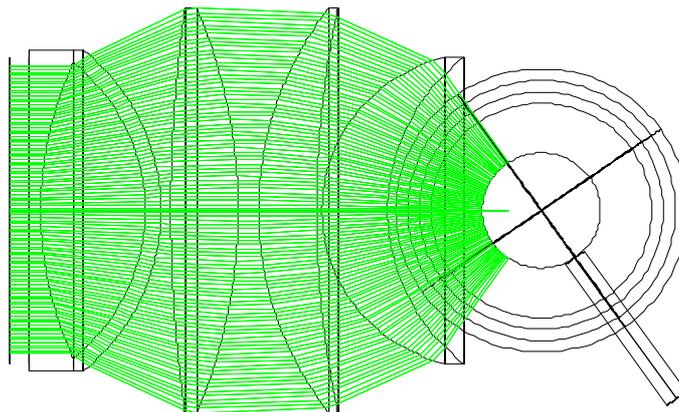


Abb. 3: Modell der Adaptionsoptik mit herkömmlichen, sphärischen Linsen.

Bei einer Apertur von 75 mm besitzt diese nur sphärische Linsen verwendende Optik eine Baulänge von nur ca. 107 mm. Der maximale Linsendurchmesser liegt bei 110 mm und die Distanz vom Mittelpunkt des EC bis zur äußersten (planen) Linsenfläche beträgt nur 130 mm. Diese kann damit bereits als Fenster dienen. Zusätzliches kann ein Fenster mit 4 mm Stärke in der Wand des EC eingelassen werden, um z.B. ein besseres Containment zu realisieren oder die Adaptionsoptik beim Transport zu schützen (Abb. 3).

Die obigen Grafiken zeigen (Abb. 4 bis Abb. 9), dass auch dieses System aus herkömmlichen Linsen über ähnlich exzellente optische Eigenschaften in Bezug auf die Wellenfrontabweichungen („Optical Path Difference“), Planarität („Transverse Ray Fan Plot“), beugungslimitiertem Auflösungsvermögen („Modulated Transfer Function“) und Strahldivergenz („Spot Size“) besitzt wie die vorher betrachteten Optiken. Was sich im berechneten normalen Interferogramm, wie auch dem Bild des Schlierenverfahrens zeigt („Focault Analyse“).

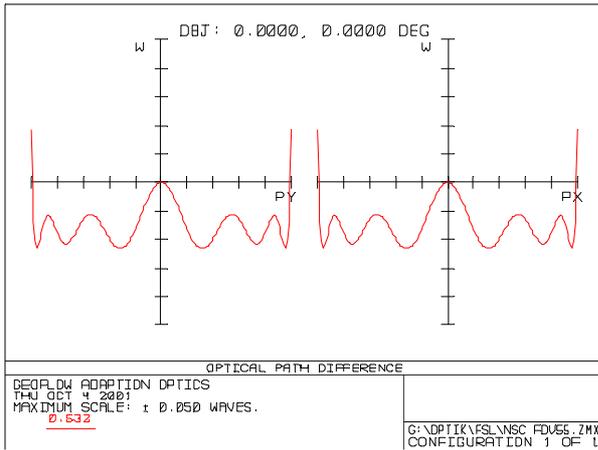


Abb. 4: Optische Pfaddifferenz

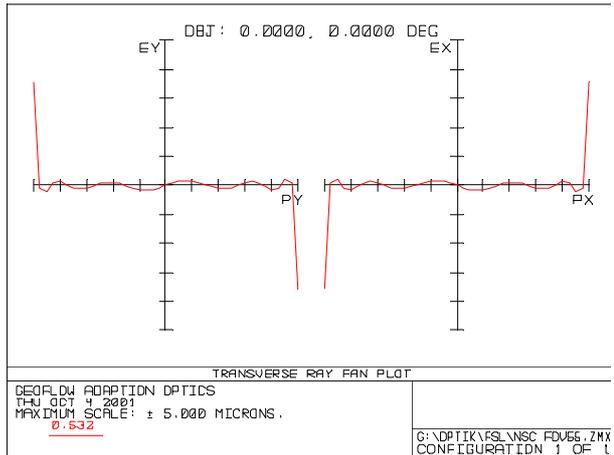


Abb. 5: Ebenheit der Wellenfront

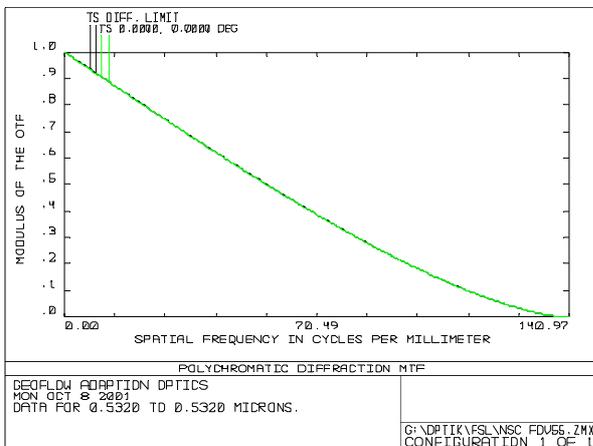


Abb. 6: Auflösungsvermögen

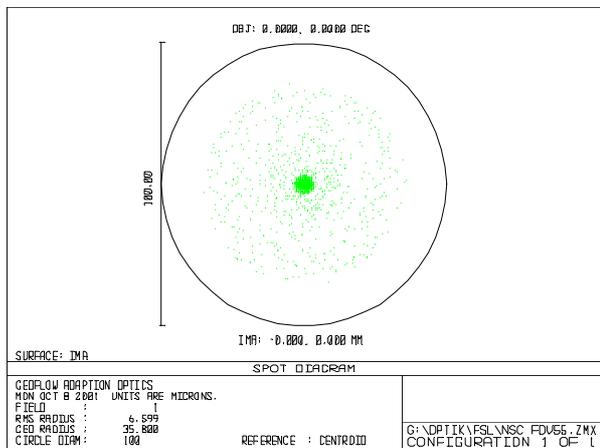


Abb. 7: Strahldivergenz

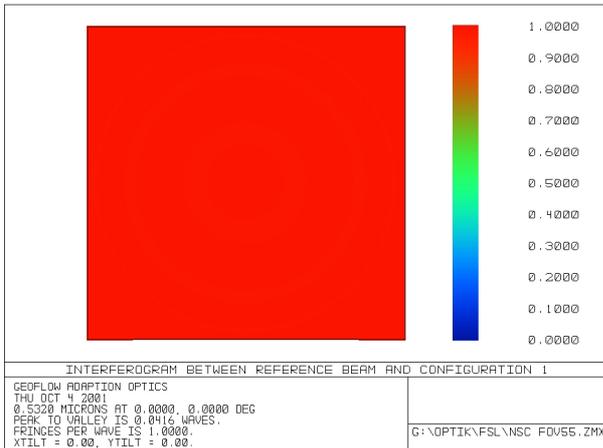


Abb. 8: Interferogramm

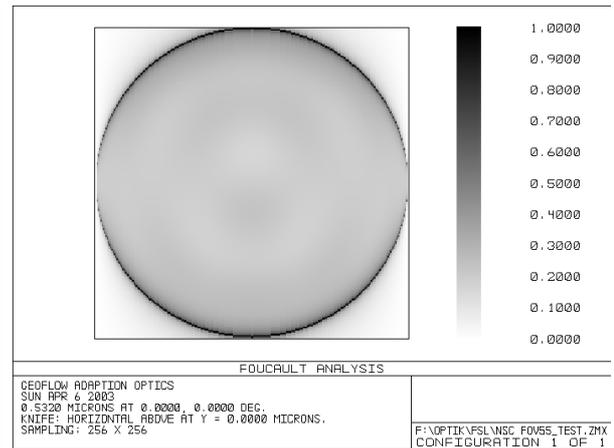


Abb. 9: Focault Analyse / Schlierenverfahren

Einfluss von Störungen

Um den Einfluss von Störungen wie etwa Dejustage, Temperaturexpansion, Missalignment, Lagerspiel usw. im Detail untersuchen zu können, wurden für alle Optiksyste me nicht-sequentielle 3D Modelle im Rechner erstellt.

Die Lage jedes einzelnen Elementes, sowie ganzer Baugruppen, kann unabhängig voneinander in x, y, z, θ_x , θ_y , θ_z variiert werden kann.

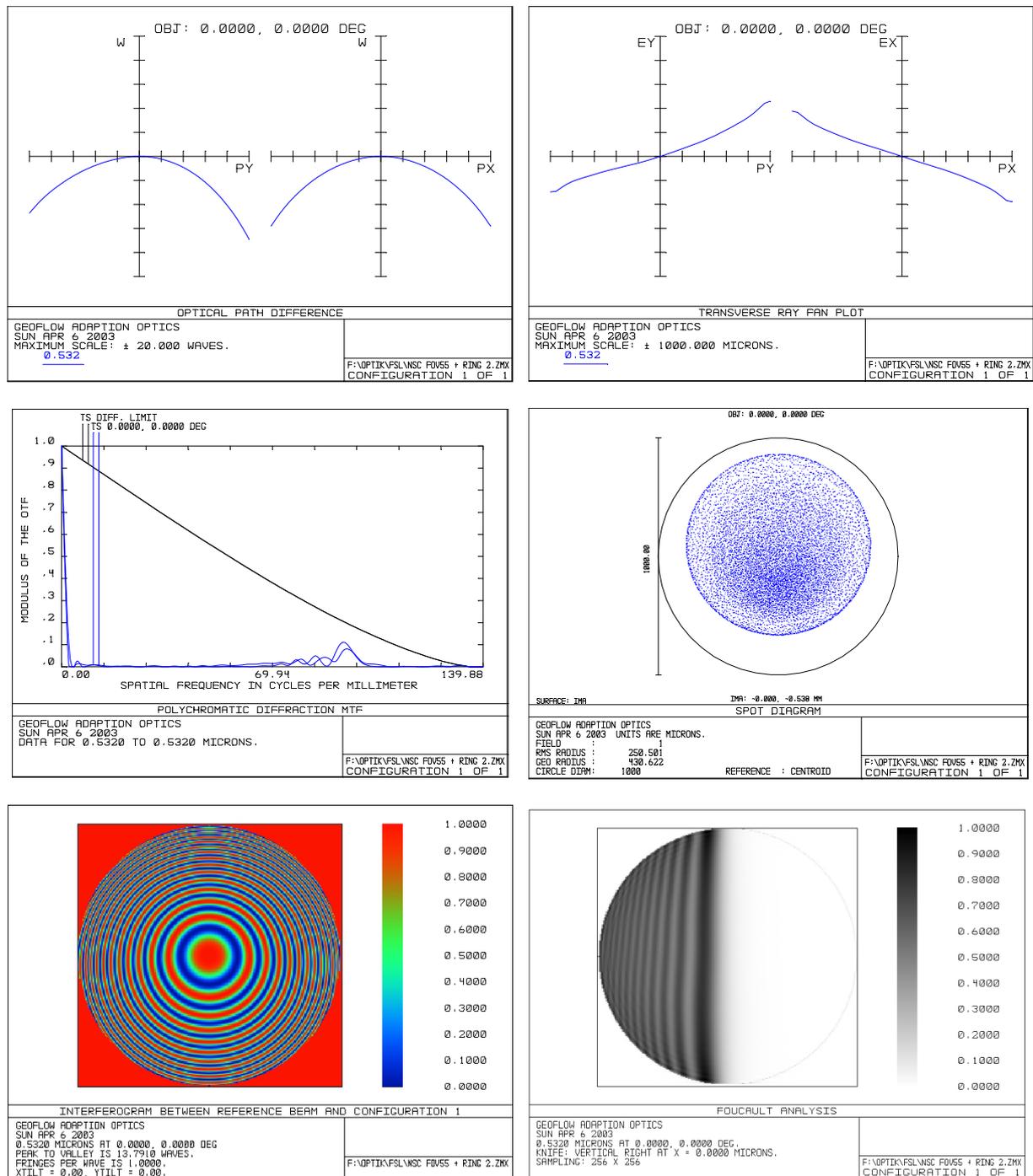


Abb. 10: Störgrößeneinfluss auf normale Interferometrie (links) und ein Schlierenverfahren (rechts), wenn die Innenkugel um 10 μm in y-Richtung versetzt ist.

Beispielhaft für viele Berechnungen soll hier der Effekt des Lagerspiels bei der Halterung der Innenkugel demonstriert werden. Für eine Auslenkung um 10 μm in die y Richtung bezogen auf die eigentliche Rotationsachse und damit sowohl vertikal als auch aus dem Fokus der Adaptionsoptik. Die Grafiken in Abb. 10 zeigen eindrucksvoll, welchen deutlich sichtbaren Effekt bereits eine kleine Auslenkung – wie sie durch Lagerspiel unvermeidlich sind – auf die Ergebnisse der optischen

Verfahren haben kann. Dies illustriert die extremen Anforderungen, die an die Präzision und die Fertigung des gesamten Experimentes gestellt werden müssen.

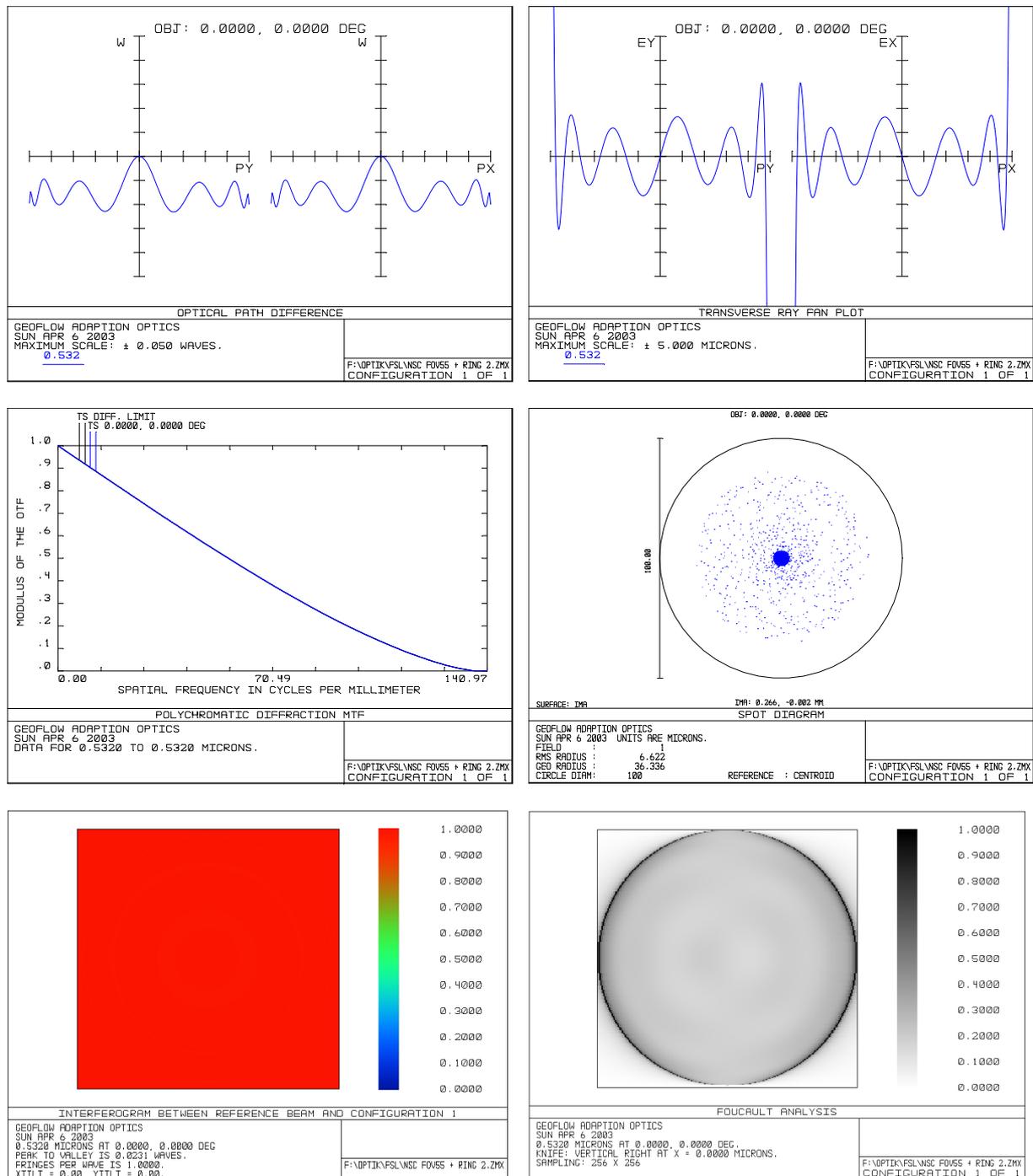


Abb. 11: Resultat einer aktiven Nachführung zeigt, dass der ursprüngliche optimale Zustand fast wieder hergestellt werden kann

Die optischen Weglängen werden stark verändert, was sich deutlich in der normalen wie der differentiellen Interferometrie widerspiegelt. Die Planität der Abbildung auf der Kamera ist nicht mehr gewährleistet, die Aufnahmen werden zum Rand unscharf sein. Es tritt eine erhebliche Strahldivergenz auf. Licht aus der gleichen Richtung wird nicht mehr auf dem gleichen Kamerapixel abgebildet. Der Kontrast, wie auch das

Auflösungsvermögen der Optik, ist stark herabgesetzt. Dies alles wirkt sich negativ auf die Auswertung des Experiments aus.

Da aber in der einen oder anderen Form immer mit gewissen Abweichungen zu rechnen ist bzw. diese einfach nicht zu vermeiden sind (Lagerspiel, Temperatúrausdehnung etc.), wurde ebenfalls untersucht, ob durch eine aktive Nachführung der gesamten Optik z. B. mit der Rotation periodisch auftretende Abweichungen wieder ausgeglichen werden können.

Mit Hilfe eines Piezo-Verstellers ließe sich die Optik sehr präzise im Nanometerbereich in x , y , z über einen ausreichend großen Bereich ($\pm 100 \mu\text{m}$) sowie in θ_x und θ_y im mrad Bereich mit nrad-Auflösung positionieren. Wie in den oben gezeigten Grafiken zu sehen ist, können mit einer derartigen Nachführung die zu erwartenden Abweichungen fast vollständig wieder ausgeglichen werden.

Zusammenfassung

Durch die integrierte Aufweitung des vom ODM kommenden kollimierten Strahles, lässt sich mit diesem Linsensystem ein Beobachtungsfeld von mehr als 110° realisieren! Dies erlaubt mit nur einer einzigen Optik die gleichzeitige Beobachtung der Strömung vom Pol bis weit über den Äquator hinaus. Dabei ist diese Optik immer noch kurz genug, um in der Front/Back Position im ETC eingesetzt zu werden. Auch der Einsatz von Lichtschnitten ist durch den kompakten Aufbau immer noch möglich, auch wenn für den Fall eines nicht mittigen Lichtschnittes die asphärische Linse, da sie die Experimentzelle nicht umschließt, trotz des kleineren Beobachtungsfeldes Vorteile hat.

Danksagung

Dieses Vorhaben wurde im Rahmen des BEOS - Projektes „Entwicklung von Diagnostik der 2. Generation für das Fluid Science Laboratory auf der ISS“ gefördert.

Literatur

- [1] Oertel, Herbert (sen., jun.), (1989), *Optische Strömungsmesstechnik*, G. Braun Verlag Karlsruhe.
- [2] Egbers, C., Brasch, W., Sitte, B., Immohr, J. and Schmidt, J.-R.; (1999), *Estimates on diagnostic methods for investigations of thermal convection between spherical shells in space*. Meas. Sci. Technol. Vol. 10, pp. 866-877.