

## **Das GEOFLOW-Experiment auf der ISS: Interferometrie und Schlieren-/Schattenmesstechnik als optische Messverfahren für die thermische Konvektion im Kugelspalt**

**B. Futterer**, M. Gellert und C. Egbers

Lehrstuhl für Aerodynamik und Strömungslehre

Brandenburgische Technische Universität Cottbus, Postfach 10 13 44, 03013 Cottbus

E-Mail: [futterer@las.tu-cottbus.de](mailto:futterer@las.tu-cottbus.de) - Homepage: <http://www.tu-cottbus.de/LAS>

### **Zusammenfassung**

In einem Laborexperiment wird die Strukturbildung und Stabilität thermischer Konvektion im rotierenden Kugelspalt unter dem Einfluss verschiedener Kraftfelder untersucht. Dabei kommen u.a. optische Messverfahren wie Schlieren-/Schattentechnik und Differenzialinterferometrie zum Einsatz. Erste Testmessungen erfolgen an einer Strömung in einer von unten beheizten Küvette. Für den konzentrischen Kugelspalt stehen numerisch gewonnene Temperaturfelder zur Verfügung, aus denen Interferogramme berechnet werden. Mit diesen werden die Anforderungen an die minimal messbaren Temperaturgradienten überprüft.

### **Motivation**

Im Rahmen eines europäischen Forschungsvorhabens der ESA (GEOFLOW) werden experimentelle, theoretische und numerische Untersuchungen zur Strukturbildung und Stabilität thermischer Konvektion im rotierenden konzentrischen Kugelspalt durchgeführt. Mit dem Modell der konzentrischen Kugelspaltströmung werden dabei Strömungsphänomene zur Simulation großräumiger geophysikalischer Bewegungen untersucht. Die Betrachtung erfolgt sowohl unter der Wirkung eines unter Mikrogravitationsbedingungen dielektrophoretisch erzeugten Zentralkraftfeldes (Raumstationsexperiment) als auch unter den Bedingungen der axial gerichteten Gravitationskraft (begleitendes Erdlaborexperiment).

Unter Schwerelosigkeit wird dabei ein künstliches Kraftfeld über eine Hochspannung zwischen Innen- und Außenkugel (ähnlich dem Kugelkondensatorprinzip) erzeugt, so dass ein radiales Kraftfeld ähnlich dem Gravitationsfeld von Planeten entsteht und auf die Modellflüssigkeit im Kugelspalt wirkt. Bei der Wahl der Messverfahren kommen vorrangig berührungslose optische Messverfahren wie Schatten-/Schlierenverfahren oder interferenzoptische Verfahren zum Einsatz. Für andere Messverfahren notwendige Tracerpartikel (z.B. LDA-Messungen) können sich in diesem künstlich erzeugten Kraftfeld ausrichten. Der Differenzialinterferometrie wird hier eine vorrangige Stellung eingeräumt, da mit diesem Verfahren quantitative Messungen möglich sind.

Für den begleitenden Erdlaborbetrieb kommt ein Aufbau zum Einsatz, der durch geringfügige Modifikationen in den drei optischen Verfahren Schatten-/Schlierentechnik und Differenzialinterferometrie Messungen ermöglicht. Erste Testmessungen erfolgen an einer Strömung in einer von unten beheizten Küvette als Modell für eine einfache Geometrie. Zur Prüfung der für die Auflösung der Temperaturgradienten erforderlichen Empfindlichkeit der Differenzialinterferometrie werden aus numerisch gewonnenen Daten Interferogramme berechnet.

## Physikalische Grundlagen

Eine umfassende Beschreibung optischer Strömungsmesstechnik findet sich in Oertel und Oertel (1989). Insbesondere für die Schatten-/Schlierenmesstechnik und interferenzoptischen Methoden gibt auch Raffel (2001) eine ausführliche Beschreibung der relevanten Grundlagen. Die wichtigsten Punkte zum Verständnis der Gemeinsamkeiten und Unterschiede werden im Folgendem zusammenfassend dargestellt.

Die für optische Messverfahren relevante Eigenschaft eines Mediums ist die Brechzahl  $n$ , die das Verhältnis von Lichtgeschwindigkeit im Vakuum  $c_0$  zur Lichtgeschwindigkeit in einem optisch dichteren Medium  $c$  beschreibt:  $n = c_0/c$ . Die Brechzahl ist abhängig vom thermodynamischen Zustand des Mediums und damit abhängig von der Lichtwellenlänge  $\lambda$ , der Dichte  $\rho$ , sowie von Druck  $p$  und Temperatur  $T$ :  $n = n(\lambda, \rho, p, T)$ .

Durchstrahlt Licht ein Medium mit vorhandenem Brechzahlgradienten können verschiedene physikalische Phänomene beobachtet werden, nach denen die optischen Verfahren eingeteilt werden. Zum Einen ändert sich die Ausbreitungsrichtung. Die resultierende Lichtbrechung wird mit Schatten-/Schlierenverfahren visualisiert. Zum Anderen erfahren Lichtwellen eine Phasenverschiebung, die zu Interferenzerscheinungen führt. Entsprechend wird dieses Phänomen mit interferenzoptischen Methoden visualisiert.

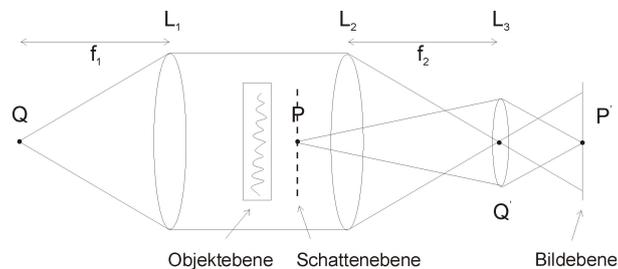


Abbildung 1: Prinzip eines optischen Strahlengangs beim Schattenverfahren nach Oertel und Oertel (1989):  $Q$  ist die Lichtquelle,  $Q'$  ihr Bild im Brennpunkt der Objektivlinse  $L_2$ . Entsprechend gekennzeichnet sind auch die Brennweiten  $f$  der Linsen  $L$ . Die Objekzebene wird mit parallelem Licht durchstrahlt.

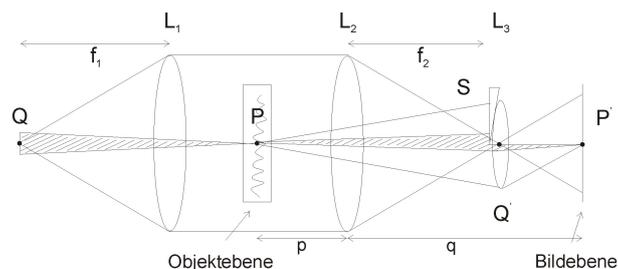


Abbildung 2: Prinzip eines optischen Strahlengangs beim Schlierenverfahren nach Oertel und Oertel (1989): Von der Lichtquelle mit endlicher Ausdehnung  $Q$  wird im Brennpunkt der Objektivlinse  $L_2$  ein Brennfleck  $Q'$  abgebildet. Im Brennpunkt von  $L_2$  ist die Schlierenkante  $S$  positioniert. Die Anordnung muss folgende Bedingung erfüllen:  $1/p + 1/q = 1/f_2$ .

Das Schattenverfahren stellt das einfachste der optischen Messverfahren dar (siehe Abb. 1). Die Struktur eines Strömungsfeldes wird direkt durch Konzentration bzw. Dekonzentration von Lichtstrahlen auf verschiedenen Stellen eines Bildschirms und dadurch resultierenden Helligkeitsunterschieden sichtbar. Die relative Helligkeitsänderung ist dabei proportional zur 2. Ableitung des Dichtefeldes.

Beim Schlierenverfahren korrelieren dagegen relative Helligkeitsänderungen mit der 1. Ableitung des Dichtefeldes. Hier wird durch eine im Brennpunkt des Objektivs eingebrachte Schlierenkante und durch eine Lichtquelle endlicher Ausdehnung ein Brennfleck im Fokus der Objektivlinse erzeugt, in dem sich alle Lichtstrahlen treffen. Bei vorhandenem Brechzahlgradienten und daraus resultierender Strahlableitung lässt die Schneide Teile der Lichtstrahlen nicht mehr durch (siehe Abb. 2).

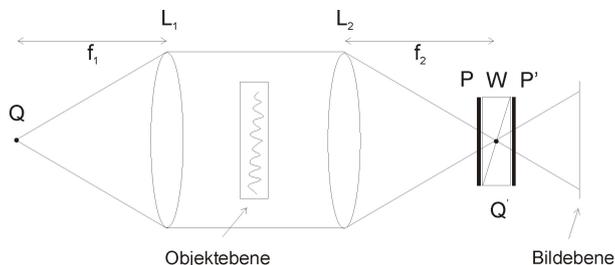


Abbildung 3: Prinzip eines Optikaufbaus für die Differenzialinterferometrie nach Merzkirch (1965).

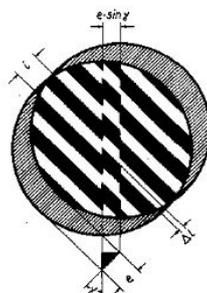


Abbildung 4: Beispiel einer Aufnahme mit dem Differenzialinterferometer nach Dohrman (2000).

Überlagert man Lichtwellen, werden Phasenverschiebungen sichtbar. In der klassischen Interferometrie (z.B. Mach-Zehnder-Interferometer) durchlaufen Lichtwellen geometrisch gleiche Strecken durch Medien mit unterschiedlichen Brechzahlen. Die Überlagerung führt je nach Phasenlage zur Verstärkung oder Auslöschung und damit zu Interferenzmustern. In der Differenzialinterferometrie gibt es dagegen keine Trennung von Mess- und Referenzstrecke. Ein in den Brennpunkt der Objektivlinse eingebrachtes Wollastonprisma überlagert benachbarte Strahlen. Ein hinter dem Prisma positionierter Polarisator sorgt für die typischen Hell-Dunkel-Muster optischer Interferenz (siehe Abb. 3).

Das Wollastonprisma fungiert dabei als Polarisationsstrahlteiler, es separiert einfallende Lichtstrahlen jeweils in einen so genannten ordinären und extraordinären Anteil mit senkrecht zueinander liegenden Polarisationsrichtungen. Im Abstand  $D$  benachbarte Strahlen werden dabei abhängig von der Objektivbrennweite  $f_2$  und dem vom Wollastonprisma abhängigen Strahlseparationswinkel  $\epsilon$  überlagert:

$$D \approx f_2 \cdot \tan \epsilon. \tag{1}$$

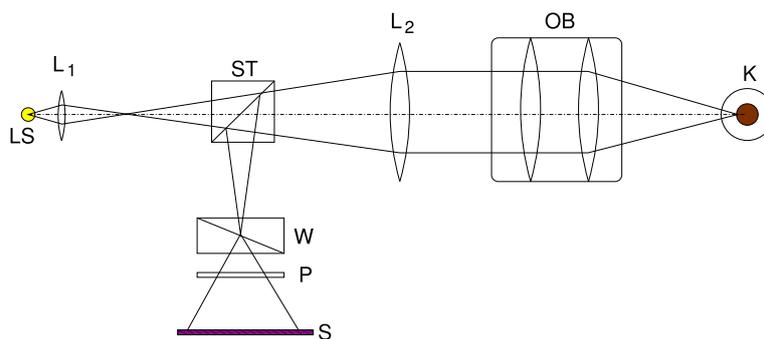
Der Polarisator liefert schließlich die Interferenz durch die Superposition dieses verschieden polarisierten Lichts. Es entsteht ein Doppelbild mit konstanter Streifenbreite  $l$  (siehe Abb. 4). Bei vorhandenen Brechzahlgradienten  $\Delta n$  verschieben sich die Streifen im Interferogramm. Es gilt:

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{b}{\lambda} \cdot \Delta n, \tag{2}$$

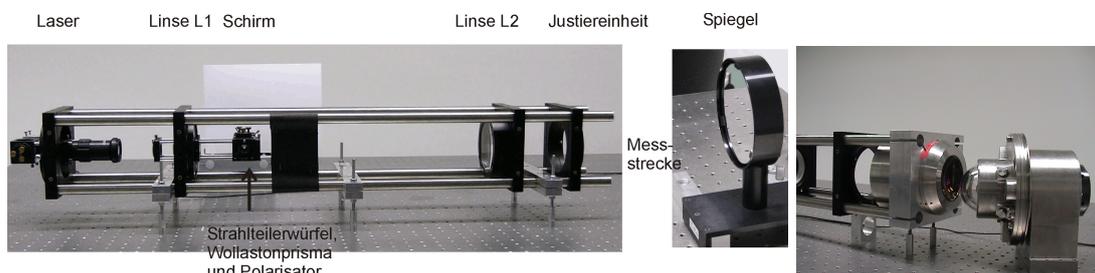
mit  $b$  als der Breite der Messstrecke und  $\lambda$  als der Lichtwellenlänge. Hiermit ist eine direkte quantitative Auswertung des von der Temperatur abhängigen Strömungsfeldes möglich.

## Auslegung der optischen Verfahren für den Erdlaborbetrieb in GEOFLOW

Im Labor wird als Lichtquelle  $LS$  ein Diodenlaser mit einer Leistung von 10 mW und einer Wellenlänge von  $\lambda=532$  nm verwendet. Der Laserstrahl wird mit einem Linsensystem  $L_1$  und  $L_2$  auf einen parallelen Strahlquerschnitt von 80 mm Durchmesser aufgeweitet (siehe Abb. 5). Eine Adaptionsoptik  $OB$  sorgt für die Fokussierung des Strahlengangs auf den Mittelpunkt der Innenkugel des Kugelspaltexperiments  $K$ . Die optische Messtechnik wird in Rückstreuanordnung aufgebaut. Die Innenkugel ist hierfür entsprechend verspiegelt, so dass die Messstrecke zweimal durchlaufen wird. Über einen Strahlteiler  $ST$  wird der Strahlengang schließlich umgelenkt und mit der Anordnung des Wollastonprismas und des Polarisators im Brennpunkt der Linse  $L_2$  in Interferogrammen auf einem Schirm  $S$  analysiert. Für den Einsatz im Schatten-/Schlierenverfahren wird das Wollastonprisma und der Polarisator entfernt bzw. eine Schlierenblende (in Form einer Rasierklinge) in den Brennpunkt eingebracht.



(a) Skizze des Strahlengangs im Laboraufbau für das Kugelspaltexperiment



(b) Foto des Laboraufbaus für den Testbetrieb mit einer Küvette

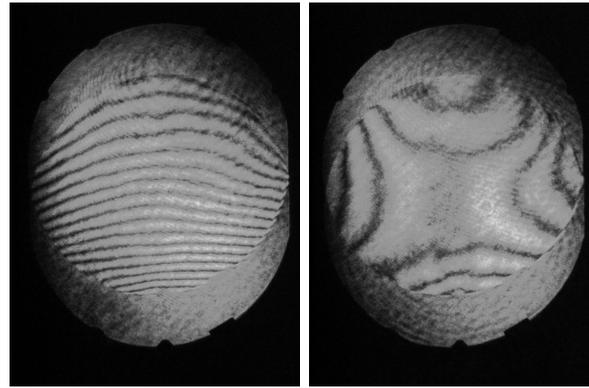
(c) Prinzip der Anbindung an den Kugelspalt im Experimentbetrieb auf der ISS

Abbildung 5: Laboraufbau in der Funktion als Differenzialinterferometer.

### Testbetrieb

Für den Betrieb in Differenzialinterferometrie kann das Wollastonprisma so in den Brennpunkt positioniert werden, dass für ein homogenes Medium Linien konstanter Breite entstehen (Streifenjustierung). Gradienten korrelieren dann mit einer Verschiebung der Streifen. Es ist möglich, das Prisma so genau zu justieren, dass die Streifenbreite gegen unendlich geht (so genannte Kollinearjustierung, Oertel und Oertel [1989]). Gradienten äußern sich dann in einer Schwärzung auf dem Schirm.

Die Qualität des Justierbildes hängt dabei entscheidend von den Parametern der optischen Bauteile ab (Strahlseparationswinkel  $\epsilon$ , Objektivbrennweite  $f_2$ , Strahlquerschnitt). Je größer die Auflösung durch hohe Strahlseparationswinkel  $\epsilon$  des Wollastonprismas, um so gekrümmter

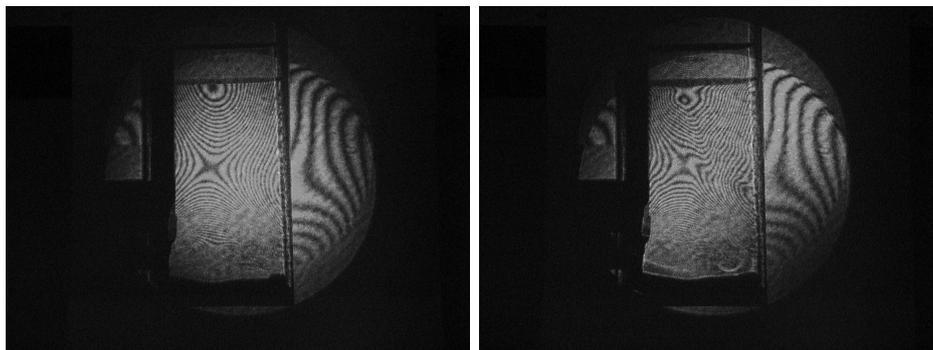


(a) Streifenjustierung      (b) Kollinearjustierung

Abbildung 6: Justierbilder für die Differenzialinterferometrie.

erscheinen die Linien konstanter Streifenbreite (siehe Abb. 6). Der Abstand benachbarter, zur Überlagerung gebrachter Strahlen  $D$  erhöht sich zusätzlich durch die Objektivbrennweite  $f_2$ , die in dieser Experimentkonfiguration durch die Anforderung an die Strahlaufweitung relativ groß ist ( $f_2 = 310$  mm). Bei einem großen Verhältnis von Objektivdurchmesser zum Durchmesser der Lichtquelle erscheinen die Interferenzstreifen unscharf. In diesem Aufbau wird der Laserstrahl von ca. 3 mm Durchmesser auf 80 mm aufgeweitet.

Der Testbetrieb am Beispiel einer thermisch getriebenen Küvettenströmung verdeutlicht zusätzlich, dass eine große Strahlseparation zu einem Doppelbild führt (siehe Abb. 7). Trotz der beschriebenen Konfiguration kann die thermische Konvektion durch Verschiebungen der Interferenzstreifen beobachtet werden.



(a) Nullbild der mit Fluid gefüllten Küvette, Justierung des Wollastonprismas in Streifenjustierung

(b) Interferogramm

Abbildung 7: Interferenzoptische Messung einer thermisch getriebenen Küvettenströmung.

## Simulation

Die begleitenden Erdlaborexperimente dienen vorrangig zur Abschätzung der erforderlichen Genauigkeiten für das gesamte Experimentdesign. Der Schwerpunkt der wissenschaftlichen Untersuchungen liegt dabei auf der Prüfung der für die Auflösung benötigten Empfindlichkeit der Differenzialinterferometrie.

Mit einer Strahlseparation  $\varepsilon = 2^\circ$ , einer Objektivbrennweite  $f_2 = 310$  mm und einer Adaptionsoptikbrennweite  $f_{OB} = 57$  mm liegt der Abstand benachbarter Strahlen bei  $D \approx 10$  mm. Für die minimal erreichbare Winkelauflösung im Kugelspalt ergibt sich  $\Delta\theta \approx 11^\circ$ . Es zeigt

sich, dass geringere Auflösung benötigt werden: z.B. ist mit  $\varepsilon = 0.05^\circ$  eine Winkelauflösung von  $\Delta\theta \approx 0.28^\circ$  möglich.

Betrachtet man den Gangunterschied, wie er im Erdlaborbetrieb für einen zeitabhängigen Strömungszustand im Kugelspalt numerisch vorhergesagt wird, wird deutlich dass an die Empfindlichkeit hohe Anforderungen gestellt wird (siehe Abb. 8).

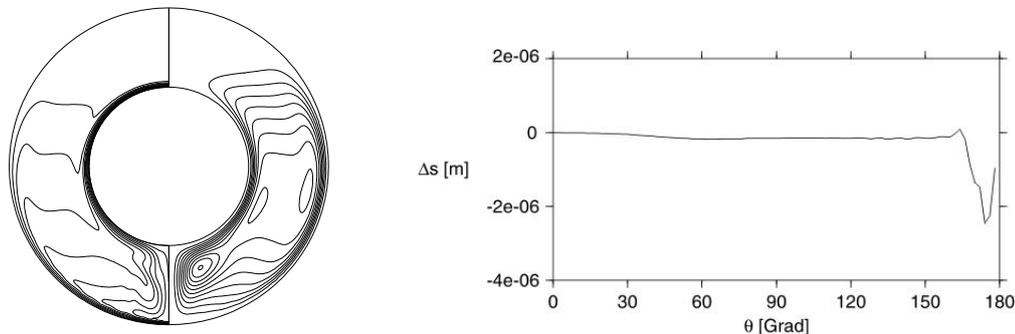


Abbildung 8: Links Temperatur- und Geschwindigkeitsfeld eines periodisch zeitabhängigen Strömungszustandes im Kugelspalt unter dem Einfluss eines axialen Kraftfeldes ( $Pr = 100$ ,  $Ra = 1 \cdot 10^6$ ), rechts Gangunterschied über die meridionale Koordinate  $\theta$ .

Zur Auswertung wird aus den numerisch erhaltenen Temperaturdaten ein Interferogramm konstruiert, welches mit dem vom Experiment stammenden Bild direkt verglichen werden kann. Dies ist vor allem für den Test des Versuchsaufbaus im Erdlabor eine geeignete Methode, da Schwierigkeiten einer Bildverarbeitungsmethode nicht auftreten und als Vorteil schon die zu erwartenden Temperaturfelder vorliegen. Für diese Auswertemöglichkeit muss im Experimentbetrieb nach der Kollinearjustierung vorgegangen werden.

Wie in der Einführung erläutert, wird bei der differentiellen Interferometrie ausgenutzt, dass Flüssigkeiten eine von der Temperatur abhängige Brechzahl  $n(T)$  aufweisen. Durchläuft ein Lichtstrahl die Kugelzelle bei unterschiedlichen Temperaturen, so ist bei gleicher geometrischer Weglänge  $d = r_2 - r_1$  mit  $r_2$  als dem Außenkugelradius und  $r_1$  als dem Innenkugelradius die optische Weglänge

$$s = \int_{R_1}^{R_2} n(T) dr \quad (3)$$

verschieden. Betrachtet man zwei benachbarte radial verlaufende Strahlen, die um den Winkel  $\Delta\theta$  verschoben sind, tritt zwischen beiden ein Gangunterschied

$$\Delta s = \int_{R_1}^{R_2} n(T) dr - \int_{R_1}^{R_2} n(\tilde{T}) dr \quad (4)$$

auf, wobei  $T = T(r, \theta, \phi)$  und  $\Delta T = T(r, \theta + \Delta\theta, \phi)$  gilt (Sitte, 2004).

Ist der Gangunterschied beider Strahlen vor dem Durchgang durch den Kugelspalt bekannt, können aufgrund der Änderung des Gangunterschieds Aussagen über die Temperaturverteilung in der Flüssigkeit gemacht werden. Voraussetzung ist natürlich, dass die genaue Abhängigkeit der Brechzahl von der Temperatur bekannt ist. Da in Gl. 4 über die radiale Richtung summiert wird, ist das gewonnene Wissen bezüglich der Temperaturverteilung auf die meridionale ( $\theta + \Delta\theta$ ) und azimuthale (bei um  $90^\circ$  gedrehtem Wollastonprisma) Richtung beschränkt. Die radiale Verteilung bleibt unbekannt. Ist die Winkeldifferenz  $\Delta\theta$  klein genug, kann der Temperaturgradient  $\nabla_\theta T$  approximiert werden.

In Abhängigkeit vom Gangunterschied  $\Delta s$  der überlagerten Strahlen ändert sich das Interferenzmuster auf dem Schirm. Entspricht der Gangunterschied einem geradzahigen Vielfachen

der halben Wellenlänge  $\lambda/2$ , ergibt sich ein heller Bereich auf dem Schirm. Bei einem Gangunterschied, der als ungeradzahliges Vielfaches von  $\lambda/2$  darstellbar ist, entsteht ein dunkler Bereich. Die Benutzung eines Strahlenbündels führt zum oben erwähnten Interferenzmuster auf dem Schirm.

Der funktionelle Zusammenhang zwischen Brechungszahl  $n$  und Temperatur  $T$  für die im Experiment zum Einsatz kommenden Silikonöle ist im relevanten Temperaturbereich eine lineare Funktion

$$n(T) = aT + b. \quad (5)$$

Setzt man diese Funktion in Gl. (4) ein, dann ergibt sich ein Gangunterschied von

$$\frac{\Delta s}{a} = \int_{R_1}^{R_2} T(r, \phi, \theta) dr - \int_{R_1}^{R_2} T(r, \phi, \theta + \Delta\theta) dr \stackrel{(\Delta\theta \rightarrow 0)}{=} \frac{d}{d\theta} \int_{R_1}^{R_2} T(r, \phi, \theta) dr \quad (6)$$

Somit ist aus den Simulationsdaten der Gangunterschied bestimmt. Die mit Gl. 6 erhaltenen Werte  $\Delta s$  werden nun als Funktion von  $\theta$  und  $\phi$  dargestellt, wobei in meridionaler Richtung die Auflösung durch  $\Delta\theta$  bestimmt ist. Theoretisch könnte bei der Generierung der Interferogramme aus den numerischen Daten  $\Delta\theta$  beliebig klein gewählt werden. Um die Vergleichbarkeit zum Experiment zu gewährleisten, ist aber ein Wert in der Größenordnung der experimentell realisierbaren Winkelauflösung ratsam, da die Winkelauflösung einen wesentlichen Einfluss auf die Qualität und den Detailreichtum der Bilder hat.

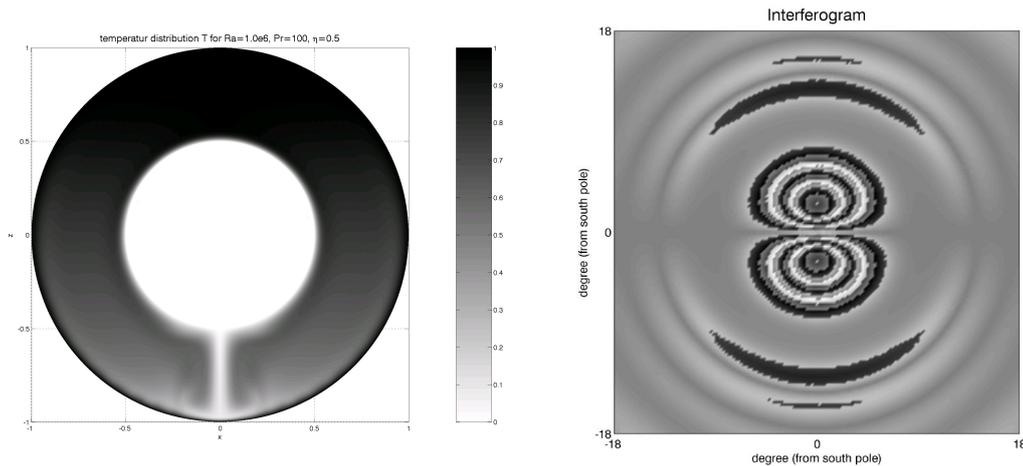


Abbildung 9: Links Darstellung des Temperaturfeldes und rechts Interferogramm für einen zeitperiodischen axialsymmetrischen Zustand bei  $Pr = 100$  und  $Ra = 1 \cdot 10^6$  im simulierten Laborsystem mit axialer Gravitationskraft, ohne Zentralkraft. Die Winkelauflösung liegt bei  $\Delta\theta = 0.4^\circ$ .

Die Abbildungen 9 und 10 zeigen Strömungszustände thermischer Konvektion im Kugelspalt für verschiedene Kraftfelder und aus den Temperaturfeldern berechnete Interferogramme. Die Abbildung 9 stellt den Fall eines periodisch zeitabhängigen Strömungszustandes dar. Hier können zeitlich periodisch sinkende Wirbel beobachtet werden. Trotzdem konzentriert sich die Bewegung des Fluids hauptsächlich auf den Bereich sehr nahe am Südpol.

Das spiegelt sich auch im Interferogramm wieder. Nur in unmittelbarer Polnähe zeigt sich ein Ringmuster, dessen Zweiteilung auf den Fakt zurückzuführen ist, dass das Interferometer den Temperaturgradienten nur in eine Koordinatenrichtung misst. Weiter entfernt vom Pol ergibt sich ein gleichförmiger grauer Hintergrund.

Das Interferogramm eines für das Raumstationsexperiment numerisch simulierten Strömungszustandes zeigt starke Temperaturänderungen, die sich nicht nur auf die unmittelbare Nähe zur Rotationsachse beschränken, sondern in der gesamten Kugel zu finden sind (siehe Abb.10).

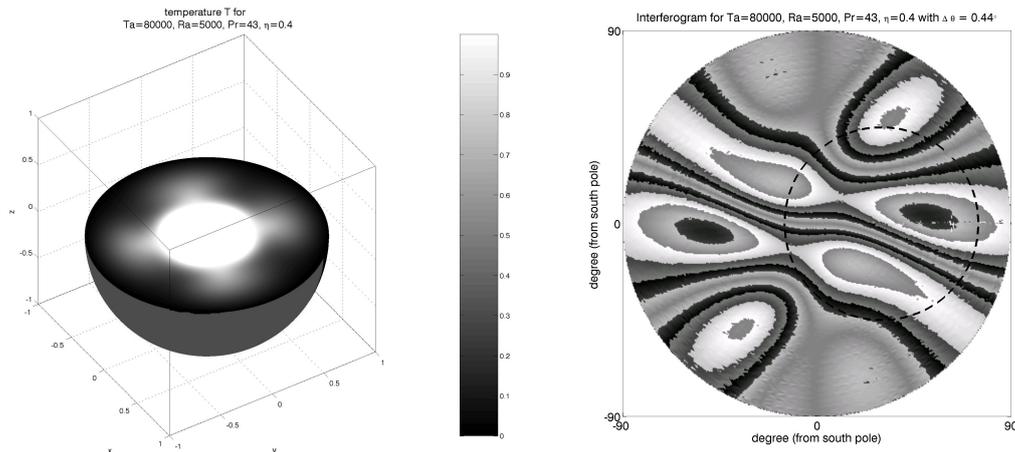


Abbildung 10: Links Darstellung des Temperaturfeldes und rechts Interferogramm für einen stationäre Zustand bei  $Pr = 43$  und  $Ra = 5 \cdot 10^3$  im simulierten Laborsystem mit zentralem Kraftfeld, mit Rotation ( $Ta = 8 \cdot 10^4$ ). Die Winkelauflösung liegt bei  $\Delta\theta = 0.4^\circ$ .

### Ausblick

Nach der Anbindung des Optikaufbaus an das Kugelspalt-Experiment wird im Rahmen einer Genauigkeitsstudie die Gradientenempfindlichkeit (Strahlseparationswinkel des Wollastonprismas) mit Unterstützung der simulierten Interferogramme weiter untersucht. Im Mittelpunkt steht auch der Einfluss der Rotation auf das Messverfahren. Für die weiteren begleitenden Erdlaborexperimente wird auch der Einsatz des Aufbaus im Schatten-/Schlierenverfahren geprüft.

### Danksagung

Dieses Projekt wird gefördert durch das Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Förderkennzeichen: 50 WM 0122.

### Literatur

- [1] [www-isl.mach.uni-karlsruhe.de/LABOR/experimentelle\\_1/node35.html](http://www-isl.mach.uni-karlsruhe.de/LABOR/experimentelle_1/node35.html) (zuletzt aktualisiert: U. Dohrmann, 23.10.2000)
- [2] Merzkirch, W.F. (1965): *A Simple Schlieren Interferometer*, AIAA J., 3, 10, 1974–1976
- [3] Oertel sen., H., Oertel jun., H. (1989): *Optische Strömungsmesstechnik*, Braun Verlag
- [4] Raffel, M. (2001): *Optische Untersuchungen in technischen Strömungen unter Berücksichtigung eines Verfahrens zur Detektion von Dichtegradienten*, DLR Institut für Strömungsmechanik, Göttingen
- [5] Sitte, B. (2004): *Thermische Konvektion in Zentralkraftfeldern*, Fortschr.-Ber. VDI Reihe 7, Nr. 460, Düsseldorf, VDI Verlag