

Das GeoFlow-Experiment auf der ISS: Simulation optischer 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

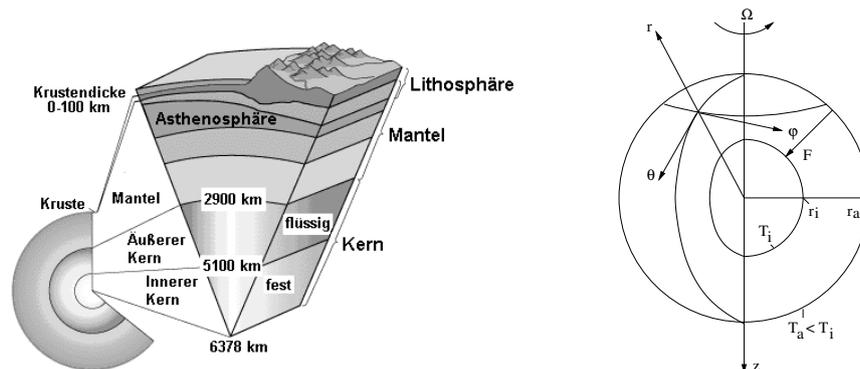
E-Mail: futterer@las.tu-cottbus.de - Homepage: <http://www.tu-cottbus.de/LAS>

Zusammenfassung

In einem Laborexperiment wird die Strukturbildung und Stabilität thermischer Konvektion im rotierenden Kugelspalt unter dem Einfluss verschiedener Kraftfelder untersucht. Zur Bestimmung des Temperaturfeldes kommen optische Messverfahren wie Schatten- und Schlierenverfahren und Wollaston-Schlieren-Interferometrie zum Einsatz. Für den konzentrischen Kugelspalt stehen numerisch gewonnene Temperaturfelder zur Verfügung, aus denen Interferogramme berechnet werden. Diese unterstützen die Auswertung experimentell gewonnener Interferogramme.

Einleitung

Im Rahmen des Projektes „GeoFlow“ werden experimentelle, numerische und theoretische Untersuchungen zur Strukturbildung und Stabilität thermischer Konvektion im rotierenden konzentrischen Kugelspalt durchgeführt. Mit dem Modell der konzentrischen Kugelspaltströmung werden dabei Strömungsphänomene untersucht, die großräumige geophysikalische Bewegungen im Erdinneren simulieren (siehe Abb. 1). Die Betrachtung der Kugelspaltströmungen erfolgt sowohl unter der Wirkung eines künstlich erzeugten Zentralkraftfeldes (Raumstationsexperiment) als auch unter den Bedingungen der axial gerichteten Gravitationskraft (begleitendes Laborexperiment).



(a) Schalenbau der Erde nach Kious u. Tilling (1996)

(b) Rotierendes, im Inneren beheiztes Kugelspaltmodell

Abbildung 1: Modell der konzentrischen Kugelspaltströmung zur Untersuchung großräumiger geophysikalischer Bewegungen.

Unter den Schwerelosigkeitsbedingungen der Raumstation wird dabei ein künstliches Kraftfeld über eine Hochspannung zwischen Innen- und Außenkugel 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 optische Messverfahren wie Schatten- und Schlierenverfahren oder interferenzoptische Verfahren zum Einsatz, die ohne Tracerpartikel auskommen. Für andere Messverfahren notwendige Tracerpartikel (z.B. Messungen mit Hilfe der Laser-Doppler-Anemometrie) können sich in diesem nach dem so genannten dielektrophoretischen Wirkungsprinzip erzeugten Kraftfeld ausrichten. Der Wollaston-Schlieren-Interferometrie wird hier eine vorrangige Stellung eingeräumt, da mit diesem Verfahren quantitative Messungen möglich sind.

Im Labor kommt ein Messsystem zum Einsatz, das durch geringfügige Modifikationen Messungen in den drei optischen Verfahren Schatten- und Schlierenmesstechnik und Wollaston-Schlieren-Interferometrie ermöglicht. Die Funktionalität der Messoptik kann mit Hilfe einer Kerzenflamme demonstriert werden. Erste Testmessungen erfolgen an einer Strömung in einer von unten beheizten Küvette als Modell für eine einfache Geometrie (Futterer u. a., 2004). Zur Prüfung der für die Auflösung der Temperaturgradienten erforderlichen Empfindlichkeit der Wollaston-Schlieren-Interferometrie werden aus numerisch gewonnenen Daten Interferogramme berechnet. Diese unterstützen auch die Auswertung experimentell gewonnener Interferogramme.

Auslegung der Messoptik

Die für optische Messverfahren zur Bestimmung von Temperaturfeldern relevante Eigenschaft eines Mediums ist die Brechzahl n . Die Brechzahl ist abhängig vom thermodynamischen Zustand des Mediums und damit abhängig von der Lichtwellenlänge λ' , der Dichte ρ , vom Druck p und von der Temperatur T . Diese physikalischen Zusammenhänge ermöglichen es, Brechzahländerungen zur Messung von Dichteänderungen heranzuziehen, sowie von allen Größen, die mit der Dichte in eindeutigen Zusammenhang stehen. Detaillierte Beschreibungen der Zusammenhänge finden sich in Oertel u. Oertel (1989) und Raffel (2001). Optische Messverfahren werden so zur Temperaturmessung in Konvektionsströmungen verwendet ($\rho = \rho(T)$). Dabei wird angenommen, dass die Lichtwellenlänge λ' konstant ist und dass sich der Druck p nicht ändert.

Die bisher in „GeoFlow“ geplanten Messmethoden zur Bestimmung des Temperaturfeldes sind die Schlierentechnik und die Wollaston-Schlieren-Interferometrie. Mit dem Schlierenverfahren erhält man einen qualitativen Eindruck vom Strömungszustand, die Wollaston-Schlieren-Interferometrie ermöglicht eine quantitative Auswertung. Im Rahmen der Untersuchungen am Laborexperiment kommt zusätzlich das Schattenverfahren zum Einsatz. Tabelle 1 zeigt in einem Überblick den physikalischen Hintergrund, den mathematischen Zusammenhang und die Auswertemethodik für alle genannten Verfahren. Abbildung 2 zeigt den Aufbau der Messoptik im Labor für die einzelnen Verfahren. Geringfügige Modifikationen lediglich im Bereich des Brennpunktes der Objektivlinse L_2 erlauben einen Betrieb der Optik in allen genannten Verfahren. Für den Betrieb als Schattenoptik wird die Messstrecke bzw. hier der Kugelspalt lediglich durchleuchtet (siehe Abb. 2(a)). Für den Betrieb als Schlierenoptik wird in den Brennpunkt der Objektivlinse L_2 eine Schlierenschneide SN eingebracht (siehe Abb. 2(b)). Arbeitet die Messtechnik als Wollaston-Schlieren-Interferometer wird im genannten Brennpunkt ein Wollaston-Prisma W eingesetzt und dahinter ein Polarisator P angeordnet (siehe Abb. 2(c)). Bei vorhandenen Brechzahlgradienten Δn verschieben sich die Streifen im Interferogramm. Für Gradienten im Kugelspalt z.B. in meridionaler Richtung θ gilt dann die in Tab. 1 für diese Streifenjustierung angegebene Formel. Hiermit ist eine indirekte quantitative Auswertung des von der Temperatur abhängigen Strömungsfeldes möglich, indem Brechzahlunterschiede Δn aufgrund der Temperaturschwankungen $T = T(r, \theta, \phi)$ gemessen werden. Ist $n(T)$ bekannt, können die Brechzahlunterschiede in Temperaturwerte umgerechnet werden.

Neben dieser so genannten Streifenjustierung kann das Wollaston-Prisma so genau in den Brennpunkt positioniert werden, dass die Streifenbreite gegen unendlich geht (so genannte Kollinear-

| Schattenverfahren | Schlierenverfahren | Wollaston-Schlieren-Interferometrie |
|---|--|---|
| physikalischer Effekt: Konzentration und Dekonzentration von Licht-Strahlen durch Strahlablenkung (Abbildung der Schattenebene) | physikalischer Effekt: Visualisierung der abgelenkten Lichtstrahlen (Abbildung der Objektebene) | physikalischer Effekt: Phasenverschiebung der Lichtwellen verursacht Interferenz, Strahlablenkung dabei vernachlässigt (Raffel 2001), robust gegenüber mechanischer Vibration, Empfindlichkeit anpassbar |
| mathematischer Zusammenhang: $\frac{\Delta I}{I_0} = -\frac{2b}{n_0} \int_{r_i}^{r_a} \left[\frac{\partial^2 n}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 n}{\partial \varphi^2} \right] dr$ radiale Richtung r nicht aufgelöst | mathematischer Zusammenhang: $\frac{\Delta I}{I_0} = -2 \frac{f}{a_0 n_0} \int_{r_i}^{r_a} \left[\frac{\partial n}{\partial \theta} \right] dr$ bzw. $\frac{\partial n}{\partial \varphi}$ radiale Richtung r nicht aufgelöst | mathematischer Zusammenhang: Kollinearjustierung: $\frac{\Delta I}{I_0} = \cos^2 \left[\pi \left(\frac{1}{4} + \frac{2b}{\lambda'} f \varepsilon \int_{r_i}^{r_a} \left[\frac{\partial n}{\partial \theta} \right] dr \right) \right] - \frac{1}{2}$ bzw. $\frac{\partial n}{\partial \varphi}$ radiale Richtung r nicht aufgelöst Streifenjustierung: $\frac{\Delta i}{i} = \frac{b}{\lambda'} \cdot f \varepsilon \cos \frac{\partial n}{\partial \theta}$ bzw. $\frac{\partial n}{\partial \varphi}$ |
| Auswertung: qualitativ | Auswertung: qualitativ | Auswertung: quantitativ |

Tabelle 1: Optische Verfahren zur Bestimmung des Temperaturfeldes: I_0 - maximale Beleuchtungsstärke bei homogenen Bedingungen, ΔI - Beleuchtungsänderung bei Auftreten von Gradienten, b - Messstrecke bzw. Breite des Kugelspaltspalts, n_0 - Brechzahl bei hom. Bed., f - Linsenfokallänge, a_0 - Geometrie des Brennflecks, λ' - Lichtwellenlänge, ε - Strahlseparationswinkel des Wollaston-Prismas, i - Streifenbreite, Δi - Verschiebung der Streifen.

justierung, Oertel u. Oertel (1989)). Gradienten äußern sich dann in einer Schwärzung auf dem Schirm. Für die Variation der Beleuchtungsstärke ΔI im Kugelspalt z.B. in meridionaler Richtung θ gilt die in Tab. 1 angegebene Formel. Dann können auf dem Schirm sichtbare Helligkeitsunterschiede in Brechzahländerungen bzw. Temperaturänderungen transformiert werden. Beim Schatten-Interferometer befindet sich ein zweites Wollaston-Prisma W_2 hinter dem Polarisator P (siehe Abb. 2(d)). Dieser Aufbau entspricht einem Schattenverfahren, da hiermit die 2. Ableitung der Brechzahl visualisiert wird. Im Vergleich zum klassischen Aufbau in Abb. 2(a) sind die Messbilder kontrastreicher. Diese Variante wird im Rahmen der geplanten Untersuchungen am Laborexperiment geprüft, da hierfür die Möglichkeit einer quantitativen Auswertung besteht. Dies wird in einem der folgenden Abschnitte beschrieben, der auf die Auswertemethode für die Wollaston-Schlieren-Interferometrie eingeht.

Alle vorgestellten Verfahren mitteln die jeweilige Änderungen der Brechzahl n längs des Lichtweges. In Richtung der Messstrecke, die im Kugelspalt der radialen Richtung r entspricht, erfolgt somit keine Auflösung der Messgröße. Die Auflösung im Kugelspalt in meridionaler Richtung θ und azimuthaler Richtung ϕ erfolgt sowohl für das Schlierenverfahren als auch für die Verfahren mit Wollaston-Prismen unabhängig voneinander, indem zum einen die Schlierenschneide und zum anderen das Prisma entsprechend um 90° gedreht werden. Beim klassischen Schattenverfahren werden beide Richtungen gleichzeitig erfasst.

Simulation

Zur Auswertung wird aus den numerisch erhaltenen Temperaturdaten ein Interferogramm konstruiert, welches mit dem vom Experiment stammenden Bild direkt verglichen werden kann. Für diese Auswertemöglichkeit muss im Experimentbetrieb nach der Kollinearjustierung vorgegangen werden. Die mathematischen Zusammenhänge für die Simulation finden sich in Futterer u. a. (2004).

Der umgekehrte Weg, aus einem Interferogramm auf die zugrunde liegende Temperaturvertei-

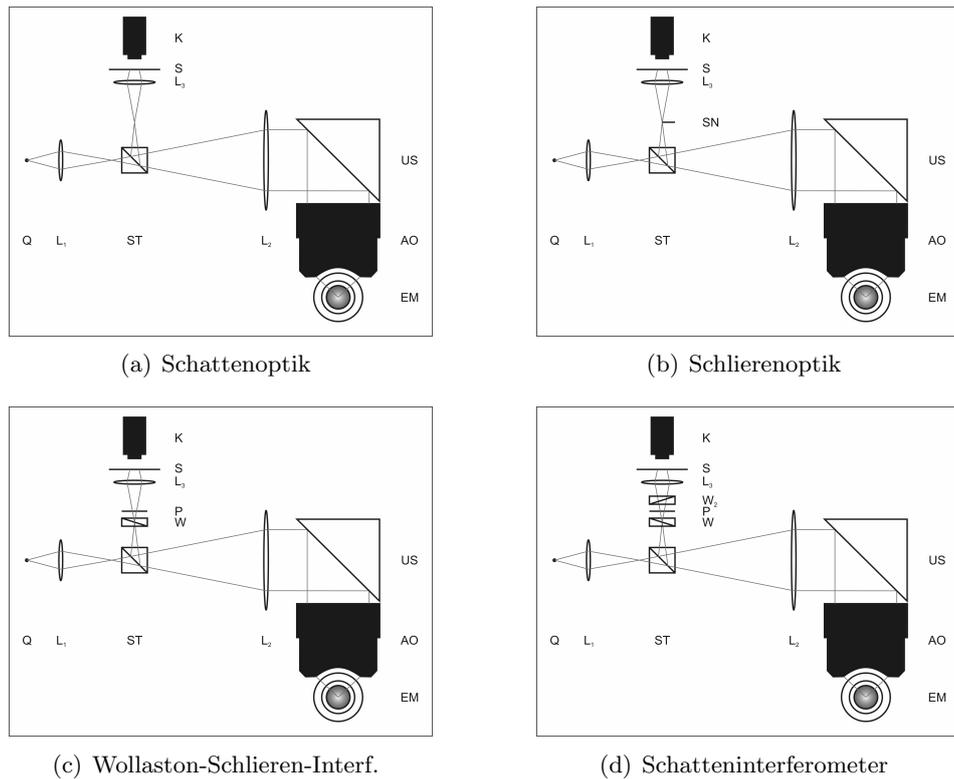


Abbildung 2: Aufbau der Messoptik im Labor für verschiedene optische Verfahren zur Bestimmung des Temperaturfeldes: Das von einem Diodenlaser mit einer Leistung von 10 mW als Lichtquelle Q ausgesandte Licht der Wellenlänge $\lambda' = 532\text{ nm}$ wird über die Linsen L_1 und L_2 zu einem parallelen Lichtbündel mit einem Durchmesser von 80 mm aufgeweitet. Dieses horizontale Lichtbündel wird über einen Umlenkspiegel US auf eine Adaptionsoptik AO gerichtet, die die Lichtstrahlen auf den Mittelpunkt der Innenkugel im Experimentmodul EM fokussiert. Die verspiegelte Innenkugel reflektiert das Licht, das dann zwischen den Linsen L_1 und L_2 über einen Strahlteilerwürfel ST auf den Schirm S abgebildet wird und von der Kamera K fotografiert werden kann.

lung zu schließen und dann die numerisch und experimentell ermittelten Feldgrößen miteinander zu vergleichen, stellt ein inverses Problem dar, dessen Lösung mathematisch nicht eindeutig ist. Diese Methode hat zwar den Vorteil, dass man aus der Messung direkt die Feldgrößen Temperatur und Strömung gewinnen kann ohne den Umweg des Vergleichs mit den numerisch erstellten Interferogrammen. Für weitere Aussagen über die Realisierbarkeit dieses Ansatzes sind aber Labormessungen notwendig (Immohr, 2005).

Für den Fall einer axial gerichteten (Gravitations-)Kraft und Heizung der Außenkugel (Situation im Labor ohne zusätzliche Zentralkraft), setzt Konvektion u.a. in Form von abtropfenden Wirbeln ein (siehe Abb. 3(a)). Bewegung findet somit hauptsächlich in der Nähe des Südpols der Kugel statt. Wird von diesem Bereich ein Interferogramm aufgenommen, so erhält man ein Muster wie es in Abb. 3(b) dargestellt ist. Die Rotationssymmetrie der Strömung findet sich aufgrund der Symmetriebrechung (Winkelabhängigkeit der Beobachtung mit dem Interferometer) im Interferogramm nicht wieder. Aber eine Spiegelsymmetrie zum Pol der Kugel bleibt erhalten. Je dichter die Streifen sind, um so stärker sind die vorliegenden Temperaturgradienten. Das Interferogramm entspricht der theoretisch zu erwartenden Verteilung von hellen und dunklen Bereichen. Experimentell gewonnene Interferogramme vom Kugelspalt nach Sitte (2004) stimmen sehr gut mit dem numerisch bestimmten Interferogramm überein.

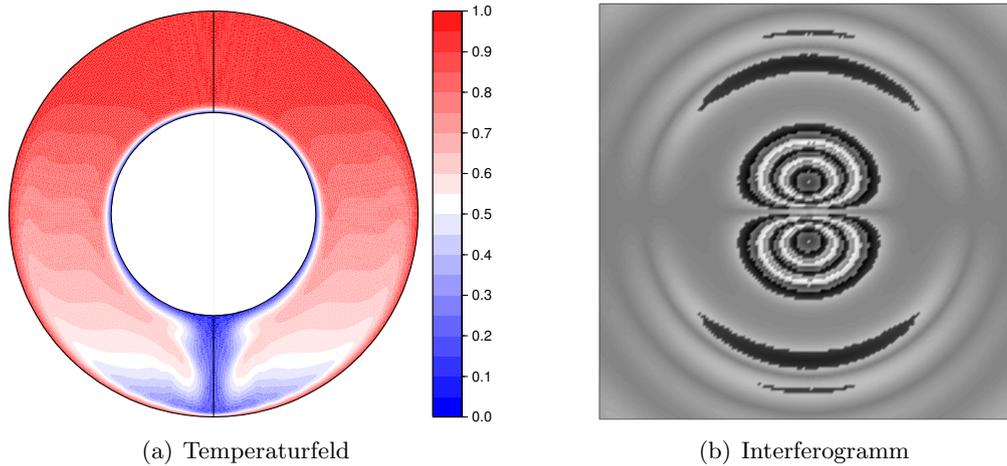


Abbildung 3: Periodische Wirbelbildung im Kugelspalt unter dem Einfluss eines axialen Kraftfeldes in einer Spaltweite $\beta = 1$ für eine Prandtl-Zahl $Pr = 100$ bei einer Rayleigh-Zahl $Ra = 1 \cdot 10^6$: Dimensionslose Temperaturverteilung und numerisch bestimmtes Interferogramm für die südliche Hemisphäre.

Für den Kugelspalt unter Einfluss eines reinen Zentralkraftfeldes, also der Situation unter Schwerkraft mit eingeschaltetem künstlichen Kraftfeld, gibt es bisher keine Messungen und experimentell gewonnene Interferogramme zum Vergleich. Im Fall ohne Rotation bei einer Taylor-Zahl $Ta = 0$ tritt bei einer Rayleigh-Zahl von $Ra = 4 \cdot 10^3$ ein rotationssymmetrischer Zustand auf (siehe Abb. 4). Dieser ist vergleichbar mit dem in Abb. 3 dargestellten Zustand für ein axial gerichtetes Kraftfeld. Das zugehörige Interferogramm weist Parallelen zum Fall mit axialem Kraftfeld auf. Dieser erste Vergleich ist ein Indiz dafür, dass die Interferogrammgenerierung auch für dreidimensionale Zustände prinzipiell funktioniert.

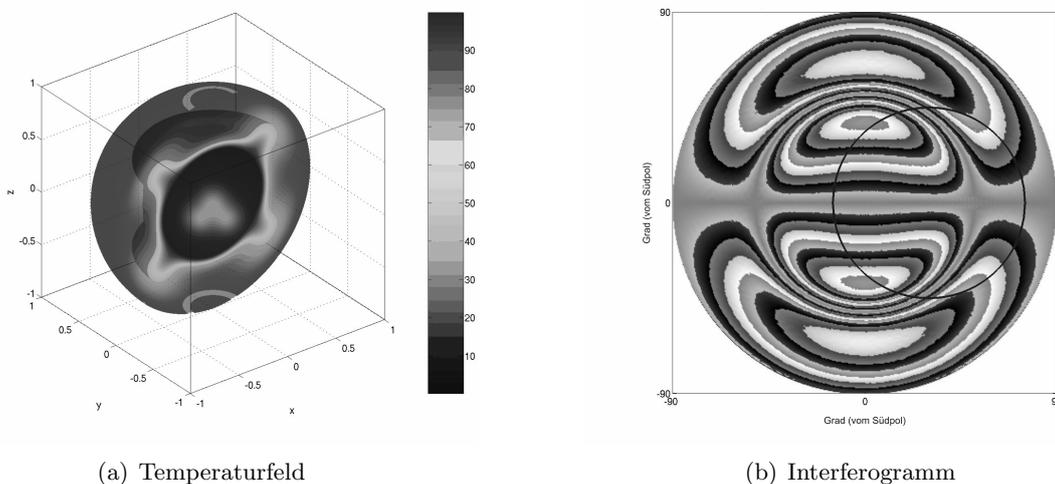


Abbildung 4: Stationäre Konvektion im nichtrotierenden Kugelspalt mit $\beta = 1.0$ für $Pr = 64.6$, $Ra_{mod} = 4 \cdot 10^3$ und $Ta = 0$ unter Einfluss eines zentralen Kraftfeldes: Temperaturverteilung und numerisch bestimmtes Interferogramm für die südliche Hemisphäre. Die Temperatur ist angegeben in Prozent der Temperaturdifferenz ΔT . Der Kreis markiert das Beobachtungsfenster.

Für eine rotierende Geometrie, und ebenso für nichtstationäre Zustände, lassen sich nach der gleichen Methode Interferogramme numerisch bestimmen. Dabei werden zwei Probleme deutlich, die die Auswertung solcher Zustände aus den Experimentdaten erschweren. Das ist einer-

seits die Abhängigkeit des Interferometers von der Blickrichtung auf die Kugel und andererseits die durch die Rotation zusätzlich aufgeprägte Frequenz, die zu einer kontinuierlichen Variation der Interferogramme führt.

Mit Blickrichtung ist hier gemeint, dass sich bei rotierender Kugel der im Interferometer abgebildete Ausschnitt der Kugel ständig ändert. Der Öffnungswinkel der Optik führt zu einem Beobachtungsfenster, das nur ungefähr ein Viertel der sichtbaren Kugeloberfläche abdeckt. Bei den Interferogrammen in den Abb. 4 und 5 ist der sichtbare Ausschnitt mit einem Kreis gekennzeichnet. Sofern ein stationärer Zustand vorliegt, kann durch Kombination mehrerer Teilbilder, die während einer Umdrehung aufgenommen werden, ein umfassendes Interferogramm erstellt werden. Die Planung der Messungen auf der ISS sieht im Moment sechs Bilder pro Umdrehung vor.

Die Mehrheit der Zustände stellt aber zeitabhängige Strömungen dar. Ohne Rotation ist man zwar auf den kleinen Ausschnitt des Bildes beschränkt. Aufgrund der relativ großen Muster in den Interferogrammen, sollte eine Zuordnung jedoch möglich sein. Desweiteren weisen einige Interferogramme Symmetrien auf, die bei der Auswertung helfen können (siehe Abb. 5 und 6). So zeigt sich, dass bei einer dominierenden geradzahligen Mode der Strömung in azimuthaler Richtung ($m = 0, 2, 4, \dots$; $m = 0$ entspricht Rotationssymmetrie) die Interferogramme spiegel-symmetrisch zum Pol der projizierten Halbkugel sind. Bei dominierender ungeradzahliger Mode fehlt diese Symmetrie.

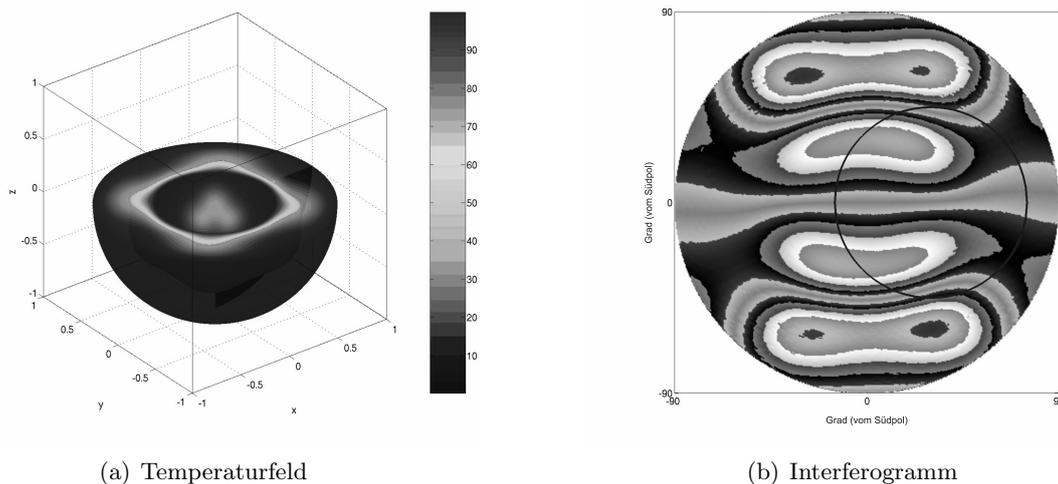


Abbildung 5: Stationäre Konvektion im nichtrotierenden Kugelspalt mit $\beta = 1.0$ für $Pr = 64.6$, $Ra_{mod} = 3 \cdot 10^3$ und $Ta = 0$ unter Einfluss eines zentralen Kraftfeldes: Temperaturverteilung und numerisch bestimmtes Interferogramm für die südliche Hemisphäre. Die Temperatur ist angegeben in Prozent der Temperaturdifferenz ΔT . Der Kreis markiert das Beobachtungsfenster.

Bei rotierender Apparatur stellt die Auswertung zeitabhängiger Strömungen eine größere Herausforderung dar. Im einfachsten dieser Fälle, einem zeitperiodischen Zustand mit einer Frequenz ν_1 , muss bei der Auswertung die Überlagerung mit der Frequenz der Rotation der Kugel ν_2 beachtet werden. Da mit großer Wahrscheinlichkeit beide Frequenzen unabhängig voneinander sind, wird es keine Periodenlänge geben, nach der wieder das exakt gleiche Interferogramm zu beobachten ist wie im Ausgangszustand. In Abb. 6 ist das Verhalten anhand einiger Bilder, aufgenommen während einer Periodenlänge P der Strömung, skizziert.

Die Rekonstruktion eines Gesamtinterferogramms wird so sehr schwierig. Bei der Festlegung der Parameter für den Experimentablauf muss also auf möglichst weit auseinander liegende Frequenzen geachtet werden. Auch hier kann die Auswertung vorhandener Symmetrien hilfreich

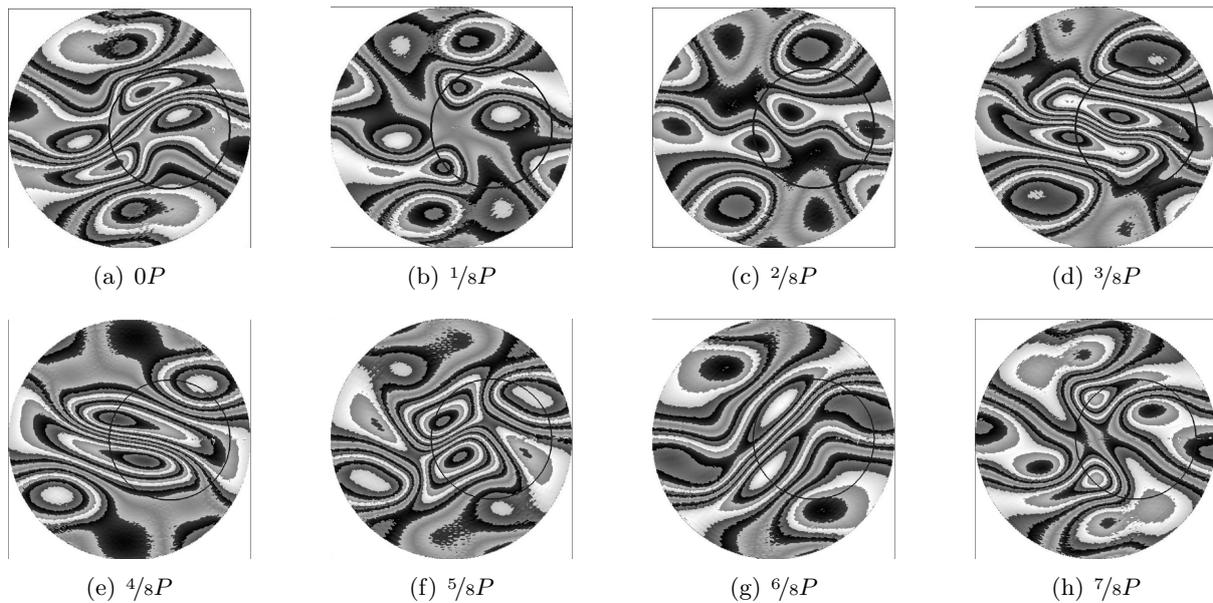


Abbildung 6: Interferogramme für die zeitlich periodische Konvektion im Kugelspalt mit $\beta = 1.0$ für $Pr = 64.6$, $Ra_{mod} = 8 \cdot 10^4$ und $Ta = 8 \cdot 10^5$ unter Einfluss der Zentralkraft: Rotation der Apparatur führt zum Verlust der Periodizität im Interferogramm. Der Kreis markiert jeweils das Beobachtungsfenster.

sein. Geht man noch einen Schritt weiter zu irregulärem Verhalten ohne definierte Periode der Zeitabhängigkeit, kann man sich weder auf periodische Wiederkehr bestimmter Muster noch auf Symmetrien stützen. Die Weiterentwicklung der Analysemethode muss sich insbesondere auf diese Problematik konzentrieren.

Es besteht nun die Möglichkeit, eine weitere Differenziation durchzuführen, so dass die zweite Ableitung der Brechzahl ermittelt wird. Dann entspricht die Simulation einer Schatten-Interferometrie nach Abb. 2(d). Eine abschließende Prüfung dieser Variante wird erst mit experimentellen Untersuchungen am Laborbreadboard möglich sein.

Ausblick

Der Experimentaufbau für den Kugelspalt steht kurz vor der Fertigstellung. Nach der Inbetriebnahme gilt es, experimentell gewonnene Interferogramme mit der numerischen Simulation zu vergleichen und die Auswertemethode weiter zu entwickeln. Weiter wird ein Vergleich aller genannten Verfahren (Schatten- und Schlierenverfahren und Wollaston-Schlieren-Interferometrie) durchgeführt, um Strömungszustände eindeutig bestimmen zu können.

Danksagung

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

Literatur

[Futterer u. a. 2004]

FUTTERER, B. ; GELLERT, M. ; EGBERS, C.: Das GEOFLOW-Experiment auf der ISS: Interferometrie und Schlieren-/Schattentechnik als optische Messverfahren für die thermische Konvektion im Kugelspalt. In: RUCK, B. (Hrsg.) ; LEDER, A. (Hrsg.) ; DOPHEIDE, D. (Hrsg.):

12. GALA-Fachtagung „Lasermethoden in der Strömungsmeßtechnik“, 7.-9. September 2004, Karlsruhe. 2004

[Immohr 2005]

IMMOHR, J.: *persönliche Mitteilung*. 2005

[Kious u. Tilling 1996]

KIOUS, W.J. ; TILLING, R.I.: *This Dynamic Earth - The Story of Plate Tectonics*. Online Edition, Version 1.08. U.S. Geological Survey, 1996. – Aktualisierungsdatum 29.09.2003. <http://pubs.usgs.gov/publications/text/dynamic.html>

[Oertel u. Oertel 1989]

OERTEL, H. sen. ; OERTEL, H. jun.: *Optische Strömungsmesstechnik*. Karlsruhe : Braun Verlag, 1989

[Raffel 2001]

RAFFEL, M.: *Optische Untersuchungen in technischen Strömungen unter Berücksichtigung eines Verfahrens zur Detektion von Dichtegradienten*, Technische Universität Clausthal, Habilitationsschrift, 2001

[Sitte 2004]

SITTE, B.: *Thermische Konvektion in Zentralkraftfeldern*, ZARM, Universität Bremen, Dissertation, 2004. – Fortschr.-Ber. VDI Reihe 7, Nr. 460. Düsseldorf: VDI-Verlag 2004