

SPHÄRISCHE WOLLASTON-SCHLIEREN-INTERFEROMETRIE: RAUM-ZEIT-ANALYSE DER THERMISCHEN KONVEKTION IM ROTIERENDEN KUGELSPALT (GEOFLOW-EXPERIMENT)

SPHERICAL WOLLASTON-SCHLIEREN-INTERFEROMETRY: SPACE-TIME- ANALYSIS OF THERMAL KONVEKTION IN ROTATING SPHERICAL GAP (GEOFLOW-EXPERIMENT)

S. Koch, B. Futterer, C. Egbers

Lehrstuhl für Aerodynamik und Strömungslehre

Brandenburgische Technische Universität, Postfach 101344, 03013 Cottbus

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

GeoFlow, Konvektion, Mikrogravitation, ISS, Kugelspalt, Wollaston-Schlieren-Interferometrie
GeoFlow, Konvektion, Microgravity, Spherical Gap, Wollaston-Schlieren-Interferometry

Zusammenfassung

Thema des Projektes GeoFlow ist die Strukturbildung und Stabilität der thermischen Konvektion in einem rotierenden Kugelspalt. Im Mittelpunkt steht dabei die experimentelle Untersuchung der Strömungen mit Hilfe der Wollaston-Schlieren-Interferometrie. Zunächst werden sub- und superkritische Bereiche mit Hilfe von Einzelbildern identifiziert. Subkritische Bereiche unterscheiden sich im Interferogramm nur geringfügig von den im Ruhezustand aufgenommenen Referenzbildern. Superkritische Regionen weisen im Interferogramm eine Verdichtung von Interferenzstreifen auf, ähnlich Höhenlinien in einer Geländekarte. Nach Auswahl von signifikanten Interferenzmustern werden diese in Raum und Zeit verfolgt. Die Mustererkennung erfolgt durch Abgleich von Experimentdaten mit den Ergebnissen aus den numerischen Simulationen.

Einleitung

GeoFlow steht für 'Geophysical Flow Simulation' (Simulation geophysikalisch motivierter Strömungen). Im Rahmen des Projektes werden Strömungen in einem so genannten Kugelschalsystem untersucht. Dieses Modell richtet sich nach der Vorstellung des Schalenaufbaus in der Erde. Betrachtet man z.B. den flüssigeren äußeren Erdkern, skaliert man das Experiment auf die dort vorherrschenden Gegebenheiten. Daher wird das Kugelschalexperiment im Inneren beheizt und von außen gekühlt, um die Temperaturunterschiede im Erdinneren zu simulieren. Weiter wird das Kugelsystem gedreht, um die Rotation der Erde nachzubilden. Ein zentraler Punkt dabei ist, dass das Gravitationsfeld der Erde zum Erdmittelpunkt gerichtet ist. Dies wird in dem Modell durch ein künstliches Kraftfeld realisiert. Die Mikrogravitationsbedingung der Raumstation ermöglicht es dabei, die im irdischen Labor herrschende Vorzugsrichtung 'oben-unten' zu vermeiden. Da sich für klassische Messverfahren notwendige Tracerpartikel (z.B. für Messungen mit Hilfe der Laser-Doppler-Anemometrie) in diesem elektrohydrodynamischen Kraftfeld ausrichten können und dann nicht mehr ungestört ein Abbild der Strömungseigenschaften

liefern, erfolgt die experimentelle Untersuchung unter Verwendung der Wollaston-Schlieren-Interferometrie. Die Arbeiten der letzten Jahre dienen der Vorbereitung des Raumstationsexperimentes in Bezug auf den Aufbau und den Test der Messtechnik, sowie die Entwicklung von Auswerteszenarien, siehe Futterer et al. 2004, 2005, 2007 und Koch et al. 2008. Insbesondere zur Mustererkennung wird dabei im Rahmen einer Vorwärtsmodellierung auf numerisch konstruierte Interferogramme zurückgegriffen.

Das Experiment selber wurde in einem Zeitraum von Juni 2008 bis Januar 2009 auf der Internationalen Raumstation ISS im Fluid Science Laboratory FSL des europäischen Forschungsmoduls COLUMBUS betrieben. Die dabei erzeugten Experiment-Daten sind zum einen Bild-Daten aus der Messtechnik (Interferogramme) mit einem Datenvolumen von ca. 200 GB und zum anderen Telemetrie-Daten aus den technischen Protokollen (Temperaturwerte, Rotationsraten, Mikrogravitation, etc.) mit 50 GB Datenvolumen. Die Kenngrößen des Experimentes spannen damit einen zweidimensionalen Parameterraum mit der Taylor-Zahl Ta (proportional zur Drehzahl η) und der Rayleigh-Zahl $Ra_{centr.}$ (proportional zum thermischen Antrieb ΔT) auf. Abbildung 1 zeigt den Wertebereich für das Experiment und stellt die experimentell durchgeführten Parametersätze den numerisch vorhergesagten gegenüber. Die numerisch simulierte Vorhersage der Dynamik wird in Bergemann et al. 2008 und Futterer et al. 2008 diskutiert. In der vorliegenden Arbeit werden für zwei Beispiele manuell ausgewählter $(Ra_{centr.}, Ta)$ -Paare die Arbeitsschritte der Auswertung der Messbilder vorgestellt. Zunächst werden die Interferogramme in Raum und Zeit betrachtet. Dann wird die Mustererkennung mit Hilfe der numerisch konstruierten Interferogramme durchgeführt.

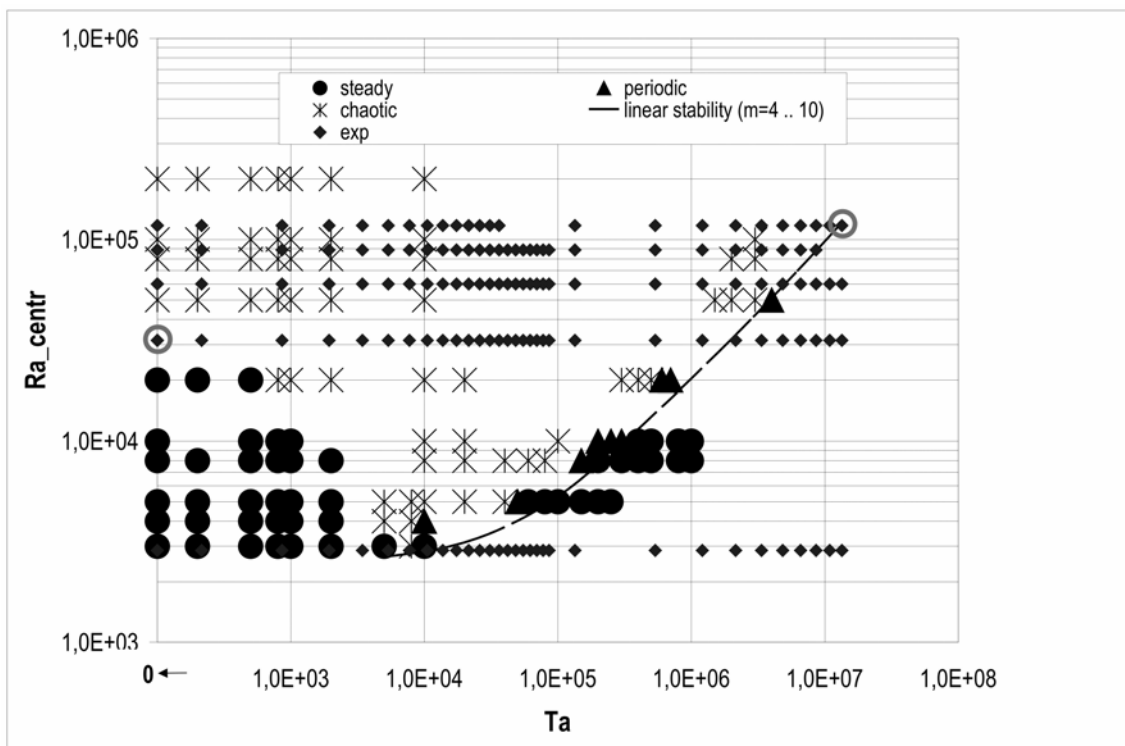


Abb. 1: Thermische Konvektion im ruhenden und rotierenden Kugelspalt: Numerische Simulation für das Zeitverhalten der Strömung als Funktion der Taylor-Zahl (stationär \bullet , periodisch \blacktriangle , chaotisch $*$). Die durchgezogene Linie markiert die kritische Rayleigh-Zahl $Ra_{centr.}$ für die erste Instabilität im rotierenden Fall nach Travnikov et al. 2003. Die Mode der Instabilität nimmt dann für höhere Parametersätze zu. Experimentell durchgeführte Parameterpaare $(Ra_{centr.}, Ta)$ zeigen das im Experiment realisierte Parameterraster (\blacklozenge). Im Folgenden werden Messbilder für $(Ra_{centr.}, Ta) = (3.15 \cdot 10^4, 0)$ und $(1.17 \cdot 10^5, 1.34 \cdot 10^7)$ diskutiert (\circ).

Raum-Zeit-Analyse

Die optische Messtechnik ist so über den oberen Glasschalen des Experimentes angeordnet, dass im Interferogramm der Wollaston-Schlieren-Interferometrie polare wie äquatoriale Regionen erfasst werden. Durch Drehung des Kugelsystems wird alle 60° ein Messbild aufgenommen, so dass während einer Umdrehung 6 Bilder erzeugt werden. Mit einer Beobachtungszeit von bis zu 15 min erhält man dann mindestens 7 Bilder im niedrigen Rotationsbereich ($n_{\min} = 0.008$ Hz bis $n = 0.16$ Hz) und bis zu 480 Bilder im Bereich hoher Rotation ($n = 0.2 \dots 2$ Hz). Aus der im Experiment erzeugten Zahl von ca. 100000 Bildern werden mit Hilfe von manuell ausgewählten Bildern die Arbeitsschritte der Auswertung demonstriert. Die Abbildungen 2 und 4 zeigen Ergebnisse der Messungen für Beispiele aus dem überkritischen Bereich im nicht-rotierenden ($Ta = 0$) und rotierenden ($Ta \neq 0$) Fall. Dargestellt ist ein Abbild bei entsprechender Position der sich unter der feststehenden Messtechnik drehenden Kugel, sowie die nachfolgende Drehung und damit die wiederholte Erfassung einer bestimmten Position. Im oberen Bereich jedes Einzel-Bildes befindet sich die Polregion und im unteren Bereich die äquatoriale Region. Jedes Bild zeigt im unteren linken Teil einen Haken der auf eine Störquelle im optischen Weg des FSL-Diagnostik-Moduls zurückzuführen ist. Diese Störung hat jedoch keinen Einfluss auf die Bildinformation.

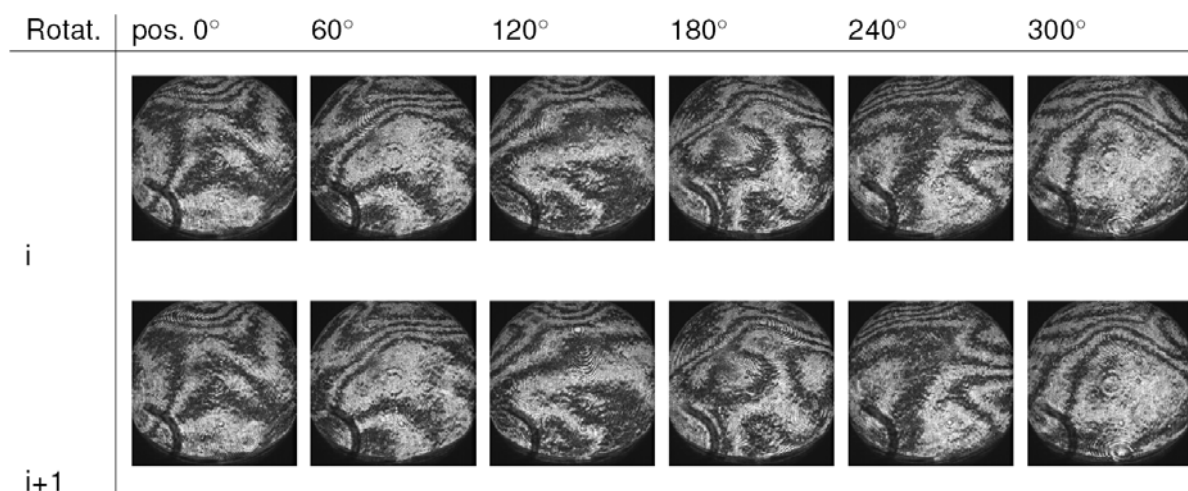


Abb. 2: Messbilder bei $Ra_{centr.} = 3.15 \cdot 10^4$, $Ta = 0$: Raum-Zeit-Darstellung der Interferogramme an 6 Positionen des Kugelkreises im Abstand von 60° während einer Kugelumdrehung und für zwei aufeinander folgende Drehungen. Die Drehung des Kugelsystems erfolgt mit 0.008 Hz, so dass zwischen den Einzelaufnahmen eine Zeit von 20 s liegt. Eine bestimmte Position wird nach 125 s wieder erreicht.

In Abbildung 2 zeigt sich vor allem im polaren Teil des Bildes eine topologische Streifenverdichtung. Es tritt eine Wiederholung der Strukturen in jeder 2. Position auf und kehrt nach einer Umdrehung wieder. Dynamisch gesehen ist aus den numerischen Vorhersagen bekannt, dass in diesem Bereich Stationarität vorliegt (Abb. 1). Im Interferogramm äußert sich dies durch Wiederkehr eines Musters nach einer Umdrehung der Kugel. Neben diesem im Experiment erfassten Zeitverhalten (Stabilität) stellt sich die Frage nach der Strukturbildung der Strömung. Um das auf ein Konvektionsmuster zurückzuführende Streifenbild zu erkennen, wird auf die numerische Simulation der Strömungen zurückgegriffen. In Abbildung 3 sind in der oberen Reihe die Temperaturfelder einer für diesen Fall vorhergesagten Strömung in radialer Richtung dargestellt, mit Blick auf den Nordpol in der Mitte des Bildes und der äquatorialen Region am Rand. Die dunklen

Schattierungen zeigen einen Wärmeaufstieg, der besonders am Pol zu beobachten ist. Die Isolinien demonstrieren den Charakter der Strukturbildung, in diesem Fall zeigt sich ein so genannter Oktaeder. In der unteren Reihe sind die Interferogramme an den verschiedenen Positionen einer Umdrehung dargestellt. Es wird deutlich, dass sich die Topologien in der Polarregion ausbilden und sich partiell in die äquatoriale Region ausweiten. Weiterhin tritt eine Wiederholung der Strukturen in jeder 2. Position auf. Zu jeder nächsten Position wechselt das Muster als horizontale Spiegelung am Pol, was auf die Charakteristik des Dreiecksmusters im Temperaturfeld zurückzuführen ist, welches bei einer 60°-Drehung entweder eine Spitze zeigt oder die Hypotenuse. Das sichtbare Segment in Analogie zum experimentellen Beobachtungsfenster ist hier durch ein Rechteck markiert. Entsprechende Strukturen zeigen sich auch in den Experimentbildern, so dass hier von einer oktaedrischen Strömung gesprochen werden kann.

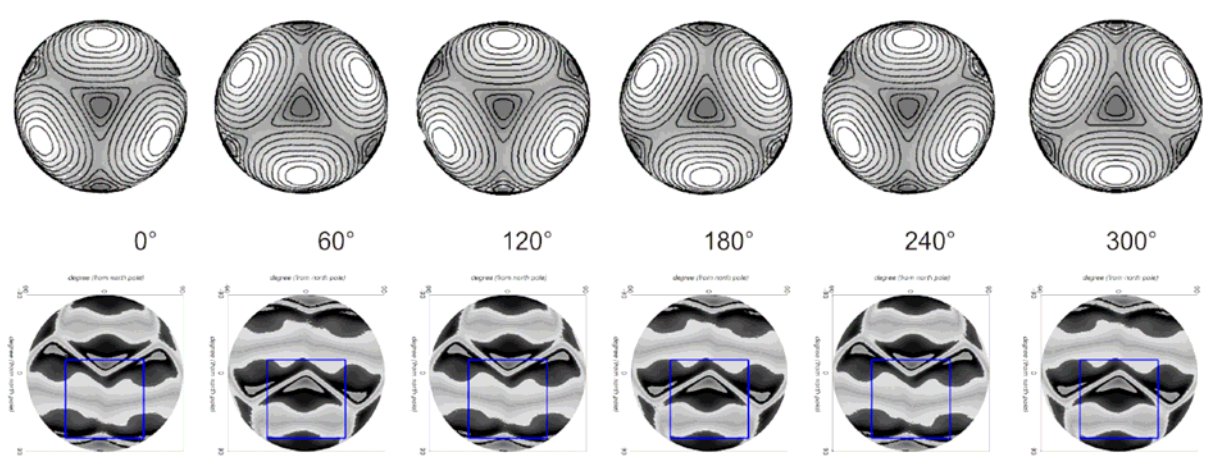


Abb. 3: Thermische Konvektion im nicht-rotierenden Kugelspalt: Stationäre oktaedrische Strömung für $Ra_{centr.} = 1 \cdot 10^4$, $Ta = 0$ in Form von Temperaturfeldern (Ansicht vom Pol, obere Reihe) und dazugehörige Interferogramme (numerische Gesamtansicht mit markierten Ausschnitten für das experimentelle Sichtfenster, untere Reihe).

In Abbildung 4 zeigt sich im polaren Bereich ein elliptisches Ringpaar, mit ausstreichenden Streifentopologien in Richtung Äquator. Dieses Messbild wiederholt sich mit nur minimalen Veränderungen für jede Position und nach jeder Umdrehung. Es ist damit erkennbar, dass die Strukturbildung stabil ist. Nach Abgleich mit weiteren numerischen Strömungsdarstellungen in Abbildung 5 können diese Strukturen als Kolumnarzellen interpretiert werden. Diese sind charakteristisch für hohe Rotationsraten und richten sich tangential entlang der Innenkugel aus. Mit zunehmender Rotation erhöht sich die Modenzahl und es bilden sich somit komplexere Streifenmuster aus, wie in Abbildung 5 von links nach rechts gezeigt. Die obere Reihe zeigt das berechnete Temperaturfeld welches von der Wollaston-Schlieren-Interferometrie vertikal zu den dargestellten Temperaturvariationen abgetastet wird. In der Bildmitte befindet sich der Pol und der äquatoriale Bereich am Rand. Die untere Reihe zeigt die entsprechenden numerischen Interferogramme. Der Kreis markiert wieder das Untersuchungssegment.

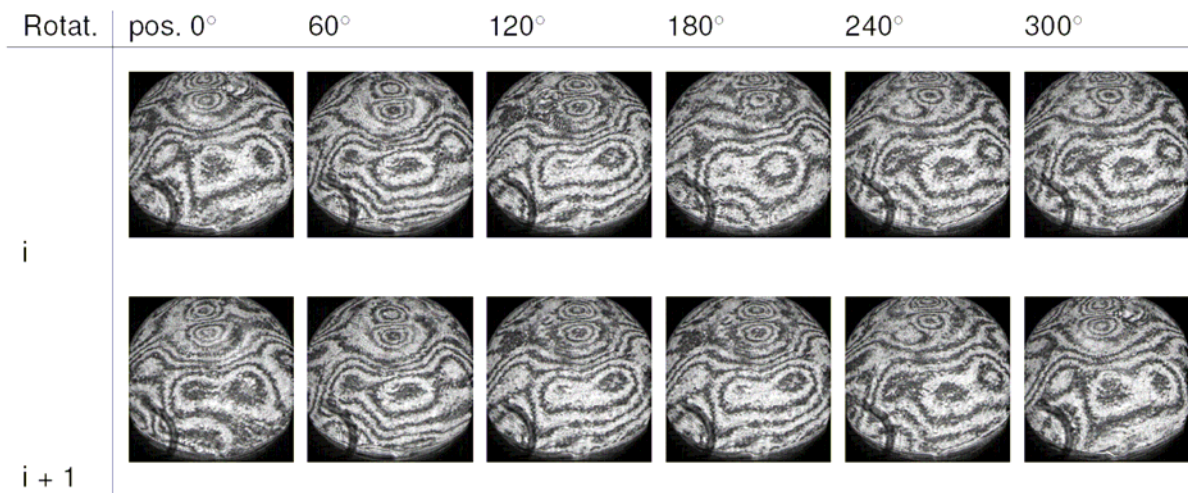


Abb. 4: Messbilder bei $Ra_{centr.} := 1.17 \cdot 10^5$; $Ta = 1.34 \cdot 10^7$: Raum-Zeit-Darstellung der Interferogramme an 6 Positionen im Abstand von 60° während einer Kugelumdrehung und für zwei aufeinander folgende Drehungen. Die Drehung des Kugelsystems erfolgt mit 2 Hz, so dass zwischen den Einzelaufnahmen eine Zeit von 0.083 s liegt. Eine bestimmte Position wird nach 0.5 s wieder erreicht.

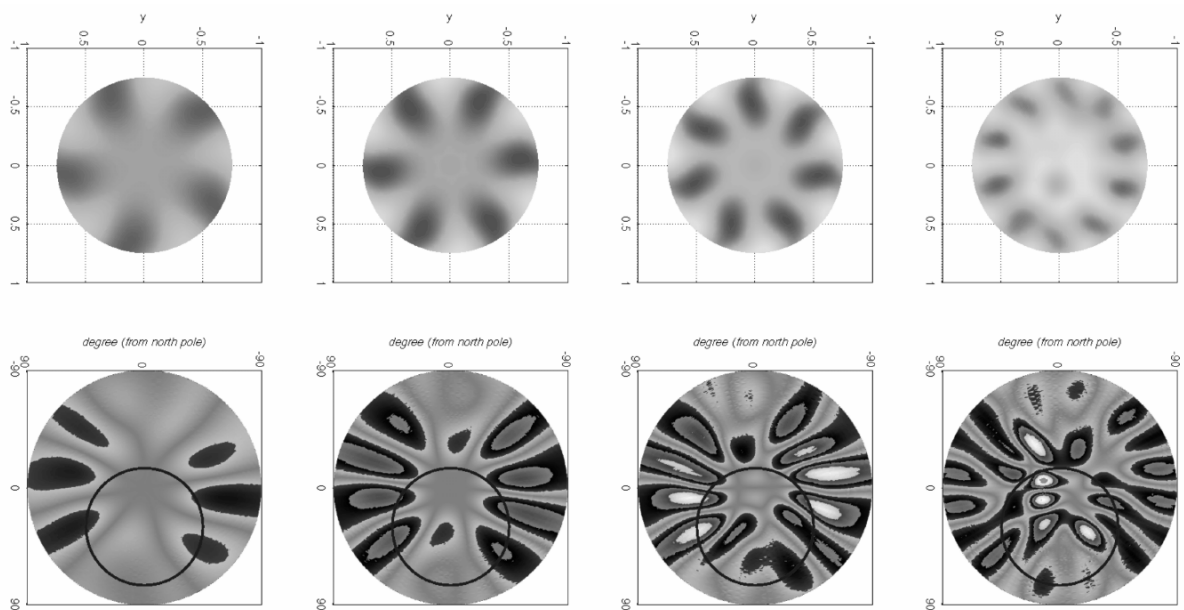


Abb. 5: Thermische Konvektion im rotierenden Kugelspalt: Stationäre Strömung in Form von Temperaturfeldern (Ansicht vom Pol, obere Reihe) mit Zunahme der Mode bei Erhöhung des Parametersatzes [$m = 5 \rightarrow 6 \rightarrow 7 \rightarrow 10$ bei $(Ra_{centr.}, Ta) = (8 \cdot 10^3, 1 \cdot 10^6) \rightarrow (1 \cdot 10^4, 1 \cdot 10^6) \rightarrow (2 \cdot 10^4, 2 \cdot 10^6) \rightarrow (5 \cdot 10^4, 4 \cdot 10^6)$] und dazugehörige Interferogramme (numerische Gesamtansicht mit markierten Ausschnitten für das experimentelle Sichtfenster, untere Reihe).

Ausblick

Nach dem erfolgreichen Abgleich erster Experiment-Daten mit numerischen Vorhersagen werden nun alle Bild-Daten mit dazugehörigen Telemetriedaten in einer Datenbank zusammengeführt. Für einen effizienteren Abgleich zwischen den Numerik- und Bilddaten wird eine automatische Mustererkennung angestrebt. Dabei soll eine Musterschablone aus

den Interferenzstreifen der numerischen Vorräusberechnungen erstellt werden, die dann in den Experimentbildern die entsprechenden Streifenmuster sucht und extrahiert. Eine Herausforderung hierbei stellen die komplexeren bzw. chaotischen Streifenmuster dar, für die es keine eindeutigen Muster gibt. Aus der Numerik ist bekannt, dass, je nach Richtung des Temperaturfeldes eines bestimmten Falls, unterschiedliche Interferenzstreifenbilder entstehen. Zur weiteren Analyse werden Interferogrammberechnungen für zusätzliche Positionen durchgeführt.

Dankesworte

Dieses Projekt wird gefördert durch das Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Förderkennzeichen: 50 WM 0822.

Literatur

Bergemann, K., Tuckerman, L., and Feudel, F.: GeoFlow: On symmetry-breaking bifurcations of heated spherical shell convection. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 137:012027 (4pp), 2008.

Futterer, B., Gellert, M., and Egbers, C. Das Geoflow-Experiment auf der ISS: Optische Messverfahren für die thermische Konvektion im Kugelspalt. GALA-Fachtagung, „Lasermethoden in der Strömungsmeßtechnik“, 06. - 08. September 2005, Cottbus.

Futterer, B., Gellert, M. and Egbers, C. Das Geoflow-Experiment auf der ISS: Interferometrie und Schlieren-/Schattenmesstechnik als optische Messverfahren für die thermische Konvektion im Kugelspalt. GALA-Fachtagung, „Lasermethoden in der Strömungsmeßtechnik“, 07. - 09. September 2004, Karlsruhe.

Futterer, B., Hollerbach, R., and Egbers, C. GeoFlow: 3D numerical simulation of supercritical thermal convective states. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 137:012026 (6pp), 2008.

Futterer, B., Koch, S., Dahley, N., von Larcher, Th. and Egbers, C. Das Geoflow-Experiment auf der ISS: Interferogrammauswertung für die thermische Konvektion im Kugelspalt. GALA-Fachtagung, „Lasermethoden in der Strömungsmeßtechnik“, ISBN 978-3-86009-007-7, 04.- 05. September 2007, Rostock.

Koch, S., Dahley, N., Futterer, B. and Egbers, C. Das Geoflow-Experiment auf der ISS: Auswertung erster Experimentdaten. GALA-Fachtagung, „Lasermethoden in der Strömungsmeßtechnik“, ISBN 978-3-9805613-4-1, 09. - 11. September 2008, Karlsruhe.

Travnikov, V., Hollerbach, R. and Egbers, C. The GEOFLOW experiment on ISS. Part II: Numerical simulation. *Adv. Space Res.*, 32:181–189, 2003.