

Das GeoFlow-Experiment auf der ISS: Interferogrammauswertung für die thermische Konvektion im Kugelspalt

B. Futterer, S. Koch, N. Dahley, Th. von Larcher, N. Scurtu, L. Jehring, C. Egbers
Lehrstuhl für Aerodynamik und Strömungslehre
Brandenburgische Technische Universität Cottbus, Postfach 10 13 44, 03013 Cottbus
E-Mail: futterer@tu-cottbus.de - Homepage: <http://www.tu-cottbus.de/LAS>

Zusammenfassung

Die experimentelle Untersuchung der thermischen Konvektion im rotierenden Kugelspalt unter dem Einfluss eines künstlich aufgebauten Zentralkraftfeldes ist Thema des Mikrogravitations-experimentes GeoFlow, das im *Fluid Science Laboratory* der Internationalen Raumstation betrieben werden wird. Die Strukturbildung und Stabilität der Strömung wird dabei mit Hilfe der Wollaston-Schlieren-Interferometrie beobachtet und analysiert.

Die vorliegende Arbeit zeigt die Auswertemethode, die zum Einen im Rahmen einer Vorwärtsmodellierung aus simulierten Temperaturfeldern numerisch konstruierte Interferogramme ermittelt. Hiermit wird zunächst eine qualitative Aussage über die zu erwartende Interferenzstreifenverteilung getroffen. Zum Anderen wird im Rahmen einer Rückwärtsmodellierung aus experimentell gewonnenen Interferogrammen ein quantitativer Temperaturverlauf berechnet, der wiederum mit den numerischen Ergebnissen verglichen werden kann.

Einleitung

Im Rahmen des europäischen Forschungsvorhabens GeoFlow werden experimentelle Untersuchungen zur Strukturbildung und Stabilität thermischer Konvektion im rotierenden konzentrischen Kugelspalt unter Einfluss eines Zentralkraftfeldes durchgeführt. Mit dem Modell der konzentrischen Kugelspaltströmung werden dabei großskalige, geophysikalisch motivierte Strömungsphänomene betrachtet. Unter den Mikrogravitationsbedingungen 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 optische Messverfahren wie Schatten- und Schlierenverfahren oder interferenzoptische Verfahren zum Einsatz, die ohne Tracerpartikel auskommen. Für andere Messverfahren notwendige Tracerpartikel (z.B. für 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 gegenüber der Schlieren-/Schattentechnik eine vorrangige Stellung eingeräumt, da aufgrund begleitender numerischer Simulationen weitreichende Analysen möglich sind. Die Auswertemethode basiert sowohl auf der numerischen Simulation von Temperaturfeldern, die in Interferogramme umgewandelt werden, als auch auf der Ermittlung eines integrativen Temperaturverlaufs im Kugelspalt auf Basis experimentell gewonnener Interferogramme.

Die Voruntersuchungen für diese Vorwärts- und Rückwärtsmodellierung erfolgen für Strömungsphänomene, die unter den Bedingungen der axial gerichteten Gravitationskraft im begleitenden Laborexperiment untersucht werden. Im Folgenden werden die relevanten Grundlagen für

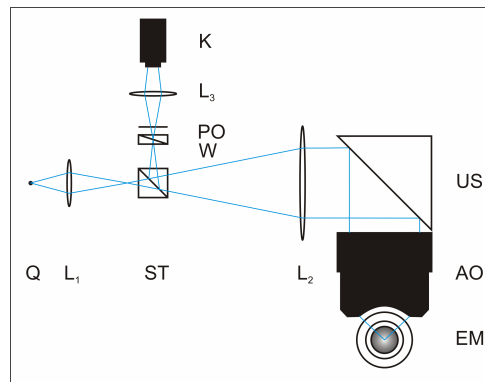


Abbildung 1: Aufbau der Messoptik für die sphärische Geometrie eines Kugelspalts. Das von einem Diodenlaser mit einer Leistung von 10 mW als Lichtquelle Q ausgesandte Licht der Wellenlänge $\lambda = 532 \text{ nm}$ wird über die Linsen L_1 und L_2 zu einem parallelen Lichtbündel mit einem Durchmesser 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 Experimentmodell EM fokussiert. Die verspiegelte Innenkugel reflektiert das Licht, so dass es die Länge der Messstrecke $d = (r_a - r_i)$ zweimal durchläuft. Dann erfolgt zwischen den Linsen L_1 und L_2 über einen Strahlteilerwürfel ST eine Umlenkung. Im Brennpunkt der Linse L_2 wird ein Wollaston-Prisma W mit einem die Auflösung bestimmenden Prismenwinkel ε eingesetzt und dahinter ein Polarisator PO angeordnet. Die Linse L_3 bildet das Messbild auf den Chip einer CCD-Kamera K ab.

die Wollaston-Schlieren-Interferometrie beschrieben. Anschließend folgt die Darstellung der Arbeitsschritte zur Vorwärtsmodellierung und schließlich zur Rückwärtsmodellierung.

Grundlagen

Die physikalische Eigenschaft eines Strömungsmediums, die von optischen Messverfahren wie der Wollaston-Schlieren-Interferometrie genutzt wird, ist die Brechzahl n . Diese 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 . Aufgrund dieser physikalischen Zusammenhänge können Brechzahländerungen zur Messung von Dichteänderungen herangezogen werden, sowie von allen Größen, die mit der Dichte in eindeutigen Zusammenhang stehen. Detaillierte Beschreibungen der Zusammenhänge finden sich in [4] und [5].

Betrachtet man thermische Konvektionsströmungen, ändert sich die Dichte aufgrund von Änderungen der Temperatur ($\rho = \rho(T)$). Dabei wird angenommen, dass die Lichtwellenlänge λ konstant ist und dass sich der Druck p nicht ändert. Variiert nun die Brechzahl im Strömungsmedium, erfahren Lichtwellen eine Phasenverschiebung, die zu Interferenzerscheinungen führt. In der vorliegenden Arbeit werden diese mit Hilfe der Wollaston-Schlieren-Interferometrie visualisiert. Abbildung 1 zeigt das Prinzip der Messoptik im Labor. Weitere Details zum Aufbau werden in [1] und [2] beschrieben.

Vorwärtsmodellierung: Temperaturfeld \rightarrow Interferogramm

Durchläuft ein Lichtstrahl den Kugelspalt bei vorhandenen Temperaturunterschieden, so ist bei gleicher geometrischer Weglänge $d = r_a - r_i$ die optische Weglänge $s(T) = \int_{r_i}^{r_a} n(T) dr$ verschieden. Betrachtet man zwei benachbarte radial verlaufende Strahlen, die um den meridionalen

Winkel $\Delta\vartheta$ verschoben sind, tritt zwischen beiden ein Gangunterschied

$$\Delta s = \int_{r_i}^{r_a} n(T)dr - \int_{r_i}^{r_a} n(\tilde{T})dr \quad (1)$$

auf, wobei $T = T(r, \vartheta, \varphi)$ und $\tilde{T} = T(r, \vartheta + \Delta\vartheta, \varphi)$ gilt. Die Wollaston-Schlieren-Interferometrie mittelt die jeweiligen Änderungen der Brechzahl längs des Lichtweges. In Richtung der Messstrecke, die im Kugelspalt der radialen Richtung r entspricht, erfolgt somit keine Auflösung der Messgröße.

Der funktionelle Zusammenhang zwischen Brechzahl n und Temperatur T für die im Experiment zum Einsatz kommenden Silikonöle ist im relevanten Temperaturbereich eine lineare Funktion mit $n(T) = c_0T + c_1$. Setzt man diese Funktion in Gl. (1) ein, dann ergibt sich ein Gangunterschied von

$$\frac{\Delta s}{c_0} = \int_{r_i}^{r_a} T(r, \vartheta, \varphi)dr - \int_{r_i}^{r_a} T(r, \vartheta + \Delta\vartheta, \varphi)dr. \quad (2)$$

In Abhängigkeit vom Gangunterschied zwischen den überlagerten Strahlen ändert sich das Interferenzmuster. Entspricht der Gangunterschied einem geradzahligen Vielfachen der halben Wellenlänge $\lambda/2$, ergibt sich ein heller Bereich im Bild, bei einem ungeradzahligen Vielfachen von $\lambda/2$ entsteht ein dunkler Bereich.

Das Streifenmuster im Interferogramm wird nicht nur von der Temperaturverteilung bestimmt. Für die numerische Berechnung ist vor allem die Winkelauflösung im Kugelspalt relevant. Für die ersten Berechnungen wird ein Wert von $\Delta\vartheta = 1.78^\circ$ verwendet. Im Folgenden werden die Arbeitsschritte zur numerischen Konstruktion eines Interferogramms für die Konvektion im Kugelspalt unter Einfluss des axial gerichteten Graviationsfeldes demonstriert.

In einem mit Flüssigkeit befüllten Kugelspalt, dessen Inneres beheizt und dessen Äußeres gekühlt wird, liegen im Bereich der südlichen Hemisphäre warme Fluidschichten über kalten. Diese Schichtung ist stabil, es findet keine Konvektionsbewegung als Ausgleichsbewegung statt. Im Bereich der nördlichen Hemisphäre tritt dagegen Konvektion aufgrund einer instabilen Schichtung auf: Hier liegen wärmere (leichtere) Flüssigkeitsschichten unter kälteren (schwereren). Als Resultat dieser Temperaturverteilung steigt das Fluid entlang der inneren Kugelschale in einer Grenzschicht in Richtung Norden, verlässt diese Schicht am Nordpol der inneren Kugel und fließt wie in einer Säule durch den Spalt (Abb. 2a). An der äußeren Kugelschale teilt sich die Säule und wandert entlang der Außenkugelschale ebenfalls in einer Grenzschicht in Richtung Süden.

Signifikante Temperaturgradienten, die in Brechzahlvariationen resultieren, finden sich damit vorrangig in der nördlichen Hemisphäre. Summiert man die Temperaturverteilung in diesem Bereich in radialer Richtung auf, erhält man eine Temperaturkurve, die direkt am Nordpol ein Maximum aufweist (Abb. 2b). Die Berechnung des Gangunterschieds Δs nach der Formel (2) ergibt für diese integrative Temperaturkurve den in Abb. 2c) dargestellten Funktionsverlauf. Dieser hat die Form der Ableitungsfunktion für die Temperaturkurve. Die Korrelation mit hellen und dunklen Streifen führt schließlich zu einem Interferogramm-Muster wie es in Abb. 2d) dargestellt ist. Die Rotationssymmetrie der Strömung (Abb. 2e) findet sich aufgrund der Symmetriebrechung (Winkelabhängigkeit der Beobachtung mit dem Interferometer) im Interferogramm nicht wieder. Aber eine Spiegelsymmetrie zum Pol der Kugel bleibt erhalten.

Die Zahl auftretender Streifen im Interferogramm wird von der der Temperaturverteilung bestimmt. Abbildung 2 zeigt die gleiche Konvektionsbewegung für zwei unterschiedliche Temperaturgradienten. Im Vergleich zu einem niedrigeren Temperaturunterschied tritt der Grenzschichtcharakter der Konvektionsbewegung für einen höheren Gradienten deutlicher hervor. Die Temperaturverteilung wird unregelmäßiger, so dass mehr Bereiche mit Gangunterschieden auftreten. Die Zahl der Interferenz-Streifen nimmt zu.

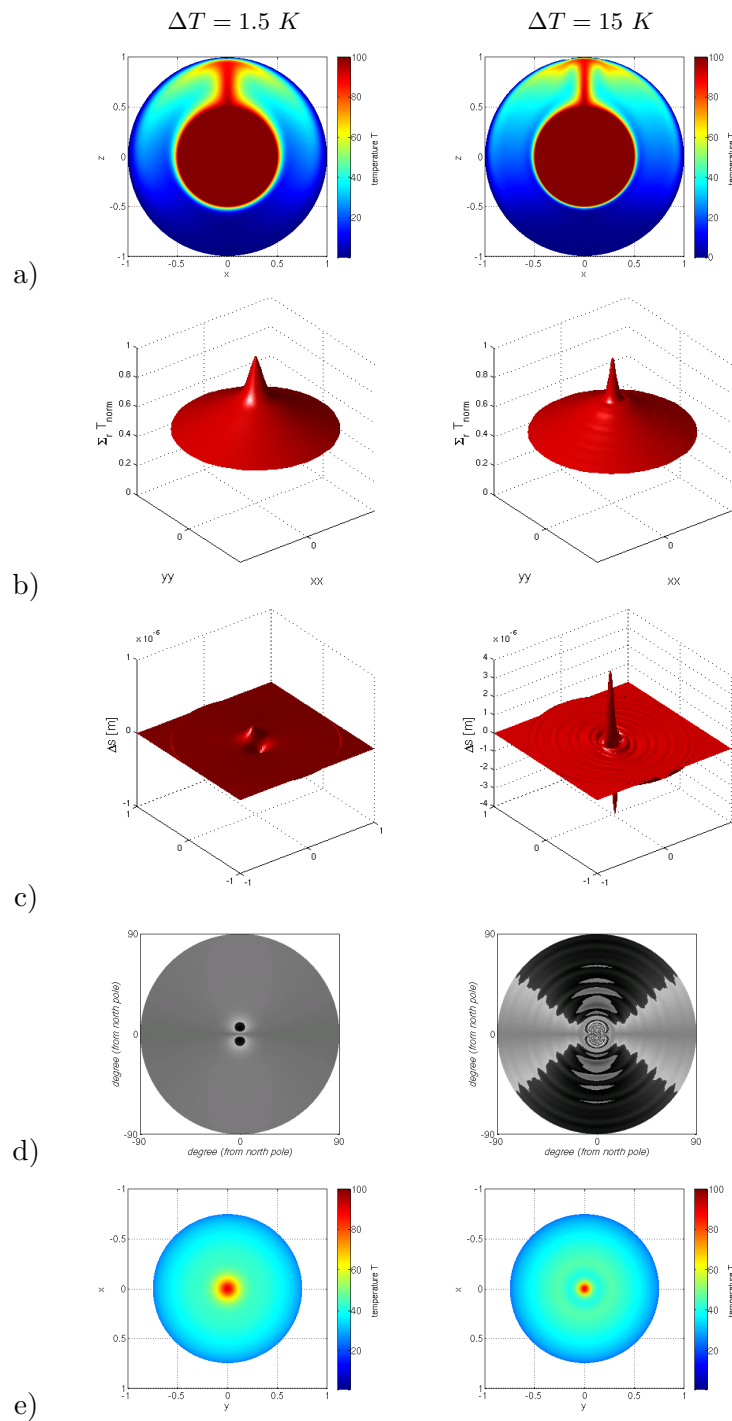


Abbildung 2: Vorwärtsmodellierung für die thermische Konvektion im Kugelspalt: a) Darstellung des Temperaturfeldes (skaliert auf 100%) im vertikalen Schnitt durch die Kugel; b) radial aufsummierte und normierte Temperaturverteilung der Nordhalbkugel, Darstellung in Polarkoordinaten; c) Verteilung des Gangunterschiedes auf der Nordhalbkugel Darstellung in Polarkoordinaten; d) Interferogramm; e) Darstellung des Temperaturfeldes (skaliert auf 100%) auf einer Kugelfläche, Ansicht vom Nordpol.

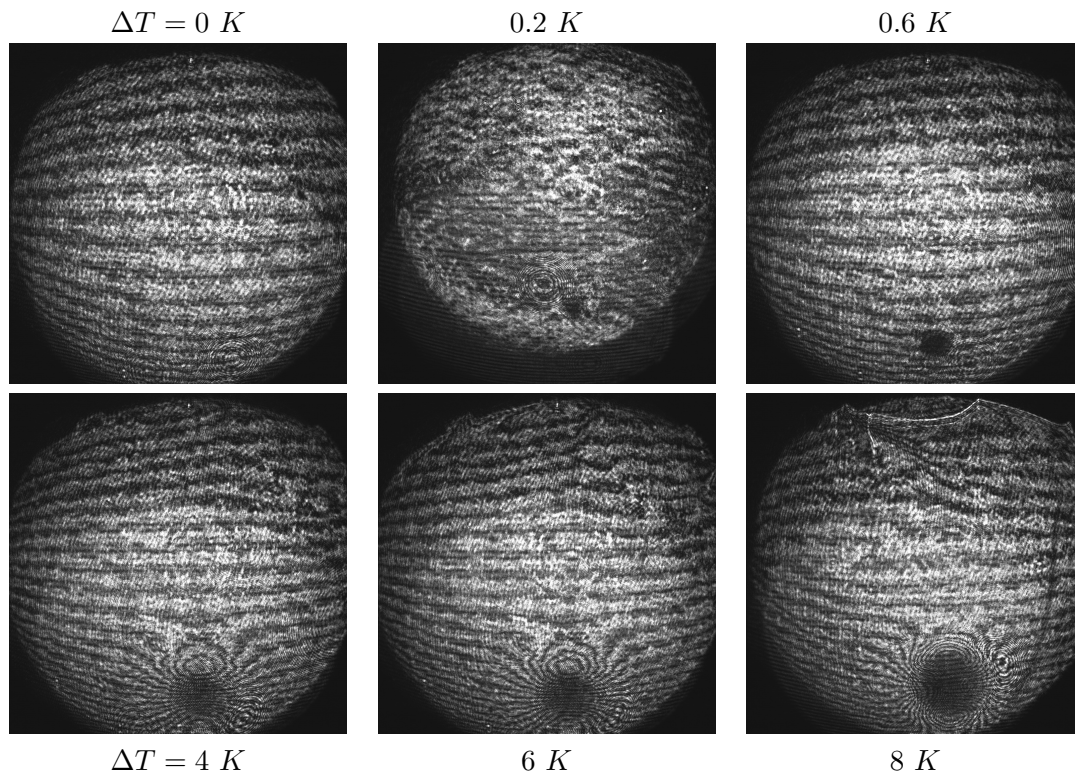


Abbildung 3: Experimentelle Interferogramme für die thermische Konvektion im Kugelspalt, die im Rahmen von Voruntersuchungen im Labor des Industrie-Partners EADS Astrium GmbH erfasst wurden.

Rückwärtsmodellierung: Interferogramm \rightarrow Temperaturverlauf

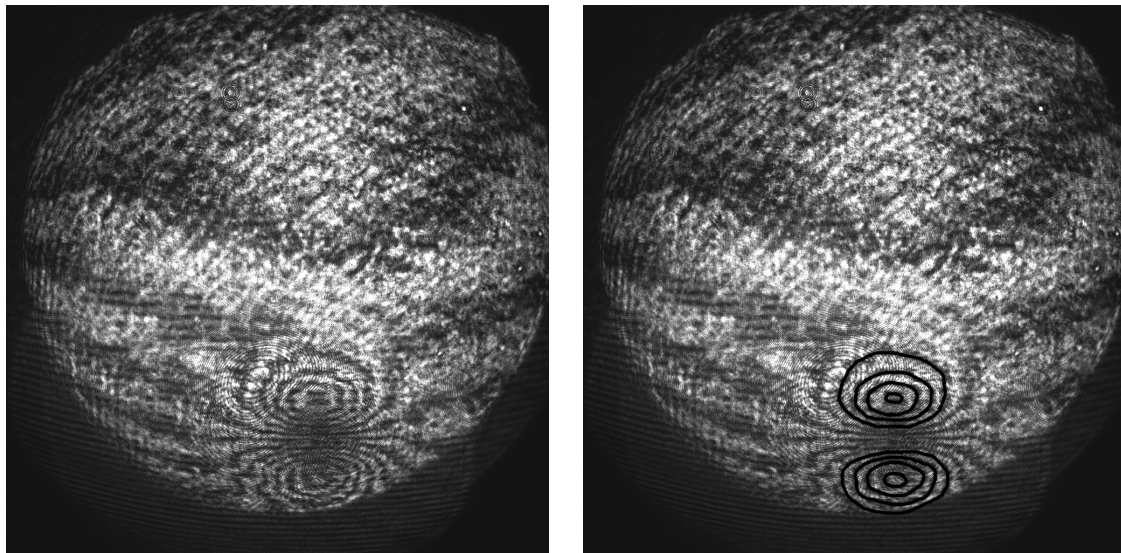
Im Rahmen von Voruntersuchungen für GeoFlow im Labor des Industrie-Partners EADS Astrium GmbH wurde die im Abschnitt zur Vorwärtsmodellierung beschriebene Konvektionsströmung im Kugelspalt experimentell untersucht. Die oberen Glasschalen des Kugelexperimentes werden dort mit der Interferometrie unter einem Winkel von 30° zwischen optischer Achse und Rotationsachse der Kugel beobachtet. Damit wird nicht nur der Pol, sondern auch der Äquatorbereich erfasst. Der untere Bildbereich bildet dann die Strömung am Nordpol des Kugelexperiments ab. Zum Einen wird hier auf die qualitative Interpretation des Messbildes eingegangen. Zum Anderen werden die Arbeitsschritte zur Berechnung der Temperaturverteilung beschrieben.

Abbildung 3 zeigt die experimentell gewonnenen Interferogramme in Abhängigkeit von der angelegten Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Außenkugel. Ist der Temperaturunterschied Null, so sind nahezu parallele Streifen sichtbar. Dies ist auf eine Dejustierung der verspiegelten Innenkugel im Kugelaufbau zurückzuführen.

Wird der Temperaturunterschied erhöht, zeigt sich im unteren Bildbereich zunächst ein Schattenbild der Strömung in Form eines dunklen Flecks. Das im Abschnitt zur Vorwärtsmodellierung beschriebene Streifenmuster wird schließlich als Ringstruktur ab einem bestimmten Temperaturgradient sichtbar. Es überlagert den Schatteneffekt der Strömung.

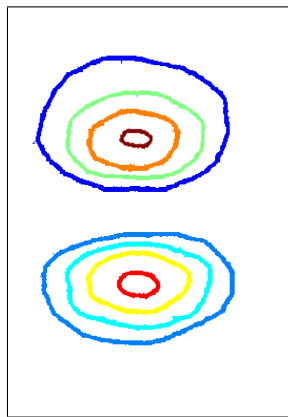
Die Arbeitsschritte für die weitere Auswertung sind analog denen von [3]. Dabei wird das Interferogramm mit Hilfe von Bildverarbeitungsmethoden auf ein reines Streifenbild ohne Rauschen reduziert. Dann erfolgt das Selektieren von Phasenwertigkeiten bzw. Gangunterschieden. Deren interpolierter Funktionsverlauf wird in eine Temperaturkurve umgerechnet. Dies wird modellhaft an einem Strömungsbild für $\Delta T = 4 \text{ K}$ gezeigt (Abb. 4).

Das Originalinterferogramm in Abbildung 4a) zeigt neben der Ringstruktur als relevante Bildin-

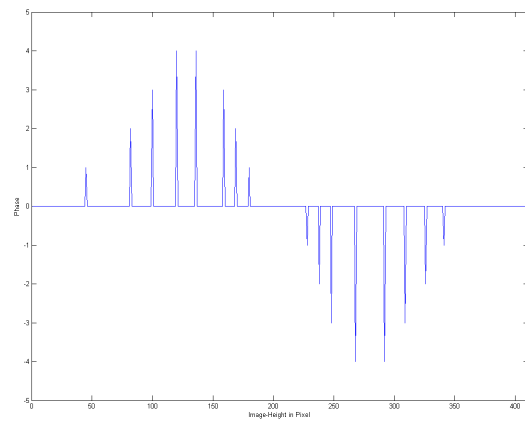


a)

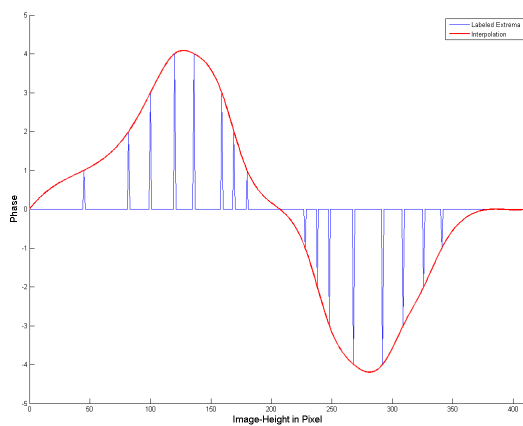
b)



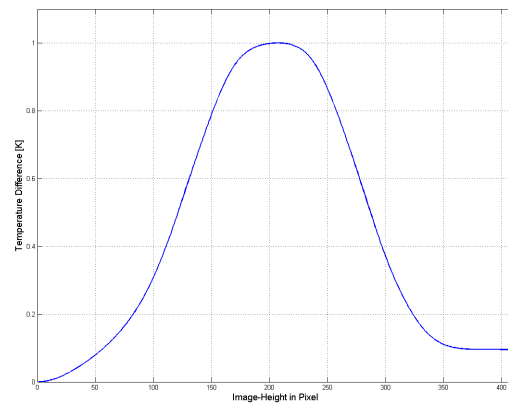
c)



d)



e)



f)

Abbildung 4: Rückwärtsmodellierung für die thermische Konvektion im Kugelspalt: a) Original-Interferogramm; b) Segmentierung der relevanten Bildinformation; c) extrahierte und gelabelte Ringe; d) Bestimmung der Extrema entlang einer mittig durch das Strömungsmuster gelegten Linie; e) Interpolation der Extremwertverteilung; f) normierte integrative Temperaturkurve.

formation und den großskaligen Streifen im Hintergrund kleinräumige Rauscheffekte. Diese sind auf die Oberflächenrauigkeit der verspiegelten Innenkugel zurückzuführen, sowie auf Rauscheffekte der digitalen Bildaufnahme (Moiré-Effekte). Abbildung 4b) zeigt das auf die relevante Bildinformation segmentierte Interferogramm, in dem die elliptischen Ringe nachgezeichnet sind. Mit diesem Bild erfolgt dann die weitere Reduktion auf einzelne Ringe (Abb. 4c).

Diese Ringe werden mit einer so genannten topologischen Linienordnung korreliert. Dabei werden den Ringen Phasenwertigkeiten in Abhängigkeit vom Ort zugeordnet. Dies wird hier entlang einer mittig durch das Strömungsmuster verlaufenden Pixelreihe gezeigt. Zur Ermittlung der Phasenwertigkeit eines Ringes wird dabei eine Rangordnung geschaffen. Im vorliegenden Beispiel liegen insgesamt zwei Mal 4 geschlossene Ringe vor. Der äußerste Ring erhält nun die erste minimal auftretende Phasenwertigkeit 1, der innerste, vierte Ring die maximal erfasste Phasenwertigkeit 4. Aus den numerischen Analysen ist bekannt, dass der radial gemittelte Temperaturverlauf eine gaussähnliche Form hat und die entsprechende Ableitungsfunktion, die dem Verlauf des Gangunterschieds entspricht, folglich zwei Extremwerte im Funktionsverlauf aufweist. Entsprechend wird eine Phase zweimal erfasst. Jeder Phasenwert wird nun unter Beachtung des Vorzeichens der Ableitungsfunktion entsprechend seiner Rangordnung positiv bzw. negativ gewertet (Abb. 4d).

Dieser Funktionsverlauf für die Phasenwerte wird weiter zu einer stetigen Funktion interpoliert (Abb. 4e), die dann nach folgender Formel zur Temperaturverteilung integriert wird:

$$\begin{aligned} T(\vartheta, \varphi) &= \int_{\vartheta_0}^{\vartheta_1} \frac{\partial T(\vartheta, \varphi)}{\partial \vartheta} d\vartheta + T_0 \\ &= \frac{\Delta \vartheta \lambda}{2d \varepsilon c_0} \int_{\vartheta_0}^{\vartheta_1} f_{phase}(\vartheta, \varphi) d\vartheta + T_0. \end{aligned}$$

Die Winkelauflösung $\Delta \vartheta$ liegt hier bei 0.1° . Abbildung 4f) zeigt die so berechnete Temperaturkurve.

Ausblick

Bei der experimentellen Untersuchung der thermischen Konvektion im Kugelspalt wird als Strömungsmessverfahren die Wollaston-Schlieren-Interferometrie eingesetzt. Diese Arbeit zeigt die Interferogrammauswertung, die von numerischen Simulationen und Berechnungen unterstützt wird. Mit einer Vorwärtsmodellierung werden hierzu aus simulierten Temperaturfeldern numerisch konstruierte Interferogramme ermittelt. Diese ermöglichen zunächst eine qualitative Aussage über die zu erwartende Interferenzstreifenverteilung und werden bei der Segmentierung relevanter Bildinformationen aus den experimentell gewonnenen Interferogrammen verwendet. Dann kann aus den Bilddaten im Rahmen einer Rückwärtsmodellierung ein quantitativer Temperaturverlauf berechnet werden. Für die weiteren Untersuchungen ist es erforderlich, diese Methode auf komplexere Strömungsphänomene zu übertragen.

Danksagung

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

Literatur

- [1] B. Futterer, M. Gellert, and C. Egbers. Das GEOFLOW-Experiment auf der ISS: Interferometrie und Schlieren-/Schattentechnik als optische Messverfahren für die thermische

Konvektion im Kugelspalt. In B. Ruck, A. Leder, and D. Dopheide, editors, *12. GALA-Fachtagung, „Lasermethoden in der Strömungsmeßtechnik“, 7.-9. September 2004, Karlsruhe*, pages 13.1–13.8. 2004. ISBN 3-9805613-1-3.

- [2] B. Futterer, M. Gellert, and C. Egbers. Das GEOFLOW-Experiment auf der ISS: Simulation optischer Messverfahren für die thermische Konvektion im Kugelspalt. In C. Egbers, L. Jehring, T. von Larcher, B. Ruck, A. Leder, and D. Dopheide, editors, *13. GALA-Fachtagung, „Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik“, 6.-8. September 2005, Cottbus*, pages 31.1–31.8. 2005. ISBN 3-9805613-2-1.
- [3] J. Immohr. *Sphärische Differentialinterferometrie für Raumfahrtanwendungen - Konvektionsströmungen im Kugelspalt unter dem Einfluss axialer und radialer Kraftwirkung*. Dissertation, ZARM, Universität Bremen, 2006. Fortschr.-Ber. VDI Reihe 7, Nr. 481. Düsseldorf: VDI-Verlag 2006.
- [4] H. sen. Oertel and H. jun. Oertel. *Optische Strömungsmesstechnik*. Braun Verlag, Karlsruhe, 1989.
- [5] M. Raffel. *Optische Untersuchungen in technischen Strömungen unter Berücksichtigung eines Verfahrens zur Detektion von Dichtegradienten*. Habilitationsschrift, Technische Universität Clausthal, 2001.