# Sphärische Wollaston-Schlieren-Interferometrie: Raum-Zeit-Analyse der thermischen Konvektion im rotierenden Kugelspalt (GeoFlow-Experiment)

Sandy Koch, Birgit Futterer, Christoph Egbers

Lehrstuhl für Aerodynamik und Strömungslehre Brandenburgische Technische Universität Cottbus

Fachtagung "Lasermethoden in der Strömungsmechanik" 08. - 10. September 2009, Erlangen

Gefördert durch: German Aerospace Center e.V. (DLR), 50 WM 0822, European Space Agency (ESA), grant number AO99-049, ESA Topical Team, grant number 18950/05/NL/VJ



#### Outline

- Einleitung
  - Motivation
  - Experiment
  - Messmethode
- 2 Daten
  - 3D Simulation
  - Experiment
  - Daten-Analyse
- 3 Zusammenfassung und Ausblick
  - Zusammenfassung
  - Ausblick

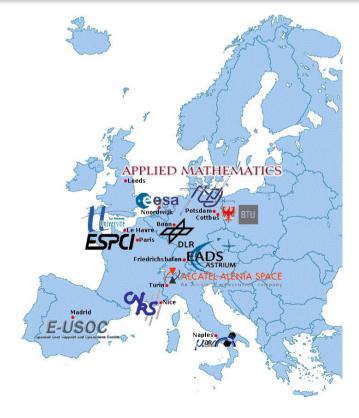


## Geophysical Flow Simulation

- Konvektionsexperiment in rotierenden Kugelschalen unter Einfluss eines Zentralkraftfeldes
- Mikrogravitationsexperiment im europäischen COLUMBUS Modul auf der Internationalen Raumstation (ISS)

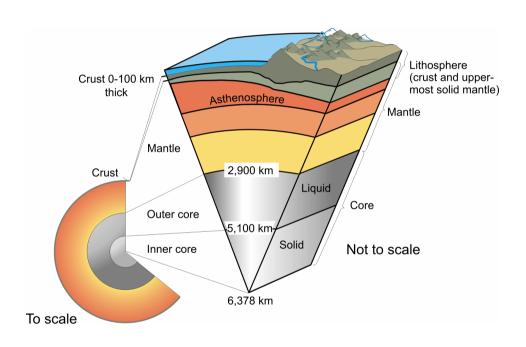
#### **Partner**

- Raumfahrtagenturen: ESA und DLR
- BTU Cottbus mit Experimenteam
   (C. Egbers, B.Futterer, S. Koch, N. Dahley, A. Stöckert, J. Brückner, L. Jehring, N. Scurtu)
- Topical Team für Datenanalyse (R. Hollerbach, P. Chossat, P. Beltrame, L. Tuckerman, F. Feudel, I. Mutabazi)
- Industrie für Technische Anlagen (FSL und EC)
- USOCs für User Support (Madrid, Neapel, Col-CC)



# Konvektion in Kugelschalen, Strömung im Erdinneren

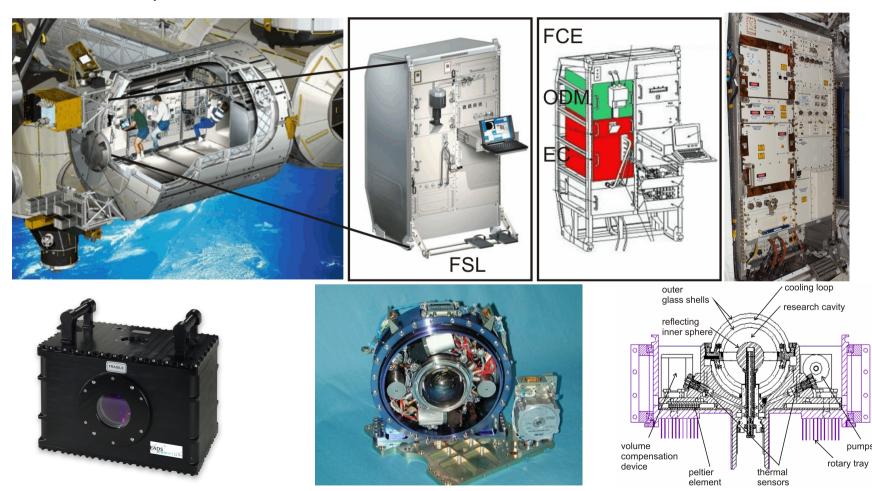
- Experimentelle Untersuchung von Rayleigh-Bénard Konvektion im konzentrischen Kugelspalt unter Einfluss eines künstlichen radialen Kraftfeldes
- ⇒ Strömung im äußeren flüssigen Erdkern
- Generierung des radialen Kraftfeldes durch Anlegen einer Hochspannung zwischen Außen- und Innenkugel
  - → künstliche Gravitationskraft
- Anforderungen:
   Mikrogravitationsbedingungen wie
   im Fluid Science Laboratory (FSL)
   im Columbusmodul auf der ISS
- Parameterbandbreite von Grundsrömung bis zur Turbulenz



Earth's interior

[Source: W.J. Kious & R.I Tilling. This Dynamics Earth, USGS (1996)]

- GeoFlow Experimentcontainer, integriert im Fluid Science Labor (FSL) im COLUMBUS Modul auf der ISS
- Start zur ISS: 7. Februar 2008
- Start des Experiments: 8. August 2008
- Rücktransport: März 2009 → Refurbishment für GeoFlow II



[Sources: European Space Agency (ESA); National Aeronautics and Space Administration (NASA); EADS Astrium GmbH, Friedrichshafen]



Parameter				
		GeoFlow	äusserer Erdkern	Erdmantel
Radienverhältnis	$\eta = \frac{r_i}{r_o}$	0.5	0.35	0.55
Prandtl-Zahl	$Pr = \frac{\nu}{\kappa}$	64.64	0.1 - 1.0	$\infty$ Temp abhäng. Viskosi- tät/geschichtet
Rayleigh-Zahl centr. Rayl.	$ extit{Ra} = rac{lpha \Delta T g d^3}{ u \kappa} \  extit{Ra}_{centr} = rac{\gamma \Delta T g_e d^3}{ u \kappa}$	0 1.4 · 10 <sup>5</sup>	> 10 <sup>25</sup>	$10^6-10^8$
Taylor-Zahl	$Ta = \left(rac{2\Omega r_a^2}{ u} ight)^2$	$1.3\cdot 10^7$	$pprox 10^{28}$	<< 1

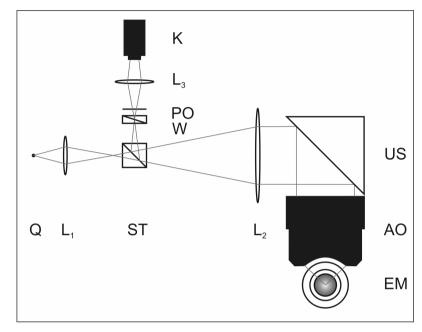
#### Wollaston-Schlieren-Interferometrie

- Brechungsindex  $n=(\lambda, \rho, p, T)$
- Temperaturunterschied  $\rightarrow$  Dichte  $\rightarrow$  Brechungsindex
  - Variation des Laserlichts ⇒
     Interferometrie:
     Wollaston-Schlieren-Interferometrie
- arbeitet zusätzlich als Schlieren/Schattenverfahren
- Interferometer ist integriert im Optical Diagnostic Module (ODM) im FSL

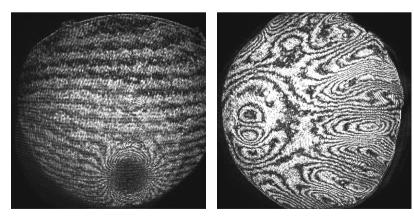
K: Kamera, L: Linsen, PO: Polfilter, W: Wollastonprisma, Q:

Laser, ST: Strahlteiler, US: Umlenkspiegel, AO:

Adaptionsoptik, EM: Kugel



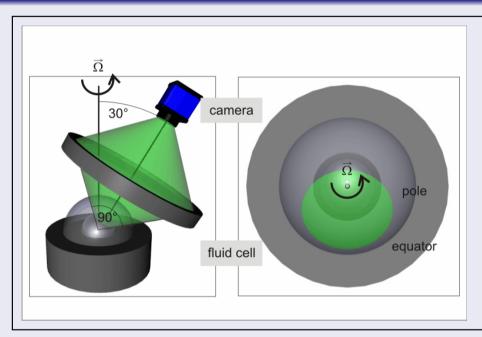
Skizze vom Strahlenverlauf



Interferogramme



#### Messmethode: Wollaston-Schlieren-Interferometrie

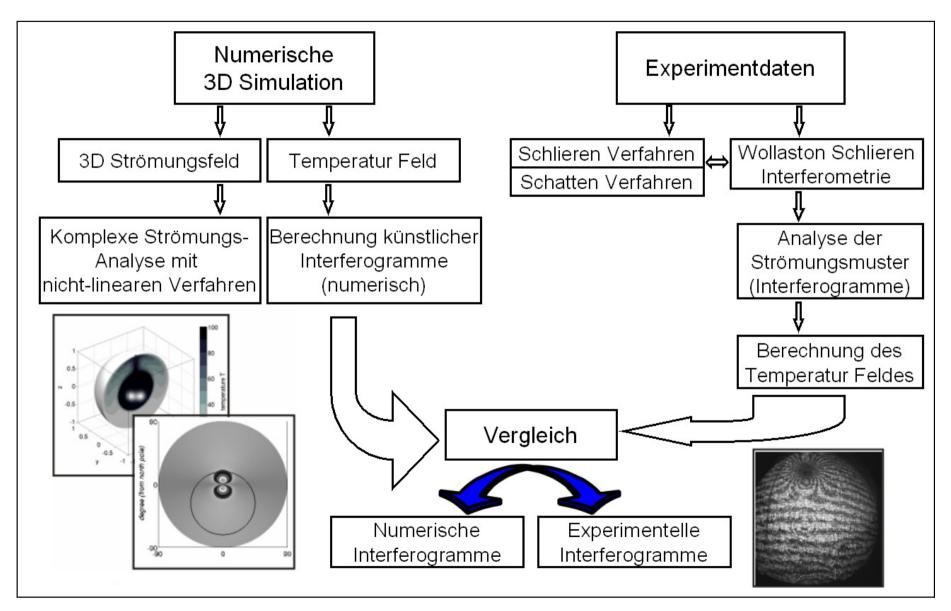




- Triggerung der Bildaufnahme alle 60°
  - ightarrow 6 Positionen ergeben Messbild der gesamten Hemisphäre

#### **Datenvolumen**

Bilder | 200 GB (pro RUN  $\approx$  16000 Bilder) Telemetrie | 50 GB ( $\Delta T$ ,  $\Omega$ , Ra, Ta, U,  $\mu g$ , etc.)



Numerische und experimentelle Datenanalyse. Untersuchung von experimentellen Daten durch Analyse und Vergleich mit numerischen Daten.

90 Q Q

#### Gleichungen für Konvektion in rotierenden Kugelschalen mit Dielektrischem Kraftfeld

Kontinuitätsgleichung

$$\nabla \cdot \mathbf{U} = 0$$

Bewegungsgleichung

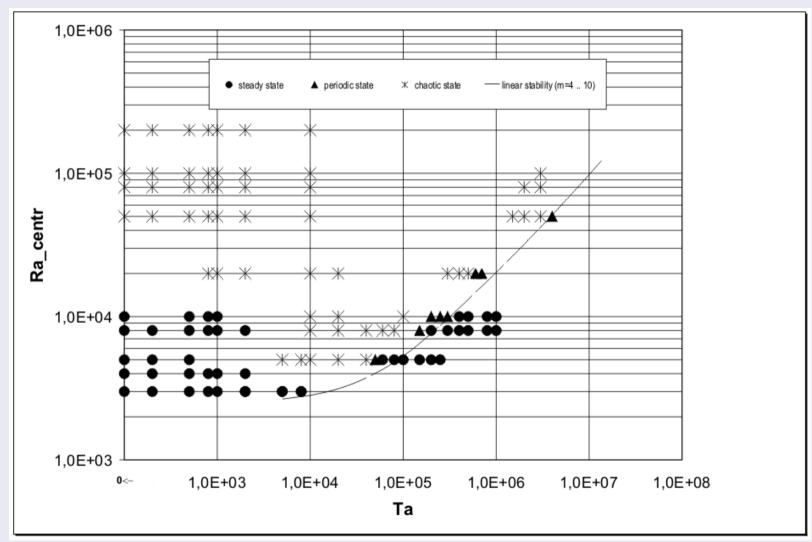
$$Pr^{-1} \left[ \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + (\mathbf{U} \cdot \nabla) \mathbf{U} \right] = -\nabla p + \nabla^2 \mathbf{U} + Ra \, T \, \hat{\mathbf{e}}_z + Ra_{centr} \, T \, \hat{\mathbf{e}}_r + \sqrt{Ta} \, \hat{\mathbf{e}}_z \times \mathbf{U} + \widetilde{Ra} \, T \, r \sin \theta \hat{\mathbf{e}}_{eq} \right]$$

Energiegleichung

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{U} \cdot \nabla T = \nabla^2 T$$

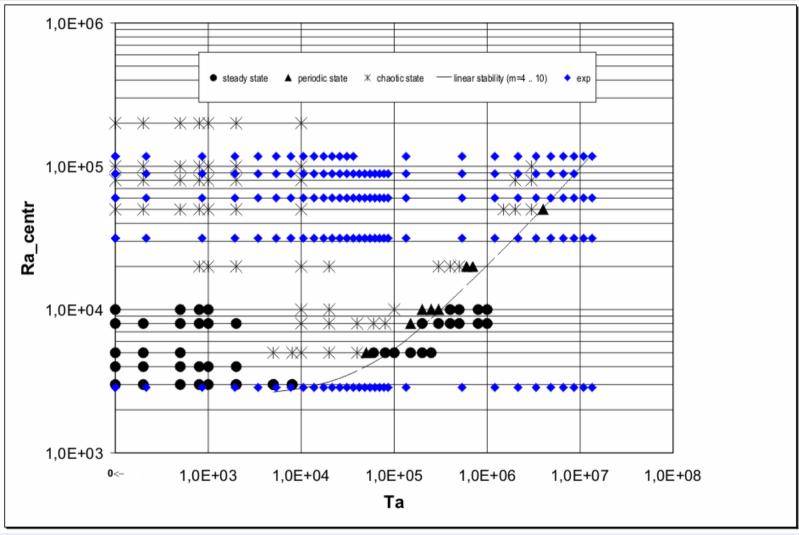
no-slip boundary conditions for velocity  $\mathbf{U}$ , temperature fixed  $T(r_o) = 0$ ,  $T(r_i) = 1$ 

# Stabilitätsdiagramm von numerischen Simulationen

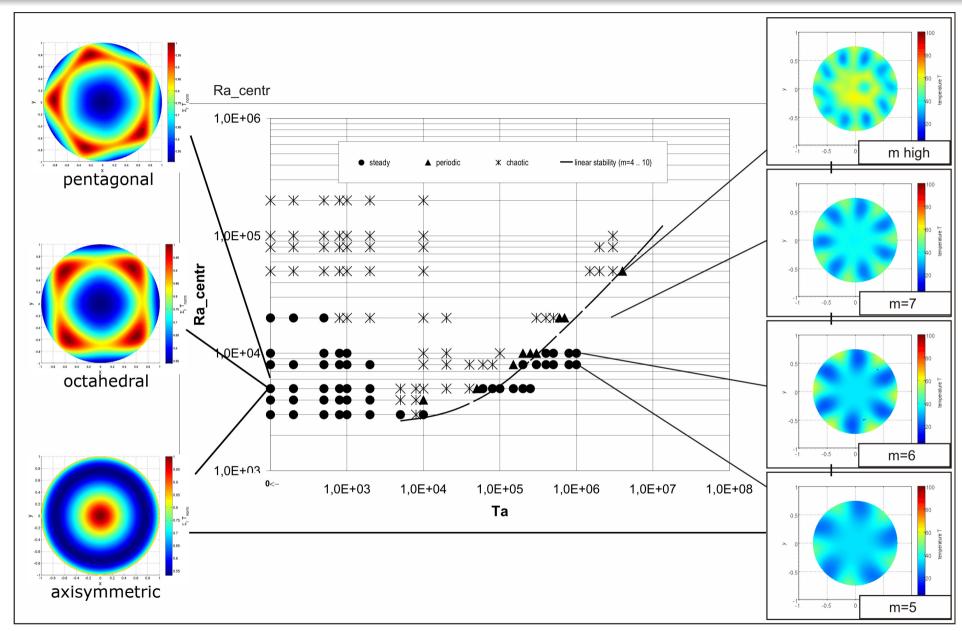


Thermische Konvektion im ruhenden und rotierenden Kugelspalt: Numerische Simulation für das Zeitverhalten der Strömung als Funktion der Taylor-Zahl [Travnikov et. al. 2003].

## Stabilitätsdiagramm mit Experimentläufen



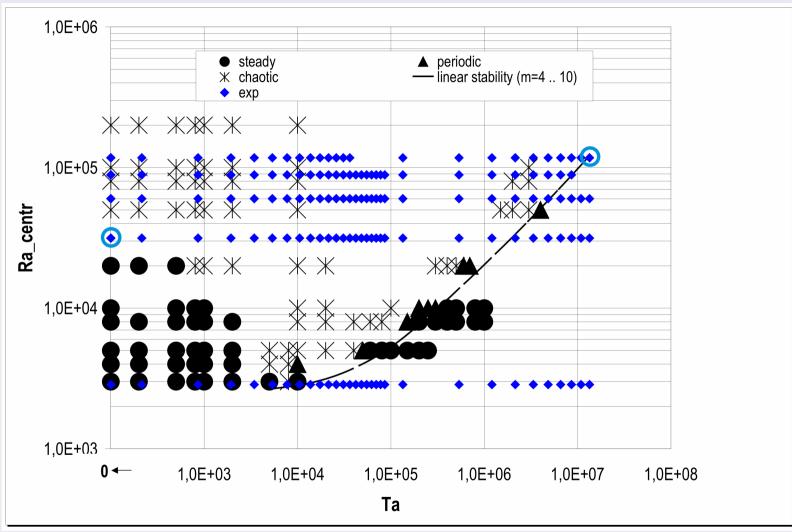
Thermische Konvektion im ruhenden und rotierenden Kugelspalt: Numerische Simulation für das Zeitverhalten der Strömung als Funktion der Taylor-Zahl [Travnikov et. al. 2003].



Numerische Simulation zur thermischen Konvektion im ruhenden und rotierenden Kugelspalt.

999

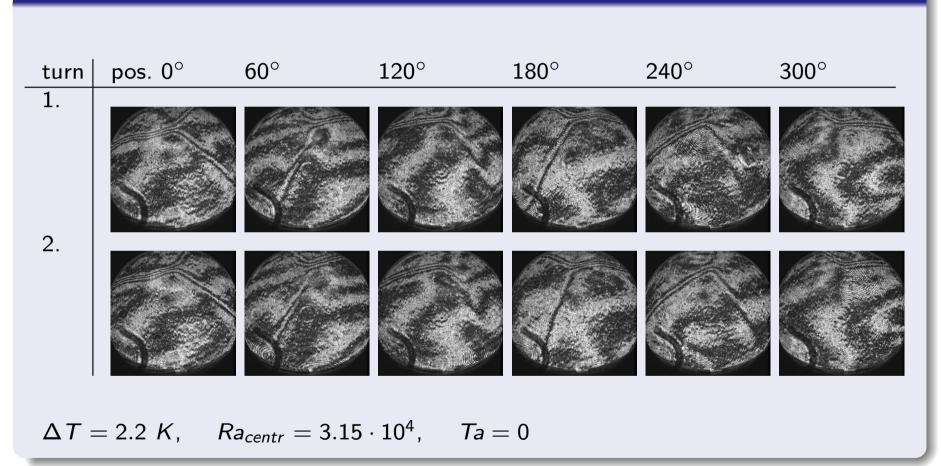
### Stabilitätsdiagramm mit Experimentläufen



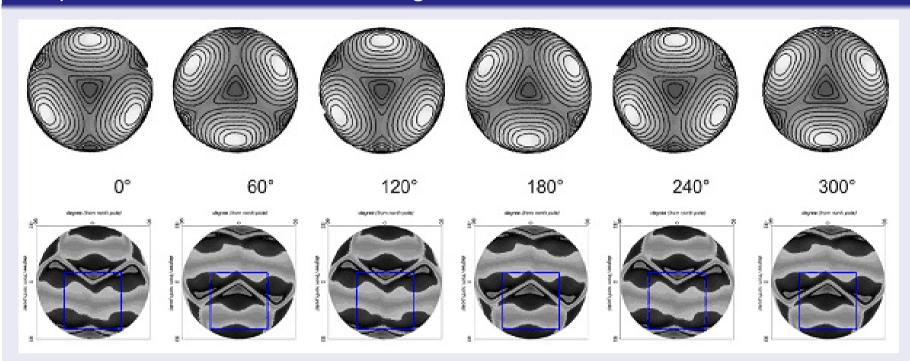
Numerische Simulation und Experimentläufe zur thermischen Konvektion im ruhenden und rotierenden Kugelspalt.

Fälle für: 
$$Ra_{(centr, Ta)} = (3.15 \cdot 10^4, 0)$$
 und  $Ra_{(centr, Ta)} = (1.17 \cdot 10^5, 1.34 \cdot 10^7)$ .

# Daten-Analyse von Experimentbildern für Run #7:



#### Temperaturfelder mit Blick auf Polarregion:

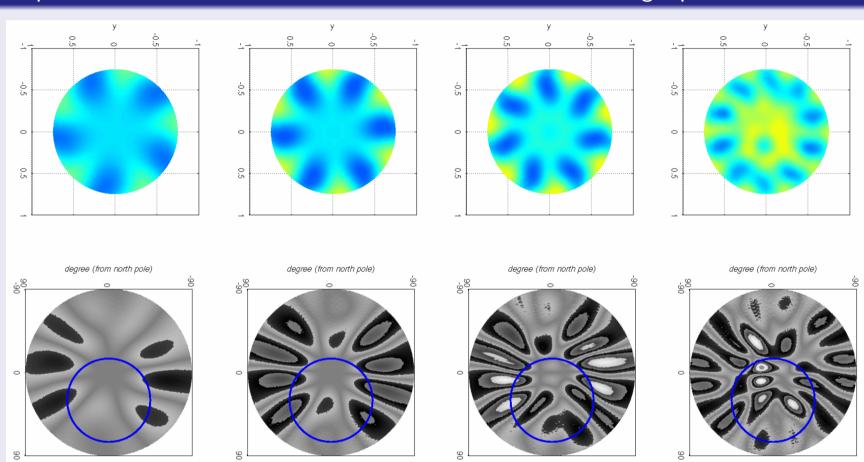


Thermische Konvektion im nicht-rotierenden Kugelspalt: Stationäre oktaedrische Strömung für

$$Ra_{centr} = 1 \cdot 10^4$$
,  $Ta = 0$ .

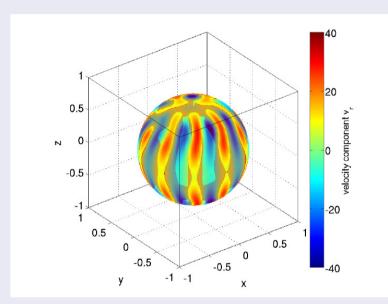
Isolinien demonstrieren den Charakter der Konvektionsmuster, dunkle Bereiche zeigen den Aufstieg des warmen Fluids.

#### Temperaturfelder für thermische Konvektion im rotierenden Kugelspalt:

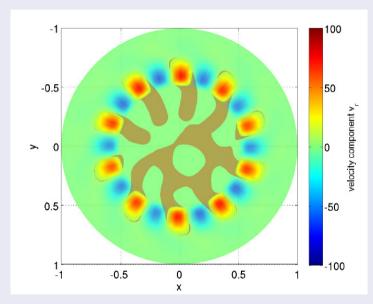


Stationäre Strömung mit Zunahme der Mode bei Erhöhung des Parametersatzes [m = 5  $\rightarrow$  6  $\rightarrow$  7  $\rightarrow$  10 bei ( $Ra_{centr}, Ta = 0$ ) = (8  $\cdot$  10<sup>3</sup>, 1  $\cdot$  10<sup>6</sup>)  $\rightarrow$  (1  $\cdot$  10<sup>4</sup>, 1  $\cdot$  10<sup>6</sup>)  $\rightarrow$  (2  $\cdot$  10<sup>4</sup>, 2  $\cdot$  10<sup>6</sup>)  $\rightarrow$  (5  $\cdot$  10<sup>4</sup>, 4  $\cdot$  10<sup>6</sup>)] und dazugehörige Interferogramme.

# Columnarzellen: $Ra_{centr} = 5 \cdot 10^4$ , $Ta = 4 \cdot 10^6$



radiale Geschw.komp. auf Sphäre, 3D-Ansicht der Kugel

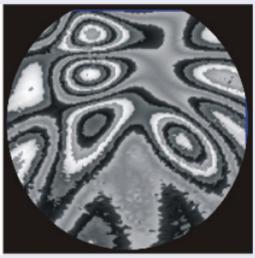


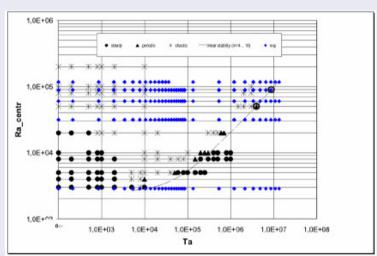
radiale Geschw.komp. auf Sphäre, Ansicht von äquatorialer Ebene auf den Pol

- prograde Drift
- Wechsel der Säulen in der Polarregion

# Abgleich von Einzelbildern:



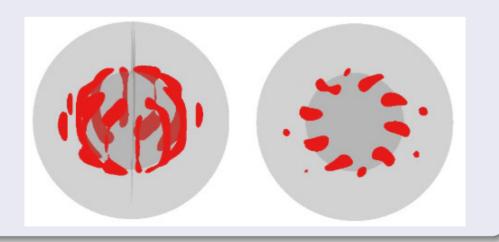




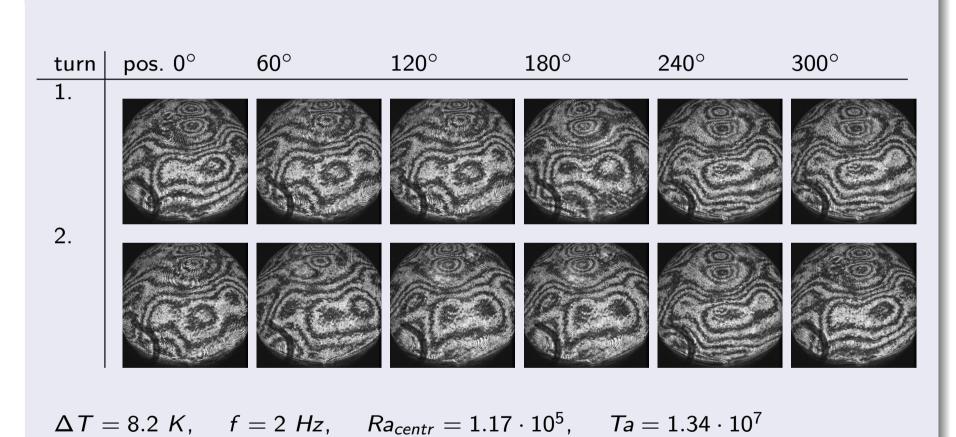
Identifikation von Streifenmuster als "Columnarzellen"

	Experiment	Numerik
Racentr	$9 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^4$
Ta	$9 \cdot 10^6$	$4 \cdot 10^6$

 $\rightarrow$  gute Übereinstimmung



# Raum-Zeit-Darstellung von Experimentbildern für Run #5:



#### Zusammenfassung

- sphärisches Konvektionsexperiment mit künstlicher radialer Gravitationskraft
- Mikrogravitationsexperiment im COLUMBUS-Modul auf der ISS
- Wollaston-Schlieren-Interferometrie
- erste Ergebnisse bestätigen:
  - nicht-rotierende Fälle
    - Koexistenz von verschiedenen Moden (axisymmetric, octahedral, pentagonal)
  - rotierende Fälle
    - gute Übereinstimmung von Columnarzellen

#### GeoFlow I

- Analyse der Experimentbilder mit Bildverarbeitung, Streifenmusteranalyse, sphärische Oberflächenprojektion, Filmen
  - → sollen Dynamiken zeigen, wie sie numerisch vorausgesagt werden

#### GeoFlow II

- Wiederflug als Mantelkonvektionsexperiment
- Fluid mit stark temperaturabhängiger Viskosität
- geplant für 2010/2011

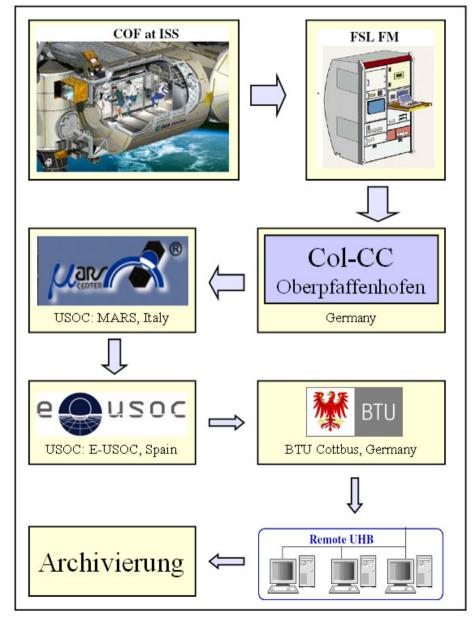
# Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

# Anhang



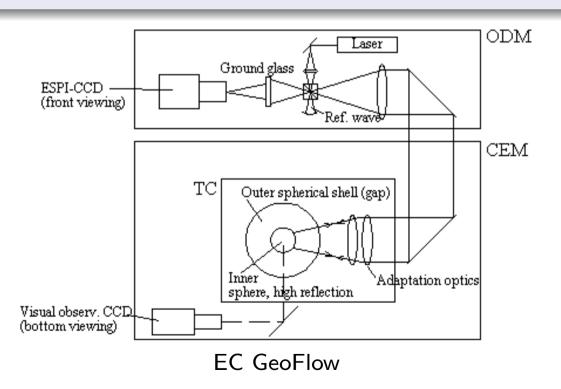


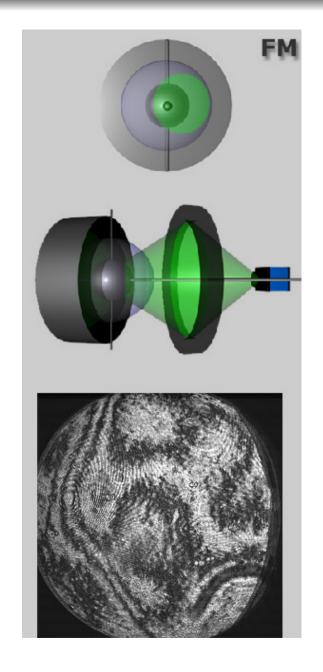




#### Eigenschaften

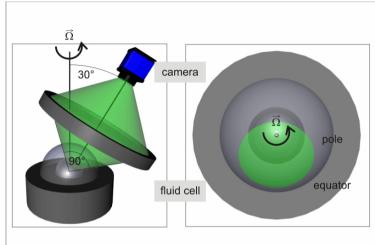
- Optisches Messverfahren (ohne Tracer)
- Laserlicht durchleuchtet transparentes Silikonöl → Temperaturunterschied → Brechzahlunterschied ⇒ Interferogramm
- Ein Ausschnitt sichtbar  $\rightarrow$  6 Bilder zu jeweils 60°  $\rightarrow$  Zusammenfügen zu einem Bild





## Eigenschaften

- Optisches Messverfahren (ohne Tracer)
- Laserlicht durchleuchtet transparentes Silikonöl → Temperaturunterschied → Brechzahlunterschied ⇒ Interferogramm
- Ein Ausschnitt sichtbar  $\rightarrow$  6 Bilder zu jeweils  $60^{\circ} \rightarrow$  Zusammenfügen zu einem Bild





#### Mögliche Diagnoseverfahren im FSL

- Visuelle Untersuchung von Strömungen durch Kameras, wie: High-Speed, High-Resolution, Infrarot, Farbaufnahme
- Hintergrund-, Volumen- und Lichtschnittbeleuchtung mit Weißlicht oder monochromatischem Licht
- PIV, 2D-Geschwindigkeitsmessungen
- Thermografie von Flüssigkeitsoberflächen über extern angebrachte Infrarotkamera
- Interferometrie-Untersuchungen mit verschiedenen opt. Anordnungen:
  - digitales Holografie-Interferometer
  - Wollaston-Shearing-Interferometer ⇒ GeoFlow
  - Schlieren-Interferometer ⇒ GeoFlow
  - Electronic Speckle Pattern Interferometer (ESPI)

mehr Informationen: http://spaceflight.esa.int/users/virtualinstitutes/fsl/index1.html

#### Setting up high voltage $\rightarrow$ acceleration due to dielectric force field

$$\mathbf{g}_{\mathbf{e}} = \frac{1}{2\rho} \epsilon \epsilon_r \nabla |\mathbf{E}|^2 \quad \text{with} \quad \mathbf{E} = \frac{1}{r^2} \frac{r_i r_o}{r_o - r_i} V_0 \sin(\omega t) \hat{\mathbf{e}}_r$$

$$g_e = \frac{2\epsilon_0 \epsilon_r}{\rho} \left( \frac{r_i r_o}{r_o - r_i} \right)^2 V_{rms}^2 \frac{1}{r^5}$$

 $\varepsilon_0$  - dielectric constant,  $\varepsilon_r$  - relative permittivity,  $\rho$  - density,  $V_{rms}$  - voltage

#### GeoFlow specific values . . .

$$\epsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12} \text{ As/Vm}, \quad \epsilon_r = 2.7,$$

$$ho=920$$
 kg/m $^3,$ 

$$d = r_o - r_i = 27 \text{ mm} - 13.5 \text{ mm} = 13.5 \text{ mm},$$

$$V_{rms} = 10 \ kV$$

$$ightarrow g_e|_{r_o} pprox 10^{-1} m/s^2$$
 compared to  $g pprox 10^1 m/s^2$ 

 $\rightarrow$  microgravity conditions required!



#### Numerically constructed interferogram

optical path through spherical gap

$$s(T) = \int_{r_i}^{r_o} n(T) dr$$

phase shift between adjacent rays

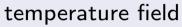
$$\Delta s = \int_{r_i}^{r_o} n(T) dr - \int_{r_i}^{r_o} n(T + \Delta T) dr$$

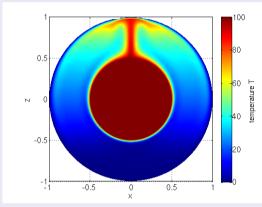
• with linear behaviour n(T) = aT + b

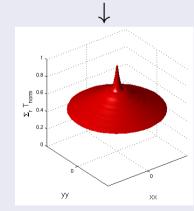
$$\frac{\Delta s}{a} = \int_{r_i}^{r_o} T(r, \theta, \phi) dr - \int_{r_i}^{r_o} T(r, \theta + \Delta \theta, \phi) dr$$

# Modelling forward

- ullet temperature field calculated from 3D simulation o interferogram
- fringe pattern evaluation for experimental data

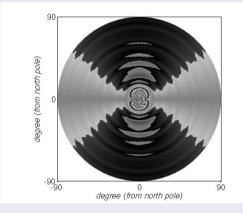


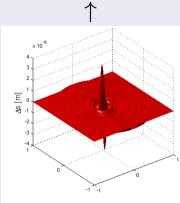




integrated temp. field

#### interferogram

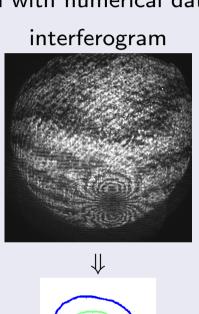


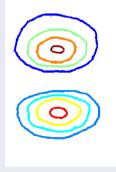


variation of optical path

# $Interferogramm \to Temperaturfeld$

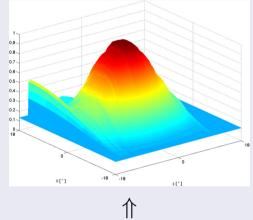
- ullet experimental interferogram o calculation of integrated temperature curve
- comparison with numerical data

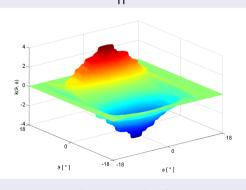




selected fringe pattern

integrated temp. field





phase shift

#### Formula - Integration

$$T(\vartheta_{1},\varphi) = \int_{\vartheta_{0}}^{\vartheta_{1}} \frac{\partial T(\vartheta,\varphi)}{\partial \vartheta} d\vartheta + T_{0}$$

$$= \frac{\triangle \vartheta \lambda}{2d \varepsilon_{A/B} (dn/dT)} \int_{\vartheta_{0}}^{\vartheta_{1}} f_{phase}(\vartheta,\varphi) d\vartheta + T_{0}$$

#### Variables

Scaled prism angle:

 $\begin{array}{rcl}
\varepsilon_{A/B} & = & 0.44^{\circ} \\
\lambda & = & 532 \times 10^{-9} m
\end{array}$ Wavelength:

Axial angle:

 $\begin{array}{rcl}
\vartheta & = & 16.7^{\circ} \\
d & = & 13.5 \times 10^{-3} m
\end{array}$ Gap:

Temperature difference:

 $\Delta T = 2K$   $(dn/dT) = -3.85 \times 10^{-4} K^{-1}$ Variation of refractive index:

 $= (0.351 \times \triangle T)K$ Start value: