

Das GeoFlow-Experiment auf der ISS: Auswertung erster Experimentdaten

Sandy Koch, Norman Dahley, Birgit Futterer, Christoph Egbers

Lehrstuhl für Aerodynamik und Strömungslehre
Brandenburgische Technische Universität Cottbus

Fachtagung "Lasermethoden in der Strömungsmechanik"
09. - 11. September 2008, Karlsruhe

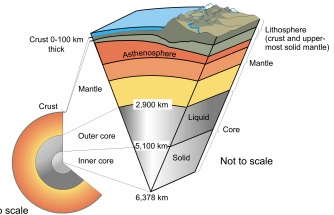
Gefördert durch: German Aerospace Center e.V. (DLR), FKZ 50 WM 0122 und 50 WM 0822,
European Space Agency (ESA),
grant number AO99-049, ESA Topical Team, grant number 18950/05/NL/VJ

Outline

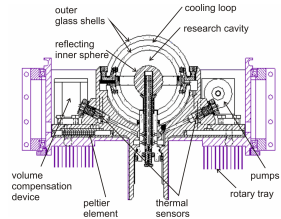
- 1 **Einleitung**
 - Motivation
 - GeoFlow Experiment
 - Messmethode und Datenanalyse
- 2 **Numerische Simulationen**
 - Thermische Konvektion und Rotation
 - Thermische Konvektion ohne Rotation
- 3 **Experimentdaten**
 - Chronologie
 - Datentransfer
 - Benutzeroberfläche GeoFlow
 - Erste Bilddaten
- 4 **Zusammenfassung und Ausblick**

GeoFlow

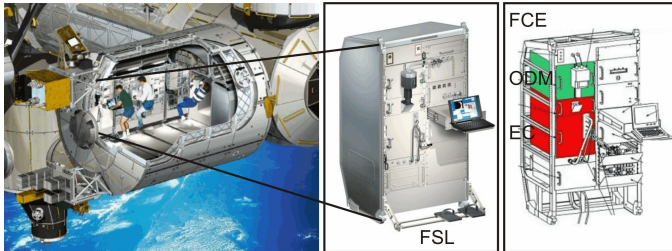
- Experimentelle Untersuchung von Rayleigh-Bénard Konvektion im konzentrischen Kugelspalt unter Einfluss eines künstlichen radialen Kraftfeldes
- ⇒ Strömung im äußeren flüssigen Erdkern
- Generierung des radialen Kraftfeldes durch Anlegen einer Hochspannung zwischen Außen- und Innenkugel
→ künstliche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



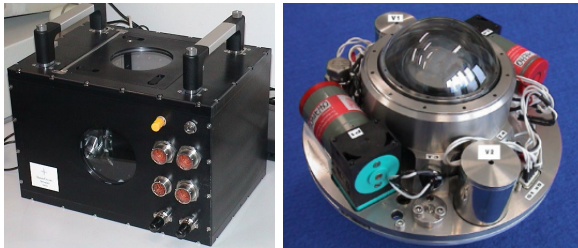
Schnitt durch die Erde, Kious (1996)



rotierendes Kugelmodell, innere Kugel
geheizt, mit Zentralkraftfeld



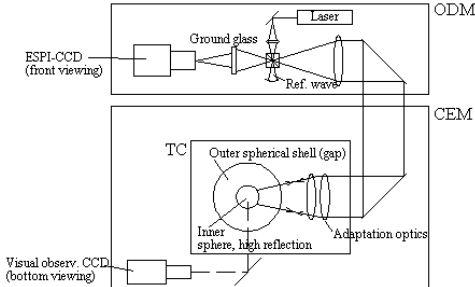
Columbusmodul und FSL



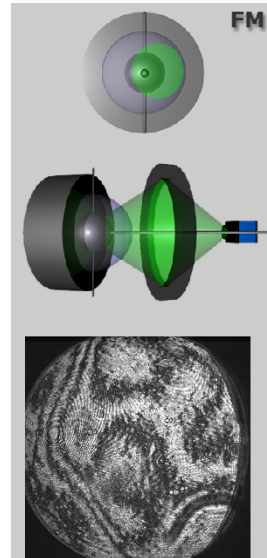
Experimentcontainer, Quellen: ESA (2005), BTU

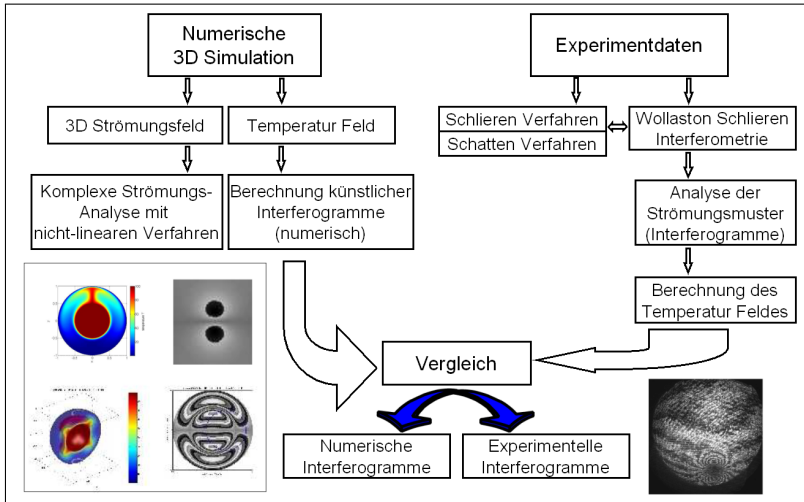
Eigenschaften

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

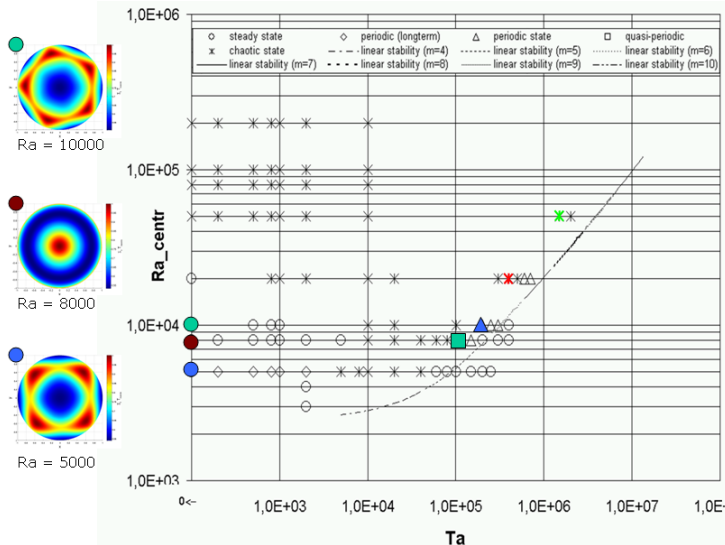


EC GeoFlow



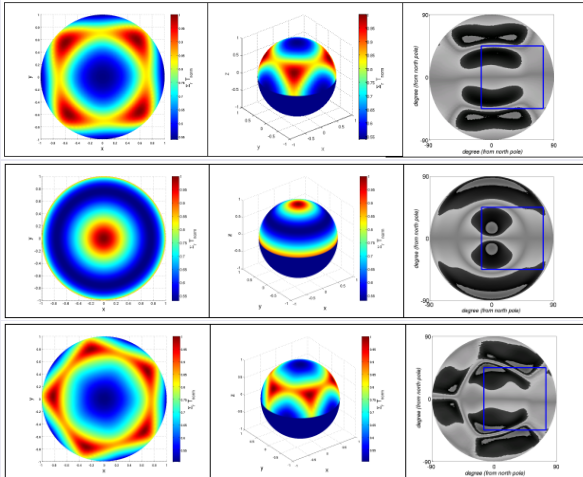


Numerische und experimentelle Datenanalyse. Untersuchung von experimentellen Daten durch Analyse und Vergleich mit numerischen Daten.



Überblick über Konvektionszustände in Kugelschalen von $\eta = 0.5$ für $Pr = 64.64$ in Abhängigkeit von $Ra_{central}$ und Ta

Ohne Rotation



Octahedral/Cubic
 $Ta = 0$,
 $Ra = 5000$

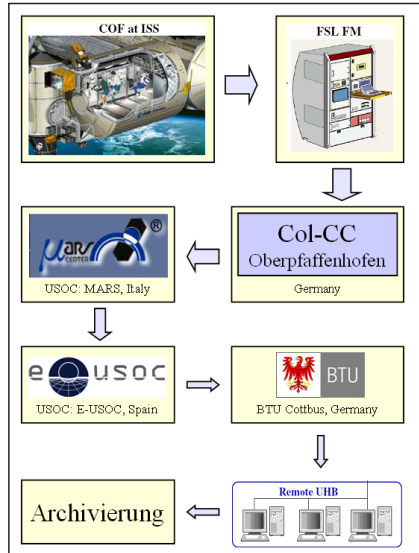
Achsensymmetrisch
 $Ta = 0$,
 $Ra = 8000$

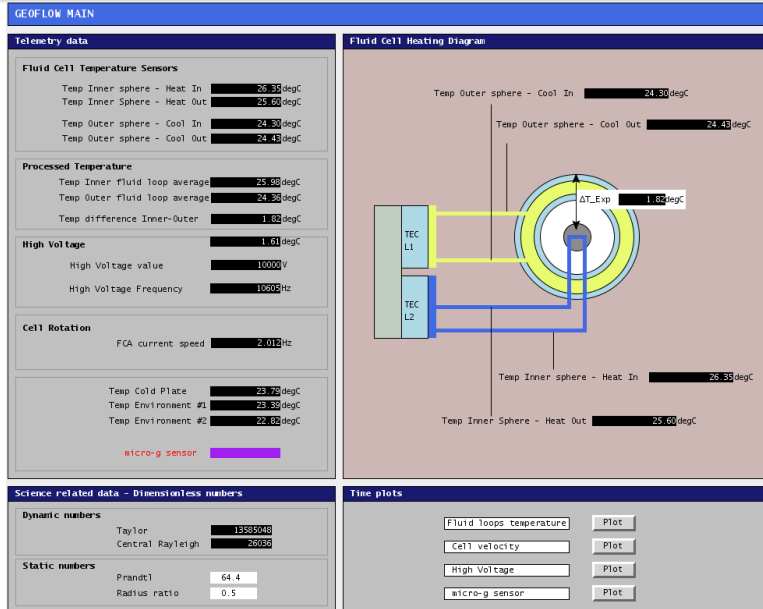
D5
 $Ta = 0$,
 $Ra = 10000$

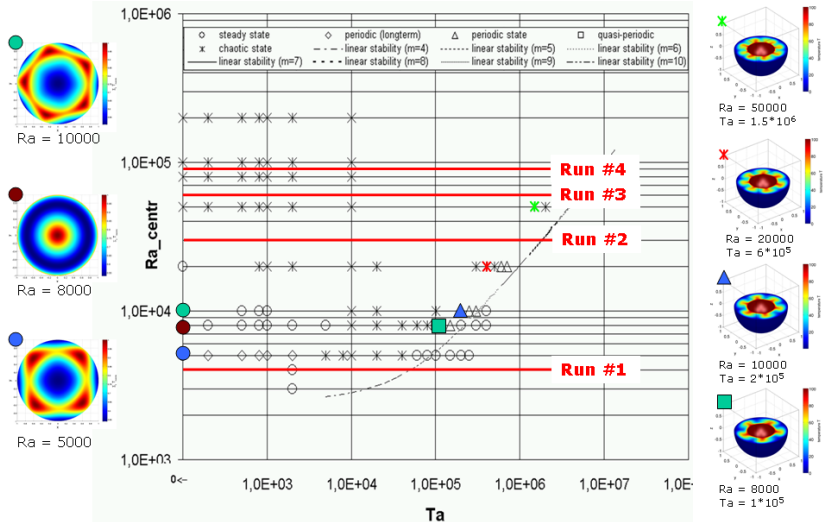
Chronologie

07.02.08	Start zur ISS
28.07.08	Einbau von GeoFlow in FSL
05.08.08	Inbetriebnahme von GeoFlow
06.08.08	Check out
07.08.08	1. Run → 0.2K, 0-2Hz
19.08.08	2. Run → 1.8K, 0-2Hz
25.08.08	3. Run → 3.6K, 0-2Hz
27.08.08	4. Run → 6.2K, 0-2Hz
⋮	
15.09.08	n. Run von 36 Runs
⋮	
Nov. 08	ursprüngl. Rücktransport
July 2009	Rücktransport

High-Rotation:	≈	16000 Bilder mit 13,5 GB pro RUN
Low-Rotation:	≈	9000 Bilder mit 7,7 GB pro RUN
No-Rotation:	≈	800 Bilder mit 0,7 GB pro RUN

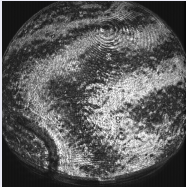




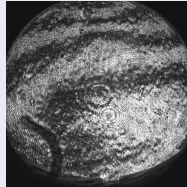


Überblick über Konvektionszustände in Kugelschalen von $\eta = 0.5$ für $Pr = 64.64$ in Abhängigkeit von $Ra_{central}$ und Ta

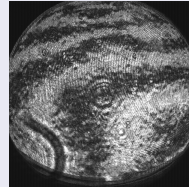
Science RUN #1: $Ra = 4 \cdot 10^3$



$$Ta = 1.34 \cdot 10^5$$



$$Ta = 3.36 \cdot 10^6$$

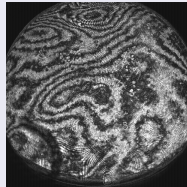


$$Ta = 1.34 \cdot 10^7$$

Science RUN #4: $Ra = 8.87 \cdot 10^4$



$$Ta = 1.34 \cdot 10^5$$

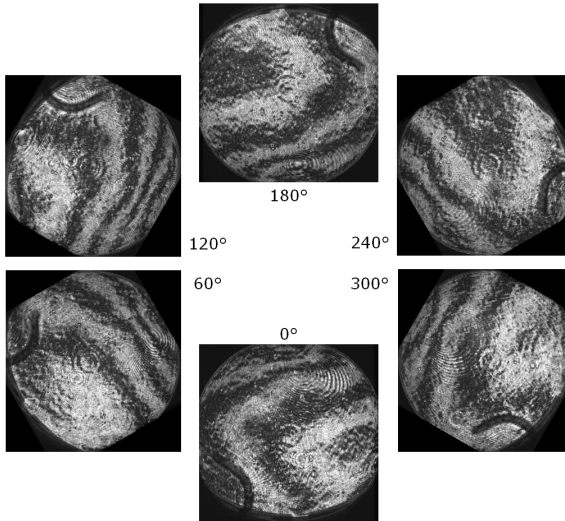


$$Ta = 3.36 \cdot 10^6$$

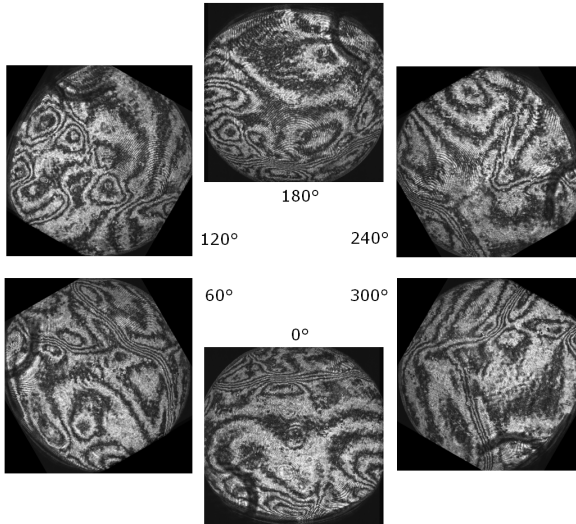


$$Ta = 8.59 \cdot 10^6$$

Science RUN #1: $Ra = 4 \cdot 10^3$, $Ta = 1,34 \cdot 10^5$



Science RUN #4: $Ra = 8.87 \cdot 10^4$, $Ta = 1,34 \cdot 10^5$



Zusammenfassung

- Experimentelle Untersuchung von thermischen Konvektionen
- Wollaston-Shearing $\Rightarrow$ Interferogramme
- Numerische Berechnungen
- Erhalt der ersten Experimentdaten $\Rightarrow$ Vergleich dieser mit Numerikdaten

Ausblick

- Wiederflug $\rightarrow$ GeoFlow II, ähnliche Experimentprozedur wie GeoFlow I
- Tausch des Fluids mit stark temperaturabhängiger Viskosität zur Simulation von Mantelkonvektion (Nonanol ($C_9H_{20}O$))
- Wissenschaftliche Analysen sind vergleichbar mit denen aus GeoFlow I, aber veränderte Konvektionsverhalten sind zu erwarten

Zusammenfassung

- Experimentelle Untersuchung von thermischen Konvektionen
- Wollaston-Shearing $\Rightarrow$ Interferogramme
- Numerische Berechnungen
- Erhalt der ersten Experimentdaten $\Rightarrow$ Vergleich dieser mit Numerikdaten

Ausblick

- Wiederflug $\rightarrow$ GeoFlow II, ähnliche Experimentprozedur wie GeoFlow I
- Tausch des Fluids mit stark temperaturabhängiger Viskosität zur Simulation von Mantelkonvektion (Nonanol ($C_9H_{20}O$))
- Wissenschaftliche Analysen sind vergleichbar mit denen aus GeoFlow I, aber veränderte Konvektionsverhalten sind zu erwarten

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Anhang

Mögliche Diagnoseverfahren im FSL

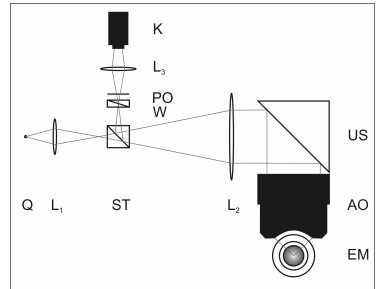
- Visuelle Untersuchung von Strömungen durch Kameras, wie: High-Speed, High-Resolution, Infrarot, Farbaufnahme
- Hintergrund-, Volumen- und Lichtschnittbeleuchtung mit Weißlicht oder monochromatischem Licht
- PIV, 2D-Geschwindigkeitsmessungen
- Thermografie von Flüssigkeitsoberflächen über extern angebrachte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

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

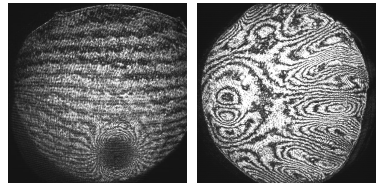
Wollaston-Shearing

- Brechungsindex $n=(\lambda, \rho, p, T)$
- Temperaturunterschied $\rightarrow$ Dichte $\rightarrow$ Brechungsindex
 - Variation des Laserlichts $\Rightarrow$ Interferometrie: Wollaston-Shearing-Interferometrie
 - Ablenkung des Strahls: Schlieren/Schattenverfahren
- zusätzlich arbeitet Wollaston-Shearing-Interferometrie 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

Equations for convection in rotating spherical shells with dielectric force field

equation of continuity

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

equation of motion

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

equation of energy

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

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

Setting up high voltage → acceleration due to dielectric force field

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

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

ϵ_0 - dielectric constant, ϵ_r - relative permittivity, ρ - density, V_{rms} - voltage

GeoFlow specific values ...

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

$$\rho = 920 \text{ kg/m}^3,$$

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

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

$$\rightarrow g_e|_{r_o} \approx 10^{-1} \text{ m/s}^2 \quad \text{compared to} \quad g \approx 10^1 \text{ m/s}^2$$

→ microgravity conditions required!

Parameters

		GeoFlow	Earth outer core	mantle
radius ratio	$\eta = \frac{r_i}{r_o}$	0.5	0.35	0.55
Prandtl number	$Pr = \frac{\nu}{\kappa}$	64.64	0.1 - 1.0	∞ viscosity temp. depend /layered
Rayleigh number	$Ra = \frac{\alpha \Delta T g d^3}{\nu \kappa}$	0	$> 10^{25}$	$10^6 - 10^8$
centr. Rayl. num.	$Ra_{centr} = \frac{\gamma \Delta T g_e d^3}{\nu \kappa}$	$1.8 \cdot 10^4$		
Taylor number	$Ta = \left(\frac{2\Omega d^2}{\nu} \right)^2$	$8.4 \cdot 10^5$	$\approx 10^{28}$	$\ll 1$

Numerically constructed interferogram

- optical path through spherical gap

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

- phase shift between adjacent rays

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

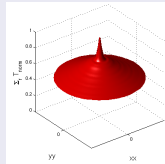
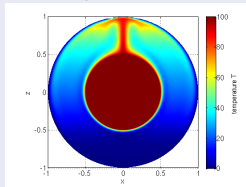
- with linear behaviour $n(T) = aT + b$

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

Modelling forward

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

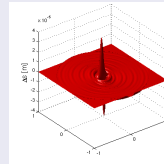
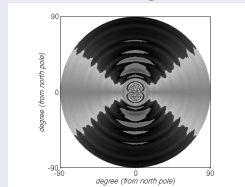
temperature field



integrated temp. field



interferogram

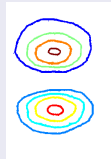
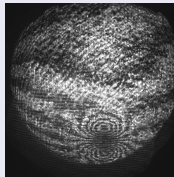


variation of optical path

Interferogramm → Temperaturfeld

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

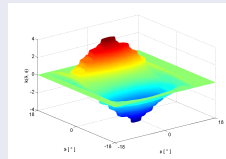
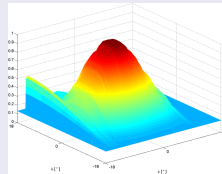
interferogram



selected fringe pattern



integrated temp. field



phase shift

Formula - Integration

$$\begin{aligned}
 T(\vartheta_1, \varphi) &= \int_{\vartheta_0}^{\vartheta_1} \frac{\partial T(\vartheta, \varphi)}{\partial \vartheta} d\vartheta + T_0 \\
 &= \frac{\Delta \vartheta \lambda}{2d \varepsilon_{A/B} (dn/dT)} \int_{\vartheta_0}^{\vartheta_1} f_{phase}(\vartheta, \varphi) d\vartheta + T_0
 \end{aligned}$$

Variables

Scaled prism angle:	$\varepsilon_{A/B}$	=	0.44°
Wavelength:	λ	=	$532 \times 10^{-9} m$
Axial angle:	ϑ	=	16.7°
Gap:	d	=	$13.5 \times 10^{-3} m$
Temperature difference:	ΔT	=	$2K$
Variation of refractive index:	(dn/dT)	=	$-3.85 \times 10^{-4} K^{-1}$
Start value:	T_0	=	$(0.351 \times \Delta T) K$