

# Abschlussbericht

# Vorhaben

Auslegung und Betrieb eines Laborbreadboards für die Integration des Kugelspaltexperiments in den FSL-Experiment-Container

FKZ: 50 WM 0122

Lehrstuhl für Aerodynamik und Strömungslehre Brandenburgische Technische Universität Cottbus

# Allgemeine Angaben

Abschlussbericht für Gerätevorentwicklung zur Forschung auf ISS (FKZ: 50 WM 0122) 12. Juni 2008

# Zuwendungsempfänger (ZE)

Egbers, Christoph, Prof. Dr.-Ing., Universitätsprofessor

Institution:

Lehrstuhl für Aerodynamik und Strömungslehre,

Institut für Verkehrstechnik,

Brandenburgische Technische Universität Cottbus,

Siemens-Halske-Ring 14

D-03046 Cottbus

**Telefon:** 0355-69-4868 **Telefax:** 0355-69-4891

E-Mail: egbers@tu-cottbus.de

#### Kennwort

FSL-Demonstrator Kugelspalt

# Fachgebiet und Arbeitsrichtung

Fachgebiet: Strömungsmechanik / Geophysik /  $\mu$ g - Forschung (FSL) Arbeitsrichtung: Raumstationsexperimentdesign / Optische Messtechnik /

Numerische Simulation

# Gesamtlaufzeit des Vorhabens

01.04.2001 - 31.12.2007

#### Berichtszeitraum

01.04.2001 - 31.12.2007

# 1 Kurzdarstellung

# 1.1 Aufgabenstellung

Im Rahmen des vom DLR und von der europäischen Raumfahrtagentur ESA geförderten Projektes GeoFlow (Geophysical Flow Simulation, FKZ AO-99-049) wird im Fluid Science Laboratory FSL des europäischen Forschungsmoduls COLUMBUS auf der Internationalen Raumstation ISS ein Experiment zur thermischen Konvektion im rotierenden Kugelspalt unter Einfluss eines künstlichen, mit Hilfe des dielektrophoretischen Wirkungsprinzips aufgebauten Zentralkraftfeldes durchgeführt (vgl. Abb. 1 und 2). Ziel des Experimentes ist die Untersuchung der Strukturbildung und Stabilität der Strömung und der Übergang ins Chaos. Mit solchen Strömungen lassen sich so genannte geophysikalisch motivierte Strömungen im Inneren der Erde beschreiben. Dieses Experiment wurde und wird von numerischen und theoretischen Vorhersagen begleitet und trägt zum Verständnis geodynamischer Wärmeübertragungsmechanismen bei.

Ziel des Vorhabens war die Entwicklung und der Aufbau eines Fluidphysik-Experiments als "Demonstrator" für das GeoFlow-Projekt. Das beinhaltete auch die Entwicklung der Strömungsdiagnoseverfahren Wollaston-Schlieren-Interferometrie, Schlieren- und Schattentechnik (Aufbau und Betrieb der Messtechnik, Entwicklung der Auswertemethode) für die zum Einsatz kommende sphärische Geometrie. Analog den theoretischen und numerischen Vorhersagen für das Raumstationsexperiment kamen ebenfalls begleitende Computersimulationen für den Demonstrator zum Einsatz.

# 1.2 Vorraussetzung, unter denen das Vorhaben duchgeführt wurde

Die Aufgaben des Lehrstuhls Aerodynamik und Strömungslehre der BTU Cottbus umfassen neben der Lehre auch die Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der Strömungsmechanik, Aerodynamik und Messtechnik. Der Lehrstuhl führt national und international anerkannte Arbeiten auf dem Gebiet der experimentellen, theoretischen und numerischen Strömungsmechanik durch. Hierzu zählen sowohl Grundlagenuntersuchungen als auch anwendungsorientierte Forschungs- und Entwicklungsarbeiten in enger Kooperation mit Industriepartnern. Die Lehrveranstaltungen decken die Fachgebiete Strömungsmechanik, Aerodynamik, Messtechnik, Raumfahrtanwendungen sowie numerische Methoden ab und vermitteln so die Basis zur Lösung anspruchsvoller Forschungs- und Entwicklungsaufgaben. Am Lehrstuhl sind ca. 20 wissenschaftliche und technische Mitarbeiter beschäftigt. Ende 2004 wurde das Fluid-Centrum eröffnet. Dort stehen auf 900 qm Windkanäle, Strömungs- und Aeroakustik-Prüfstände sowie Raumfahrt-Labore und Rechentechnik für F- und E-Projekte zur Verfügung.

#### 1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Planung und Ablauf des Vorhabens waren konsistent nach den Vorgaben des Erst-Antrags und den in den Jahresberichten 2001–2007 dokumentieren Fortschritten, sowie sich aus den Aufstockungsanträgen 2002, 2005 und 2007 ergebenden Aufgaben. Die folgende Tabelle listet die Arbeitspakete und ihren Bearbeitungszeitraum, sowie die Tätigkeiten bei den Schnittstellen zur Europäischen Raumfahrtagentur ESA, der Industrie und den Kooperationspartnern, die u.a. als ESA Topical Team organisiert sind.

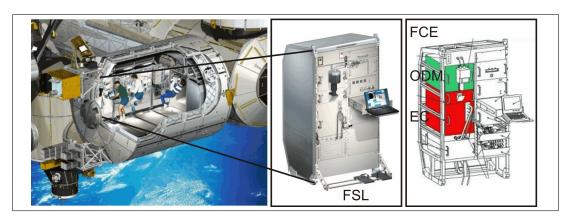


Abbildung 1: COLUMBUS und das FSL-Labor: Prinzipsdarstellung mit freundlicher Genehmigung von ESA.



Abbildung 2: Hardware des Raumstationsexperiments. Links: Fluid Science Laboratory (FSL); rechts: Experimentcontainer (EC) mit integrierter Experimentzelle (oben), Experimentzelle aus dem lehrstuhleigenen Science Reference Model/Demonstrator (unten). FSL-Bild mit freundlicher Genehmigung von MARS, Neapel (Italien), EC-Bild mit freundlicher Genehmigung von ASTRI-UM, Friedrichshafen, Deutschland.

Experiment Container   Experiment Container	Arbeitspakete		2001 I II III	IV I	2002	Ξ	I VI	2003	=	I VI	2004 11 111	ΛI	I	2005 II II	Ξ	IV I	20	2006 11 111	IV I	I	2007	7 III IV
Authorized backgriche eines	Experiment C	Jontainer																				
Uniforteentable of the Control of th	Hardware:	• Auslegung und Betrieb eines						×				×	×						×	×	×	×
Design, Fertigung		Laborbread boards: Vorintegration, Anforder ungsliste Experiment an FSA		×																		
Weiter-Entwicklung Themostatisierung		Design, Fertigung		×																		
Integration im Labor (inkl. Messtechnik)		Zusammenbau Weiter-Entwicklung Thermostatisierung					×	×				×										
Design, Konstruktion Breadboard (BB),		Integration im Labor (inkl. Messtechnik)											×						;	;	;	;
Design, Konstruktion Breadboard (BB),		rests, Modifikationen, Detrieb (IIIKI. Messtechnik)														×			×	×	×	*
• Design, Konstruktion Engineering  Model (EM), Phase C/D; Astrium  • Design, Construction Flight Model  (FM), Phase C/D; Astrium  • Retruishment EM, Phase E/F;  • Retruishment EM, Phase E/F;  • Astrium  • Optische Tests BB; BTU, Astrium  • Optische Tests EM standalone; BTU,  Astrium  • Optische Tests EM standalone; BTU,  Astrium  • Optische Tests FM standalone; BTU,  Astrium  • Optische Tests FM standalone; BTU,  Astrium  • Optische Tests FM standalone; BTU,  Astrium  • Optische Base; BTU, E-USOCS,  Astrium  • Planung, Aufbau der  RASTRIUM  • Planung, Aufbau der  RASTRIUM  • Planung, RTU, RTU  RASTRIUM  • Planung, RTU  RASTRIUM  • RTU  RASTRIUM  • Planung, RTU  RASTRIUM  • Planung, RTU  RASTRIUM  • Planung, RTU  RASTRIUM  • RRU  RASTRIUM  • Planung, RTU  RASTRIUM  • RRU  RRU  RRU  RRU  • RRU  RRU  RRU		• Design, Konstruktion Breadboard (BB),						×														
Model (EM), Phase C/D; Astrium  • Design, Construction Flight Model (FM), Phase C/D; Astrium  • Refurbishment EM, Phase E/F; Astrium  • Optische Tests BB; BTU, Astrium  • Optische Tests EM standalone; BTU, Astrium  • Optische Tests EM integrated in FSL EM; BAStrium  • Optische Tests EM standalone; BTU, Astrium  • Optische Tests FM standalone; BTU, Astrium  • Planum, BTU, E-USOCS, Astrium  • Planum, ATRIX); BTU, BTU, BTU, BTU, BTU, BTU, BTU, BTU,		• Design. Konstruktion Engineering									×	×	×		<u>بر</u>							
• Design, Construction Flight Model (FM), Phase C/D; Astrium • Refurbishment EM, Phase E/F;  Astrium • Optische Tests BB; BTU, Astrium • Optische Tests EM integrated in FSL EM, FN Strium • Optische Tests EM integrated in FSL EM, FN Strium • Optische Tests EM integrated in FSL EM, Strium • Optische Tests FM standalone; BTU, Astrium • Planung, Entwicklung Experiment Flow Plan (MATRIX); BTU, ESA • User Home Base; BTU, E-USOCS, Astrium • Planung, Aufbau der  • User Home Base; BTU, E-USOCS, Astrium • Planung, Aufbau der  Redenennfanesstation BTU  Redenennfanesstation BTU		Model (EM), Phase C/D; Astrium																				
• Christian (Prince Cyl.), Astrium • Optische Tests BB; BTU, Astrium • Optische Tests EM standalone; BTU, Astrium • Optische Tests EM standalone; BTU, Astrium • Optische Tests FM standalone; BTU, Astrium • Planung, Entwicklung Experiment Flow Plan (MATRIX); BTU, ESA • User Home Base; BTU, E-USOCS, Astrium • Planung, Aufbau der • Variand (Arthau der  Astrium • Planung, Aufbau der  Astrium • Planung, BTU, E-USOCS, Astrium		• Design, Construction Flight Model																	×	×		
Astrium  • Optische Tests BB; BTU, Astrium  • Optische Tests EM standalone; BTU, Astrium  • Optische Tests EM integrated in FSL EM; Strium  • Optische Tests EM integrated in FSL EM; Strium  • Optische Tests FM standalone; BTU, Astrium  • Optische Tests FM standalone; BTU, Astrium  • Optische Tests FM standalone; BTU, Astrium  • Planung, BTU, E-USOCS, Astrium  • Vion: • Planung, Aufbau der  • Planung, Aufbau der  • Planung, Aufbau der  Rodenenmfanesstation: BTU  Bodenenmfanesstation: BTU		• Refurbishment EM, Phase E/F;																				×
Optische Tests BB; BTU, Astrium     Optische Tests EM standalone; BTU,     Astrium     Optische Tests EM integrated in FSL     EM; BTU, Astrium, MARS     Optische Tests FM standalone; BTU,     Astrium     Astrium     Lion:    Optische Tests FW standalone; BTU,     Astrium     Lion:    Optische Tests FM standalone; BTU,     Astrium		Astrium																				
Astrium  • Optische Tests EM integrated in FSL  EM; BTU, Astrium, MARS  • Optische Tests FM standalone; BTU, Astrium  • Planung, Entwicklung Experiment Flow Plan (MATRIX); BTU, E-USOCS, Astrium  • Planung, Aufbau der  x x x  Astrium  • Planung, Aufbau der  x x x  Astrium  • Planung, Aufbau der  x x x  Astrium  • Planung, PTII	Tests:	<ul> <li>Optische Tests BB; BTU, Astrium</li> <li>Optische Tests EM standalone; BTU,</li> </ul>									×									×		
Optische Tests EM integrated in FSL     EM; BTU, Astrium, MARS     Optische Tests FM standalone; BTU,     Astrium     Astrium     Astrium     Bodenemnénsestation: BTI     Bodenemnénsestation: BTI		Astrium																				
Optische Tests FM standalone; BTU,     Astrium     Astrium     Astrium     Optische Tests FM standalone; BTU,     Astrium     Optische Tests FM standalone; Ax x x x x x x x x x x x x x x x x x x		• Optische Tests EM integrated in FSL																			×	×
Astrium  • Planung, Entwicklung Experiment Flow  • Planung, Entwicklung Experiment Flow  Nathanang, Entwicklung Experiment Flow  × × × ×  Astrium  • Planung, Aufbau der  × × × ×  Bodenemnénnésstation. RTI																				×		
Planums, Aufbau der  • Viser Home Base, BTU, E-USOCS,  Astrium  • Planums, Aufbau der  x x x x Rodenemnénnesstation. RTII	Oneration.	Astrium  Planing Entwickling Experiment Flow						>	×									>	×	×	>	>
CS, x x x x x x x x x x x x x x x x x x x	Operation.	Plan (MATRIX); BTU, ESA						<	<									<	<	<	<	<
× × ×		• User Home Base; BTU, E-USOCS,																	×	×	×	×
× × ×		Astrum																				
		<ul> <li>Planung, Aufbau der Bodenempfangsstation: BTU</li> </ul>						×	×											×	×	×

Arbeitspakete		2001 I II III IV I	2002 II III	IV I	2003	VI IV	1 11	2004	I VI	2005 II II	Η.	I VI	2006 п п	Η.	I > I	2(	2007 II III	VI
Wissenschaft]	Wissenschaftliche Arbeitspakete																	
Simulation:	• Stabilitäts-Analyse für verschiedene Spaltweiten $\eta$ , Prandtl-Zahlen $Pr;$ BTU,	×	×	×	×	×	×	×	×									
	Leeds  • 30 direkte numerische Simulation:			×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	Variation fur verscn. $Fr$ , $\eta$ , MALKLX; BTU, Leeds																	
	• Numerische Simulation für Messtechnik WSI: RTII								×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	• 2D/3DNumerische Simulation für	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
Thousand.	Laborbreadboard; BTU  Bifurbations Angless			;		;												
ı neone:	Moden-Interaktion, Einfluss			<	<	< <	< <	<	< <	<	<	< <	×					
	verschiedener Zentralkräfte); INLN,																	
	Dresden, BTU																	
	• Biturkation-Analyse													×	×	×	×	×
	(Fladverloigungsmethode); Fotsdam, ESPCI. BTU. Leeds																	
Experiment:	Arbeiten im Labor																	
	• Entwicklung, Aufbau und Betrieb eines	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	modularen																	
	Wollaston-Schlieren-Interferometers für																	
	das Laborbreadboard; B1U, 15L  Adamtionsontil für Schnittstelle	>	<b>&gt;</b>	>														
	Messtechnik - Laborbreadboard; BTU	<		<														
	Entwicklung										×	×	×	×	×	×	×	×
	Bildverarbeitung/Auswertetools für																	
	Experimentdaten aus dem																	
	Raumstationsexperiment; BTU																	
	Iracer-Fartikel-Studie für Hochensunmerbroftfold: BTII FSA										×	×	×					
	Theomopanium son and differentially			;														
	Rotation; BTU			<	<	< <												
Arbeitspakete		I II III IV I 2001	11 111 2002	I >1	11 11 2003	III IV	1 12	11 111 2004	IV I	11 II 2005	-	IV I	11 200	111 III 2006	IV	11 20		VI III 77
4						ı	l	 			ı !					i		

Arbeitspakete	-	2001 II III IV I	2002	2003	2004	2005	2006	2007
Meilonetaino								
• Preliminary Design Review (PDR)					×			
• Critical Design Review (CDR)						×		
<ul> <li>Ankunft EC GeoFlow FM am KSC</li> </ul>								×
• Topical Team Aktivitäten (Treffen)						×	×	×
Summer School					×			
• Tagungen (Auswahl):								
- Int. Couette Taylor Workhop		×		×		×		×
- Magnetohydrodynamics Lab. Exp. for				×				×
Geophysics and Astrophysics								
- European Geoscience Union, General			×	×	×	×		×
Assembly								
- LADOAN, GALA (intern. und			×		×	×		×
nationales Symp. Anwendung von								
Lasermessmethoden in der								
Strömungsmechanik)								
- ELGRA General Assembly		×		×		×		×
- International Astronautical Congress							×	
- German Association Applied		×	×	×	×	×		
Mathematics & Mechanics, General								
Assembly								
	Ι	II III IIV II	II III IIV I	II III IV I	II III IV I	II III IV I	VI III II I VI III II I VI III II II AI III II	VI III II
Arbeitspakete		2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007

# 1.4 Anknüpfung an den wissenschaftlichen und technischen Stand

Geophysikalisch motivierte experimentelle, numerische und theoretische Untersuchungen von Konvektionsströmungen in rotierenden Kugelschalenmodellen haben zwar eine lange Tradition. Entsprechende experimentelle Untersuchungen unter Mikrogravitationsbedingungen, insbesondere Langzeituntersuchungen, sind aber bisher nur in geringem Umfang realisiert worden. Theoretische Überlegungen, dynamische geophysikalische Strömungsvorgänge, z.B. in der Atmosphäre oder Konvektionsströmungen im Kernbereich von Planeten bzw. im flüssigen äußeren Erdkern insbesondere unter Mikrogravitationsbedingungen zu untersuchen, wurden z.B. von [1] diskutiert.

Hart et. al [2] führten 1985 ein Space-Shuttle Experiment mit einem Halbschalenmodell durch, das 1995 in ein Nachfolgeexperiment mündete [3]. In ihren Experimenten konnten sie sowohl eine radiale Temperaturdifferenz wie auch einen Temperaturgradientenverlauf zwischen Äquator und Pol realisieren. Die auf der Erde zentral wirkende Gravitationskraft wurde von ihnen durch Anlegen eines Zentralkraft-Hochspannungsfeldes simuliert und sich ausbildende Strömungsmuster mit der Schlierentechnik visualisiert und analysiert. Die experimetellen Ergebnisse wurden darüber hinaus mit Ergebnissen aus numerischen Simulationen verglichen.

Der von Hart et. al ausgenutzte so genannte dielektrophoretische Effekt (vgl. [4]), der auf Flüssigkeiten unter Einfluss eines Hochspannungs-Wechselfeldes wirkt, wurde bereits zuvor und auch danach in Experimenten mit verschiedenen Geometrien für die Erzeugung eines künstlichen Kraftfeldes genutzt (vgl. [5]-[10]).

In Kugelspaltgeometrien nimmt die Wirkung der dielektrophoretischen Kraft nicht wie im Erdkernbereich mit dem Radius linear zu (vgl. z.B. [11]) sondern dagegen mit einer höheren Potenz ( $r^5$ ) ab. Untersuchungen von z.B. Früh [12] und Beltrame [13] zeigten, dass die geophysikalische Analogie des elektrischen Zentralkraftfeldes zum realen Gravitationsfeld der Erde trotz dieser Abweichung aber gegeben und die grundsätzliche Charakteristik der auftretenden Strömungen erhalten bleibt. Aus diesem Grund wird der dielektrophoretische Effekt auch im Geoflow-Experiment zur Erzeugung eines Zentralkraftfeldes verwendet.

Das Alleinstellungsmerkmal des Geoflow-Experimentes gegenüber bisher durchgeführten vergleichbaren Mikrogravitationsexperimenten besteht vor allem in der Möglichkeit, experimentelle Untersuchungen über einen Zeitraum von mehreren Wochen durchführen zu können. Dadurch ist nicht nur ein größerer Umfang an Parametervariationen (von rein konvektiven Strömungen bis hin zu Zentrifugalkraft-beeinflussten Strömungen) möglich. Das Verhalten komplexer Strömungen an kritischen Parameterpunkten sowie Übergangsszenarien zwischen verschiedenen Strömungsmustern können darüber hinaus genauer untersucht werden.

Weitere, aktuell in der Vorbereitungsphase befindliche europäische Raumstationsexperimente haben Untersuchungen zum Verhalten von Emulsionen und Schäumen, und von Transportprozessen in verdampfenden Flüssigkeiten zum Inhalt und sind nicht Gegenstand des in Geoflow geplanten Vorhabens.

Im Rahmen früherer und paralleler Forschungsvorhaben des ZE wurden sowohl wissenschaftlich als auch technisch vielseitige Erfahrungen in der Umsetzung und Durchführung von Experimenten von rotierenden Strömungen in Kugelgeometrien sowohl unter verschiedenen Mikrogravitationsbedingungen als auch im Labor unter dem Einfluss der natürlichen Gravitation gesammelt. Hier seien einzelne Vorarbeiten im Zusammenhang mit dem Raumstationsexperiment (ESA AO 99-049: "Simulation of Geophysical Fluid Flows under Micro-

gravity") stichpunktartig aufgelistet:

- $\bullet$  Untersuchungen zum elektrohydrodynamischen Kraftprinzip (Fallturm Bremen, 5 s)
- Untersuchungen instationärer Konvektion im Kugelspalt (Parabelflug, 25 s)
- Untersuchungen stationärer Konvektion im Kugelspalt (TCM-Wolna, 20 min)
- Eigene numerische Simulation thermischer Konvektion ohne/mit Rotation
- Vergleichende experimentelle Untersuchungen im Erdlabor (DFG gefördert)
- Untersuchungen zur thermischen Konvektion mit Rotation (GAS-KIK, 50 h, zusammen mit ZARM, Universität Bremen)

Detaillierte Beschreibungen finden sich in den Jahresberichten 2001 und 2002. Im Besonderen sind die Projekte TCM/WOLNA (DLR-Projekt, FKZ: 50 WM 9433) und GAS-KIK (DLR-Projekt, FKZ: 50 WM 9900) hervorzuheben. Unter Schwerelosigkeit wurde bei TCM/WOLNA ein 20minütiges Weltraum-Experiment als Raketenflug erfolgreich abgeschlossen, bei dem die Stabilitätsgrenzen für den Einsatz der thermischen Konvektion ohne Rotation (kritische Rayleigh-Zahlen) als Funktion der relativen Spaltweite gefunden wurden und damit theoretische und numerische Vorhersagen bestätigt werden konnten. Im Rahmen von GAS-KIK wurde erste theoretische und numerische Untersuchungen zur Strukturbildung von thermischer Konvektion im weiten rotierenden konzentrischen Kugelspalt vergleichend unter der Wirkung eines dielektrophoretisch erzeugten Zentralkraftfeldes unter kompensierter Gravitation (GAS-Experiment auf dem Shuttle) sowie unter terrestrischen Bedingungen (axiales Kraftfeld) systematisch durchgeführt. Aufgrund von Änderungen im Shuttle-Programm der NASA wurde das Experiment selber aber nicht mehr durchgeführt. Dieses Experiment hätte neben der wissenschaftlichen Untersuchung der Konvektion in weiten rotierenden Kugelspalten auch im Hinblick auf die Strömungsdiagnose der Wollaston-Schlieren-Interferometrie einen erheblichen Entwicklungsschritt zu dem Gesamtprojekt GeoFlow geleistet. Die technische Umsetzung einer homogenen Thermostatisierung wurde im Rahmen beider Experimente weiterentwickelt, so dass hier entsprechend angeknüpft werden konnte. Eine Herausforderung im Rahmen von GeoFlow und damit auch dieses Vorhabens blieb aber auch die Miniaturisierung des Experimentes als Anpassung an die Bedingungen im Experiment-Container des FSL.

#### Literatur

- [1] Yavorskaya, I., Fomina, M., Balyaev, N. I. and Yu, N., 1984, A simulation of central-symmetry convection in microgravity conditions, Acta Astronautica, 11, 179-183
- [2] Hart J.E., Glatzmaier G.A., Toomre J., 1986, Space-laboratory and numerical simulations of thermal convection in a rotating hemispherical shell with radial gravity, J. Fluid Mech., 173, 519-544
- [3] Hart J.E. et. al, 1999, Titel unbekannt, in: Nasa Technical Memorandum, NASA-TP-1999-209-576
- [4] Pohl H.A., 1978, Dielectrophoresis, Cambridge University Press, Cambridge

- [5] Smylie D.E., 1966, Thermal convection in dielectric liquids and modelling in geophysical fluid dynamics, Earth Planet Sci. Lett., 1, 339-340
- [6] Jones, T.B., 1978, Electrohydrodynamically enhanced heat transfer in liquids a review, Adv. Heat Transfer, 14, 107-148
- [7] Paschkewitz J.S. and Pratt D.M., 2000, The influence of fluid properties on electrohydrodynamic heat transfer enhancement in liquids under viscous and electrically dominated flow conditions, Exp. Thermal Fluid Sci., 21, 187-197
- [8] Snyder T.J. and Chung J.N., 2000, Terrestrial and microgravity boiling heat transfer in a dielectrophoretic force field, Int. J. Heat Mass Transfer, 43, 1547-1562
- [9] Sitte B., Brasch W., Junk M., Travnikov V. and Egbers C., 2001, Thermal flow in a rotating spherical gap with a dielectrophoretic central force field, in: Chossat, P. et al. (eds.), Dynamo and dynamics, a mathematical challenge, Kluwer, Dordrecht, 93-100
- [10] Sitte, B., Rath, H., 2003, Influence of the dielectrophoretic force on thermal convection, Experiments in Fluids, 34, 24-27
- [11] Kertz, W., 1995, Einführung in die Geophysik, Band I, Unveränd. Nachdr. der Aufl. 1992, BI-Wissenschaftsverl., Mannheim [u.a.], ISBN: 3-86025-695-5
- [12] Früh, W.-G., 2005, Using magnetic fluids to simulate convection in a central force field in the laboratory, Nonlin. Processes Geophys., 12, 877-889
- [13] Beltrame, P., Travnikov, V., Gellert, M. and Egbers, C., 2006, GEOFLOW: Simulation of convection in a spherical shell under central force field, Nonlin. Processes Geophys., 13, 413-423

#### 1.5 Kooperationen

#### ESA GeoFlow Projekt, AO 99-049

Dr. Pascal Chossat University of Nice, Sophia Antipolis, INLN, Frankreich

Dr. Rainer Hollerbach University of Leeds, UK

# ESA TopicalTeam, FKZ: 18950/05/NL/VJ

Prof. Laurette Tuckerman PMMH-ESPCI Paris, Frankreich Dr. Fred Feudel AG NLD, Universität Potsdam

Dr. Philippe Beltrame MPI Dresden

Prof. Innocent Mutabazi Le Havre University, Frankreich

assoz. Partner:

Prof. Friedrich Seiler, Dr. Julio Srulijes French-German Research Institute

of Saint-Louis (ISL), Frankreich

Die Kooperation im Rahmen des ESA Topical Team findet im Wesentlichen durch das gemeinsame Arbeiten insbesondere an den numerisch/theoretischen Arbeitspaketen statt. Die

Schnittstellen sind in der Tabelle zum Ablauf des Vorhabens vermerkt. Regelmäßige Projektbesprechungen der Kooperationspartner auch unter Einbezug der ESA und dem Industriepartner EADS Astrium GmbH Friedrichshafen wurden ebenfalls durchgeführt und sind ebenfalls in der Tabelle zum Ablauf des Vorhabens gelistet. Inhalte der Treffen können den Jahresberichten seit 2005 entnommen werden.

# 2 Eingehende Darstellung des Vorhabens

#### 2.1 Verwendung der Zuwendung und der erzielten Ergebnisse

Die experimentelle Untersuchung der thermischen Konvektion im rotierenden Kugelspalt unter dem Einfluss eines künstlich aufgebauten Zentralkraftfeldes ist Thema des Mikrogravitationsexperimentes GeoFlow, das im Fluid Science Laboratory (FSL) des europäischen Moduls COLUMBUS der Internationalen Raumstation (ISS) Mitte April 2008 gestartet werden soll.

Die erfolgreiche Durchführung des ISS-Experimentes, inklusive nachfolgender Datenauswertung, bedeutet im Vorfeld eine Vielzahl von Arbeitspaketen, die am Lehrstuhl unter intensivem Einsatz der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter (aus Projektmitteln des Vorhabens finanziert und darüber hinaus auch aus Lehrstuhl eigener Finanzierung) sowie studentischer Hilfskräfte bearbeitet wurden. Aus dem hier zusammengefassten Vorhaben ist als Produkt konkret ein "FSL-Demonstrator" für Fluid-Physik-Experimente auf der ISS entstanden, der die Originalabmessungen und die Funktionalitätsmerkmale des mittlerweile im COLUMBUS-Modul der ISS betriebenen Experimentcontainers (Flugmodells) hat (vgl. Abb. 3). Damit ist es unter abweichenden Erd-Randbedingungen möglich, wesentliche Inhalte der Experiment-prozedur und Datenauswertung bereits im Vorfeld des Raumstationsexperimentes durchzuführen, die vorgesehenen Messtechniken anzuwenden sowie geeignete Bildauswerteverfahren für die Datenanalyse zu entwickeln. Eine optimale Vorbereitung für eine erfolgreiche Experimentdurchführung ist damit gegeben.

Numerische Untersuchungen, hierzu gehören sowohl 3D-Simulationen des Strömungs- und Temperaturfeldes als auch nichtlineare Stabilitätsanalysen, wurden für den im ISS-Experiment vorgesehenen Untersuchungsbereich des Parameterraums, aufgespannt durch die freien Parameter (Rotationsrate, Temperaturdifferenz, Hochspannung), durchgeführt. Ebenso werden aus den numerischen Daten so genannte künstliche Interferogramme berechnet. Damit ist im Vorhinein nicht nur die Analyse von im Experiment zu erwartenden Strömungszuständen möglich, sondern auch die Identifizierung von aus strömungsmechanischer Sicht interessanten Parameterbereichen und Übergangsszenarien. Die numerisch berechneten Interferogramme werden für die spätere Auswertung der experimentell gewonnenen Interferogramme und vor allem auch für die Zuordnung der Interferogrammmuster zu jeweiligen Strömungstypen, eingesetzt (vgl. Abb. 4). Die im Rahmen der numerischen Arbeiten entstandenen umfangreiche Parameterstudien stehen in Form einer Datenbank für die Auswertung der Experimentdaten des Raumstationsexperimentes zur Verfügung.

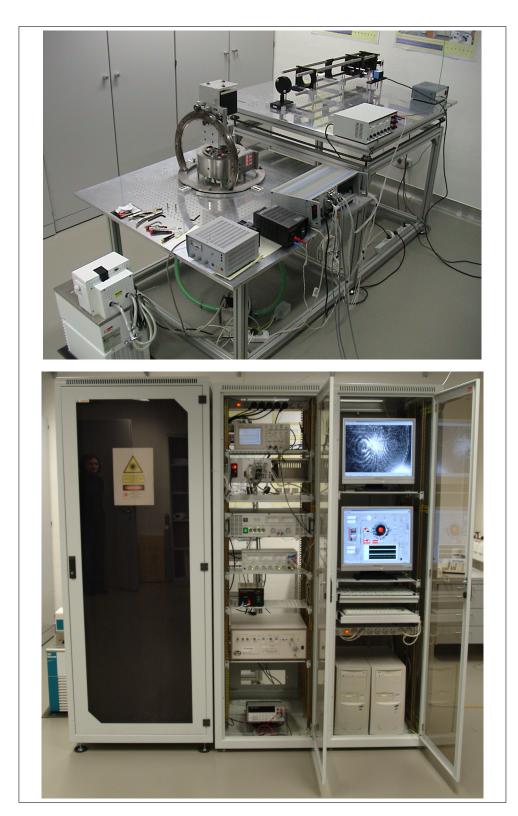


Abbildung 3: Blick in das GeoFlow-Labor am Lehrstuhl. Oben: Science Reference Model/Demonstrator während des Experimentaufbaus, Unten: Experimentsteuerung mit Elektronikschrank (Mitte) sowie Computer mit Steuerungssoftware und Messbilddarstellung (rechts).

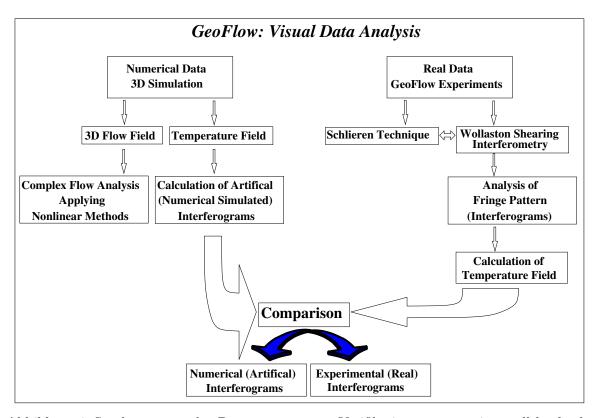


Abbildung 4: Struktogramm der Datenauswertung: Verifikation von experimentell beobachteten Strömungszuständen durch Analyse und Vergleich von numerisch berechneten und experimentell gewonnenen Daten.

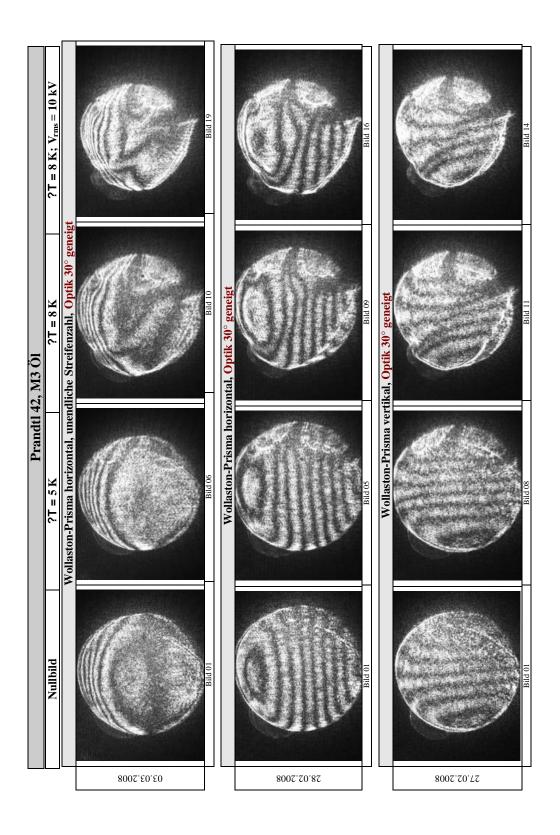
#### 2.1.1 Meilensteine und Verwertung experimenteller Arbeiten

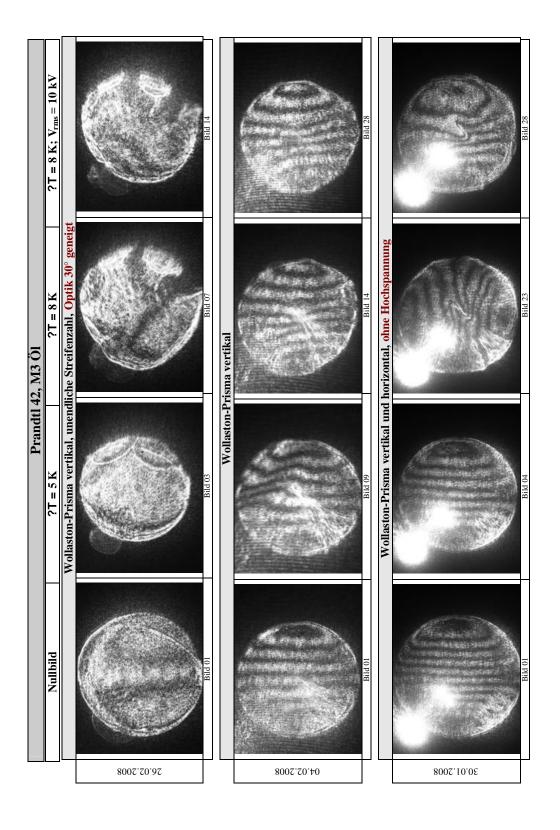
#### Messtechnik

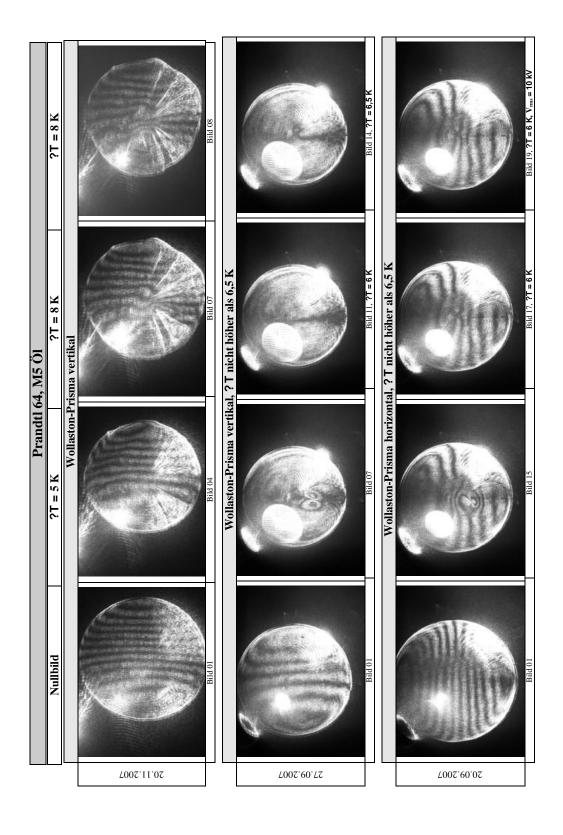
Entsprechend den Anforderungen durch das FSL wurde ein modulares Wollaston-Schlieren-Interferometer aufgebaut, das durch geringfügige Modifikationen im Optikaufbau auch den Einsatz als Schlieren-/Schattenoptik erlaubt (Jahresbericht 2002). Ein Vergleich der Verfahren wurde zunächst an Hand einer Strömung in einer von unten beheizten Küvette vorgenommen (Jahresbericht 2003). Zur Adaptierung an den Kugelspaltdemonstrator wurde dann ein justierbarer Messtisch realisiert und in Betrieb genommen (Jahresbericht 2004 und 2005). Die variable Messtechnik wird aktuell weiter erfolgreich für die Untersuchungen der Konvektion unter der im Labor vorherrschenden Einfluss der axial gerichteten Gravitationskraft eingesetzt und u.a. zur Optimierung der Bildverarbeitung für zu erwartenden Messbilder aus dem Raumstationsexperiment genutzt (seit 2006).

#### Kugelspaltdemonstrator

Das Demonstrator-Experiment wurde für die begleitenden Laboruntersuchungen für ein im Vergleich zum Raumstationsexperiment engeren Spalt umgebaut, da hier eine Vielzahl von strömungsmechanischen Instabilitäten zu erwarten sind. Diese sind zusätzlich notwendig, um die optischen Verfahren eingehend auch für komplexe Strukturen zu evaluieren. Die Messprotokolle ausgewählter Untersuchungen im Labor zeigen unterschiedliche Einstellungen für das Wollaston-Prisma und den Blickwinkel der Messoptik. Stimmen zwei Messbilder, die mit horizontaler und vertikaler Justierung des Prismas aufgenommen wurden, überein, so kann hier in einer qualitativen Vorabanalyse von einer axialsymmetrischen Strömung gesprochen werden. Der Blickwinkel der Messoptik hat vor allem einen Einfluss auf das Messbild, wenn dreidimensionale komplexe Strömungen vorliegen. Die Verwendung von zwei unterschiedlichen Ölen (unterschiedlicher Viskosität) zeigt in den Messbildern erste qualitative Unterschiede der Strömungsmuster. Diese aktuell weiter verfolgten experimentellen Untersuchungen fließen auch in die Verifizierung der ersten dreidimensionalen numerischen Simulationen ein.







# 2.1.2 Meilensteine und Verwertung numerischer Arbeiten ISS-Experiment

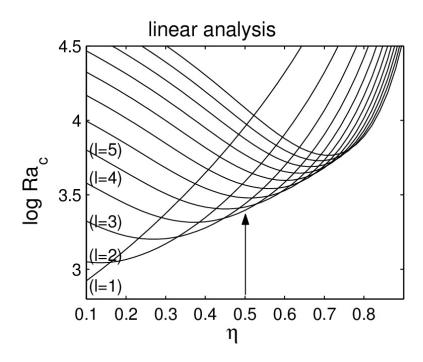


Abbildung 5: Ergebnisse der Stabilitätsanalysen für den nicht-rotierenden Fall. Im nicht-rotierenden Fall zeigen die Kurven den Einsatz der Konvektion und die höchstmögliche Wellenzahl der Strömung.

Nachdem zu Beginn des Projektes die Stabilitätsanalysen den Einsatz der Konvektion und der ersten Instabilitäten für sämtliche möglichen Experiment-Parameterkonfigurationen demonstrierten (vgl. Abb. 5 und 6), folgten direkte numerische Simulationen für den geplanten Experimentablauf. Dieser im Lauf des Berichtszeitraumes auf Grundlage der ESA-Randbedingungen und eigener numerischer Voruntersuchungen permanent weiterentwickelte Ablaufplan für den Experimentbetrieb auf der Raumstation sieht eine umfangreiche Variation der freien Parameter wie der Hochspannung (Einfluss der Zentralkraft), des Temperaturgradienten (Auftrieb, Rayleigh-Zahl  $Ra_{central}$ ,  $Ra_{central} \propto (V_{\rm rms}^2 \Delta T)$ ,  $V_{\rm rms}$ =effektive Hochspannung,  $\Delta T$ =Temperaturdifferenz) und der Rotation (Taylor-Zahl Ta,  $Ta \propto \Omega$ ,  $\Omega$ =Rotationsrate) vor, wobei aktuell vorgesehen ist, die Hochspannung auf einem konstanten Wert zu belassen. Durch die Variation von Temperaturgradient und Rotationsrate in kleinen Schritten lassen sich sehr viel tiefergehende experimentelle Untersuchungen durchführen. Für die begleitende numerische Untersuchung des Raumstationexperimentes ergab sich die Notwendigkeit von Strömungssimulationen analog dieses stark erweiterten Experimentablaufplanes (vgl. Abb. 7).

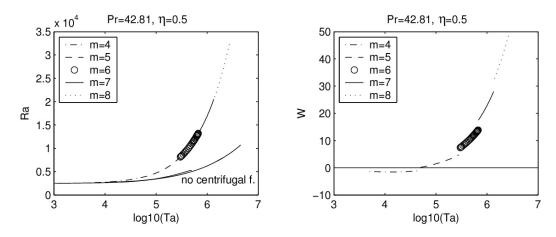


Abbildung 6: Ergebnisse der Stabilitätsanalysen für den rotierenden Fall. Im rotierenden Fall liegt eine Grundströmung vor. Die Stabilitätskurven zeigen die erste Instabilität der Grundströmung.

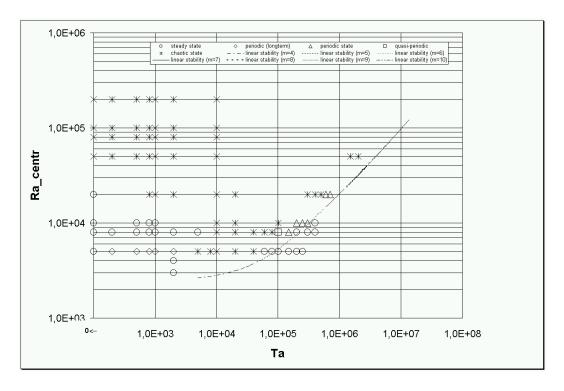


Abbildung 7: Experimentparameterraum und numerisch berechnete Zustände

Der wesentliche Teil des Ablaufplanes geht wie folgt von statten. Die Hochspannung wird auf das Maximum von  $V_{rms} = 10 \ kV$  eingestellt, um ein möglichst reines Zentralkraftfeld unter den Mikrogravitationsbedingungen der Raumstation aufbauen zu können. Im Fokus stehen die Variation des Temperaturgradienten und die der Rotation. Hier werden zwei Hauptschleifen durchlaufen. In der ersten Hauptschleife des Kerns wird die Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Außenkugel kontinuierlich erhöht. Hier wird keine Rotation überlagert. In der zweiten Hauptschleife wird pro Arbeitsschritt eine Temperaturdifferenz eingestellt und dann die Rotationsrate beginnend bei n=0 Hz erhöht. Wird das Maximum der Rotationsrate erreicht, wird das Experiment gestoppt, um die anfallende Menge an Daten von der Raumstation herunterzuladen. Anschließend wird diese Vorgehensweise so fortgeführt, indem wieder ein  $\Delta T$  eingestellt und mit n überlagert wird. Für die Parameterkonfiguration bedeutet das zunächst auch, dass der Bereich ohne Rotation zweimal untersucht wird. Indem hier aber das "Anfahren" des Temperaturgradienten in der einen Schleife kontinuierlich geschieht und in der anderen Schleife immer von Null beginnend der Temperaturgradient angesteuert wird, verändert man die Anfangsbedingungen. Dies kann Einfluss auf die Strukturbildung und Stabilität der Strömung haben und kann im Rahmen dieser Arbeitsweise mit untersucht werden (vgl. Abb. 8 und 9). Im Bereich der rotierenden Zustände zeigen sich komplexe Muster und Driftraten, die mit der Stabilitätsanalyse vorhergesagt und mittlerweile mit den direkten numerischen Simulationen verifiziert werden konnten (vgl. Abb. 10 und 11). Diese Untersuchungen sind aufgrund des gegenüber der ursprünglichen Planung stark erweiterten Experimentplanung (siehe auch Aufstockungsantrag 2007) und des sehr hohen Rechenaufwandes noch nicht abgeschlossen und werden im Rahmen des Projektes "Durchführung und Auswertung des Kugelspaltexperiments GeoFlow auf der Internationalen Raumstation ISS" (DLR-Projekt, FKZ: 50 WM 0822) weiterverfolgt.

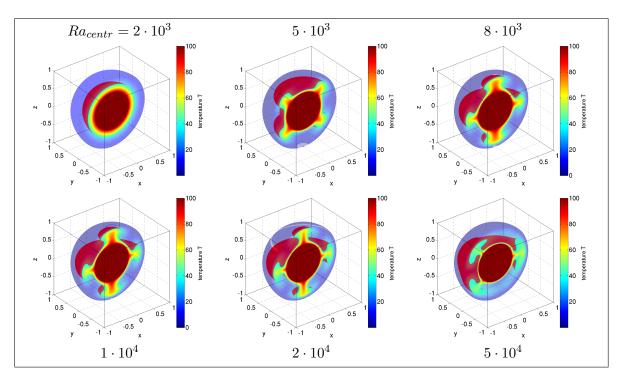


Abbildung 8: Konvektion im nicht-rotierenden Kugelspalt bei  $\eta=0.5,\ Pr=64.64,\ Ta=0,\ Ra_{centr}$ nimmt schrittweise zu.

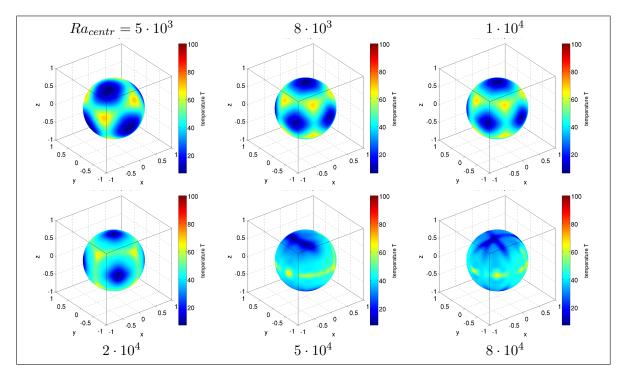


Abbildung 9: Konvektion im nicht-rotierenden Kugelspalt bei  $\eta=0.5,\ Pr=64.64,\ Ta=0,\ Ra_{centr}$  wird direkt eingestellt.

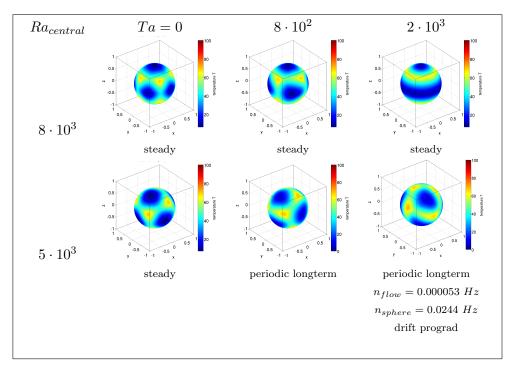


Abbildung 10: Konvektion im rotierenden Kugelspalt bei  $\eta=0.5,\, Pr=64.64,\, Ra_{centr}$  fest, Bereich niedriger Rotationsrate.

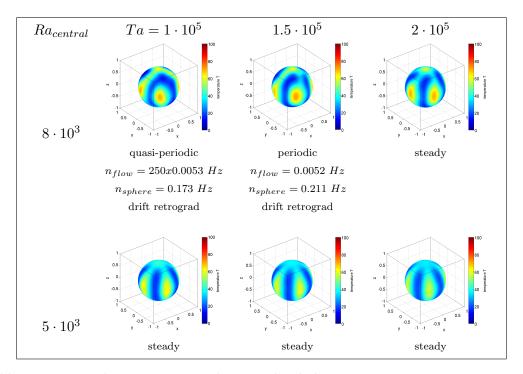


Abbildung 11: Konvektion im rotierenden Kugelspalt bei  $\eta = 0.5$ , Pr = 64.64,  $Ra_{centr}$  fest, Bereich mittlerer Rotationsrate.

#### Labor-Experiment

Die im FSL für GeoFlow genutzte Messtechnik der Wollaston-Schlieren-Interferometrie erlaubt quantitative Analysen. Die Auswertemethode basiert sowohl auf der numerischen Simulation von Temperaturfeldern, die in Interferogramme umgewandelt werden (Details siehe Jahresbericht 2004), als auch auf der Ermittlung eines integrativen Temperaturverlaufs im Kugelspalt auf Basis experimentell gewonnener Interferogramme (Darstellung der Entwicklungsschritte in den Jahresberichten 2006 und 2007). Die Simulationen für das Science Reference Model flossen unter anderem in die Entwicklung der Auswertemethode für die Strömungsdiagnose ein (Darstellung in den Abb. 12 und 13).

Die numerischen Untersuchungen für ein dem Raumstationsexperiment vergleichbares dimensioniertes Laborexperiment fanden in der ersten Projektphase für die Konvektion ohne Rotation statt (Abb. 14). Daher konnten die Berechnungen zweidimensional durchgeführt werden, da die Strömung im relevanten Parameterbereich zweidimensional ist. Die Ergebnisse dieser numerischen Untersuchungen forderten für ein experimentelles Science Reference Model eine andere, kleinere Spaltweite als im FSL EC GeoFlow spezifiziert (Jahresbericht 2004, Abschn. 4.5), um z.B. die Messtechnik mit Hilfe von auftretenden Instabilitäten zu evaluieren.

Ein axiales im Labor vorherrschendes Kraftfeld erfordert bei der Strömungssimulation wegen geringerer Symmetrien jedoch eine höhere Auflösung, so dass die Berechungszeiten und der erforderliche Speicherplatz im Vergleich zu den Berechnungen für ein Raumstationsexperiment um ein Vielfaches höher lagen (Jahresbericht 2003, Abschn. 4.1). Für das daher mit  $\eta=0.71$  realisierte Labormodell sind 3D-Rechungen unumgänglich, da 3D-Strömungen zu erwarten sind. Eine 3D-Simulation wird seit 2006 bewältigt. Nach der Evaluierung der Möglichkeiten für dreidimensionale Strömungssimulationen für vergleichende Laborexperimente (dominantes axiales Kraftfeld, Überlagerung durch Zentralkraftfeld und Rotation) konnte nach einer Clustererweiterung ein Benchmark für 3D-Rechnungen abgeschlossen werden (Beschreibung der Vorgehensweise im Jahresbericht 2005, Abschnitt 4.5, Darstellung erster und weiterer Ergebnisse im Jahresbericht 2006 und 2007, Abschnitt 1.2.1 Numerik und die folgenden Abb. 15).

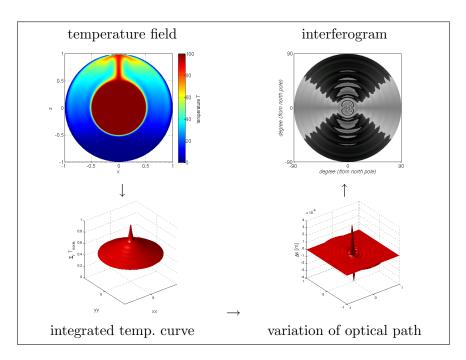


Abbildung 12: Vorwärtsmodellierung

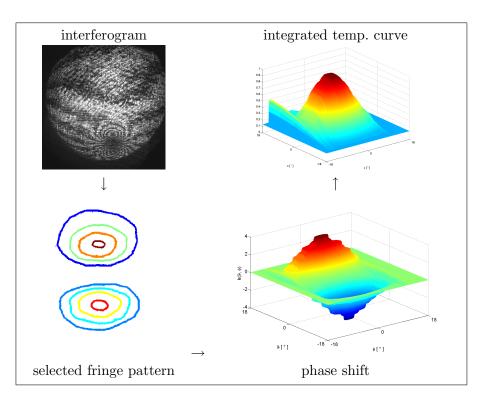
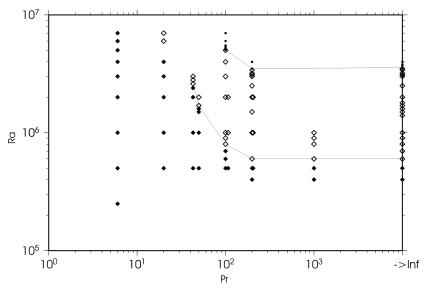
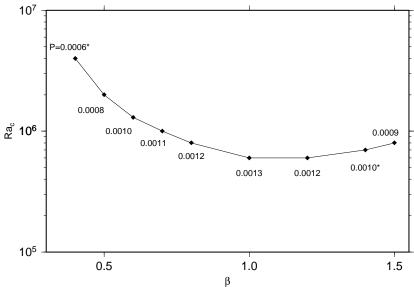


Abbildung 13: Rückwärtsmodellierung



Stabilitätsdiagramm für die thermische Konvektion im Kugelspalt mit einem Aspektverhältnis  $\beta=1$  (Radienverhältnis  $\eta=0.5$ ) unter dem Einfluss eines axialen Kraftfeldes. Die Symbole kennzeichnen die berechneten Zustände: Grundströmung ( $\blacklozenge$ ), periodisch sinkende Wirbel ( $\diamond$ ), irreguläres Strömungsmuster ( $\bullet$ ).



Stabilitätsdiagramm für die thermische Konvektion im Kugelspalt verschiedener Aspektverhältnisse  $\beta$ , Betrachtung bei unendlicher Prandtl-Zahl  $Pr \to \infty$  unter dem Einfluss eines axialen Kraftfeldes. Gekennzeichnet ist der Einsatz der periodischen Wirbelbildung ( $\blacklozenge$ ).

Abbildung 14: Konvektion im Kugelspalt unter Einfluss eines axialen Kraftfeldes in Abhängigkeit vom Arbeitsfluid (Prandtl-Zahl Pr) und von der Spaltweite  $\beta$ .

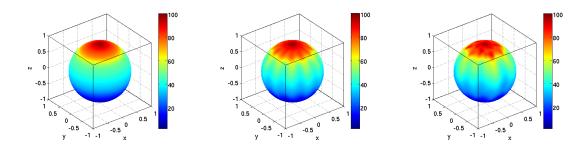


Abbildung 15: Konvektion im Kugelspalt mit  $\eta=0.714$  für Pr=0.7. Darstellung des Temperaturfeldes auf einer sphärischen Fläche in der Mitte des Kugelspalts: Stationäre 2D-Strömung für  $Ra=4\cdot 10^5$  (links), zeitabhängige 3D-Strömung mit 11 so genannten Bananen-Zellen für  $Ra=5\cdot 10^5$  (Mitte), zeitabhängige irreguläre 3D-Strömung für  $Ra=7\cdot 10^5$  (rechts).

#### 2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die geleistete Arbeit im Vorhaben war für die erfolgreiche Geräte-Vorentwicklung des GeoFlow-Raumstationsexperimentes notwendig und angemessen. Die theoretische und numerische Begleitung, sowie die experimentellen Laborarbeiten waren erforderlich, um die Durchführung des Raumstationsexperimentes optimal vorzubereiten. Insbesondere auch die Koordinationstätigkeit zwischen den beteiligten Projekt- und Kooperationspartnern stellte den erfolgreichen Abschluss der Vorentwicklung des Gesamtprojektes sicher.

# 2.4 Voraussichtlicher Nutzen/Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplanes

Der in diesem Projekt definierte Nutzen ist abgesehen von den technologischen Entwicklungen im Zusammenhang mit dem Aufbau des Fluid-Simulationslabors (Experimenthardware, Steuerungselektronik und Messtechnik) auf Grundlagenforschung im Bereich der experimentellen und numerischen Strömungsmechanik ausgerichtet. Die Ergebnisse der Experimente und auch die Kalibrierung/Verbesserung der numerischen Codes durch die Verifizierung der numerischen Rechnungen mit experimentellen Ergebnissen können zukünftigen wirtschaftlichen Projekten bzw. wissenschaftlich-wirtschaftlichen Gemeinschaftsprojekten dienen.

Im BTU-Fluidsimulationslabor konzentrieren sich Untersuchungen zur Strömung im Kugelspalt auf dynamische und strukturbildende Mechanismen bei der Transition in die chaotische bzw. turbulente Strömung. Die in den Experimenten gewonnenen Erkenntnisse tragen zum grundlegenden Verständnis des laminar-turbulenten Umschlags in der Strömungsmechanik bei, z.B. aktive Strömungskontrolle, Relaminarisierung, Turbulenzentstehung, und sind ebenso bedeutend für die Forschung zu geophysikalisch motivierten (turbulenten) Strömungen (konvektive Strömungen bei schneller Rotation).

Mit den gewonnenen Erkenntnissen zur elektrohydrodynamischen Theorie und der damit verbundenen Möglichkeit zur künstlichen Krafterzeugung unter  $\mu g$ -Bedingungen wird auch ein Beitrag für mögliche technische Anwendungen unter Erdbedingungen geleistet, z.B. für Mikropumpensysteme, Dosiersysteme, Wärmetauscher- und Abscheidersysteme. Im Rahmen der genannten bisherigen Untersuchungen wurden vom Antragsteller im Erdlabor oder bei Experimenten unter Schwerelosigkeit u.a. folgende Produkte entwickelt:

- Kugelspalt-Demonstrationsmodell zur Simulation geophysikalischer Bewegungen,
- Software-Paket: ,3D-Strömungssimulation zur Konvektion in Kugelspalten',
- Software-Paket: ,Zeitreihenanalyse',
- Software-Paket: ,Chaosdynamik',
- Schockfestes Schlieren- und Schatten- bzw. Interferometrieverfahren für sphärische Objekte,
- Hochspannungsgenerator für elektrohydrodynamische Kraftfeldgenerierung,

# 2.5 Darstellung des während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Während der Durchführung des Vorhabens sind keine Fortschritte auf dem Gebiet bei anderen Stellen bekannt geworden.

# 2.6 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen

# 2.6.1 Im Berichtszeitraum erfolgte Veröffentlichungen

# Studien-/ Diplom- / Masterarbeiten

- Bergemann, K., 2008, Konvektion im Kugelspalt: Numerische Untersuchung und Bifurkationsanalyse am Beispiel des GeoFlow-Experiments, Diplomarbeit Universität Potsdam
- Koch, S., 2007, Bildverarbeitung und Strömungsdiagnose für das GeoFlow Experiment
   Schwerpunkt: Bildaufbereitung und Extraktion der Strömungsmuster, Masterarbeit Universität Cottbus
- Dahley, N., 2007, Bildverarbeitung und Strömungsdiagnose für das GeoFlow Experiment Schwerpunkt: Bildauswertung und Ermittlung der Temperaturverteilung, Masterarbeit Universität Cottbus
- Huschto, M., 2006, Inbetriebnahme eines Kugelspaltexperimentes Qualifizierung der Strömungsmesstechnik und Optimierung der Experimentansteuerung, Diplomarbeit Universität Cottbus
- Hergt, A., 2004, Auslegung und Aufbau eines Laboraufbaues zur Interferometrie und Schlieren-/Schattenmesstechnik, Studienarbeit Universität Cottbus

#### Dissertationen

- Futterer, B.: Experimentelle und numerische Untersuchung von Kugelspaltströmungen. Dissertation Universität Cottbus, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 7 Strömungstechnik, Nr. 485, 2006, ISBN: 3-18-348507-9
- Immohr, J.: Sphärische Differentialinterferometrie für Raumfahrtanwendungen Konvektionsströmung im Kugelspalt unter dem Einfluss axialer und radialer Kraftwirkung. Dissertation ZARM Universität Bremen, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 7 Strömungstechnik, Nr. 481, 2006, ISBN: 3-18-348107-3
- Sitte, B.: Thermische Konvektion in Zentralkraftfeldern. Dissertation ZARM Universität Bremen, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 7 Strömungstechnik, Nr. 460, 2004, ISBN: 3-18-346007-6
- Travnikov, V.: Thermische Konvektion im Kugelspalt unter radialem Kraftfeld. Dissertation Universität Cottbus, Cuvillier Verlag Göttingen, 2004, ISBN: 3-86537-131-0

#### Zeitschriften

- von Larcher, Th.; Futterer, B.; Egbers, Ch.: GeoFlow: On the status of experimental preparation of spherical gap flow experiments with central force field on International Space Station (ISS), J. Phys.: Conf. Ser. (eingereicht)
- Futterer, B.; Hollerbach, R.; Egbers, Ch.: GeoFlow: 3D numerical simulation of super-critical thermal convective states, J. Phys.: Conf. Ser. (eingereicht)
- von Larcher, Th.; Futterer, B.; Egbers, Ch.; Hollerbach, R.; Chossat, P.; Beltrame, P.; Tuckerman, L.; Feudel, F.: GeoFlow European Microgravity Experiments on Thermal Convection in Rotating Spherical Shells under influence of Central Force Field, Journal of The Japan Society of Microgravity Application 2008 (in Druck)
- Futterer, B.; Gellert, M.; von Larcher, Th.; and Egbers, Ch.: Thermal Convection in rotating spherical shells: An experimental and numerical approach within GeoFlow, Acta Astronautica 62 (2008), 300–307
- Futterer, B.; Brucks, A.; Hollerbach, R.; Egbers, Ch.: Thermal blob convection in sperical shells, Int. J. Heat Mass Transfer 50 (2007), 4079–4088
- Hollerbach, R.; Junk, M.; Egbers, Ch.: Non-axisymmetric instabilities in basic state spherical Couette flow Fluid Dynamics Research 38 (2006), 257–273
- Beltrame, P., Travnikov, V., Gellert, M., and Egbers, Ch.: GEOFLOW: Simulation of convection in a spherical gap under central force field, Nonlinear Processes in Geophysics 13 (2006), 1–11
- Gellert, M.; Beltrame, P.; Egbers, Ch.: The GeoFlow experiment spherical Rayleigh-Bénard convection under the influence of an artificial central force field, J. Phys.: Conf. Ser. 14 (2005), 157–161
- Hollerbach, R.; Futterer, B.; More, T.; Egbers, Ch.: Instabilities of the Stewartson layer, part 2. Supercritical mode interactions. Theor. Comp. Fluid Dynamics 18 (2004), 197–204
- Beltrame, P.; Egbers, C.; Hollerbach, R.: The GEOFLOW-experiment on ISS (part III): Bifurcation analysis. Advances in Space Research 32 (2003), Nr. 2, 191–197
- Travnikov, V.; Egbers, C.; Hollerbach, R.: The GEOFLOW-experiment on ISS (part II): Numerical simulation. Advances in Space Research 32 (2003), Nr. 2, 181–189
- Egbers, C.; Beyer, W.; Bonhage, A.; Hollerbach, R.; Beltrame, P.: The GEOFLOW-experiment on ISS (part I): Experimental preparation and design. Advances in Space Research 32 (2003), Nr. 2, 171–180
- Travnikov, V.; Rath, H. J.; Egbers, Ch.: Stability of natural convection between spherical shells: Energy Theory. Int J. Heat Mass Transfer 45 (2002), 4227–4235

#### Veröffentlichungen in Tagungsbänden und Vorträge / Poster

- Egbers, Ch., Futterer, B., Bergemann, K., Feudel, F.: Dynamics of thermal convective flows in spherical shells (GEOFLOW), GAMM-Tagung, 31. März 4. April 2008, Bremen
- von Larcher, Th.; Futterer, B.; Egbers, Ch.: The GeoFlow-Experiment on International Space Station (ISS): Research on Thermal Convective Flows in a Spherical Gap under influence of a Central Force Field. Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin e.V. "50 Jahre Weltraumforschung", 2007
- Futterer, B.; Larcher, von Th.; Egbers, Ch.: Non-rotational and rotational regimes of spherical gap flows and their influence on thermal convection in a set-up with central force field. MHD Laboratory Experiments for Geophysics and Astrophysics, 1–3 October 2007, Museo Diocesano, Catania, Italy
- Futterer, B.; von Larcher, Th.; Egbers, Ch.: GeoFlow: The ISS experiment and 3D numerical simulation on thermal convection in spherical shells, European Low Gravity Research Association (ELGRA) Biennial Symposium and General Assembly 2007, 4–7 September, Florence, Italy
- Futterer, B.; Koch, S.; Dahley, N; von Larcher, Th.; Scurtu, N.; Jehring, L; Egbers, Ch.: Das GeoFlow-Experiment auf der ISS: Interferogrammauswertung für die thermische Konvektion im Kugelspalt, Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik, 15. Fachtagung der Deutschen Gesellschaft für Laser Anemometrie (GALA) e.V., 4.-6. September 2007, Rostock, ISBN-Nr: 978-3-86009-007-7
- Scurtu, N.; Futterer, B.; Egbers, Ch.: Three-dimensional natural convection in spherical annuli, 15th International Couette Taylor Workshop, July 9-12, 2007, LMPG, Le Havre University, Le Havre, France
- Futterer, B.; Gellert, M.; Travnikov, V.; von Larcher, Th.; Egbers, Ch.: Numerical Studies for GeoFlow: Dynamics of Thermal Convection in Rotating Spherical Shells, European Geosciences Union (EGU) General Assembly 2007, 15. 20. April 2007, Wien, Österreich
- Beltrame, P.; Chossat, P.; Egbers, Ch.: The (3,4) Spherical Mode Interaction in the GEOFLOW-experiment and Astrophysical Framework, European Geosciences Union (EGU) General Assembly 2007, 15.–20. April 2007, Wien, Österreich
- Egbers, Ch.: The GEOFLOW experiment on ISS: Experiments and numerical simulation of geophysical fluid flows. Inst. für Raumsimulation, DLR, 25.10.2006, Köln
- Futterer, B.; Gellert, M.; Huschto, M.; von Larcher, Th.; Egbers, Ch.: Thermal convection in rotating spherical shells: an experimental and numerical approach within GEOFLOW. 3rd Germany-China Workshop on Microgravity & Space Life Sciences, DLR, 9.–11. Oct. 2006, Berlin
- Futterer, B.; Gellert, M.; Huschto, M.; von Larcher, Th.; Egbers, Ch.: Thermal convection in rotating spherical shells: an experimental and numerical approach within GEOFLOW. 57th Int. Astronautical Congress (IAC), Valencia, Spain, 2–6 Oct., 2006

- Futterer, B., Gellert, M., Huschto, M., von Larcher, Th., Egbers, Ch.: Thermal convection in rotating spherical shells: an experimental and numerical approach within GeoFlow. Geodynamik Workshop 2006, 27. 29. September 2006, MPS, Katlenburg-Lindau
- Futterer, B.; Gellert, M.; Egbers, Ch.: Das GeoFlow-Experiment auf der ISS: Simulation optischer Messverfahren für die thermische Konvektion im Kugelspalt. Proceedings der 13. GALA-Fachtagung "Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik", 6.-8. September 2005, Cottbus, Hrsg.: C. Egbers, L. Jehring, T. von Larcher u.a., ISBN 3-9805613-2-1
- Egbers, C.; Travnikov, V.; Futterer, B.; Gellert, M.; Beltrame, P.: Supercritical thermal convective motions in spherical shells under central force field (GEOFLOW). European Geosciences Union (EGU) General Assembly 2005, 24.–29. April 2005, Wien, Österreich
- Futterer, B.; Gellert, M.; Egbers, Ch.: Das GeoFlow-Experiment auf der ISS: Interferometrie und Schlieren-/Schattenmesstechnik als optische Messverfahren für die thermische Konvektion im Kugelspalt. Proceedings der 12. GALA-Fachtagung "Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik", 7.-9. September 2004, Karlsruhe, Hrsg.: B. Ruck, A. Leder, D. Dopheide, ISBN 3-9805613-1-3
- Beltrame, P.; Egbers, C.; Travnikov, V.; Hollerbach, R.: The GeoFlow experiment: Experimental preparation, bifurcation analysis and numerical simulation. Proceedings of "The International Symposium on Physical Sciences in Space (ISPS 2004)", Toronto, 23. 27. Mai 2004
- Egbers, C.; Beltrame, P.; Gellert, M.; Travnikov, V.; Futturer, B.: Simulation of super-critical thermal convective motions in the spherical gap flow experiment under central force field (GeoFlow). Proc. 7th Drop Tower Days, Bremen, 12.-15.09.2004
- Beltrame, P.; Egbers, C.: The (3,4) mode interaction in the GeoFlow framework. In: Proc. Appl. Math. Mech. 4 (2004), 474–475
- Futterer, B.; Hollerbach, R.; Egbers, C.: Periodical convective flow in spherical shells. In: Proc. Appl. Math. Mech. 4 (2004), 482–483
- Travnikov, V.; Hollerbach. R.; Egbers, C.: Thermische Konvektion im Kugelspalt unter radialem Kraftfeld: Dreidimensionale Strömung. GAMM-Tagung, 21.- 27. März 2004, Dresden
- Beltrame, P.; Egbers, C.; Hollerbach, R.: Interaction (2,3) in the GeoFlow experiment on the International Space Station (ISS). Int. Turbulence Initiative (ITI-workshop), Sept. 2003, Bad Zwischenahn, Germany
- Beltrame, P.; Egbers, C.: GeoFlow: Geophysical fluid flow experiments in the Fluid Science Laboratory on ISS. 5th EUROMECH Fluid Mechanics Conference, 24-28 August 2003, Toulouse, France
- Beltrame, P.; Travnikov, V.; Egbers, C.: Time-dependent dynamics in the "GeoFlow" experiment on the ISS. Proceedings of 29th General Assembly of the European Geophysical Society (EGS), Nice, France, 2003

- More, T.; Futterer, B.; Hollerbach, R.; Egbers, C.: Instabilities of the Stewartson layer II. An experimental/numerical comparison. 13th International Couette Taylor Workshop, July 3-5, 2003, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Spain
- Beltrame, P.; Egbers, C.; Travnikov, V.: Heteroclinic cycles in the Geoflow-experiment on the International Space Station. 13th International Couette Taylor Workshop, July 3-5, 2003, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Spain
- Travnikov, V.; Hollerbach, R.; Egbers, C.: Natural convection in rotating spherical gap under the central force field. 13th International Couette Taylor Workshop, July 3–5, 2003, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Spain
- Egbers, C.; Beyer, W.; Bonhage, A.; Hollerbach, R.; Beltrame, P.: Experimental preparation and design of the GeoFlow experiment on ISS. 13th International Couette Taylor Workshop, July 3–5, 2003, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Spain
- Futterer, B.; Brucks, A.; Hollerbach, R.; Egbers, C.: Natural convection in wide spherical shells. Proc. Appl. Math. Mech. 3 (2003), 382–383
- Travnikov, V.; Egbers, C.; Hollerbach, R.: Natural convection in rotating spherical shells under a central force field. GAMM-conference 24–28 March 2003, Padua, Italy
- Egbers, Ch.; Futterer, B.; Travnikov, V.; Hollerbach, R.; Chossat, P.: Preparation of geophysical fluid flow experiments (GeoFlow) in the Fluid Science Laboratory on ISS. Proceedings of 34th COSPAR 2002 Meeting, Houston, Texas, USA, 10–19th Oct. 2002
- Egbers, Ch.: Simulation of Geophysical Fluid Flows under Microgravity (GeoFlow): Flow diagnostics and experiment concept for Fluid Science experiments. Proceedings of 11th Int. Symp. on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics. Lisbon. 8–11th July 2002
- Egbers, Ch.; Futterer, B.; Travnikov, V.; Hollerbach, R.; Chossat, P.: Preparation of Geophysical Fluid Flow Experiments with the Rotating Spherical Gap Flow Model in Space (GeoFlow). Proceedings of 27th General Assembly of the European Geophysical Society (EGS), Nice, France, 22.–26.April 2002
- Travnikov, V.; Hollerbach, R.; Egbers, Ch.: Thermische Konvektion im Kugelspalt unter axialem Kraftfeld. Jahrestagung der Gesellschaft für angewandte Mathematik und Mechanik (GAMM), Augsburg, 25–28 März 2002
- Egbers, Ch.: Konvektive Strömungen in rotierenden Systemen. Vortrag BTU-Workshop: "Geophysikalische Strömungen / Konvektion", 18./19. März 2002, Cottbus
- Sitte, B.; Immohr, J.; Hinrichs, J. O.; Maier, R.; Egbers, Ch.; Rath, H. J.: Rayleigh-Bénard convection in dielectrophoretic force fields. Proc. 12th Int. Couette-Taylor Workshop, Northwestern University, Evanston, Chicago, Sept. 6–8, 2001
- Brasch, W.; Sitte, B.; Egbers, Ch.: Numerical simulation of thermal convection in spherical shells: Preparation of Space experiments. Proc. 12th Int. Couette-Taylor Workshop, Northwestern University, Evanston, Chicago, Sept. 6–8, 2001

- Junk, M.; Hollerbach, R.; Egbers, Ch.: Numerical investigation of the flow in wide spherical gaps. Proc. 12th Int. Couette-Taylor Workshop, Northwestern University, Evanston, Chicago, Sept. 6–8, 2001
- Egbers, Ch.; Hollerbach, R.; Chossat, P.: Simulation of geophysical fluid flows under microgravity. European Low Gravity Research Association (ELGRA), Banyuls-sur-Mer, France 25–28 Sept. 2001

## 2.6.2 Geplante Veröffentlichungen

#### Zeitschriften

- Futterer, B.; Hollerbach, R., Egbers, Ch.: Dynamics of GeoFlow. J. Fluid Mech. (geplant)
- Futterer, B.; Dahley, N., Koch, S., Gellert, M., Larcher, Th. Egbers, Ch.: Wollaston Shearing Interferometry for Spherical Shell Convection. Meas. Sci. Techn. (in Vorbereitung)
- Scurtu, N., Futterer, B., Egbers, Ch.: Three-dimensional simulation for natural convection in spherical shells. Int. J. Heat Mass Transfer (in Vorbereitung)

#### Veröffentlichungen in Tagungsbänden und Vorträge / Poster

- 59th Int. Astronautical Congress, 29.09.—03.10.2008, Glasgow, UK
- Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress der DGLR, 23. 25. September 2008, Darmstadt
- 16. Fachtagung der Deutschen Gesellschaft für Laser Anemometrie (GALA) e.V., 9.-11. September 2008, Karlsruhe
- Futterer, B.; Bergemann, K.; Feudel, F.; Tuckerman, L.; Egbers, C.: ISS Experiment GeoFlow: Non-Rotational and Rotational Regimes of Thermal Convection in Rotating Spherical Shells. European Geosciences Union (EGU) General Assembly 2008, Vienna, Austria, 13–18 April 2008
- Futterer, B.; Hollerbach, R.; Chossat, P.; Beltrame, B.; Tuckerman, L.; Feudel, F.; Egbers, C.: GeoFlow: Ein Experiment zur Darstellung konvektiver Strömungen im Erdinneren. Jahrestagung der Deutschen Geophysikalischen Gesellschaft, 3.–6. März 2008, Freiberg

# A Erfolgskontrollbericht

# A.1 Beitrag des Ergebnisses zu den förderpolitischen Zielen

Das Vorhaben reiht sich nicht in ein konkretes Förderprogramm ein. Es ist Bestandteil des von Seiten der ESA übergeordnet geförderten europäischen Forschungslabors COLUMBUS, ein Mehrzwecklabor für die multidisziplinäre Forschung unter Schwerelosigkeit. GeoFlow ist ein europäisches Projekt unster deutscher Federführung. Das Vorhaben diente der Prototypentwicklung sowie den wissenschaftlichen Vorbereitungen des Gesamtprojektes und unterstütze die Koordinationsarbeiten im europäischen Verbund.

# A.2 Wissenschaftlich-Technisches Ergebnis, Nebenergebnisse, gesammelte Erfahrungen

Aus dem hier zusammengefassten Vorhaben ist als Produkt konkret ein "FSL-Demonstrator" für Fluid-Physik-Experimente auf der ISS entstanden, der die Originalabmessungen und die Funktionalitätsmerkmale des mittlerweile im COLUMBUS-Modul der ISS betriebenen Experimentcontainers (Flugmodells) hat. Zusätzlich entstand durch die Messtechnik-Peripherie, die für das Experiment für die Anwendung von optischen Messverfahren nötig ist, eine FSL-ähnliche Infrastruktur im Sinne eines Fluidsimulationslabors auf der Erde.

Messtechnik als auch Experimentzelle stehen für weitere strömungsphysikalische Untersuchungen zur Verfügung und werden aktuell auch für Vorarbeiten genutzt, die in einen Forschungs-Antrag zur Verifizierung von 3D-Strömungen im Kugelspalt unter Laborbedingungen fließen. Dort werden auch die Erfahrungen der numerischen Simulation zum Tragen kommen.

Im Rahmen der numerischen Arbeiten entstanden für die verschiedenen betrachteten Einflussparameter umfangreiche Programmpakete, die von zweidimensionaler Betrachtung auch in dreidimensionale Rechnungen überführt wurden.

#### A.3 Fortschreibung des Verwertungsplanes

A.3.1 Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen und erteilte Schutzrechte, die vom ZE oder von am Vorhaben Beteiligten gemacht oder in Anspruch genommen wurden, sowie ggf. auch deren standortbezogene Verwertung (Lizenzen u.a.) und erkennbare weitere Verwertungsmöglichkeiten.

Es wurden keine Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen gemacht/vorgenommen. Schutzrechte wurden vom ZE nicht erteilt oder in Anspruch genommen.

A.3.2 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende (mit Zeithorizont) - z.B. auch funktionale/wirtschaftliche Vorteile gegenüber Konkurrenzlösungen, Nutzen für verschiedene Anwendergruppen/-industrien am Standort Deutschland, Umsetzungs- und Transferstrategien (Angaben, soweit die Art des Vorhabens dies zulässt).

Wirtschaftliche Erfolgsaussichten standen zunächst nicht unbedingt im Vordergrund. Dennoch ergibt sich die Möglichkeit, die Ergebnisse der Experimente und auch die Kalibrierung/Verbesserung der numerischen Codes durch die Verifizierung der numerischen Rechnungen mit experimentellen Ergebnissen für zukünftige wirtschaftlichen Projekte bzw. wissenschaftlichwirtschaftlichen Gemeinschaftsprojekte zu nutzen (siehe auch ausführlichere Darstellung in Abschnitt 2.4).

A.3.3 Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende (mit Zeithorizont) - u.a. wie die geplanten Ergebnisse in anderer Weise (z.B. für weitere öffentliche Aufgaben, Datenbanken, Netzwerke, Transferstellen etc.) genutzt werden können. Dabei ist auch eine etwaige Zusammenarbeit mit anderen Einrichtungen, Firmen, Netzwerken, Forschungsstellen u.a. einzubeziehen

Wie in Abschnitt 2.4 dargestellt tragen die in den Experimenten gewonnenen Erkenntnisse zum grundlegenden Verständnis des laminar-turbulenten Umschlags in der Strömungsmechanik bei und sind ebenso bedeutend für die Forschung zu geophysikalisch motivierten (turbulenten) Strömungen.

Mit den gewonnenen Erkenntnissen zur elektrohydrodynamischen Theorie und der damit verbundenen Möglichkeit zur künstlichen Krafterzeugung unter  $\mu g$ -Bedingungen wird auch ein Beitrag für mögliche technischen Anwendungen unter Erdbedingungen geleistet Aktuell wird an der Entwicklung eines Parabelflugexperimentes gearbeitet, um die Fragestellung weiter zu bearbeiten (Aufstockungsantrag zum DLR-Vorhaben FKZ 50 WM 0822).

Der Transfer der wissenschaftlichen Ergebnisse geschieht im Wesentlichen durch Publikationen bzw. Konferenzbeiträge (national und international) sowie durch regelmäßige Projektbesprechungen der Kooperationspartner. Die Inhalte der Treffen im Rahmen des ESA Topical Teams 'Geophysical Flow Simulation' sind in den Jahresberichten 2005 bis 2007 wiedergegeben. Die erfolgten und geplanten Veröffentlichungen im Berichtszeitraum sind in diesem Abschlussbericht in Abschnitt 2.6 gelistet.

#### A.4 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Im Herbst 2007 wurde das GeoFlow Projekt von Seiten der ESA durch die PSAG (Physical Sciences Advisory Group) begutachtet. In dem hierfür von Seiten des ZE zu erstellenden Bericht wurden Wiederflugmöglichkeiten für weitere GeoFlow-Experimentphasen geprüft. Diese Möglichkeiten beinhalten die Verwendung einer Experimentflüssigkeit mit anderer Viskosität, der Einsatz einer anderen Spaltweite oder die Variation der Messtechnik. Auch eine andere zylindrische Geometrie wäre möglich. Im Januar 2008 fand hierzu ein Treffen des Topical Team statt, bei dem diese Möglichkeiten eingehender diskutiert wurden. Als weiterer Vorschlag ergab sich dabei auch die Modulation der Hochspannung. Nach einer weiteren Iteration sind die folgenden Wiederflugphasen definiert worden:

- 1. GeoFlow I:
  - Modulation der Hochspannung
  - Hintergrund: Untersuchungen zu g-jitter-Effekten
- 2. GeoFlow II:

- Wechsel der Experiment-Flüssigkeit unter Auswahl eines Fluides, dessen Viskosität starke Temperaturabhängigkeit zeigt
- Hintergrund: Untersuchungen von Konvektionsbewegungen im Erdmantel (aktuelle GeoFlow-Experiment-Phase konzentriert sich auf Strömungen im flüssigen Erdkern)

#### 3. GeoFlow III:

- Wechsel der Experiment-Flüssigkeit unter Verwendung einer kolloidalen Suspension
- Hintergrund: Untersuchungen von Konvektionsbewegungen im Erdmantel

Für die Bearbeitung von GeoFlow II wurde der ESA vom ZE eine Liste von Flüssigkeiten übergeben, die entsprechende Eigenschaften haben. Dieser Fluid-Studie müssen nun Labor-Tests und Simulationen folgen. Die Arbeitsschritte hierfür werden aktuell detailliert ausgearbeitet.

Während GeoFlow I und II noch mit dem zur Verfügung stehenden EC GeoFlow FM realisiert werden kann, stellt GeoFlow III ein neues Experiment dar, da das aktuelle Design dieser Flüssigkeit gerecht werden muss.

Diese Erfolgsaussicht der Wiederflugphasen münden in eine Erweiterung und Verlängerung des Projektes.

Zur Variation der Geometrie, d.h. zur Realisierung eines Zylinderexperimentes, um die wissenschaftlich und/oder technische Erkenntnisse in technische Anwendungen zu überführen, ist ein Parabelflugexperiment geplant, das der ZE zusammen mit dem Kooperationspartner Prof. I. Mutabazi von der Universität LeHavre, Frankreich durchführt. Aktuell wird hierfür die Auslegung eines derartigen Experimentes geprüft.

#### A.5 Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben

Im Rahmen des Vorhabens wurden sämtliche Arbeiten nach der Planung des Vorhabens durchgeführt. Alle Arbeiten führten zu einer Lösung.

#### A.6 Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer

Das BTU-Fluidsimulationslabor steht für externe Wissenschaftler, die im FSL der ISS Experimente durchführen wollen, zur Verfügung. Die Messtechnik-Peripherie steht ebenfalls für weitere strömungsmechanische Experimente zur Verfügung.

Die im Vorhaben eingesetzten numerischen Codes wurden bereits 2004 im Rahmen der vierten Summer School des Helmholtz Institutes for Supercomputational Physics möglichen Nutzern in der Zeit vom 23.08.2004 bis 17.09.2004 präsentiert. Inhalte dieser IV. Summer School for Computational Fluid Mechanics wurden vom ZE mit den Kooperationspartnern Rainer Hollerbach und Laurette Tuckerman abgestimmt.

An dieser Stelle sei das Original-Programm genannt:

Numerical modeling have dramatically increased our understanding of physical processes in fluid mechanics and their technical applications. In the Summer School 2004 we will examine the use of numerical simulations for rotating fluids and address related engineering problems. As an example for such an interplay between theory and experiment we discuss the simulation

of geophysical fluid flows under microgravity (GeoFlow) on board the International Space Station ISS. The main topics considered in the Summer School are

- Couette Flow Dynamics
- Hydrodynamic Instability
- Magnetohydrodynamics and Dynamo Theory
- Magnetic Taylor-Couette Flow
- The GeoFlow Experiment

# A.7 Einhaltung der Ausgaben- und Zeitplanung

Die im Vorhaben beantragten Mittel wurden analog der Zeitplanung ausgegeben.