

DAS GEOFLOW-EXPERIMENT AUF DER ISS: AUSWERTUNG ERSTER EXPERIMENTDATEN

S. Koch, N. Dahley, B. Futterer, C. Egbers

Lehrstuhl für Aerodynamik und Strömungslehre

Brandenburgische Technische Universität Cottbus, Postfach 10 13 44, 03013 Cottbus

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

Zusammenfassung

Thema des Mikrogravitationsexperimentes GeoFlow, das im Fluid Science Laboratory (FSL) im Columbus Modul der Internationalen Raumstation (ISS) betrieben wird, ist die experimentelle Untersuchung der thermischen Konvektion im rotierenden Kugelspalt unter dem Einfluss eines künstlich aufgebauten Zentralkraftfeldes. Für die Strömungsdiagnose wird die Wollaston-Schlieren-Interferometrie eingesetzt aus der die Messbilder, die Interferogramme, gewonnen werden.

In dieser Arbeit wird das Hauptaugenmerk auf die Auswertung erster experimenteller Daten gelegt. Hierzu wurde eine Automatisierung des Steuerprogramms im Bodenlabor für Referenzmessungen unter Erdbedingung entwickelt. Ein Aspekt dabei ist die Kopplung der Temperaturdaten mit den Bilddaten. Zur Vorbereitung der Auswertung erster Experimentdaten wird der Einfluss der Verzerrung untersucht und die Kopplung von Bilddaten und Telemetriedaten entwickelt, im Hinblick auf eine Strömungsdiagnose, bei der anfallende Datenmengen verwaltet werden müssen. Diese Datenmengen können dann in einer Datenbank abgespeichert und mit numerischen Daten verglichen werden.

Einleitung

Das europäische Forschungsexperiment GeoFlow wird auf der Internationalen Raumstation automatisiert betrieben. Thema des Experiments ist die thermische Konvektion im Kugelspalt, welches in den Veröffentlichungen zur GALA 2004 [3], 2005 [2] und 2007 [4] beschrieben wurde, mit den Schwerpunkten zum Verfahren und Numerische Interferometrie, sowie erste Auswertung experimenteller Voruntersuchungen. Im folgenden werden weitere Arbeitsschritte zur Automatisierung beschrieben.

Für Referenzmessungen unter Erdbedingungen steht das Science Referenz Model (SRM) an der BTU Cottbus zur Verfügung. Die Experimentansteuerung dieses Modells wurde auf einen automatisierten Betrieb umgestellt, für einen effizienten Vergleich der Daten vom Bodenmodell mit denen von der ISS und um eine Vorstellung für die Verarbeitung der Datenmengen von der ISS zu bekommen. Alle erzeugten Daten zu den Temperaturen werden chronologisch sortiert in ein so genanntes Log-file geschrieben. Die gleichzeitig aufgenommenen Bilddaten werden mit einem Zeitstempel versehen und können so mit den Experimentdaten gekoppelt werden.

Die Bildverarbeitung und Bildauswertung bezieht sich zunächst auf die Bilder aus der Messkampagne beim Industrie-Partner EADS Astrium GmbH am Engineering Model (EM). Für die Auswertung der Bilddaten werden aus den Interferogrammen die Störeffekte herausgefiltert, auf reine Streifen reduziert und die relevanten Ringstrukturen extrahiert (vgl. [7]). Diese

werden in Linienbilder, anhand der Kanten der Streifenmuster, umgewandelt. Das Linienbild wird spaltenweise abgearbeitet und ein Phasenpunkt gesetzt, wenn entlang einer Spalte eine Kante einer Ringstruktur gefunden wurde. Mit Hilfe dieser Phasenpunkte kann anschließend die Phasenkennlinie errechnet und interpoliert werden. Aus dieser interpolierten Phasenkennlinie wird die Temperaturlinie integriert. Es werden alle Spalten des Bildes abgearbeitet, damit ein komplettes Temperaturfeld in azimuthaler und meridionaler Auslenkung berechnet werden kann [1]. Eine ausführliche Beschreibung des Vorgehens ist in [4] zu finden. Diese Temperaturverteilung über das gesamte Bild dient dem Vergleich mit numerisch ermittelten Simulationen. Die Verzerrung muss also diskutiert werden, weil numerische und experimenteller Daten automatisiert verglichen werden sollen. Numerische Daten zeigen keine Verzerrungen auf. Im Folgenden wird mit Hilfe von Daten aus Voruntersuchungen dieser Aspekt diskutiert.

Diskussion über Verzerrung durch sphärische Geometrie

Durch Beheizen der Innenkugel und Kühlen der Außenkugel bilden sich am Pol unter Erdbedingungen, bei genügend hohen Temperaturdifferenzen, gleichmäßige Strömungsstrukturen aus. Die entstehenden Strömungen sind spiegelsymmetrisch zu einander, wenn keine Hochspannung angelegt oder rotiert wird. Die Strömungsstrukturen in den Bildern aus den EM-Messreihen weisen aber eine nichtsymmetrische Ringstruktur auf, das heißt die unteren Ringpaare sind auf den Interferogrammbildern verzerrt dargestellt. Die Annahme liegt nahe, dass die Kugelgeometrie eine Verzerrung verursacht. Dieses wird aber durch die Verwendung einer Adaptionsoptik ausgeschlossen, was im Folgenden erklärt wird.

Für die Erfassung der Strömungen befindet sich im Experimentaufbau ein Linsensystem, bestehend aus Sammel- und Streulinse, die den Laserstrahl zur reflektierenden Kugel lenken und wieder zurück in die Kamera. Die Laserstrahlen durchlaufen, auf Grund der Funktionsweise der Adaptionsoptik, die Schale der Außenkugel im rechten Winkel (siehe Abbildung 1). Die Laserstrahlen werden dann an der Innenkugel reflektiert und auf dem gleichen Weg zurück geworfen. Durch die Fokussierung auf den Kugelmittelpunkt ist eine Brechung und somit auch eine Verzerrung an dieser Stelle nicht möglich. Die Laserstrahlen haben auf Grund des Linsensystems bzw. der Adaptionsoptik die Eigenschaft des Mittelpunktstrahls und daraus folgend die gleiche Länge. Es tritt ebenfalls keine Verzerrung durch den Kugelspalt auf, die berücksichtigt werden müsste [5].

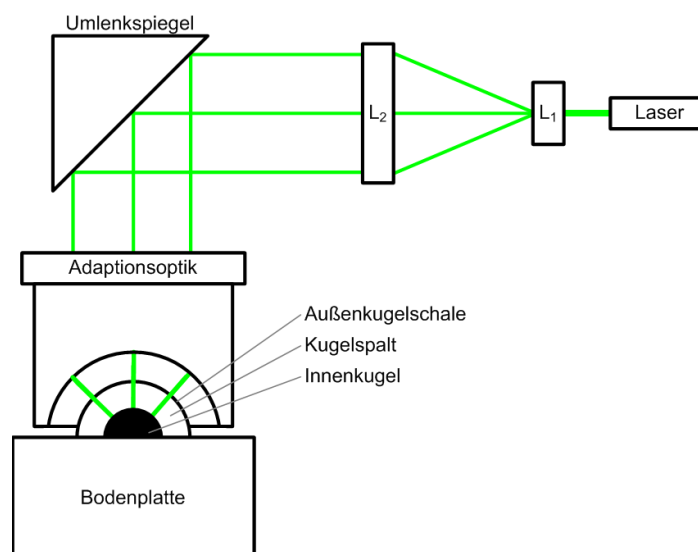


Abbildung 1: Aufbau der Messoptik für die sphärische Geometrie eines Kugelspalts

Um die Asymmetrie der Strömungsstrukturen in den EM-Bildern zu erklären, werden alle Linsen, die den Laserstrahl weiten oder bündeln, in diesem Experimentaufbau, auf ihre Eigenschaften untersucht. Fast jede Linse weist an den Randregionen gewisse Verzeichnungen auf, so auch bei diesem verwendeten Linsensystem. In der Literatur werden viele Arten von Verzeichnungen bei Linsen genannt. Eine der Hauptverzeichnungsform ist die radiale Verzeichnung. In Abbildung 2 ist eine schematische Darstellung von radialen Verzeichnungen auf das Bild eines Quadrates zu sehen (vgl. [6]). Man unterscheidet dabei die Positive- oder Kissenverzerrung, in der Darstellung als gestrichelte Linie markiert, und die Negative- oder Tonnenverzerrung, hier als die gepunktete Linie angegeben. Folglich ist anzunehmen, dass Bildinformationen, besonders an den Randregionen, verzerrt werden.

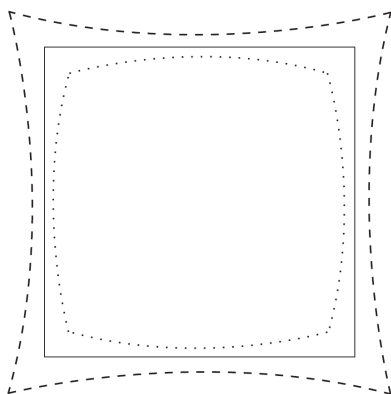
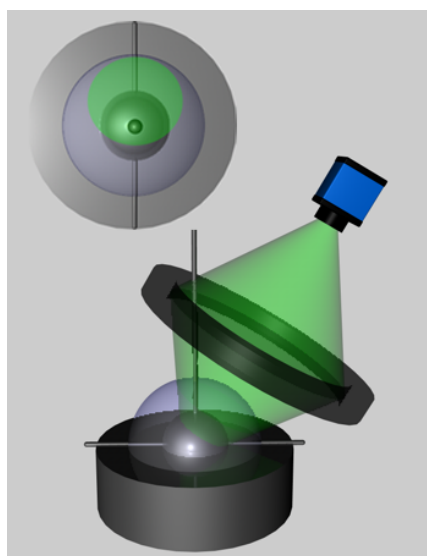
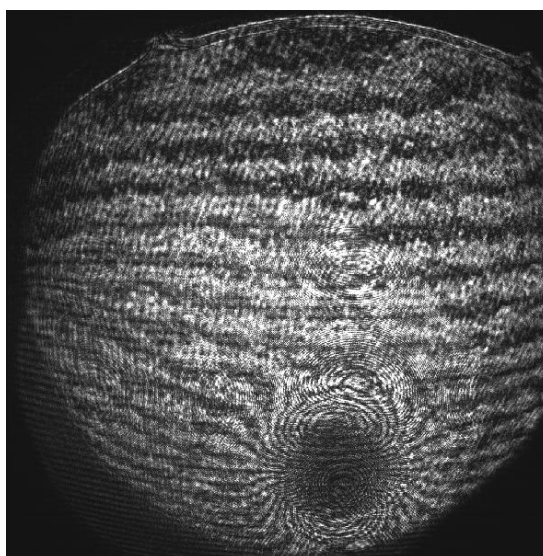


Abbildung 2: Radiale Verzeichnungen bei Linsen [6].

Da der Bildausschnitt den Polbereich des Kugelschalsystems nur am Rand erfasst, wie im Abbildungsausschnitts oben links in der Abbildung 3 zu sehen, könnte eine Verzerrung bzw. Verzeichnung durch die verwendeten Linsen möglich sein. Der grüne Bereich zeigt den Bereich des aufgenommenen Bildes bzw. den Lauf des Laserstrahls bis in die Kamera. Dies ist eine vereinfachte Prinzipdarstellung in der die Adaptionsoptik und einzelne Linsen durch den Ring symbolisiert werden.



Kamerasicht



Interferogramm

Abbildung 3: Sicht auf die Kugel mit dazugehörigem Interferogramm

Unter Schwerelosigkeit wird vermutet, dass sich an mehreren Stellen Pole ausbilden und nicht nur im Randbereich des Bildausschnittes. Somit werden auftretende Verzerrungen in den EM-Meßreihen vernachlässigt, da die Auswertemethode über die Ringe sich nicht verändert und Verzerrungen nicht herausgerechnet werden müssen. Gewollte Brechungen werden nur durch die Strömung des Fluids im Kugelspalt verursacht [8]. Dennoch ist die Untersuchung für spätere Auswertungen nützlich.

Die Bildverarbeitungssoftware HALCON der Firma MVTec Software GmbH bietet die Möglichkeit der Bestimmung neuer Kameraparameter gemäß eines vorgegebenen radialen Verzerrungskoeffizienten (κ), bzw. daraus resultierend die Veränderung der radialen Verzerrung eines Bildes. Dieses Verfahren wurde für ausgewählte EM-Bilder angewendet, um ein gleichmäßiges Temperaturfeld zu erhalten.

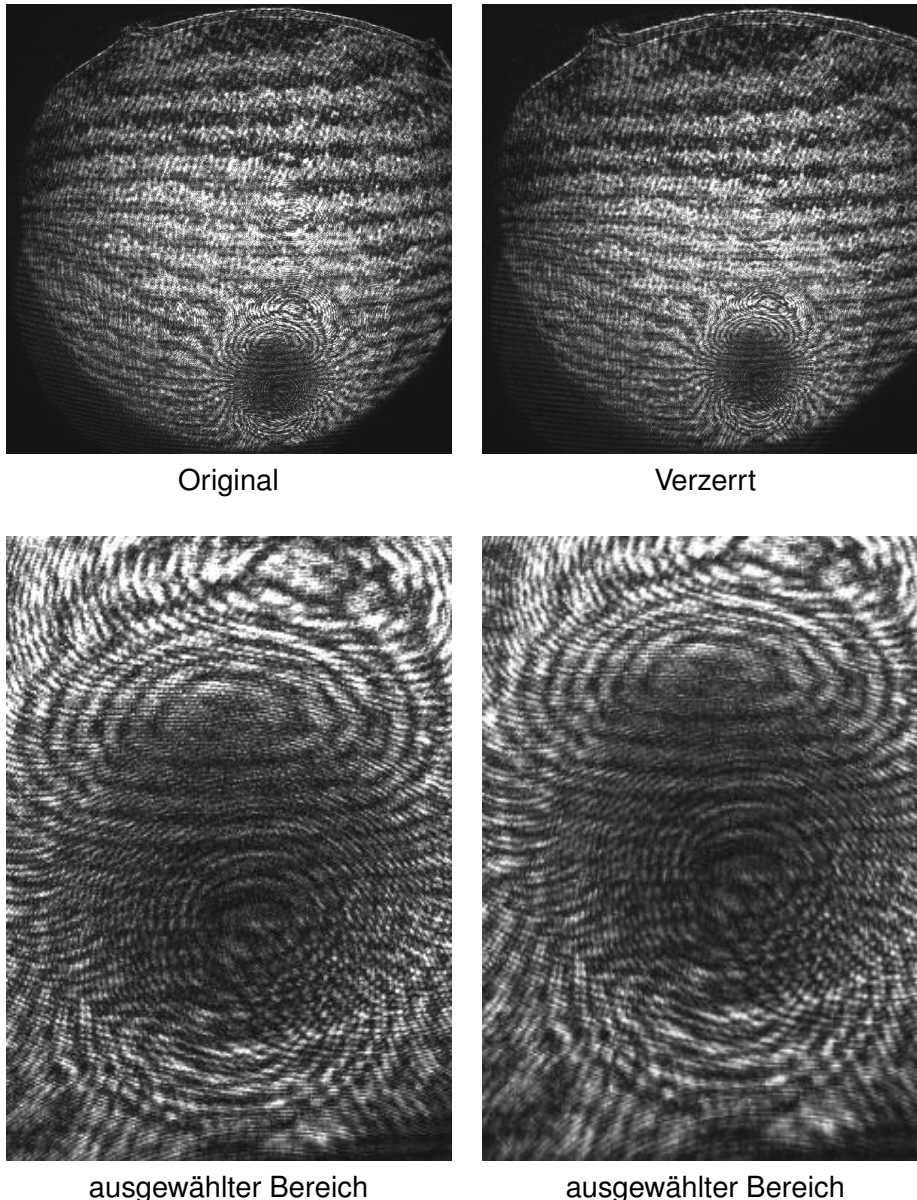


Abbildung 4: Original und verzerrtes Bild (benutzte Software: HALCON)

In Abbildung 4 ist eine Verzerrung mit Hilfe eines selbst gewählten Verzerrungskoeffizienten κ und den Kameraparameter in HALCON zu sehen. Ein genaues κ kann, auf Grund der

Art der Messung, weder gemessen noch durch Kalibrierung ermittelt werden. Es ist deutlich zu erkennen, dass die unteren Ringstrukturen nach der Anwendung des Programms symmetrischer aussehen. Deutlicher wird diese Verbesserung der Symmetrie in den errechneten normierten Temperaturlinien in Abbildung 5. In dieser Abbildung ist aufgezeigt, wie sich das verzerrte Bild, die Temperaturlinie und das Temperaturfeld zum Original verändert. Die extrahierten Ringpaare wurden im Original nachgezeichnet und anschließend extrahiert. Schon in den Bildern der extrahierten Ringstrukturen lässt sich eine gewisse Symmetrie ausmachen. Der Verlauf der Temperaturlinie ist im verzerrten Bild deutlich gleichmäßiger als im Vergleich zur Originalverteilung, aber immer noch nicht spiegelsymmetrisch. Die gleiche Verbesserung in der Symmetrie lässt sich natürlich auch in den normierten Temperaturverteilungen über das gesamte Bild erkennen (Abbildung 5 unten).

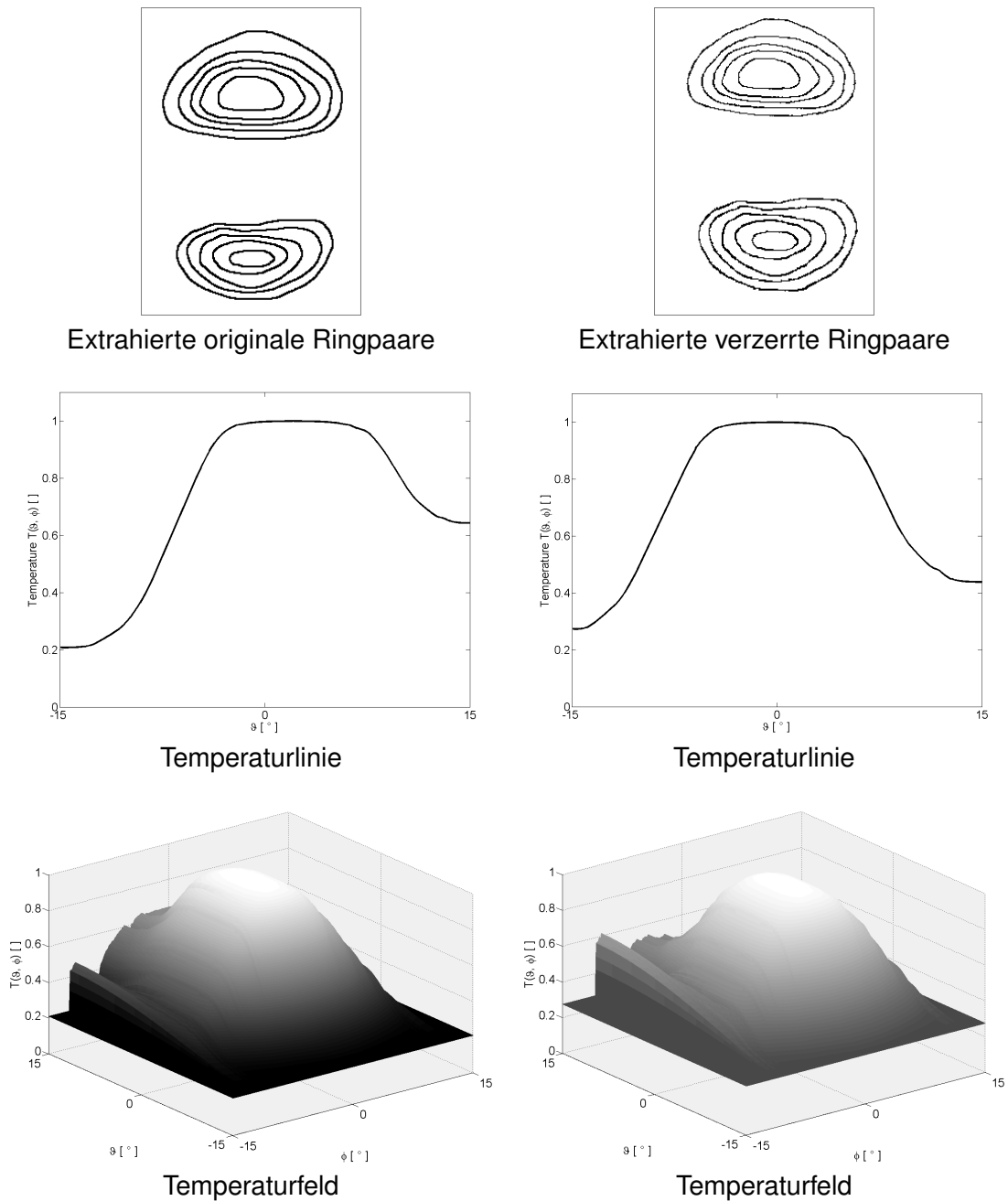


Abbildung 5: Extrahierte Ringe mit errechneter Temperaturlinie und Temperaturfeld

In Abbildung 6 links wurden die oberen Ringe auf die untere Ebene horizontal gespiegelt, um so identische und symmetrische Augenpaare zu erhalten, für einen effizienteren Vergleich mit numerischen Daten. In Abbildung 6 Mitte und rechts ist nun zu sehen, dass der erste und der letzte Punkt in der Temperaturlinie die gleichen Werte für die Temperaturdifferenz haben, da die Ringpaare symmetrisch zu einander sind.

Als Lösung für dieses Problem der Verzeichnung in den Randbereichen wäre es möglich, nur die oberen Ringstrukturen zu erfassen, horizontal zu spiegeln und auszuwerten. Dieses Vorgehen kann aber zunächst nur auf Bilder aus den Meßreihen unter Erdbedingung angewendet werden. Es ist nicht bekannt, wie sich die Strömungen unter Mikrogravitation verhalten bzw. ausbilden werden, um so mögliche Fehlinterpretationen zu verhindern. Bestimmte Aspekte und Erkenntnisse aus diesen Voruntersuchungen werden aber in die Auswertung der Bilddaten unter Schwerelosigkeit einfließen.

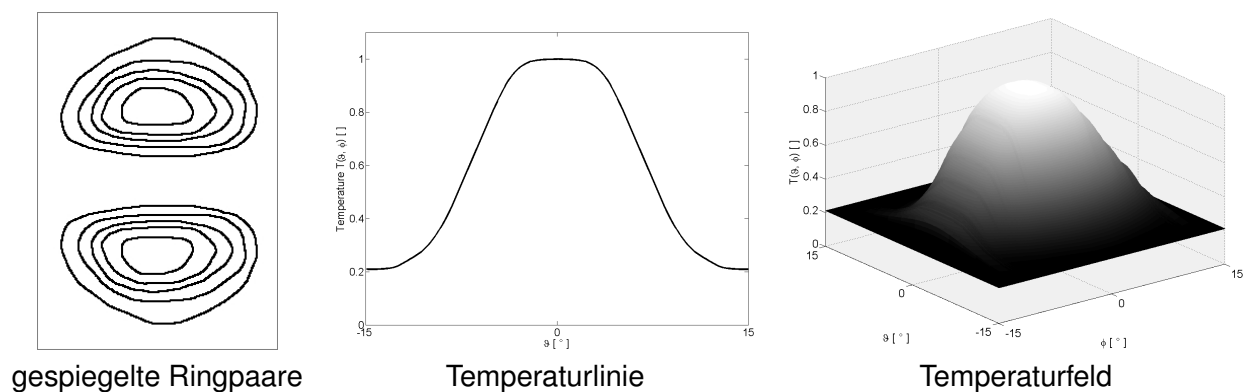


Abbildung 6: gespiegelte Ringpaare mit errechneter Temperaturlinie und Temperaturfeld

Automatisierung des Referenzmodells

In Abbildung 7 ist die Benutzeroberfläche des Modells für Referenzmessungen an der BTU Cottbus zu sehen. Es können Temperaturdifferenzen und Hochspannung angelegt werden und gleichzeitig wird das Messbild als Livebild angezeigt. Für einen automatischen Ablauf des Programms, werden die Bilder von der Kamera aufgezeichnet und mit einem Zeitstempel versehen. Die Experimentdaten werden chronologisch sortiert und fortwährend in ein Log-File geschrieben. Die Kopplung der Temperaturdaten mit den Bilddaten hat den Vorteil, dass die Vergleiche mit den gewonnenen Bildern und Experimentdaten von dem Experiment auf der ISS effizienter durchgeführt werden können und die Analyse des Bodenexperiments effektiv vollzogen werden kann.

Die Bilddaten und die Telemetriedaten, müssen bei einem automatisierten Ablauf nicht von Hand durchsucht werden, um sie bestimmten Zeitpunkten und eingestellten Temperaturen zuzuordnen. Es kann so schneller ein bestimmter Strömungszustand bei einer eindeutigen Temperatur anhand des Bildervergleiches ausgemacht werden. Zudem verfällt der Aufwand die Bilder selbst aufnehmen zu müssen und diese mit einem Zeitstempel zu versehen und dazu die Temperaturdaten zu dokumentieren.

Alle bedienbaren Bausteine und Ausgabefenster, sind logisch angeordnet und können vom Benutzer manuell gesteuert werden und laufen anschließend automatisiert weiter. Änderungen können vorgenommen werden und laufen dann ebenfalls automatisiert weiter.

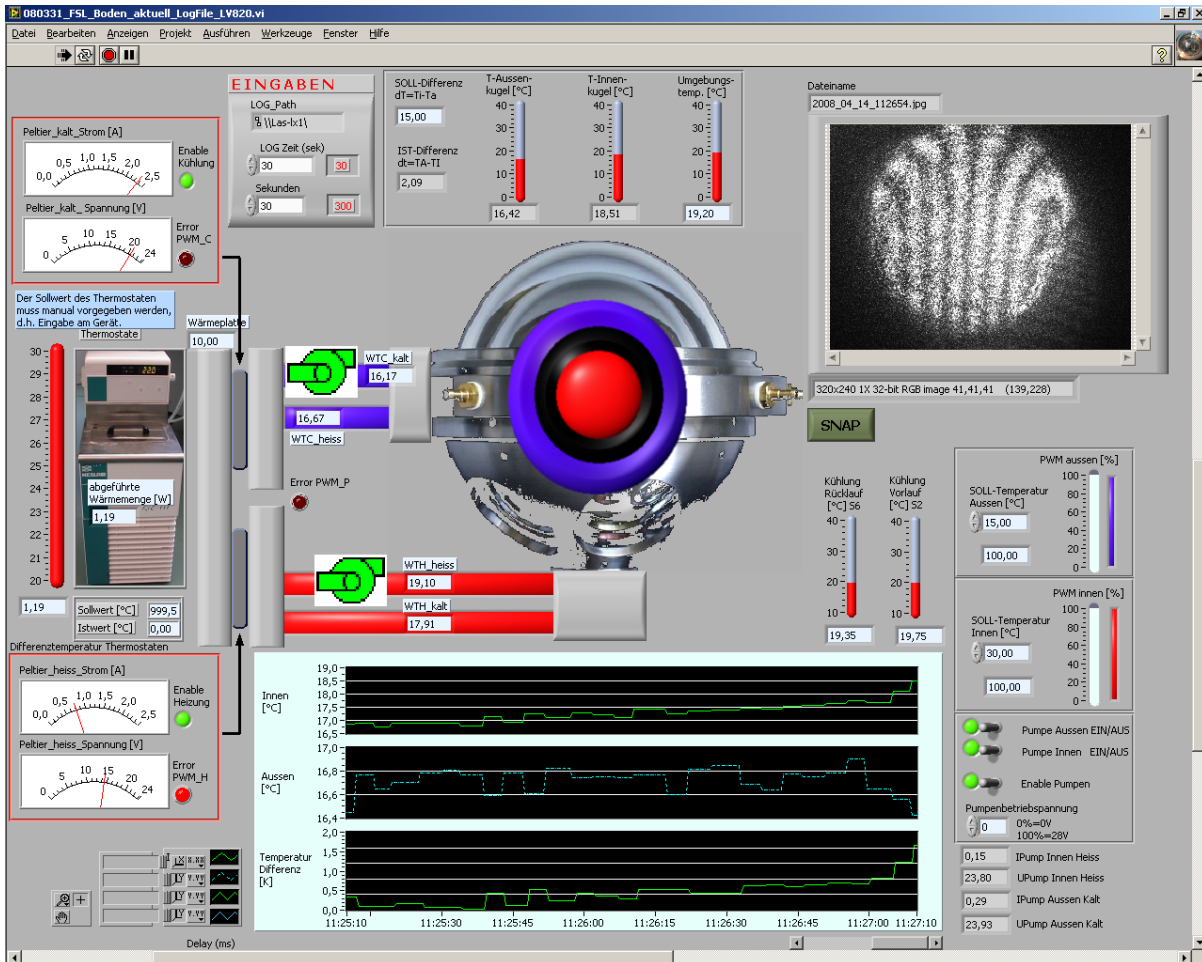


Abbildung 7: Grafische Benutzeroberfläche vom Bodenmodell

Ausblick

Eine automatisierte Auswertung der Bilddaten wird angestrebt, um die zu erwartende Datenmenge zu analysieren. Dazu ist eine Implementierung von Mustererkennungsalgorithmen erforderlich. Desweiteren muss die Auswertung auch auf komplexere bzw. chaotische Strömungsstrukturen ausgeweitet werden.

Danksagung

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

Literatur

- [1] DAHLEY, N.: *Bildverarbeitung und Strömungsdiagnose für das GeoFlow Experiment Schwerpunkt: Bildauswertung und Ermittlung der Temperaturverteilung*, Brandenburgische Universität Cottbus, Diplomarbeit, 2007

- [2] FUTTERER, B. ; GELLERT, M. ; EGBERS, C.: Das GeoFlow-Experiment auf der ISS: Optische Messverfahren für die thermische Konvektion im Kugelspalt. In: *GALA-Fachtagung, „Lasermethoden in der Strömungsmeßtechnik“* (06. - 08. September 2005, Cottbus)
- [3] FUTTERER, B. ; GELLERT, M. ; EGBERS, C.: Das GeoFlow-Experiment auf der ISS: Interferometrie und Schlieren-/Schattenmesstechnik als optische Messverfahren für die thermische Konvektion im Kugelspalt. In: *GALA-Fachtagung, „Lasermethoden in der Strömungsmeßtechnik“* (07. - 09. September 2004, Karlsruhe)
- [4] FUTTERER, B. ; KOCH, S. ; DAHLEY, N. ; LARCHER, Th. von ; EGBERS, C.: Das GeoFlow-Experiment auf der ISS: Interferogrammauswertung für die thermische Konvektion im Kugelspalt. In: *GALA-Fachtagung, „Lasermethoden in der Strömungsmeßtechnik“*, ISBN 978-3-86009-007-7 (04. - 05. September 2007, Rostock)
- [5] IMMOHR, J.: *Sphärische Differentialinterferometrie für Raumfahrtanwendungen - Konvektionsströmungen im Kugelspalt unter dem Einfluss axialer und radialer Kraftwirkung*, Universität Bremen, Diss., 2006. – Fortschritt-Bericht VDI Reihe 7, Nr. 481, Düsseldorf
- [6] JOCKEL, S.: *3-dimensionale Rekonstruktion einer Tischszene aus monokularen Handkamera-Bildsequenzen im Kontext autonomer Serviceroboter*, Universität Hamburg, Diss., 2006
- [7] KOCH, S.: *Bildverarbeitung und Strömungsdiagnose für das GeoFlow Experiment Schwerpunkt: Bildaufbereitung und Extraktion der Strömungsmuster*, Brandenburgische Universität Cottbus, Diplomarbeit, 2007
- [8] SITTE, B.: *Thermische Konvektion in Zentralkraftfeldern*, Universität Bremen, Diss., 2004