

## EIGENSCHAFTEN VON GROSSSKALIGEN ZIRKULATIONEN IN THERMISCHER KONVEKTION

### PROPERTIES OF LARGE-SCALE CIRCULATIONS IN THERMAL CONVECTION

**E. Lobutova, R. du Puits, C. Resagk**

Technische Universität Ilmenau, 98684 Ilmenau

3D Particle Tracking Velocimetry, Lagrange'sche Partikeltrajektorien  
3D particle tracking velocimetry, Lagrangian trajectories

#### Zusammenfassung

Mittels 3D Particle Tracking Velocimetry (PTV) werden Langzeit-Trajektorien von heliumgefüllten Latexballons aufgenommen. Diese dienen als Tracerpartikel in einer großen Rayleigh-Bénard-Zelle („Ilmenauer Fass“) zur Untersuchung der natürlichen thermischen Konvektion. Aus der Rekonstruktion der Trajektorien lassen sich Geschwindigkeitszeitreihen sowie Geschwindigkeits- und Beschleunigungsinkremente für alle drei Raumrichtungen berechnen und statisch auswerten. Dabei zeigen die Fluktuationen der Zirkulationsgeschwindigkeit eine Gauss-Verteilung, wogegen die Beschleunigungen eine intermittente Verteilung analog der Eigenschaften von turbulenten isothermen Strömungen aufweisen.

#### Einleitung

Konvektionsströmungen zeichnen sich im Allgemeinen durch eine hohe Komplexität sowie zeitliche und räumliche Instabilität aus, die deren Vorhersage und numerische Berechnung erschweren. Aus diesem Grunde werden im großskaligen Modellexperiment „Ilmenauer Fass“ (Höhe: 7 m, Durchmesser: 7m), einer so genannten „Rayleigh-Bénard(RB)-Zelle“, seit mehreren Jahren die Eigenschaften von turbulenten Konvektionsströmungen untersucht.

Neben detaillierten Messungen der Geschwindigkeits- und Temperaturfelder im Grenzschichtbereich an der Heiz- und Kühlplatte der RB-Zelle (du Puits et al. 2007) spielen auch die großskaligen Zirkulationen außerhalb der Grenzschichten im Volumen der Konvektionszelle eine große Rolle bei der Wärmeübertragung. Im Gegensatz zum turbulenten Charakter dieser thermisch angetriebenen Luftströmungen formieren sich hier kohärente Strömungsstrukturen mit bestimmten räumlichen und zeitlichen Eigenschaften.

Mit der Anwendung der 3D PTV-Methode mit heliumgefüllten Latexballons als Tracerpartikel konnten verschiedene Moden dieser großskaligen Zirkulationen bei bestimmten Rayleigh-Zahlen ( $Ra$ ) und Aspekt-Verhältnissen ( $\Gamma$ ) nachgewiesen werden (Lobutova et al. 2008). Im vorliegenden Beitrag wird die Bewegung einzelner Partikel über einen langen Zeitraum verfolgt und statistisch analysiert.

Aus den Wahrscheinlichkeitsdichteverteilungen (PDF) der Bahngeschwindigkeit und der Beschleunigung werden bei  $\Gamma = 2$  (Durchmesser: 7 m, Höhe: 3,5 m) und unterschiedlichen  $Ra$  (unterschiedliche Temperaturdifferenzen zwischen Kühl- und Heizplatte) wichtige Eigenschaften der Zirkulationsströmung ermittelt und mit numerischen Berechnungen verglichen (Schumacher 2008).

#### Experiment

Die Experimente wurden im „Ilmenauer Fass“ (IF), einer klassischen zylindrischen RB-Zelle mit einem Durchmesser von  $D = 7,15$  m und einer variablen Höhe  $H = 0,06 - 6,3$  m durchgeführt. Die luftgefüllte Konvektionszelle wird von unten beheizt, von oben gekühlt und hat adiabatische Seitenwände (Abb. 1). Die Temperatur der Heizplatte am Boden kann

zwischen 20°C und 80°C variiert werden, die Temperatur der Kühlplatte an der Decke wird in der Regel auf 20°C eingestellt. Durch Veränderung der Lage der Kühlplatte lassen sich unterschiedliche Zellhöhen einstellen, was einem variablen Aspektverhältnis  $\Gamma = D/H = 1 - 100$  entspricht. Mehr Details des „Ilmenauer Fass“ sind von du Puits et al. (2007) publiziert worden.

Das 3D PTV-System besteht aus vier 8 MP Canon EOS 20D Digital-Kameras, die an den Wänden des IF befestigt sind (Abb. 1). Die Kameras werden mittels Pulsgenerator elektrisch ferngesteuert und lösen ihrerseits zwei externe Blitzlampen aus. Dabei handelt es sich um Hochleistungs-Studioblitzlampen der Fa. Elinchrom mit einer Energie von 1,5 – 6 J. Mit diesem System ist eine Bildwiederholfrequenz bis 3 Hz realisierbar. Als Tracer wurden 15 cm große heliumgefüllte Latexballons eingesetzt. Die manuell mit Helium gefüllten Latexballons schweben in Luft in der Regel fünf Stunden lang.

Die Analyse und Auswertung der aufgenommenen Partikelbilder erfolgt photogrammetrisch (Maas et al. 1993). Hierbei benötigt man mindestens zwei Kameras, die Verwendung von vier Kameras erhöht die Genauigkeit der Bestimmung der Partikelkoordinaten erheblich. Wichtig dabei sind präzise in-situ Kalibrierungstechniken und subpixel-genaue Bildauswertungsmethoden (Putze 2006).

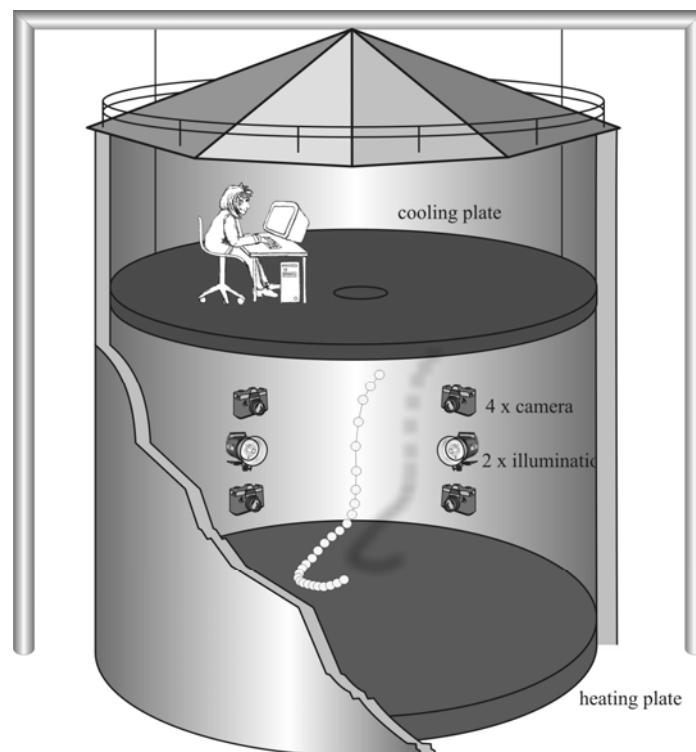


Abb. 1: Schematische Darstellung der Konvektionszelle „Ilmenauer Fass“ mit dem 3D PTV-System zur Aufnahme und Rekonstruktion von Lagrange'schen Partikeltrajektorien.

## Ergebnisse

Abbildung 2 zeigt erste Ergebnisse der dreidimensionalen Rekonstruktion von Partikeltrajektorien von acht Ballons über einen Zeitraum von 60 Minuten, aufgenommen bei  $Ra = 1,3 \cdot 10^{11}$  und mit einer Bildfolgefrequenz von 1 Hz. Die Zeitreihen der drei Geschwindigkeitskomponenten weisen die für turbulente Strömungen typischen Fluktuationen auf. Die absoluten Geschwindigkeiten betragen 0,35 - 0,65  $ms^{-1}$  und die zeitlichen Fluktuationen liegen zwischen 10 und 20 s.

Die Autokorrelationsfunktionen dieser Geschwindigkeitszeitreihen zeigen ein weiteres charakteristisches Zeitmaß von 40 s, welches mit der Umlaufzeit einer großen Zirkulationsrolle korrespondiert. Die kürzeren Zeiten lassen sich mit kleineren

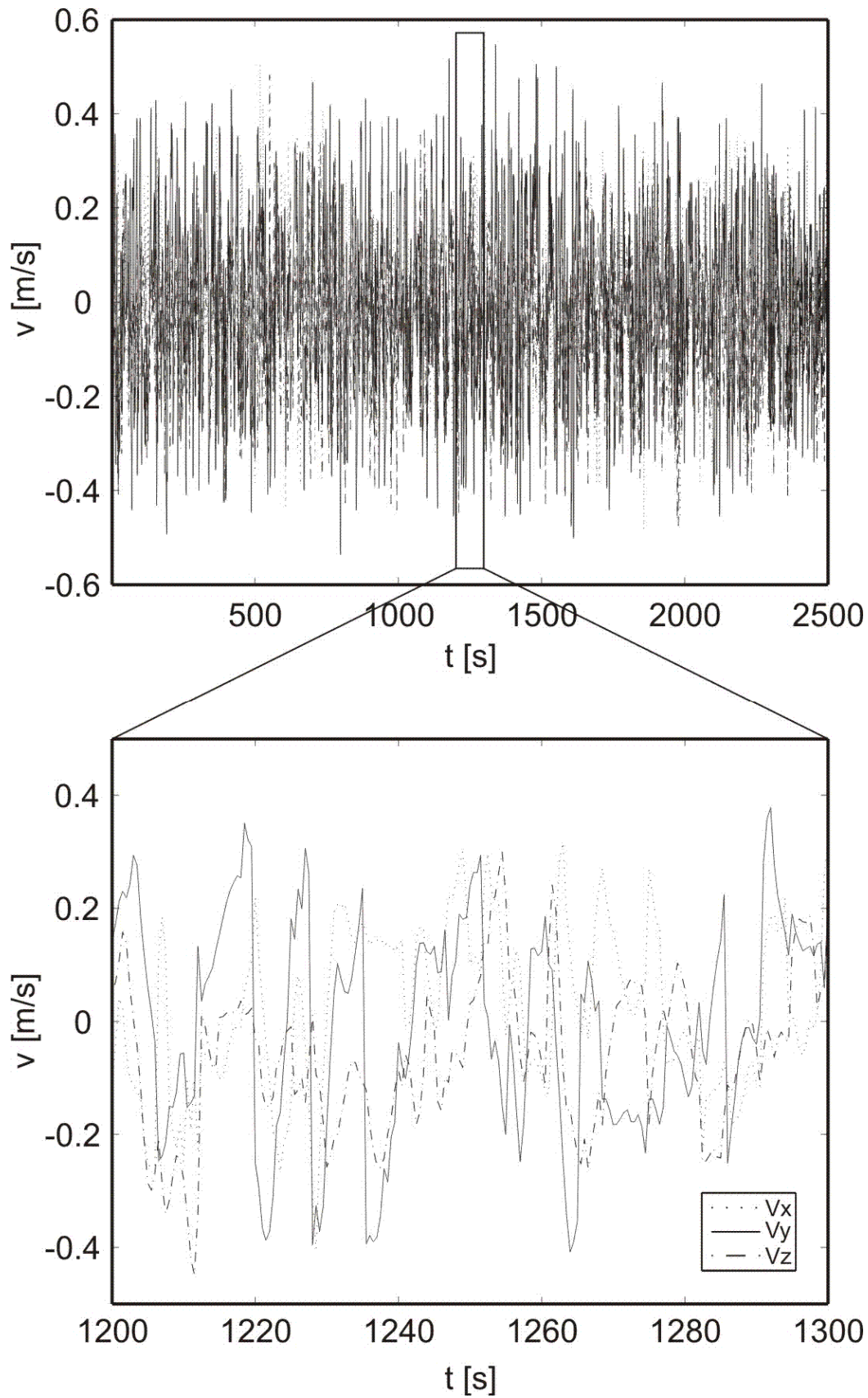


Abb. 2: Zeitreihen der drei Komponenten der großskaligen Zirkulationsgeschwindigkeit im "Ilmenauer Fass" bei Aspektverhältnis  $\Gamma = 2$ .

Zirkulationsstrukturen wie eine kleine Rolle mit einem Durchmesser von 3 m und „Tornados“ mit Durchmessern von 1 m erklären (Lobutova et al. 2008). Berechnet man aus den 3D PTV-Daten die Wahrscheinlichkeitsdichteverteilungen (PDF) der einzelnen Geschwindigkeitskomponenten, erhält man die zu erwartenden Gauss-Verteilungen (Abb. 3). Die PDF der Beschleunigung der großskaligen Zirkulationsbewegung zeigt jedoch große Abweichungen von der Gauss-Verteilung. Dies findet man in der Regel bei kleinskaligen Fluktuationen in hochgradig turbulenten Strömungen, wo intermittente Vorgänge dominieren.

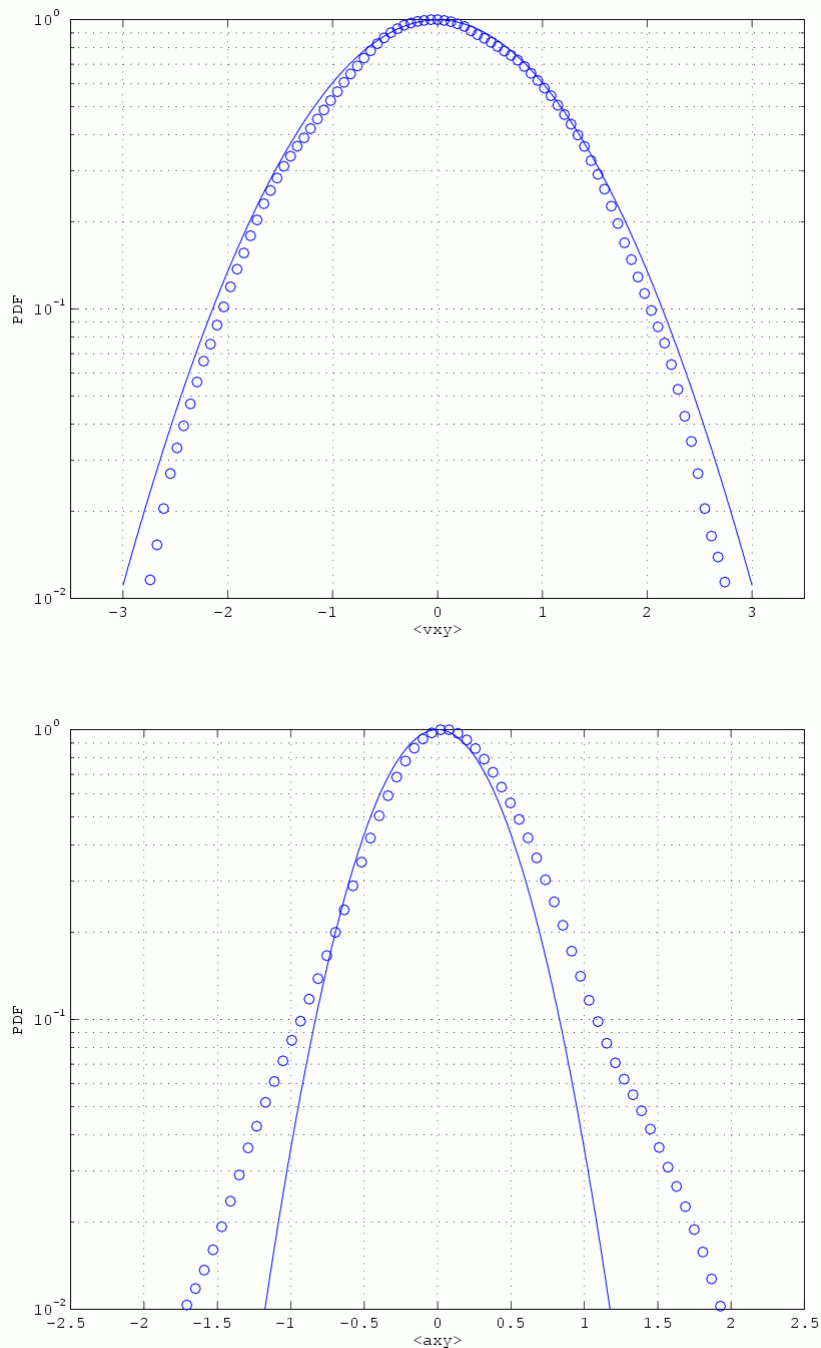


Abb. 3: Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung der horizontalen Geschwindigkeits- (oben) und Beschleunigungsfluktuationen (unten) der großskaligen Zirkulationsströmung der thermischen Konvektion im „Ilmenauer Fass“ (durchgezogene Kurve zeigt die Gauss-Verteilung mit  $\sigma = 1$  bzw. 0,3).

## Zusammenfassung

Mit 3D PTV lassen sich Lagrange'sche Partikeltrajektoren aufnehmen und daraus Geschwindigkeitszeitreihen der großskaligen Zirkulationsströmungen in thermischer Konvektion berechnen. Die daraus gewonnenen Wahrscheinlichkeitsdichteverteilungen der Geschwindigkeits- und Beschleunigungsfluktuationen zeigen typische Eigenschaften von turbulenten Strömungen. Daraus lassen sich die folgenden Schlussfolgerungen ableiten:

1. Trotz der Verwendung von relativ großen Tracerpartikeln ist die räumliche und zeitliche Auflösung des PTV-Verfahrens groß genug, um die Struktur der großskaligen Zirkulationsströmung zu analysieren.
2. Auch die Zirkulationsströmungen in thermischer Konvektion zeigen das für isotrope Turbulenz typische intermittente Verhalten der Beschleunigung.

Zukünftige Messungen sollen über einen längeren Zeitraum durchgeführt werden, um die statistische Aussagekraft der Daten zu erhöhen.

## Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die finanzielle Unterstützung im Rahmen des SPP 1147 „Bildgebende Messverfahren für die Strömungsanalyse“.

## Literatur

- Du Puits, R., Resagk, C., Tilgner, A., Busse, F.-H., Thess, A., 2007: Structure of thermal boundary layers in turbulent Rayleigh-Bénard convection, *J. Fluid Mech.*, 572, 231-254
- Lobutova, E., Resagk, C, 2008: Untersuchung von Lagrange'schen Partikeltrajektorien in thermischer Konvektion mittels 3D PTV, Proc. 16. Fachtagung Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik, Karlsruhe 2008, 51-1
- Schumacher, J., 2008: Lagrangian Dispersion and Heat Transport in Convective Turbulence, *Phys. Rev. Lett.*, 100, 134502
- Maas, H.-G., Grün, A., Papantoniou, D., 1993: "Particle Tracking in three-dimensional turbulent flows – Part I: Photogrammetric determination of particle coordinates". *Experiments in Fluids*, Vol. 15, pp. 133-146
- Putze, T., 2006: "Quality analysis of flow field data determined by 3D PTV in gas flows". Proc ISFV12, Göttingen, Germany, 69.1