

## 2D GRENZSCHICHTMESSUNGEN IN TURBULENTER RAYLEIGH-BÉNARD-KONVEKTION MITTELS LDA

**R. du Puits, C. Resagk, A. Thess**

Technische Universität Ilmenau, FG Thermo- und Magnetofluidynamik,  
PF 100 565, 98784 Ilmenau  
ronald.dupuits@tu-ilmenau.de

### Zusammenfassung

In unserem Beitrag präsentieren wir Geschwindigkeitsmessungen in turbulenter Rayleigh-Bénard(RB)-Konvektion. Die von unten beheizte und von oben gekühlte Konvektionszelle mit einem Durchmesser von  $D=7,15\text{m}$  und einer maximalen Höhe von  $H=6,30\text{m}$  ist mit Luft gefüllt. Räumlich und zeitlich hoch aufgelöste Profile der mittleren horizontalen Geschwindigkeit in der Kühlplattengrenzschicht sowie deren statistische Größen werden mittels 2D-Laser-Doppler-Anemometer (LDA) bestimmt und in ihrer Abhängigkeit von Rayleigh-Zahl ( $Ra$ ) und Aspektverhältnis  $\Gamma$  ( $\Gamma=D/H$ ) diskutiert. Des Weiteren werden mittels Autokorrelation aus den gemessenen Geschwindigkeitszeitreihen periodische Schwankungen mit mindestens zwei unterschiedlichen Zeitskalen extrahiert.

### Einleitung

Thermische Konvektion ist der am häufigsten realisierte Strömungszustand in der Natur. Sie ist für die Strömung in der Erdatmosphäre, in den Ozeanen, im Erdmantel und auf der Sonne verantwortlich. Gleichzeitig wirkt sie in zahlreichen technischen Systemen wie Kraftwerken, Fußbodenheizungen sowie Schmelzanlagen für Halbleitereinkristalle, Stahl oder Glas.

Die meisten thermischen Konvektionsströmungen sind durch sehr hohe Werte der Rayleigh-Zahl im Bereich  $10^8 < Ra < 10^{21}$  gekennzeichnet. In diesem Parameterbereich besitzen die Geschwindigkeits- und Temperaturfelder eine außerordentlich komplizierte räumlich-zeitliche Struktur. Die Grenzen des Wissens über turbulente thermische Konvektion bei  $Ra \gg 1$  werden am Modell der RB-Konvektion in einem von unten beheiztem und von oben gekühltem, zylindrischem Behälter besonders deutlich sichtbar.

Dieses System, gekennzeichnet durch die drei Eingangsparameter Rayleigh-Zahl, Prandtl-Zahl ( $Pr$ ) und Aspektverhältnis ist seit über 100 Jahren Gegenstand intensiver Forschung. Trotz einer Vielzahl von experimentellen (Deardorff & Willis 1967, Castaing et. al. 1989, Niemela et. al. 2000) und theoretischen Arbeiten (Malkus 1954, Grossmann & Lohse 2000, Kadanoff 2001) sind die Transportvorgänge in diesem System nur unvollständig verstanden. Erst in jüngster Zeit ist man durch den Einsatz von moderner, laserbasierter Meßtechnik in der Lage, Geschwindigkeits- und Temperaturfelder mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung zu messen, ohne das Strömungsfeld zu beeinflussen.

Die Ilmenauer Gruppe verfügt mit dem „Ilmenauer Fass“ (Abb. 1) über ein unikales Modell-experiment zur RB-Konvektion in Luft. Die Größe des Experimentes (Durchmesser  $D=7.15\text{m}$ ,

Höhe  $0,05\text{m} < H < 6,30\text{m}$ ) gestattet Messungen in einem Parameterbereich von  $10^6 < Ra < 10^{12}$  und  $1,13 < \Gamma \ll 100$ . Messungen des horizontalen Geschwindigkeitsprofils in der Plattengrenzschicht können in Verbindung mit entsprechenden Temperaturdaten Aufschluss über die allgemeinen Eigenschaften von thermischen Grenzschichten in turbulenter Konvektion geben und damit das Verständnis der Transportvorgänge in Konvektionsströmungen verbessern.

## Experiment

Das „Ilmenauer Fass“ ist ein mit Luft gefüllter, zylindrischer Behälter mit einem „Volumen“ von  $250\text{m}^3$ . Eine elektrisch beheizte Bodenplatte mit einer Temperatur zwischen  $20^\circ\text{C}$  und  $80^\circ\text{C}$  und eine frei darüber hängende Kühlplatte, deren Temperatur zwischen  $15^\circ\text{C}$  und  $25^\circ\text{C}$  einstellbar ist, erzeugen eine hochturbulente Konvektionsströmung in dessen Innerem (Abb. 1). Während der Aufbau der Heizplatte dem einer elektrischen Fußbodenheizung ähnelt, musste für die geforderte Temperaturhomogenität der Kühlplatte eine spezielle Konstruktion angefertigt werden. Sie besteht aus 16 einzelnen, wassergekühlten Segmenten, die an einer Tragkonstruktion aus Stahl befestigt sind. Dieses etwa 5t schwere Gebilde kann mittels Kran in jeder beliebigen Höhe zwischen  $0,05\text{m} < H < 6,30\text{m}$  über der Heizplatte fixiert werden. Aufgrund der hervorragenden Wärmeleitung wird eine maximale Temperaturabweichung von  $1,2\text{K}$  gegenüber der mittleren Oberflächentemperatur gewährleistet. Für Messzwecke sind in der Kühlplatte diverse Öffnungen vorgesehen, durch die sowohl ein mechanischer als auch ein optischer Zugang für die Messungen realisiert werden kann.

Um die Konvektionsströmung durch wechselnde Umgebungsbedingungen nicht zu beeinflussen, kommt auf der Seitenwand neben einer inneren und einer äußeren passiven Isolierschicht ein aktives Kompensationsheizsystem zum Einsatz. Die Arbeitsweise dieses Systems beruht darauf, dass durch eine Heizmatte zwischen den beiden Isolierschichten die Temperatur an dieser Stelle an die Innenwandtemperatur angeglichen werden kann und damit ein Wärmeaustausch zwischen Innenraum und Heizmatte praktisch verhindert wird. Um räumliche Inhomogenitäten der Innenwandtemperatur, die z.B. durch die auf- und absteigende Konvektionsströmung verursacht werden, auszugleichen, ist dieses Heizsystem in 15 Segmente unterteilt.

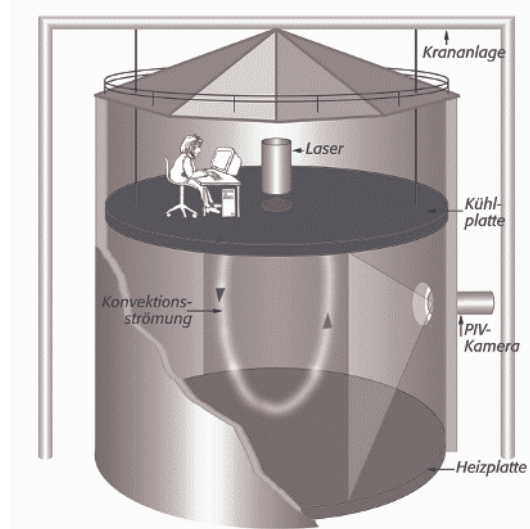


Abb. 1: Schema des RB-Experimentes „Ilmenauer Fass“

## Messtechnik

Die Schwierigkeit bei der Messung von Temperatur und Geschwindigkeit in einer konvektiven Luftströmung besteht darin, diese bei der Messung nach Möglichkeit nicht zu beeinflussen. Im Falle der Geschwindigkeitsmessung wird dies durch den Einsatz des LDA's gewährleistet. Dabei werden zwei einzelne Sonden mit unterschiedlicher Wellenlänge kombiniert, um beide, um  $90^\circ$  versetzte, horizontale Geschwindigkeitskomponenten zu messen. Durch die Montage der gesamten Messeinrichtung an einem Traversiersystem kann diese in vertikaler Richtung mit einer Schrittweite von  $10\mu\text{m}$  verschoben werden und somit das Geschwindigkeitsprofil in der Grenzschicht gemessen werden. Wegen der geringen Größe des Messvolumens der LDA-Sonden (Länge  $l_{MV}=2\text{mm}$ , Durchmesser  $\varnothing_{MV}=50\mu\text{m}$ ) ist die räumliche Auflösung dieser Profile insbesondere innerhalb der Grenzschicht deutlich höher als in allen bisherigen Experimenten.

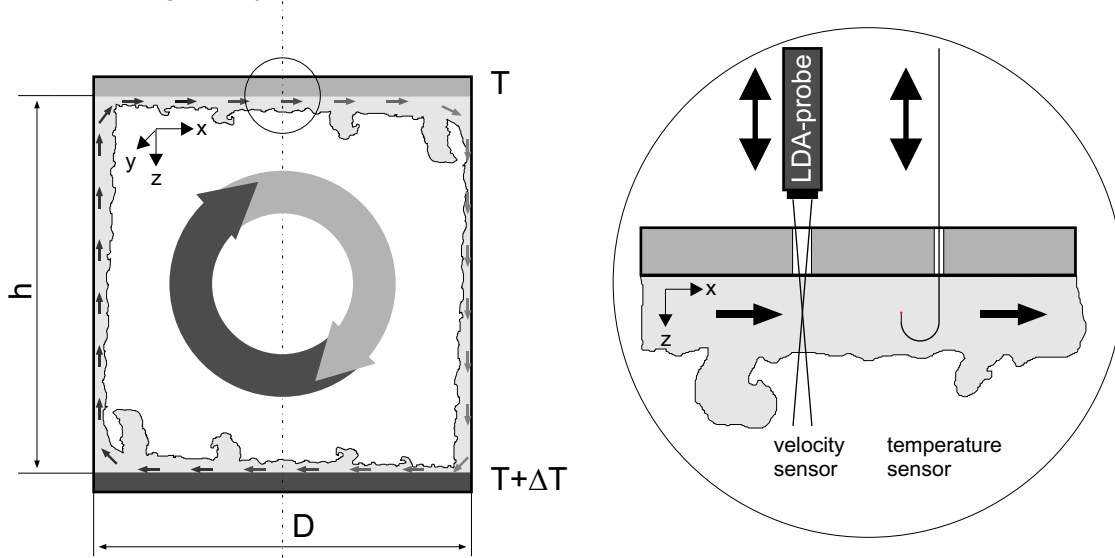


Abb. 2: Geschwindigkeits- und Temperaturmessung in der Grenzschicht eines RB-Experimentes: Struktur der Strömung (links) und Messprinzip (rechts)

Neben der Bestimmung der Grenzschichtdicke für verschiedene Rayleigh-Zahlen ( $Ra$ ) und Aspektverhältnisse ( $A$ ) aus den Geschwindigkeitsprofilen ist die Analyse von Geschwindigkeitszeitreihen von besonderem Interesse. Unter bestimmten Bedingungen zeigen sich hier ausgeprägte kohärente Oszillationen, welche durch eine periodische Änderung der Lage der Achse der Konvektionsrolle erklärbar sind.

## Ergebnisse

Wie schon einleitend erwähnt, hängt der Wärmetransport durch die RB-Zelle weitgehend von der Dicke und der Struktur der Grenzschichten in der Nähe der Heiz- und Kühlplatte ab. Für  $Pr=0.7$  und Rayleigh-Zahlen  $R < 10^{16}$  sagen theoretische Modelle eine laminare Plattengrenzschicht mit einem linearem Temperaturprofil und einem Geschwindigkeitsprofil nach Blasius voraus. Für größere Rayleigh-Zahlen wird ein Übergang zum so genannten, ultimativem Regime vorhergesagt. Dieser Zustand unterscheidet sich vom turbulentem Regime dadurch, dass der dimensionslose Wärmetransport ( $Nu$ -Zahl) durch die RB-Zelle vollkommen unabhängig von den molekularen Transportkoeffizienten des Fluides wird. Diese Eigenschaft liegt in einer Transition der Plattengrenzschicht von laminar zu turbulent (logarithmisches Temperatur- und Geschwindigkeitsprofil, Schlichting & Gersten 1997) begründet. Allerdings konnte aufgrund fehlender experimenteller dieser Zustand bis heute noch in keinem RB-

aufgrund fehlender experimenteller dieser Zustand bis heute noch in keinem RB-Experiment nachgewiesen werden.

In unserem Beitrag präsentieren wir Profile der mittleren Geschwindigkeit und weiterer statistischer Größen, die im Zentrum der Kühlplatte in einem Abstand von  $0,47\text{mm} < z < 90\text{mm}$  gemessen wurden und diskutieren deren Abhängigkeit von  $Ra$  und  $\Gamma$ . Ein vorläufiges Geschwindigkeitsprofil sowie das Profil der Fluktuationen, welche bei  $Ra=10^{12}$ ,  $\Gamma=1,13$  und  $Pr=0,7$  gemessen wurden sind in Abb. 3a dargestellt. Deutlich ist hierbei die Abweichung von der laminaren Blasius-Lösung zu erkennen. Inwieweit diese Messung auch für andere Parameter repräsentativ ist, muss eine Validierung über einen breiteren Parameterbereich zeigen. Temperaturprofilmessungen, für die stellvertretend ein Beispiel bei gleichen Parametern in Abb. 3b dargestellt ist, scheinen jedoch diese Abweichungen zu bestätigen.

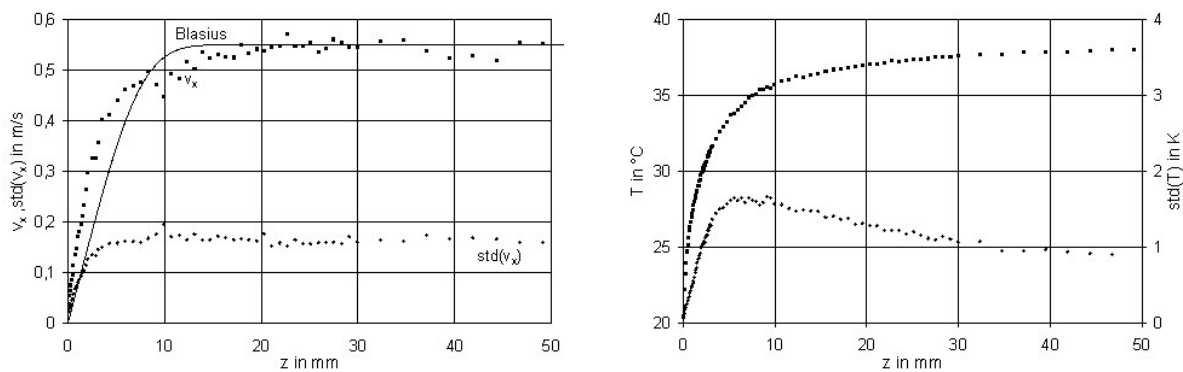


Abb. 3a und b: Profile von  $v_x$  und  $\sigma_{v_x}$  (linkes Diagramm) im Vergleich mit dem Geschwindigkeitsprofil in der laminaren Plattengrenzschicht sowie  $T$  und  $\sigma_T$  (rechtes Diagramm)

Untersucht man den zeitlichen Verlauf der Geschwindigkeit in einem Punkt, lassen sich insbesondere in der Komponente senkrecht zur Hauptströmungsrichtung (crossflow -  $v_y$ ) starke kohärente Oszillationen mit unterschiedlichen Zeitskalen erkennen, welche auch von anderen Autoren (Funfschilling & Ahlers 2004) beobachtet wurden. Die Ursachen dafür sind noch nicht in allen Einzelheiten geklärt, sie liegen jedoch hauptsächlich in der periodischen Änderung der Lage der Rotationsachse der Konvektionsströmung begründet. In Abb. 4 ist ein Beispiel gezeigt, in dem sowohl kurze Zeitskalen ( $t=40\text{s}$ , diese Zeit korrespondiert mit der Umlaufzeit der Strömung) als auch lange Zeitskalen ( $t=2000\text{s}$ ) zu erkennen sind.

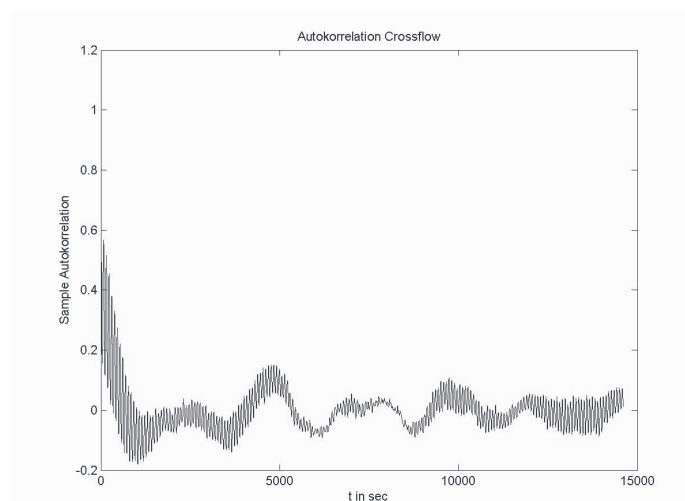


Abb. 4: Autokorrelationsfunktion der Geschwindigkeitskomponente  $v_y$  senkrecht zur Bahngeschwindigkeit einer großen Konvektionsrolle

## Dankesworte

Die Autoren danken hiermit der Deutschen Forschungsgemeinschaft (Zuwendung Nr. TH 497/16-1 and 16-2) und dem Thüringer Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst für die finanzielle Unterstützung der hier präsentierten Arbeit.

## Literatur

Castaing, B., Gunaratne, G., Heslot, F., Kadanoff, L., Libchaber, A., Thomae, S., Wu, X.-Z., Zaleski, S., Zanetti, G., 1989, Scaling of hard thermal turbulence in Rayleigh-Bénard convection. *J. Fluid Mech.* 204, 1--30.

Deardorff, J.W., Willis, J.E., 1967, Investigation of turbulent thermal convection between horizontal plates. *J. Fluid Mech.* 28, (4), 675-704.

Funfschilling, D., Ahlers, G., 2004, Plume Motion and Large-Scale Circulation in a Cylindrical Rayleigh-Bénard Cell. *Phys. Rev. Lett.* 92, 194502

Grossmann, S., Lohse, D., 2000, Scaling in thermal convection: a unifying theory. *J. Fluid Mech.* 407, 27-57

Malkus, W. V. R., 1954, Discrete transitions in turbulent convection. *Proc. Roy. Soc. A* 225, 185.

Niemela, J.J., Skrbek, L., Sreenivasan, K.R., Donnelly, J.R., 2000, Turbulent convection at very high Rayleigh numbers. *Nature* 404, 837-840.

Schlichting, H., Gersten, K., 1997, *Grenzschichttheorie*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 9.Auflage [450-455]