

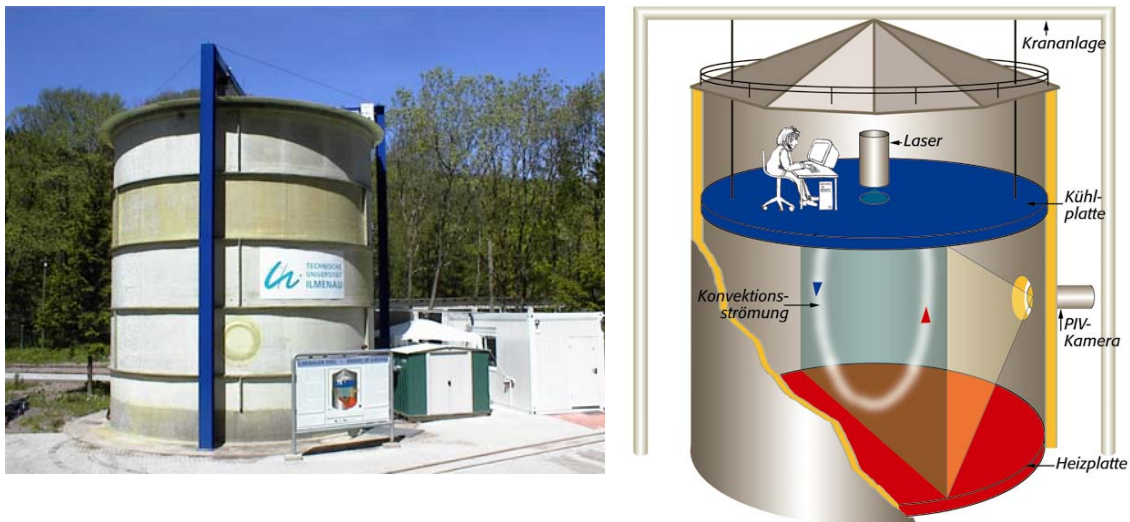
## LDA-Messungen in turbulenten, nicht-isothermen Grenzschichten am „Ilmenauer Fass“

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

Technische Universität Ilmenau, Fakultät für Maschinenbau  
PF 100565, 98684 Ilmenau

### 1. Motivation

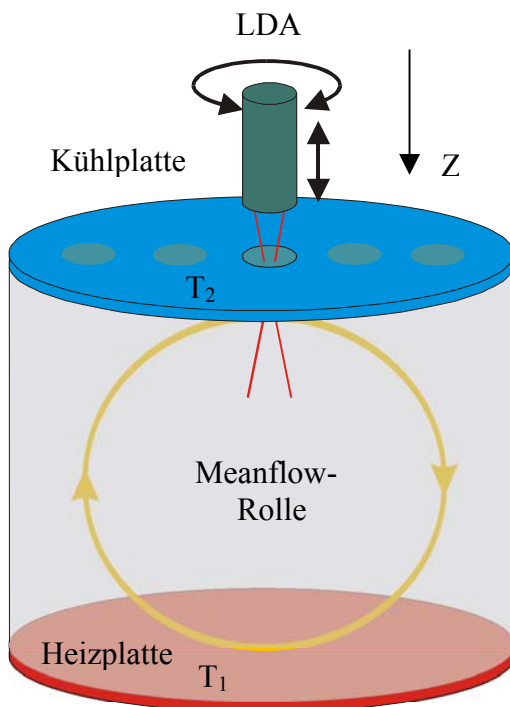
Das „Ilmenauer Fass“ ist ein Großgerät zur Erforschung der turbulenten thermischen Konvektion bei Rayleigh-Zahlen  $Ra < 10^{12}$ . In einem zylindrischen Behälter mit einem Durchmesser von 7m und einer variablen Höhe von 0,1m bis 6,30m wird eine Luftströmung durch natürliche Konvektion über der beheizten Boden- und der gekühlten Deckplatte erzeugt. In diesem sogenannten Rayleigh-Bénard-Experiment ist der Wärmetransport abhängig von den Ähnlichkeitskennzahlen Rayleigh-Zahl ( $Ra$ ), Prandtl-Zahl ( $Pr$ ) und Aspektverhältnis ( $A$ ). Von besonderem Interesse ist dabei der Zusammenhang zwischen  $Ra$  und  $Nu$ , der signifikant vom Geschwindigkeits- und Temperaturfeld in den Grenzschichten an der Boden- und Deckplatte beeinflusst wird. Aufgrund der großen Abmessungen des Konvektionsexperiments beträgt das kleinste Längenmaß (Kolmogorov-Länge) einige Millimeter. Damit ist im vorgestellten Experiment erstmals die Möglichkeit für eine direkte, hochauflösende Geschwindigkeitsmessung in der Grenzschicht gegeben. Die resultierenden Profile und Zeitreihen sollen das Verständnis der statistischen Eigenschaften der Geschwindigkeits- und Temperaturgrenzschichten vorantreiben.



**Abb. 1:** Konvektionsexperiment „Ilmenauer Fass“, Gesamtansicht und schematischer Aufbau.

## 2. Experiment

Zur Charakterisierung der Grenzschicht an der gekühlten Deckplatte der Messzelle werden lokale Geschwindigkeitsmessungen mittels LDA und Temperaturmessungen mit Mikrothermistoren durchgeführt. Beide Messsysteme können durch mehrere Fenster mit einem Traversiersystem (Schrittweite  $10\ \mu\text{m}$ ) durch die Grenzschicht in vertikaler Richtung bewegt werden. Für die Messung der Strömungsgeschwindigkeit in der viskosen Grenzschicht wird eine 1d LDA-Sonde von POLYTEC mit einem  $160\text{mm}$  Objektiv verwendet. Daraus ergibt sich ein Messvolumen von ca.  $250\ \mu\text{m} \times 50\ \mu\text{m}$  bei einer Laserwellenlänge von  $690\text{nm}$ . Die Aufnahme der Geschwindigkeitsprofile erfolgt nacheinander in Mean- und Crossflow-Richtung bis in  $100\text{mm}$  Grenzschichttiefe mit einer Schrittweite von minimal  $100\ \mu\text{m}$  (Wandnähe) und maximal  $5000\ \mu\text{m}$  (Bulknähe). Für die statistische Auswertung der Geschwindigkeitsdaten werden an jeden Punkt Zeitreihen mit einer Messdauer von 35 Minuten aufgenommen, wobei maximal 65536 Messwerte aufgezeichnet werden können. Der Einsatz einer Dantec-Nebelsonde gewährleistet je nach Messposition eine LDA-Burstrate zwischen 1 und 20 Hz.



**Abb. 2:** LDA-Grenzschichtmessung unter der Kühlplatte bei Aspektverhältnis  $A=1$ , Messprinzip und Sondenposition im Original.

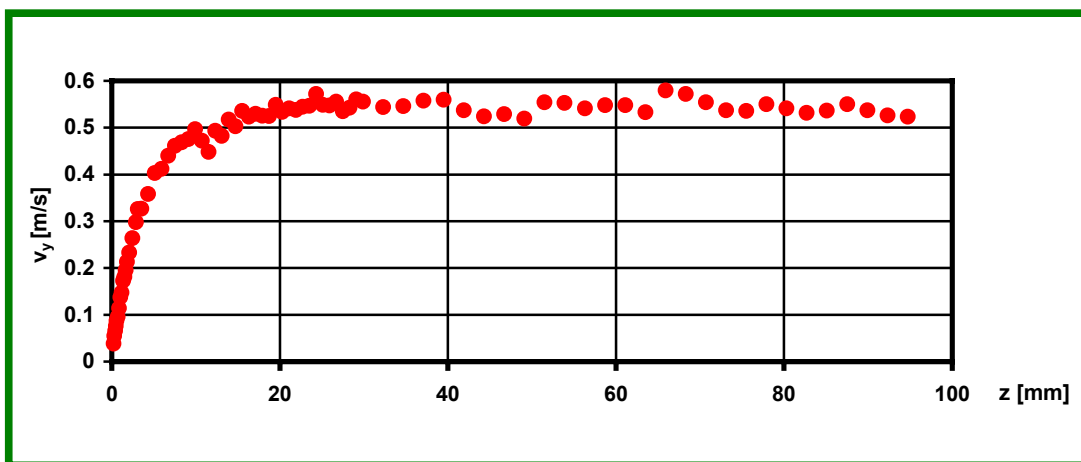
Die hochauflösenden Geschwindigkeitsmessungen in Mean- und Cross-Flow-Richtung werden für variable Rayleigh-Zahlen (Temperaturdifferenz und Abstand zwischen geheizter Grundplatte und gekühlter Deckplatte) und an unterschiedlichen

Positionen entlang der Hauptströmungsrichtung der Konvektionswalze vorgenommen. Damit lässt sich die Entwicklung der Grenzschicht experimentell bestimmen und mit Grenzschichtmodellen vergleichen.

Parallel zu den Geschwindigkeitsmessungen erfolgt die Charakterisierung der thermischen Grenzschicht mit Hilfe von Mikro-Thermistoren, die mit dem gleichem Traversierungssystem durch verschiedene Fenster in der Kühlplatte in z-Richtung bewegt werden.

### 3. Ergebnisse

Abbildung 3 zeigt ein typisches Grenzschichtprofil für eine Rayleigh-Zahl von  $Ra = 10^{12}$ . Die Heizplattentemperatur beträgt  $70^\circ\text{C}$ , die Kühlplattentemperatur  $20^\circ\text{C}$ . Bei der höchsten Kühlplattenposition von  $6,3\text{m}$  ( $A=1$ ) bildet sich in der Zelle eine große Konvektionswalze aus, dessen Lage und mittlere Geschwindigkeit über Wochen konstant bleiben. Deshalb ähnelt das Geschwindigkeitsprofil in Kühl- und Heizplattennähe dem der klassischen Grenzschichtströmung. Die Grenzschichtdicke beträgt bei den gewählten Parametern  $20\text{mm}$ .



**Abb. 3:** Geschwindigkeitsprofil unter der Mitte der Kühlplatte bei  $Ra = 10^{12}$ ,  $T_1 = 70^\circ\text{C}$ ,  $T_2 = 20^\circ\text{C}$ , Zellenhöhe  $H = 6,3\text{m}$ .

In Wandnähe ( $z = 0 - 0,5\text{mm}$ ) zeigt das Profil einen linearen Anstieg (Abb. 4). Dies deutet auf die Existenz einer laminaren Unterschicht hin. Mit Hilfe klassischer Grenzschichttheorie nach Schlichting [1] lassen sich daraus die Schubspannungsgeschwindigkeit

$$\text{mit } v_{y+}^2 = \nu \cdot \frac{d\bar{v}_y}{dz}$$

$$\bar{v}_y(z) = \frac{\tau}{\rho \cdot \nu} \cdot z$$

$\tau$  - Schubspannung

$\rho$  - Dichte

$\nu$  - kinematische Viskosität

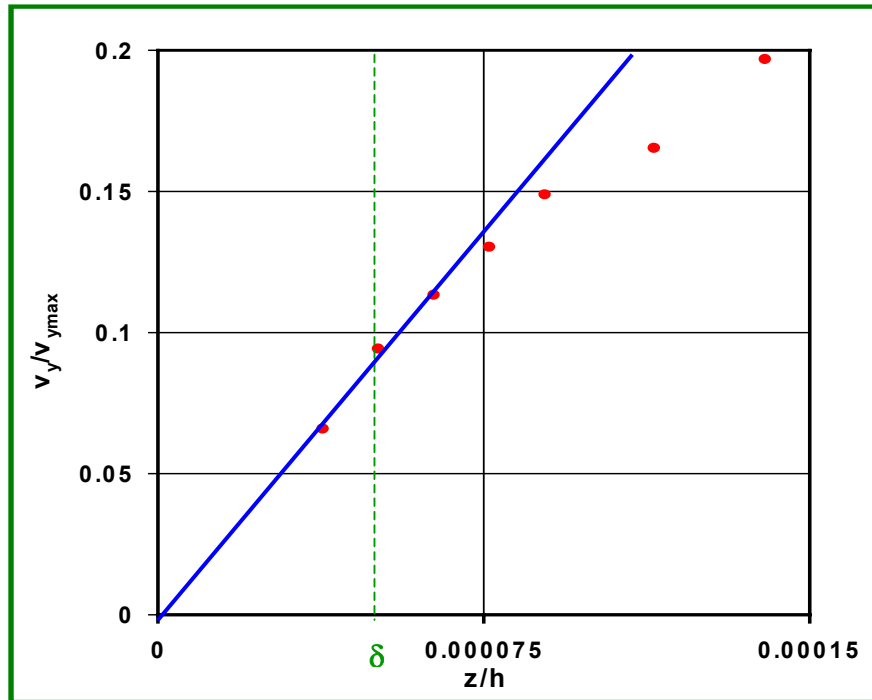
# 19.4

und die Dicke der laminaren Unterschicht

$$\delta = \frac{\nu}{v_{y+}}$$

berechnen.

Im konkreten Fall betragen die Schubspannungsgeschwindigkeit  $0,05\text{ms}^{-1}$  und die Dicke der laminaren Unterschicht  $0,3\text{mm}$ .



**Abb. 4:** Darstellung der laminaren Unterschicht aus den Daten von Abb. 3.

Im Bereich von  $0,5\text{mm}$  bis  $20\text{mm}$  zeigt das Grenzschichtprofil einen logarithmischen Verlauf, welcher bei der klassischen Plattengrenzschicht durch die Beziehung:

$$\bar{v}_y(z) = \frac{v_{y+}}{\kappa} \ln \frac{v_{y+} \cdot z}{\nu} + B$$

beschrieben wird. Die Konstanten  $\kappa$  (Karman-Konstante) und  $B$  betragen bei glatter Wand und isothermen Verhältnissen  $0,41$  und  $5,0$ . Die Profilmessungen in der Konvektionsströmung ergeben folgende modifizierte Werte (Abb.5):

$$\kappa = 0,31 \quad \text{und} \quad B = -1,44$$

Dies ist unter anderem auf die Existenz der thermischen Grenzschicht und der damit verbundenen Auftriebskräfte zurückzuführen.

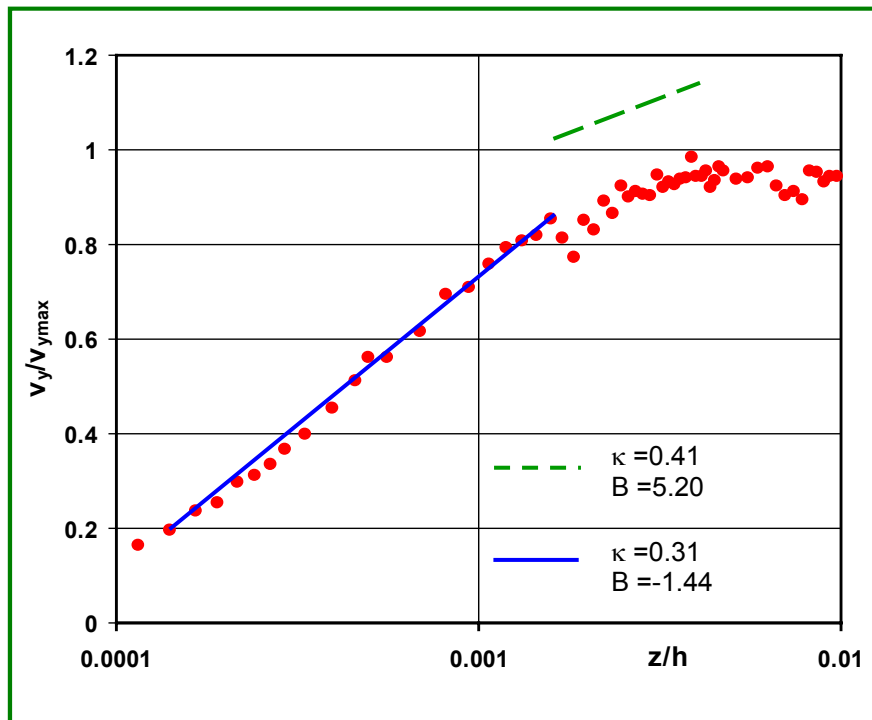


Abb. 5: Logarithmische Wandprofil bei nicht-isotroper Grenzschicht. Die gestrichelte Kurve entspricht der isotropen glatten Wand.

Die thermische Grenzschicht wird durch das Temperaturprofil in Abbildung 6 beschrieben. Es ist im Vergleich zum Geschwindigkeitsprofil ein prinzipiell ähnlicher Verlauf zu erkennen. Die Grenzschichtdicke wird hier in der Literatur aus dem Schnittpunkt der Anstiegsgerade an der Wand mit der Waagerechten der Bulktemperatur berechnet und beträgt 5mm. Die Theorie der Rayleigh-Bénard-Konvektion (Grossmann & Lohse[2]) sagt für eine Rayleigh-Zahl von  $Ra = 10^{12}$  eine annähernd gleiche Dicke für die viskose und thermische Grenzschicht voraus. Dies wurde durch die Messungen am „Ilmenauer Fass“ bestätigt.

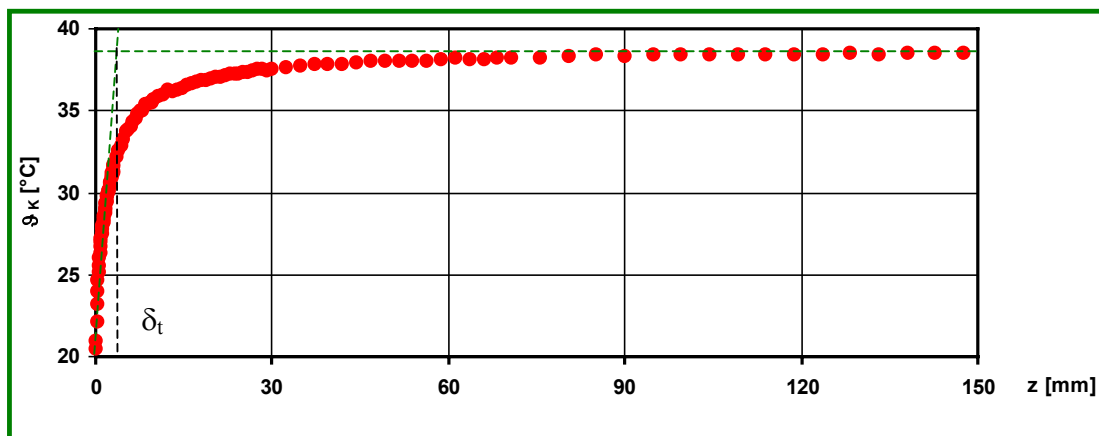


Abb. 6: Temperaturprofil unter der Mitte der Kühlplatte bei  $Ra = 10^{12}$ ,  $T_1 = 70^{\circ}\text{C}$ ,  $T_2 = 20^{\circ}\text{C}$ , Zellenhöhe  $H = 6.3\text{m}$ . Die Grenzschichtdicke beträgt 4mm.

## 4. Zusammenfassung

Am Großgerät „Ilmenauer Fass“ zur Untersuchung der Rayleigh-Bénard-Konvektion in Luft wurden Geschwindigkeits- und Temperaturprofile in der Grenzschicht unter der gekühlten Deckplatte mit bisher unerreichter räumlicher und zeitlicher Auflösung gemessen. Die ermittelten Grenzschichtdicken zeigen eine gute Übereinstimmung mit der Theorie. Bei der Charakterisierung der gemessenen nicht-isothermen Geschwindigkeitsprofile zeigen sich Ähnlichkeiten zur klassischen isothermen Plattengrenzschicht.

Neben der Grundlagenforschung zur Rayleigh-Bénard-Konvektion dienen die vorgestellten Untersuchungen z.B. auch zur Charakterisierung von Raumluftströmungen, zur Optimierung von Wärmetauschern und zur Erforschung atmosphärischer Strömungen.

Die Arbeiten werden von der Deutschen Forschungsgemeinschaft unter dem Geschäftszeichen TH 497/16 gefördert.

## 5. Literatur

- [1] Schlichting, H., Gersten, K.: Grenzschicht-Theorie  
Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1997
- [2] Grossmann, S., Lohse, D.: Scaling in thermal convection: a unifying theory  
J. Fluid Mech. (2000), vol. 407, pp. 27-56