

# Mitteilung

## Fachgruppe: Turbulenz und Transition

Untersuchung von Sekundärströmungen in differenziell beheizten Rohrströmungen mittels Direkter Numerischer Simulationen

André Dachwitz, Christian Bauer, Claus Wagner,  
DLR, Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik, Bunsenstr. 10, 37073 Göttingen  
[andre.dachwitz@dlr.de](mailto:andre.dachwitz@dlr.de)

Turbulente Mischkonvektion in vertikalen Rohrströmungen spielt bei der Wärmeübertragung in vielen technischen Anwendungen eine wesentliche Rolle, z. B. in den Wärmeempfängern eines Solarturms (B. Norton (2013)). Nach R. Narasimha und K.R. Sreenivasan (1979) kann die Erwärmung der Strömung in vertikalen Rohren auch zu einer Relaminarisierung und damit zu einer Verringerung des Widerstandskoeffizienten führen.

Um die Turbulenzstruktur der Grenzschichtströmung gezielt zu beeinflussen und damit ggf. den Widerstandsbeiwert der Strömung zu reduzieren, wurden im Rahmen dieser Arbeit direkte numerische Simulationen (DNS) der vertikalen Rohrströmung mit variabler sinusförmiger Erwärmung und Kühlung der Wand durchgeführt. Dabei werden die dimensionslosen inkompressiblen Navier-Stokes-Gleichungen mit einer Boussinesq-Approximation zusammen mit der Energiegleichung mit einer Finite-Volumen-Methode mit zentralen Differenzen vierter Ordnung diskretisiert (Feldmann und Wagner, 2012) und zeitlich mit

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \vec{u} + \nabla p = \frac{1}{Re_b} \nabla^2 \vec{u} + \frac{Gr}{Re_b^2} \theta \delta_{ij} \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \theta = \frac{1}{Pr Re_b} \nabla^2 \theta \quad (3)$$

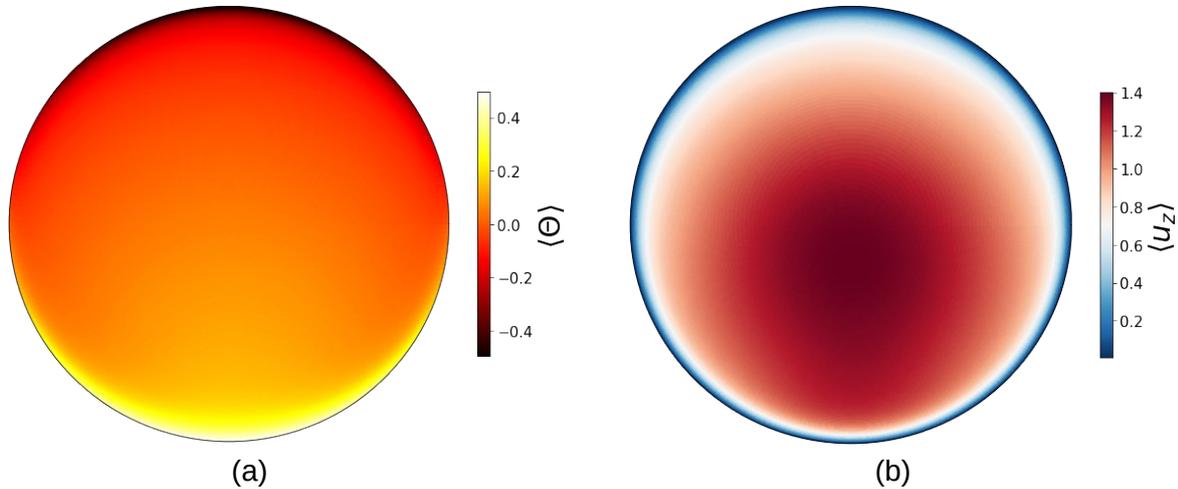
einem semi-impliziten Euler-Leapfrog-Verfahren zweiter Ordnung (Shishkina und Wagner, 2004) integriert. Die Transportgleichungen (1)-(3) werden mit der Volumenstromgeschwindigkeit  $u_b$  und dem Durchmesser  $D$  des glatten Rohrsegments der Länge  $21 D$  normiert, woraus sich mit der kinematischen Viskosität  $\nu$  von Luft die Reynolds-Zahl  $Re_b = u_b D / \nu = 4328$  ergibt. Entsprechend werden die Prandtl-Zahl  $Pr = \nu / k = 0.71$ , mit der Wärmeleitfähigkeit  $k$  der Luft und die Grashof-Zahl  $Gr = g \beta \Delta T u_b^3 / \nu^2 = 9.5 \cdot 10^6$ , mit der Temperaturdifferenz  $\Delta T$  zwischen dem Maximum des wärmeren und dem Minimum des kälteren Bereichs, der Schwerebeschleunigung  $g$  und dem Wärmeausdehnungskoeffizienten  $\beta$  definiert. Die Wandtemperatur wurde in Umfangsrichtung  $\varphi$  gemäß

$$\theta_w = \sin(\varphi) \quad (4)$$

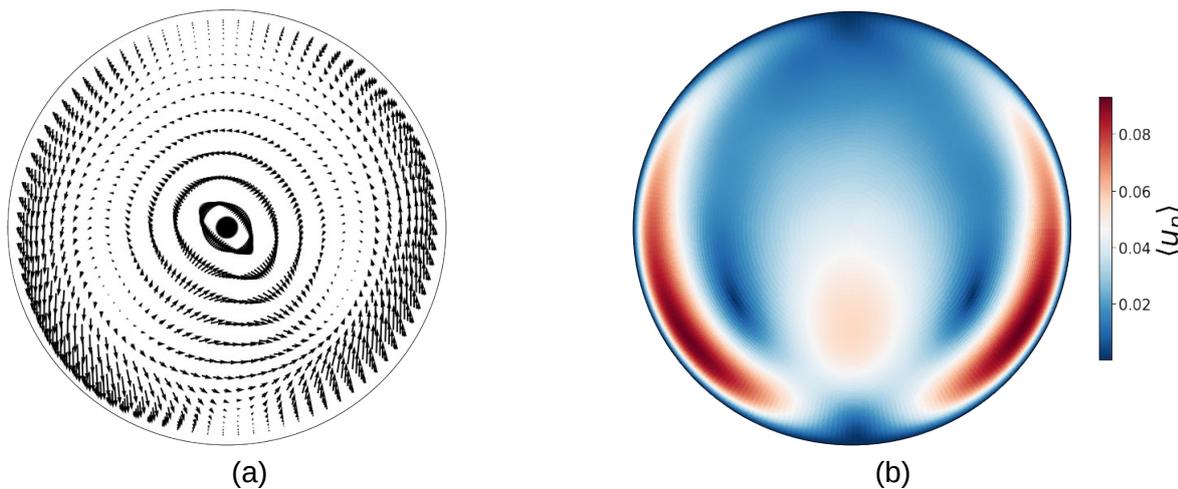
variiert. Die Temperatur wird mit  $\Delta T$  und dem arithmetischen Mittel der Wandtemperaturen  $T_0$  normiert, woraus sich  $\theta = (T - T_0) / \Delta T$  ergibt. Die auftriebsbedingte Beschleunigung bzw. Abbremsung der warmen bzw. kalten Strömungsbereiche führt zur Ausbildung von Sekundärströmungen ähnlich zu denen in einem gekrümmten Rohr (A. Noorani et al. (2013)). Solche Sekundärströmungen wurden auch für den Fall temperaturabhängiger Flüssigkeitseigenschaften beobachtet (A. Antoranz et al. (2020)). Abbildung 1 zeigt die Felder der mittleren Temperatur und der mittleren axiale Strömungsgeschwindigkeit im Rohrquerschnitt. In Abbildung 1a sind im oberen Teil des Querschnitts niedrigere Temperaturen als im unteren Teil zu erkennen, was auf die differentielle Beheizung zurückzuführen ist. Dies führt aufgrund der Auftriebskraft zu einer Verlangsamung der mittleren axialen Strömungsgeschwindigkeit im kühleren Teil und zu einer Beschleunigung im wärmeren Teil, wodurch sich ihr Maximum in Richtung der erwärmten Wand verschiebt (Abbildung 1b). Dadurch ist das Geschwindigkeitsfeld nicht achsensymmetrisch und es bildet sich eine Sekundärströmung aus. Letztere ist in Abbildung 2 als

Vektordarstellung der mittleren Geschwindigkeitskomponenten  $\langle u_r \rangle$  und  $\langle u_\varphi \rangle$ , sowie der Betrag dieser mittleren Geschwindigkeiten  $\langle u_p \rangle = \sqrt{\langle u_r \rangle^2 + \langle u_\varphi \rangle^2}$ , im Rohrquerschnitt visualisiert. Abbildung 2a zeigt zwei gleichgerichtete Strömungswirbel, von denen der linke das kühlere Fluid entlang der linken Rohrwand vom oberen zum unteren Teil des Querschnitts transportiert, während

der rechte das wärmere Fluid entlang der rechten Rohrwand vom unteren zum oberen Teil des Querschnitts transportiert. Die Zentren der Strömungswirbel sind an den Minima der Absolutbeträge der Geschwindigkeitskomponenten normal zur Hauptströmungsrichtung in Abbildung 2b zu erkennen. Weiterhin ist zu erkennen, dass die Sekundärströmung in Wandnähe am stärksten ist und an den Stellen der Temperaturmaxima schwächer wird (vgl. Abbildung 1a). Diese auftriebsinduzierte Sekundärströmung wird im Rahmen des Workshops turbulenzstatistisch erklärt und mit der Sekundärströmung in gekrümmten Rohren verglichen.



**Abbildung 1:** (a) Mittlere Temperatur  $\langle \theta \rangle$ , (b) und mittlere axiale Strömungsgeschwindigkeit  $\langle u_z \rangle$  in einem Rohrquerschnitt.



**Abbildung 2:** (a) Vektordarstellung der mittleren Geschwindigkeitskomponenten  $\langle u_r \rangle$  und  $\langle u_\phi \rangle$ , (b) Betrag der mittleren Geschwindigkeiten  $\langle u_p \rangle = \sqrt{\langle u_r \rangle^2 + \langle u_\phi \rangle^2}$  in einem Rohrquerschnitt.

- B. Norton (2013). Harnessing Solar Heat Vol. 18. *Springer Science & Business Media*. ISBN: 978-94-007-7275-5.
- R. Narasimha und K.R. Sreenivasan (1979). Relaminarization of Fluid Flows. *Advances in Applied Mechanics*, vol. 19, pp. 221-309.
- A. Antoranz, O. Flores und M. García-Villalba (2020). DNS of Turbulent Pipe Flow With Temperature-Dependent Fluid Properties Subject to Non-Uniform External Heating. *Direct and Large Eddy Simulation XII*, pp. 233-238.
- A. Noorani, G. K. El Khoury und P. Schlatter (2013). Evolution of Turbulence Characteristics from Straight to Curved Pipes. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, vol. 41 pp. 16-26.
- D. Feldmann und C. Wagner (2012). Direct Numerical Simulation of Fully Developed Turbulent and Oscillatory Pipe Flows at  $Re_\tau = 1440$ . *Journal of Turbulence*, vol. 13, N32.
- O. Shishkina und C. Wagner (2004). Stability Conditions for the Leapfrog-Euler Scheme with Central Spatial Discretization of any Order. *Applied Numerical Analysis & Computational Mathematics*, vol. 1, pp. 315-326.