

## **Titel:**

Experiments in Pipe Flows at Transitional and Very High Reynolds Numbers

## **Verfasser:**

Emir Öngüner

## **Zusammenfassung (Deutsch):**

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit den experimentellen Untersuchungen turbulenter Rohrströmung. Die Experimente wurden in zwei renommierten Rohr-Windkanälen durchgeführt: CoLaPipe (Cottbus Large-Pipe) an der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus-Senftenberg und CICLoPE (Center for International Cooperation in Long Pipe Experiments) an der Universität Bologna. Der erste Teil der Arbeit konzentriert sich auf die Entwicklung der turbulenten Rohrströmung unter Berücksichtigung der Druckschwankungen an der Rohrwand ( $110.000 \leq Re_b \leq 760.000$ ), die entlang der axialen Richtung gemessen wurden. Damit wurde versucht die Position festzustellen wo die Strömung vollständig turbulent wird. Die Ergebnisse zeigen, dass der Turbulenz mit der Anwendung von Blenden in stromaufwärts gerichteter Richtung angeregt wird. Das quadratische Mittel des Wanddrucks (normalisiert mit inneren Variablen) nimmt mit der Reynolds-Zahl ab. Das zweite Ziel dieser Arbeit ist die Untersuchung der Rohrstukturenlängen mit Hitzdrahtanemometrie ( $3.500 \leq Re_r \leq 37.000$ ) und Particle Image Velocimetry ( $60.000 \leq Re_b \leq 140.000$ ) in voll ausgebildeter Turbulenz in Bezug auf ihre Wellenzahlabhängigkeit und räumliche Korrelation. Damit wurden die sogenannten Very Large-Scale Motions (VLSM: sehr großskalige Strukturen) identifiziert, die eine axiale Länge von ca.  $20R$  ( $R$ : Radius) besitzen. Nach der Hälfte des Radius wurde eine starke Abnahme dieser Strukturlängen beobachtet. Die Position der äußeren spektralen Peaks (OSP: outer spectral peaks), die den größten Energieinhalt pro Wellenzahl außerhalb der viskosen Wandregion darstellen, bewegt sich in Richtung der Wand als sich die Reynolds-Zahl erhöht. Ungefähr 45% der kumulativen Energie wird von Strukturen länger als  $3R$  beigetragen, während der Energiebeitrag für längere Strukturen  $\lambda_x / R > 20$  auf 15% sinkt. Räumliche Autokorrelationen angewendet auf die Particle Image Velocimetry- (PIV) Ergebnisse liefern einige Hinweise auf das Verhalten dieser turbulenten Strukturen. Wenn sich der korrelierte Punkt stromabwärts bewegt, zeigt der Korrelationskoeffizient ein periodisches Verhalten welches als ein Zeichen für die Existenz von turbulenten Strukturen betrachtet wird. Diese korrelierten PIV-Daten der Positionen um die Rohrachse liefern ähnliche Strukturlängen in Strömungsrichtung mit den Ergebnissen der Hitzdrahtanemometrie.

## **Zusammenfassung (Englisch):**

The present work aims at investigating the turbulence in pipe flow. Experiments have been performed in two unique pipe facilities: CoLaPipe (CottbusLarge-Pipe) and CICLoPE (Center for International Cooperation in Long Pipe Experiments). The first part of the thesis is focusing on the development of flow considering pressure fluctuations ( $110.000 \leq Re_b \leq 760.000$ ) measured along the axial direction to find the location where the flow becomes fully developed turbulent. Results show that application of ring disturbance to the incoming flow initiates turbulence much earlier upstream. The root-mean-square values of the wall pressure normalized by the inner variables are found to be decreasing as a function of Reynolds number. The second aim of this thesis is determining the streamwise lengths of large-scale structures in fully developed turbulent state with respect to their wavenumber dependency and spatial correlation using hot-wire anemometry ( $3.500 \leq Re_\tau \leq 37.000$ ) and Particle Image Velocimetry ( $60.000 \leq Re_b \leq 140.000$ ) respectively. Meandering structures, usually referred as VLSM (very large-scale motions), have been identified with claimed extension up to  $20R$ , where  $R$  is the pipe radius. After reaching half of the radius a strong decrease of structure lengths is observed. The location of the outer spectral peaks (OSP) which represent the largest energy content per wavenumber outside the viscous wall region is moving towards the wall as the Reynolds number increases. Approximately 45% of the cumulative energy is contributed by structures longer than  $3R$  while for longer structures such as  $\lambda_x / R > 20$  energy contribution drops down to 15%. Spatial auto-correlations applied on PIV results deliver some hints about the behavior of the turbulent structures. As the correlated point is moving downstream of the pipe, the correlation coefficient shows some periodic behavior. This motion is considered as a sign of the presence of turbulent structures. Correlated data for wall-normal locations around pipe axis provide similar streamwise structure lengths as those obtained in hot-wire measurements.