

Isothermal and non-isothermal turbulent flow over solid waves

Transport and structure

Doctoral Thesis

Author(s):

Kruse, Nils

Publication date:

2005

Permanent link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-004940290>

Rights / license:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#)

Diss. ETH No. 16031

ISOTHERMAL AND NON-ISOTHERMAL
TURBULENT FLOW OVER SOLID WAVES:
TRANSPORT AND STRUCTURE

A dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH

for the degree of
Doctor of Technical Sciences

presented by
Nils Kruse
Dipl.-Ing.
(University of Hannover)
born on June 23, 1975
Germany

Accepted on the recommendation of
Prof. Dr. Philipp Rudolf von Rohr, examiner
Prof. Dr. Thomas Rösgen, co-examiner

Zurich, 2005

Abstract

An experimental study on transport phenomena in a turbulent flow with separation in a wide water channel (aspect ratio 12:1) is presented. The wavy bottom wall, characterized by the wavelength Λ and the wave amplitude $2a$, is heated with a constant heat flux under non-isothermal condition. Spatiotemporal information on the flow velocity is obtained from digital particle image velocimetry (PIV). Digital particle image thermometry (PIT) is used to assess simultaneously the temporal and spatial variation of velocity and temperature fields. The temperature is measured with thermochromic liquid crystal particles (TLC) which change their reflected wavelengths as a function of the temperature.

At isothermal conditions, measurements are performed at Reynolds numbers up to 20500, defined with the bulk velocity and the half-height of the channel. Large ensembles of instantaneous velocity fields are decomposed into orthogonal eigenfunctions. A projection of instantaneous snapshots of the velocity field onto eigenfunctions is used to extract the time development of flow structures of defined kinetic energy. Large longitudinal structures with a characteristic spanwise scale $\mathcal{O}\{1.5\Lambda\}$ can be found by projecting instantaneous realizations of the flow onto the first two eigenfunctions. Any interactions between coherent structures result in a merger into newer structures via complete, partial, and fractional pairings or divisions. The structures retain the characteristic separation and contribute significantly to the kinetic energy. The meandering motion of $\mathcal{O}\{1.5\Lambda\}$ -scales provides a mechanism for the transport of momentum.

To quantify how turbulence statistics and eigenfunctions in the outer

part of the shear layer depend on the interaction with the wall, three wavy surfaces, characterized by different amplitude-to-wavelength ratios, are investigated. Similar dominant eigenfunctions with similar spanwise scales are obtained in the *outer* part of the wall shear layer. The root-mean-square of the streamwise and spanwise velocity fluctuations, Reynolds shear stress, Reynolds stress coefficients, and turbulent kinetic energy are approximately the same regardless the surface roughness, when normalized with the friction velocity. The structure of stress producing motions in the outer flow could have a universal character, in that they are influenced by turbulence producing processes in the inner flow only through the magnitude of the friction velocity.

The scaling of the outer flow structures is found to be approximately the same for a Reynolds number range of $Re_h=2400-20500$ for those parts of the turbulent structure which are not directly affected by viscosity (larger eddies). Reynolds similarity is not valid in the fine-structure of turbulence and in the region close to the wall.

The decomposition of combined velocity and temperature fields, obtained from measurements under non-isothermal conditions, reveals a quantitative agreement between large-scale thermal and momentum structures. The correlation reduces rapidly at higher eigenmodes. The characteristic spanwise scale $\mathcal{O}\{1.5\Lambda\}$ can be confirmed in the first dominant eigenmodes of the scalar and momentum field. The distribution of budget terms for the heat fluxes, $\overline{u'T'}$ and $\overline{v'T'}$, are similar to those for the two Reynolds stress components, $\overline{u'u'}$ and $\overline{u'v'}$. Over the channel cross-section, the wall-normal heat flux is an order of magnitude smaller than the streamwise heat flux, except close to the wall, where the contribution of the normal heat flux increases significantly. A proper orthogonal decomposition reveals dominant scales in the turbulent heat flux. Larger scale structures make a large contribution to the streamwise heat flux and smaller scales of motion are more important contributors to normal heat flux near the wall. The findings provide a basis for improving the momentum and heat transport through large and small eddies between the wavy wall and the bulk fluid.

Zusammenfassung

Die vorliegende experimentelle Arbeit untersucht Transportvorgänge in einer turbulenten ausgebildeten Strömung durch einen Rechteckkanal mit einem Seitenverhältnis von 12:1. Über eine beheizte wellige Grundfläche, die über ihre Wellenlänge Λ und Amplitude $2a$ charakterisiert ist, wird der Strömung bei nicht-isothermen Bedingungen ein konstanter, definierter Wärmestrom zugeführt. Räumlich und zeitlich aufgelöste Informationen über die Fluidgeschwindigkeit werden mit dem digitalen Particle-Image-Velocimetry (PIV) Verfahren gewonnen. Ein Flüssigkristall-Thermometrie-Verfahren (LCT) ermöglicht die gleichzeitige Erfassung der zweidimensionalen Geschwindigkeits- und Temperaturfelder. Dabei wird die Temperatur mit in dem Fluid suspendierten Flüssigkristallen bestimmt, die ihre emittierte Wellenlänge als Funktion der Temperatur ändern.

Unter isothermen Bedingungen werden Messungen bei Reynoldszahlen bis 20500 durchgeführt. Die Reynoldszahl ist definiert über die querschnittsgemittelte Geschwindigkeit und die halbe Kanalhöhe. Eine POD-Zerlegung (proper orthogonal decomposition) der Geschwindigkeitskomponente in Strömungsrichtung liefert dominante Eigenfunktionen. Die Projektion zeitlich aufgelöster Geschwindigkeitsfelder auf Eigenfunktionen wird als Filter eingesetzt, der die Beobachtung zeitlich aufgelöste Grobstrukturen definierter kinetischer Energie erlaubt. Die nach den ersten beiden energiereichsten Eigenfunktionen gefilterten Geschwindigkeitsfelder zeigen eine charakteristische Skala von 1.5Λ in Richtung der Kanaltiefe. Die in Strömungsrichtung ausgerichteten Strukturen interagieren miteinander, wobei deren Grösse und Abstand kon-

stant bleiben. Die oszillierenden Seitwärtsbewegungen der Grobstrukturen geben einen Einblick in die Vorgänge des instationären Impulstransportes.

Um den Einfluss der gewellten Wand auf Grobstrukturen sowie Turbulenzgrößen zu quantifizieren, werden drei gewellte Oberflächen untersucht, die durch unterschiedliche Verhältnisse der Amplitude zur Wellenlänge gekennzeichnet sind. Dabei werden für die dominanten Eigenfunktionen ähnliche charakteristische Skalen in Richtung der Kanaltiefe gefunden. Die quadratischen Mittelwerte der Geschwindigkeiten, die Reynoldsspannungen, die spektralen Kreuzkorrelationskoeffizienten, und die turbulenten kinetischen Energien sind ähnlich in ausreichender Entfernung von der gewellten Wand unabhängig von der Wandgeometrie, sofern sie mit der Reibungsgeschwindigkeit skaliert werden.

Die Skalierung der Grobstrukturen im Aussenbereich ist ähnlich für den Reynoldszahlenbereich von 2400 bis 20500. Die Reynoldsähnlichkeit gilt nicht für kleine Strukturen und den welligen, wandnahen Bereich.

Die POD-Zerlegung der simultan gewonnenen Geschwindigkeits- und Temperaturfelder zeigt eine grosse Ähnlichkeit der Eigenfunktionen beider Felder, wobei die Korrelation bei höheren POD-Modi abnimmt. Die charakteristische Skala von 1.5Λ in Richtung der Kanaltiefe kann für die Grobstrukturen des Impuls- und thermischen Feldes bestätigt werden. Kreuzspektren der turbulenten Wärme- und Impulsübertragung lassen eine grosse Korrelation zwischen Wärme- und Impulstransport erkennen. Der wandnormale Transportterm ist im Aussenbereich um eine Größenordnung kleiner als der Wärmestrom in Strömungsrichtung, steigt aber in Wandnähe signifikant an. Grobstrukturen haben massgeblichen Anteil am Wärmestrom in Strömungsrichtung, kleinere Strukturen am wandnormalen Transportterm. Die Ergebnisse bilden eine Grundlage zur gezielten Optimierung des Impuls- und Wärmetransportes durch Strukturen unterschiedlicher Skalen zwischen komplexen gewellten Oberflächen und der Aussenströmung.