



Doctoral Thesis

Large eddy simulation of turbulent channel and jet flows using the approximate deconvolution model

Author(s):

Küng, Marco

Publication Date:

2007

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-005582797> →

Rights / License:

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

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

Large Eddy Simulation of Turbulent Channel and Jet Flows using the Approximate Deconvolution Model

A dissertation submitted to the
Swiss Federal Institute of Technology Zürich

for the degree of
Doctor of Technical Sciences

presented by
Marco Küng
Dipl. Masch.-Ing. ETH

born 4 January 1972
citizen of Switzerland

Accepted on the recommendation of

Prof. Dr. K. Boulouchos, examiner

Prof. Dr. L. Kleiser, co-examiner

Prof. Dr. A. G. Tomboulides, co-examiner

Dr. C. E. Frouzakis, co-examiner

Abstract

In the frame of the present work, Large Eddy Simulations (LES) of turbulent low-Mach number flows were performed. The work is part of an extended project with the goal of establishing LES for turbulent reacting flows.

The goal of the present work was the combination of a spectral element code, which in the past was used for Direct-Numerical Simulations (DNS), and the Approximate Deconvolution Model (ADM) as a subgrid model for LES. The spectral element method combines high accuracy with the flexibility for handling complex geometries.

ADM was first implemented for incompressible, turbulent flows and validated for a turbulent channel flow at Reynolds numbers $Re = 2,800$ and $Re = 10,935$. The flow in the doubly periodic (stream- and spanwise directions) channel was forced at the inflow, maintaining a constant mass flux. Good agreement was obtained between the LES and the DNS results of Moser et al. (R. D. Moser, J. Kim, and N. N. Mansour, Direct numerical simulation of turbulent channel flow up to $Re_\tau = 590$, *Phys. Fluids*, 11(4):943-945, 1999) with respect to the friction Reynolds number and the Reynolds and shear stresses and the logarithmic law of the wall. The spatial resolution especially at the wall is comparable with the LES of Stolz et al. (S. Stolz, N. A. Adams, and L. Kleiser, An Approximate Deconvolution Model for Large Eddy Simulations of compressible flows and its application to incompressible wall-bounded flows, *Phys. Fluids*, 13(4):997-1015, 2001).

In the original version of the model, the relaxation term of ADM is used to account for the interaction between the large and the small scales of the turbulent flow and is based on low-order statistics. An alternative formulation, based on higher-order statistics was proposed by Yakhot (private communication, 2002). He proposed a relaxation term based on

low-order statistics and a correction based on the local value of the rate of strain. This model was implemented in a global spectral-LES code. It was found that with this modification the logarithmic wall law and the friction Reynolds number (Re_τ) were almost insensitive to the spatial resolution in stream- and spanwise directions and the spatial resolution in wall-normal direction could be significantly reduced with respect to that of the standard ADM.

The incompressible LES code was then used for turbulent jet flows for $Re = 2,000$. The setup is that of a jet issued from a nozzle of diameter d_j into a co-flowing stream in a domain of diameter $11d_j$ and length $40d_j$. The domain is bounded moving with the velocity of the co-flowing stream. The jet flow is perturbed with correlated velocity fluctuations and the goal was the investigation of the scale-similarity region ($x/d_j > 20$). The LES results were compared with DNS simulation results performed for this project. The investigation shows an overestimation of the centerline turbulent velocity intensity in the transition region ($x/d_j < 20$), whereas a good agreement was obtained in the scale-similarity region. Two different LES filters were investigated. The first filter (Boyd filter) filters the spectral element excluding the elemental boundaries and the second filter (Legendre filter) filters it including the elemental boundaries. The agreement of the turbulent velocity intensity in the scale-similarity region with the DNS result was only obtained with the second filter. Further, a variation of Re , different mean velocity profiles at the exit, different correlation of the inflow perturbations, different values of the relaxation parameter of ADM, different filter types for the explicit LES filtering and an alternative formulation of the filtered conservation equations could not eliminate the overestimation of the turbulent intensities. Summarizing, the combination of the spectral element code and ADM shows satisfying results in the scale-similarity region whereas the turbulent intensities are overestimated in the transition region ($x/d_j < 20$).

The LES code was then extended for variable-density, low-Mach number flows and was validated against DNS results computed for a non-isothermal, single-species jet. The same setup was used as for the isothermal jet with $Re = 2,000$ and the length of the domain was set to $20d_j$. The Boyd and the Legendre filter were investigated and the LES with the Legendre filter were unstable whereas the Boyd filter stabilized the simulation. Overall the turbulent intensities for velocity

and temperature and the decrease of the mean quantities along the centerline were overestimated by the LES.

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit handelt von der Grobstruktursimulation (LES) von turbulenten Strömungen unter der Annahme von kleinen Mach-Zahlen. Sie ist Teil einer Entwicklung mit dem Ziel, reaktive Strömungen mit Hilfe der Grobstruktursimulation zu berechnen.

Ziel der Arbeit war es, einen spektralen Elemente Code, welcher bisher für Direkte Numerische Simulationen (DNS) verwendet wurde, mit dem LES-Feinstruktur-Modell *Approximate Deconvolution Model* (ADM) für Grobstruktursimulationen zu kombinieren. Spektrale Elemente Codes kombinieren die Genauigkeit von spektralen Methoden mit der Flexibilität für komplexe Simulationsgeometrien.

ADM wurde zunächst für inkompressible, turbulente Strömungen in den Code implementiert und am Fall der inkompressiblen, turbulenten Kanalströmung für $Re = 2,800$ und für $Re = 10,935$ untersucht. Die Simulationen nehmen in Strömungs- und Spannweitenrichtung periodische Randbedingungen an. Die Strömung wurde mit einem zusätzlichen Kraft-Term in der Impulsgleichung versehen, um den Massenfluss während der Simulation konstant zu halten. Dabei zeigte sich eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den LES-Resultaten, im Speziellen dem logarithmische Wandgesetz, den Reynolds-Zahlen Re_τ sowie den Reynolds-Spannungen, mit den DNS-Daten von Moser et al. (R. D. Moser, J. Kim, and N. N. Mansour, Direct numerical simulation of turbulent channel flow up to $Re_\tau = 590$, *Phys. Fluids*, 11(4):943-945, 1999). Die räumliche Auflösung entspricht derjenigen der LES von Stolz et al. (S. Stolz, N. A. Adams, and L. Kleiser, An Approximate Deconvolution Model for Large Eddy Simulations of compressible flows and its application to incompressible wall-bounded flows. *Phys. Fluids*, 13(4):997-1015, 2001).

Die originale Version von ADM wird ein Relaxationsterm verwendet,

um die Interaktion zwischen den grossen und den kleinen Skalen zu berechnen. Der Relaxationsterm basiert dabei auf Statistiken tiefer Ordnung. Eine alternative Formulierung wurde von Yakhot (private Kommunikation, 2002) vorgeschlagen, indem der originale Relaxationsterm korrigiert wird mit der lokalen Scherrate der Strömung und in einen globalen, spektralen LES-Code implementiert wurde. Die LES zeigte, dass das logarithmische Wandgesetz der Wandströmung und in diesem Zusammenhang die Reynolds-Zahl an der Wand Re_τ nur noch gering von der räumlichen Auflösung abhängen.

Die Kombination von ADM und dem spektralen Elemente Code wurde weiter für LES von inkompressiblen, turbulenten Freistrahlsströmungen verwendet. Das Rechengebiet entspricht einem Rohr mit einem Durchmesser von $11d_j$ und einer Düse mit Durchmesser d_j . Einer Mantelströmung wird die turbulente Freistrahlsströmung überlagert und der Freistrahls wird mit Hilfe eines Einström-Generators an der Düse verblasen. Die Länge des Rechengebietes entspricht $40d_j$ und die LES-Resultate werden mit eigens für diese Arbeit berechneten DNS-Daten verglichen. Die Untersuchungen zeigten, dass insbesondere die turbulenten Geschwindigkeits-Intensitäten in Strömungsrichtung entlang der Freistrahls-Achse im Bereich der Transition ein Überschwingen zeigen und im Ähnlichkeitsbereich ($x/d_j > 20$) mit der DNS Lösung exakt übereinstimmen. Zwei unterschiedliche LES Filter wurden untersucht. Der erste Filter (Boyd Filter) filtert das Element ausschliesslich dem Rand. Hingegen filtert der zweite Filter (Legendre Filter) den Rand auch mit. Die gute Übereinstimmung im Ähnlichkeitsbereich der Fluktuation mit der DNS konnte nur mit dem Legendre Filter erreicht werden. Im weiteren, wurde eine Variation der Reynolds-Zahl, des mittleren Geschwindigkeits-Einströmprofils, der räumlichen und zeitlichen Korrelation der dem mittleren Geschwindigkeits-Einströmprofil überlagerten Fluktuationen, des Relaxations-Parameters von ADM, der Filter-Arten und eine alternative Formulierung der Impulsgleichung untersucht und konnten das Überschwingen nicht eliminieren. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die LES im Bereich $x/d_j > 20$ eine gute Übereinstimmung mit den DNS Resultaten zeigen und die Statistiken im transienten Bereich des Freistrahls ($x/d_j < 20$) überschätzt werden.

Der Code wurde anschliessend weiterentwickelt für die Grobstruktursimulation von nicht-isothermen, turbulenten Freistrahlsströmungen. Dabei wurde das Rechengebiet des isothermen Freistrahls auf eine Länge

von $20d_j$ verkürzt und die LES-Resultate wurden mit ebenfalls eigens für diese Arbeit berechneten DNS-Resultaten verglichen. Wiederum wurden der Boyd und der Legendre Filter untersucht und es zeigte sich, dass der Legendre Filter zu instabilen Grobstruktursimulationen führte, was der Boyd Filter nicht tat. Die LES mit dem (stabilen) Boyd Filter überschätzen die Geschwindigkeits- und Temperaturfluktuationen als auch den Abfall der mittleren Grössen entlang der Strömungsachse.