



Doctoral Thesis

## Large-eddy simulation of complex massively-separated turbulent flows

**Author(s):**

Ziefle, Jörg

**Publication Date:**

2008

**Permanent Link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-005709584> →

**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](#).

DISS. ETH No. 17846

# Large-Eddy Simulation of Complex Massively-Separated Turbulent Flows

A dissertation submitted to

ETH ZURICH

for the degree of

Doctor of Technical Sciences

presented by

JÖRG ZIEFLE

Dipl.-Ing. Luft- und Raumfahrttechnik, University of Stuttgart  
M.Sc. in Aerospace Engineering, Georgia Institute of Technology

born September 3, 1976

citizen of Germany

accepted on the recommendation of

Prof. Dr.-Ing. Leonhard Kleiser, examiner

Prof. Dr.-Ing. Ulrich Rist, co-examiner

2008



# Abstract

---

This thesis is concerned with the large-eddy simulation (LES) of complex massively-separated turbulent flows. The approximate-deconvolution subgrid-scale model (ADM) has been formulated for and implemented into the semi-industrial compressible finite-volume code NSMB, with full support of domain decomposition and parallel computing. The subgrid-scale model and simulation approach have been applied to four examples of massively separated flow with increasing complexity.

First, the new implementation was validated by investigating the streamwise-periodic hill channel at two different Reynolds numbers ( $Re = 2800$  and  $10595$ ) and at the low Mach number of  $Ma = 0.2$ . Despite the deliberately-chosen coarse spatial resolution, excellent agreement to highly resolved incompressible reference data from literature was achieved.

The compressible nature of the simulation code was then exploited by studying compressibility effects in the streamwise-periodic hill channel at the lower Reynolds number. In a series of large-eddy simulations with increasing Mach number up to the supersonic regime ( $Ma = 2.5$ ), further insight into the mean-flow separation characteristics and their connection to the instantaneous flow behaviour on both the upper and lower walls could be gained.

The considerably more complex and computationally demanding jet-in-crossflow configuration was studied next. In this well-known test case at incompressible flow conditions, a round turbulent jet issues perpendicularly into a laminar boundary layer at a jet-to-crossflow velocity ratio of  $R = 3.3$  and a jet-based Reynolds number of  $Re = 6930$ . The agreement of the present LES results with incompressible high-resolution LES data and measurements was found to be very good. The mean flow field and derived flow properties such as the jet trajectories, or the development of the jet along its trajectory, was investigated in detail. Sophisticated three-dimensional visualisations of the instantaneous flow field, in particular its complex vortex structure, were recovered and further revealed the key mechanisms in the formation of the most characteristic vortices. The three-dimensional periodic (“wagging”) movement of the ejected jet body was analysed and associated with the shedding of large-scale coherent structures in the mixing region.

Finally, the computational setup was applied to a jet-in-crossflow of direct industrial relevance, which is related to the film-cooling of turbomachinery blades. Here a large isobaric plenum feeds cool fluid through a short inclined nozzle into a hotter turbulent boundary layer. In a first simulation, this was represented by a steady mean-turbulent profile, whereas in a second simulation unsteady turbulent inflow data was imposed. The jet-to-crossflow momentum and density ratios were chosen according reference measurements as 0.25 and 2, respectively.

The LES results with the mean-turbulent boundary-layer profile exhibit some notable deviations from the experimental reference data from literature, owing to the lack of crossflow fluctuations and the resulting differences in flow topology and mixing behaviour. For the case with the unsteady turbulent inflow data, good agreement with the measurements, and the expected enhanced mixing process, is observed. It thus became clear that a more accurate prediction of the mean quantities and fluctuations is not possible without providing realistic unsteady inflow data for the turbulent boundary layer. Furthermore, the secondary flows within the nozzle, and the dominant

vortex structures in the mixing region, both of which are crucial for the understanding of the mixing process, were analysed and compared for the two simulations.

---

## Kurzfassung

---

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Grobstruktursimulation von komplexen massiv abgelösten turbulenten Strömungen. Das Feinstrukturmodell ADM („approximate-deconvolution model“) wurde für den semi-industriellen kompressiblen Finite-Volumen-Strömungslöser NSMB formuliert und implementiert, mit voller Unterstützung von Rechengebietsaufteilung und parallelem Rechnen. Das Feinstrukturmodell und der Rechenansatz wurden auf vier Beispiele für massiv abgelöste Strömungen von steigender Komplexität angewandt.

Zunächst wurde die neue Implementierung am Fall eines Kanals mit stromab periodisch angeordneten Hügeln für zwei verschiedene Reynoldszahlen ( $Re = 2800$  und  $10595$  und einer niedrigen Machzahl von  $Ma = 0.2$ ) validiert. Trotz des bewusst grob gewählten Rechnetzes wurde eine hervorragende Übereinstimmung mit hochaufgelösten inkompressiblen Referenzergebnissen aus der Literatur erzielt.

Anschliessend wurde die kompressible Natur des Simulationsprogrammes ausgenützt durch die Untersuchung von Kompressibilitätseffekten im Kanal mit periodischen Hügeln bei der niedrigeren Reynoldszahl. In einer Reihe von Grobstruktursimulationen mit steigender Machzahl bis in den Überschallbereich ( $Ma = 2.5$ ) konnten weitere Einblicke in das Ablöseverhalten der mittleren Strömung und ihr Zusammenhang mit dem instantanen Strömungsverhalten an der unteren und oberen Wand gewonnen werden.

Als nächstes wurde die deutlich komplexere und rechenaufwändigere „jet-in-crossflow“-Konfiguration untersucht. In diesem wohlbekannten Testfall tritt ein runder turbulenter Freistrahls unter rechtem Winkel in eine laminare Grenzschicht aus (bei einem Geschwindigkeitsverhältnis zwischen Freistrahls und Grenzschicht von  $R = 3.3$  und einer auf Freistrahls-Grössen basierenden Reynoldszahl von  $Re = 6930$ ). Die Übereinstimmung der LES-Resultate mit inkompressiblen hochaufgelösten Referenzdaten und -messungen ist sehr gut. Das mittlere Strömungsfeld und davon abgeleitete Strömungseigenschaften wie die Trajektorien des Freistrahls, oder die Entwicklung des Freistrahls entlang seiner Trajektorie, wurden detailliert untersucht. Dreidimensionale Visualisierungen des instantanen Strömungsfeldes zeigten seine komplexe Wirbelstruktur und gaben weiteren Aufschluss auf die im Bildungsprozess der charakteristischen Wirbel beteiligten Hauptmechanismen. Die dreidimensionale periodische Bewegung („Wackeln“) des ausgeblasenen Freistrahls wurde analysiert und mit der Ablösung von grossskaligen kohärenten Strukturen in der Mischungszone in Verbindung gebracht.

Zuletzt wurde die Rechenmethode auf eine „jet-in-crossflow“-Konfiguration von direkter industrieller Bedeutung angewandt, die mit der Filmkühlung von Turbomaschinenschaukeln verwandt ist. Kühles Fluid strömt hierbei aus einer grossen isobarischen Druckkammer über eine kurze schräge Düse in eine heisse turbulente Grenzschicht. In einer ersten Grobstruktursimulation wurde diese durch ein stationäres mittleres turbulentes Profil repräsentiert, wohingegen in einer zweiten Simulation instationäre turbulente Einströmdaten benutzt wurden. Die Impuls- und Dichteverhältnisse zwischen Freistrahls und Grenzschicht wurden im Einklang mit Referenzmessungen zu  $0.25$  und  $2$  gewählt.

---

Die Ergebnisse aus der Grobstruktursimulation mit dem mittleren turbulenten Grenzschichtprofil weisen deutliche Abweichungen von den experimentellen Referenzdaten aus der Literatur auf. Diese sind vor allem auf das Fehlen von Fluktuationen in der ankommenden Grenzschicht und der dadurch resultierenden unterschiedlichen Strömungstopologie zurückzuführen. Gute Übereinstimmung mit den Messdaten und das erwartete verbesserte Mischungsverhalten wurde hingegen für den Fall mit den instationären turbulenten Einströmdaten gefunden. Somit stellte sich also heraus, dass eine genaue Vorhersage der Strömungsstatistiken ohne realistische instationäre Einströmdaten für die Grenzschicht nicht möglich ist. Weiterhin wurden die Sekundärströmungen in der Düse und die dominanten Wirbelstrukturen in der Mischungszone, die beide für das Verständnis des Mischungsprozesses unerlässlich sind, für beide Fälle untersucht und miteinander verglichen.