

Diss. ETH No. 17375

NUMERICAL INVESTIGATIONS OF COMPRESSIBLE TURBULENT SWIRLING JET FLOWS

A dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY
ZÜRICH

for the degree of
Doctor of Technical Sciences

presented by

Sebastian Müller

Dipl.-Ing. (University of Stuttgart)
born on April 18, 1975
citizen of Germany

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. L. Kleiser, examiner
Prof. Dr. N. A. Adams (TU Munich), co-examiner

2007

Abstract

In the present investigation the effect of adding swirl to subsonic circular jet flows and mixing layers is studied by means of stability analysis and numerical simulation.

In the first part we examine the viscous and inviscid spatial stability of compressible swirling mixing layers (i. e., circular mixing layers with an additional swirl component which is present only in the shear layer) that differ in swirl intensity, Mach number and Reynolds number. The two disturbance modes that are observed are a centrifugal and a shear instability. The effect of viscosity on these instabilities is discussed.

In the second part we present direct numerical simulation (DNS) and large-eddy simulation (LES) results to study the nonlinear evolution of a compressible swirling mixing layer. Our results have been obtained with a highly accurate DNS/LES code solving the (filtered) Navier-Stokes equations in cylindrical coordinates. Details concerning the underlying numerical discretization as well as validation computations are presented. Swirling mixing layers at Mach number $Ma = 0.8$ and Reynolds number $Re = 5000$ (based on the mixing layer radius) are considered. These flows incorporate the nonlinear disturbance development and transition to turbulence of the laminar layer perturbed at the inflow by viscous spatial instabilities obtained from linear theory. Different combinations of inflow disturbances as well as base flows are investigated. The DNS reference data is also used to assess the predictive capability of LES using the Approximate Deconvolution Model (ADM).

In the third part vortex breakdown in a compressible swirling jet flow is investigated by LES using ADM. Conditions are chosen similar to recent experimental investigations for incompressible flow. LES results are presented for two simulations of a swirling jet at Mach number $Ma = 0.6$ with and without inflow forcing by imposed linear instability disturbances. Both the forced and the self-excited jet show three-dimensional helical waves developing in the jet breakdown zone. The features observed in the two simulations are compared to each other as well as to the experiments with respect to flow statistics and instability behavior. Both simulations show favorable qualitative agreement with the experiment.

Kurzfassung

In der vorliegenden Arbeit wird der Einfluss von Drall auf subsonische runde Freistrahlen und Mischungsschichten im Rahmen von stabilitätstheoretischen Betrachtungen und numerischen Simulationen untersucht.

Im ersten Teil wird die räumliche Stabilität von kompressiblen drallbehafteten Mischungsschichten untersucht, wobei die Drallintensität, die Machzahl sowie die Reynoldszahl der Grundströmung variiert werden. Als instabile Störungen werden zentrifugale Instabilitäten sowie Scherinstabilitäten identifiziert. Der Einfluss der Viskosität auf diese Instabilitäten wird diskutiert.

Im zweiten Teil werden Ergebnisse zur Evolution einer kompressiblen drallbehafteten Mischungsschicht diskutiert, welche mit Hilfe direkter numerischer Simulationen (DNS) und Grobstruktursimulationen (LES) berechnet wurden. Die Strömungsberechnung basiert auf der Lösung der (gefilterten) Navier-Stokes-Gleichungen in zylindrischen Koordinaten. Zu diesem Zweck wurden eine numerische Diskretisierung hoher Ordnung implementiert und dazugehörige Validierungsrechnungen durchgeführt. Die betrachteten drallbehafteten Mischungsschichten mit Machzahl 0.8 und Reynoldszahl 5000 (gebildet mit dem Radius der Mischungsschicht) enthalten die nichtlineare Störungsentwicklung und die Transition in die Turbulenz der laminaren Strömung, welche am Einströmrand durch räumlich anwachsende viskose linear instabile Eigenlösungen gestört wird. Drei verschiedene Anregungstypen werden im Rahmen der DNS untersucht. Die Ergebnisse der DNS dienen auch als Referenzdaten zur Überprüfung der LES-Ergebnisse, die mittels eines auf einer approximativen Invertierung des LES-Filters beruhenden Modells (ADM) erhalten werden.

Im dritten Teil wird das Wirbelplatzen in subsonischen, massiv drallbehafteten Freistrahlen unter Verwendung von LES untersucht. Die Strömungskonfiguration entspricht einer experimentellen Untersuchung für inkompressible Strömung. In einer ersten Simulation wird lediglich ein laminares Strömungsprofil am Einströmrand vorgegeben, während in einer zweiten Simulationen zusätzlich Störungen aufgeprägt werden, welche mit Hilfe linearer Stabilitätstheorie berechnet wurden. In beiden Simulationen werden dreidimensionale asymmetrische Wellenstörungen beobachtet, welche sich in der Zone des platzenden Wirbels entwickeln. Beide Simulationen stehen in guter Übereinstimmung mit dem Experiment.