

Diss. ETH No. 17955

Direct Noise Computation of High Reynolds Number Subsonic Jet Flow Using LES

A dissertation submitted to
ETH ZURICH

for the degree of
Doctor of Technical Sciences

presented by

Felix Keiderling

Dipl.-Ing. Luft- und Raumfahrttechnik, Universität Stuttgart
M.Sc. Aerospace Engineering, University of Arizona
born on July 8, 1975
citizen of Germany

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. L. Kleiser
Dr. habil. (HDR) C. Bogey (EC Lyon)

2008

Abstract

The effect of nonlinear interaction of instability eigenmodes on jet flow transition and its noise for a round jet at a Mach number of $Ma = 0.9$ and a Reynolds number of $Re = 4.5 \cdot 10^5$ based on jet exit conditions is investigated by large-eddy simulations. At the inflow, helical perturbations determined from linear stability theory are superimposed on a laminar base flow in order to initiate transition to turbulence. Two different ranges of azimuthal wavenumbers n are excited. The first type of simulations excites modes $|n| = 1, \dots, 8$ while the second excludes $|n| \leq 3$ from the inflow forcing. For both modal compositions we investigate the effect of the disturbance amplitude and vary it in the range from 1.5%, 3.0% to 4.5% of the jet inlet velocity. Thereby, we aim to characterize sources of noise generation and, in particular, underlying mode interactions.

For the first type of excitation the changes in forcing amplitude mostly affect the streamwise position of the transition process which is shifted upstream for larger excitation levels. The transition process is similar for the three amplitudes and is characterized by strong vortex pairings that directly place an imprint on the emitted noise. The simulation results are in fair agreement with experimental and numerical reference data.

For the second type of excitation we observe changes in the transition of the jet with increasing forcing amplitude. As the shear layer roll up, pronounced vortex pairings are more and more weakened and vortex rings are distorted to form three-dimensional structures. This change in transitional behavior affects the acoustic near field which exhibits features of both, natural and tonally-excited jets. In particular for high forcing amplitudes, a tonal component outside the initially excited frequency range is observed. This tone can be linked to fluid-dynamic events in the early transitional region as well as at the end of the potential core. Furthermore, its frequency can be explained by a weakly nonlinear interaction of initially excited eigenmodes.

To substantiate the soundness of the predictions, insensitivity against the choice of certain numerical parameters is demonstrated. The relaxation-term coefficient of the ADM subgrid-scale model is reduced and effects are found to be small. Subgrid-scale model effects are further investigated by simulating a baseline configuration using approximately deconvolved information. Finally, we address the effect of the azimuthal resolution on our simulation results.

Kurzfassung

Die vorliegende Dissertation befasst sich mit dem Einfluss der nichtlinearen Interaktion von Instabilitätsmoden auf den laminar-turbulenten Übergang eines runden Freistrahls bei einer Machzahl von 0.9 und einer Reynoldszahl von $Re = 4.5 \cdot 10^5$ gebildet mit Grössen am Eintritt des Freistrahls. Hierzu wird eine Reihe von Grobstruktursimulationen (LES) durchgeführt. Am Einströmrand des numerisch Rechengebietes werden dreidimensionale Störungen gemäss linearer Stabilitätstheorie mit einer laminaren Grundströmung überlagert, um den Umschlag einzuleiten. Hierbei werden zwei unterschiedliche Zusammensetzungen der Einströmstörungen untersucht: Beim ersten Typ werden Umfangswellenzahlen $|n| = 1, \dots, 8$ angeregt, im zweiten nur Wellenzahlen $4 \leq |n| \leq 8$. Für die jeweiligen Zusammensetzungen der modalen Anregung wird der Einfluss der Stör-Amplitude im Bereich von 1.5% bis 4.5% (bezogen auf die Eintrittsgeschwindigkeit des Freistrahls) untersucht.

Bei der Anregung der Eigenmoden $|n| = 1, \dots, 8$ beschränkt sich der Einfluss der Stör-Amplitude hauptsächlich auf den Ort des Umschlags. Das Transitionsverhalten für unterschiedliche Amplituden ist relativ ähnlich und geprägt von Wirbelpaarungen, die auch den direkt berechneten Schall dominieren. Strömungs- wie auch Schallergebnisse stimmen qualitativ mit Referenzdaten überein und sind deutlich vom Transitionsverhalten geprägt.

Für den zweiten Typ der Anregung wird bei Vergrösserung der Stör-Amplitude eine Veränderung des Transitionsverhaltens festgestellt, welches von gelegentlich auftretenden Wirbelpaarungen zu einem Umschlag mit dreidimensionalen Wirbelstrukturen wechselt. Diese Veränderung im Transitions-geschehen beeinflusst das dadurch generierte akustische Nahfeld. Die Ergebnisse im Strömungsbereich sind in sehr guter Übereinstimmung mit experimentellen und anderen numerischen Resultaten. Das direkt berechnete akustische Nahfeld hat Eigenschaften von sowohl natürlichen als auch tonal angeregten Freistrahlen, die zum einen mit Vorgängen im Transitionsbereich der Scherschicht und zum anderen mit Ereignissen am Ende des Potentialströmungskerns in Zusammenhang gebracht werden können. Die besonders für grosse Stör-Amplituden auftretende tonale Komponente, welche ausserhalb des angeregten Frequenzbandes liegt, lässt sich mit Hilfe schwach nichtlinearer Theorie als Interaktion angeregter Moden erklären.

Um die Sensitivität des Simulationsverfahrens zu untersuchen, und somit auch die Zuverlässigkeit der Vorhersagen zu demonstrieren, werden

bestimmte numerische Parameter verändert. Zuerst wird der Relaxationskoeffizient des Feinstrukturmodells verändert, dessen Einfluss auf die Ergebnisse sich als gering erweist. Der Einfluss des gewählten Feinstrukturmodells wird anhand einer Simulation untersucht, die approximativ entfilterte Feldgrößen verwendet. Abschliessend wird der Einfluss der numerischen Auflösung in Umfangsrichtung untersucht.