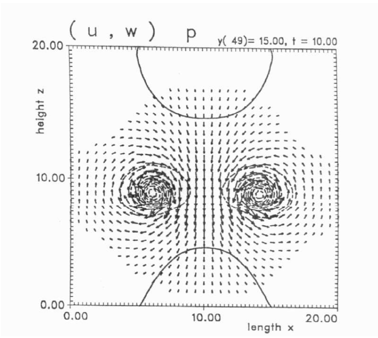
Anwendungsbericht 2

Zentrum für Paralleles Rechnen (in Kooperation mit der DLR)

Strömungssimulation auf Parallelrechnern

Am Institut für Physik der Atmosphäre der Deutschen Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Oberpfaffenhofen wird an der Erforschung von Wirbelstrukturen und Vermischungsvorgängen innerhalb turbulenter Strömungen gearbeitet. Die Basis dieses Forschungsprojektes bildet das Program LESTUF (Large Eddy Simulation of TUrbulent Fluid). Es ermöglicht die Simulation des Einflusses stabiler Schichtung und Scherung auf die Entstehungs- und Diffusions-Eigenschaften homogener, turbulenter Strömungen.
(Abb.: Geschwindigkeitskomponenten in der Wirbelschleppe eines Verkehrsflugzeuges.)

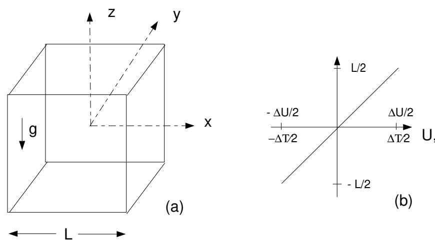


Aufgabenstellung

Das Institut für Physik der Atmosphäre hat innerhalb der Rechenzentren der DLR Zugriff auf einen CRAY-YMP Vektorrechner mit einer maximalen Rechenleistung von 330 MFlops. Ein Simulationslauf mit LESTUF auf 128^3 Gitterpunkten benötigt dort 3 Stunden CPU-Zeit, wobei die Verweilzeit im Rechner um ein Vielfaches höher liegt. Hierbei wird eine Rechenleistung von 130 MFlops erreicht. Nimmt man sehr hohe Verweilzeiten von bis zu einer Woche in Kauf, so sind Simulationen mit bis zu 256^3 Gitterpunkten möglich. Um exakte Aussagen über die Vermischungsprozesse innerhalb der Abgasfahnen moderner Flugzeuge zu treffen, ist eine Vervierfachung der Auflösung auf 1024^3 Punkte notwendig. Dies führt zu einer Vergrößerung der Anforderungen an die Speicher– und Rechenleistung des Rechners um das 64–fache. Solche hohen Anforderungen sind in naher Zukunft auf Parallelrechnern realisierbar. Um diese Möglichkeiten ausnutzen zu können, wird in enger Kooperation zwischen dem Zentrum für Paralleles Rechnen und der DLR eine parallele Version von LESTUF entwickelt.

Mathematische Modellierung

Das Simulationsgebiet, in dem wir die Strömung untersuchen, ist ein gleichmäßiger dreidimensionaler Würfel mit Seitenlänge L. Er ist eingebettet in ein Koordinatensystem mit den drei Richtungen x, y und z (bzw. x_i, $i = 1, 2, 3$). Hierbei zeigt x in die Hauptströmungsrichtung, y steht senkrecht dazu und z ist die vertikale Richtung.



Simulationsgebiet und mittlere Profile

Die Bewegung eines Newtonschen Fluids wird durch die inkompressible Navier-Stokes Gleichung beschrieben, das Temperaturverhalten durch den ersten Hauptsatz der Thermodynamik. Das resultierende partielle Differentialgleichungssystem wird durch die Kontinuitätsgleichung geschlossen. Alle physikali-

Zentrum für Paralleles Rechnen — Arbeitsgruppe Prof. Dr. A. Bachem
Telefon: (0221) 470–6030
Hausanschrift: Weyertal 80, D-50931 Köln — Telefax: (0221) 470–5160
Postanschrift: ZPR, Universität zu Köln, Albertus-Magnus-Platz, D-50923 Köln — Email: zpr@zpr.uni-koeln.de

schen Größen werden dimensionslos aus einem Referenzwert und einer Abweichung (auch Störung oder Fluktuation) von diesem Wert dargestellt. Die Referenzskalen für Dichte, Länge, Geschwindigkeit und Temperatur lauten ρ_R, L, $\Delta U = \|dU/dz\|L$ sowie $\Delta T = \|dT_R/dz\|L$. Die turbulenten Störungen hierzu werden mit $\bar{u} = (u, v, w) = (u_1, u_2, u_3)$ für die Geschwindigkeit, T für die Temperatur und p für den Druck bezeichnet.

Es ergibt sich das folgende dimensionslose Differentialgleichungssystem:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(u_j u_i) + Sx_3 \frac{\partial u_i}{\partial x_1} + Su_3 \delta_{i1} = -\frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} - \frac{\partial p}{\partial x_i} + Ri \frac{S^2}{s} T \delta_{i3} , \quad (1)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(u_j T) + Sx_3 \frac{\partial T}{\partial x_1} + su_3 = -\frac{\partial \tau_{Tj}}{\partial x_j} , \quad (2)$$

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 . \quad (3)$$

Die Gleichungen werden auf einem äquidistanten Eulerschen Koordinatensystem diskretisiert und mit finiten Differenzen zweiter Ordnung auf einem Gitter mit versetzt angeordneten Komponenten (staggered grid) bearbeitet. Die Zeitintegration wird mit dem Adams-Bashforth Verfahren berechnet, die aus der Inkompressibilität resultierende Poissongleichung für den dynamischen Druck wird implizit gelöst.

Parallelisierung

Wir haben eine parallele Version (ParLESTUF) des oben beschriebenen Programms entwickelt, die für MIMD-Systeme mit 4 bis 128 Prozessoren konzipiert wurde. Die Parallelisierung basiert auf einer Zerlegung, bei der das kubische Versuchsgebiet in horizontale Scheiben zerlegt und auf die in einer Ringtopologie angeordneten Prozessoren verteilt wird.
Als Message Passing Plattform wird MPI benutzt. Als neuer Standard wird dieses System in naher Zukunft auf allen Parallelrechnern verfügbar sein. Die verwendete Programmiersprache ist Fortran 77.
Besonderes Augenmerk wurde auf die Implementation des parallelen Poissonlösers gelegt, der einen Großteil der Rechenzeit beansprucht. Auf der Basis der gewählten Datenverteilung wurde hierzu ein 'divide & conquer' Verfahren entwickelt und implementiert.

Mit dem bestehenden parallelen Programm wurden im Frühjahr 1995 auf der Cray-T3D des 'Edinburgh Parallel Computing Centre' erste Testläufe mit bis zu 256^3 Gitterpunkten durchgeführt. Die Implementation eines Multigridverfahrens für die Poissongleichung, dessen Vergleich mit den bisherigen Methoden und Tests auf weiteren Parallelrechnern wie der SGI POWER Challenge XL und der SP-2 sind weitere Aufgaben für 1995.

Ansprechpartner

Dr. Thomas Gerz
Deutsche Forschungsanstalt
für Luft- und Raumfahrt e. V.
Institut für Physik der Atmosphäre
D - 82234 Oberpfaffenhofen
Tel: 08153/28-1333
Fax: 08153/28-1841
E-Mail: Thomas.Gerz@dlr.de

Dipl.–Math. Martin Strietzel
Zentrum für Paralleles Rechnen
Universität zu Köln
Weyertal 80
D - 50931 Köln
Tel: 0221/470-6003
Fax: 0221/470-5160
E-Mail: Strietzel@zpr.uni-koeln.de

Stand: 8. Mai 1995