

# Numerische Strömungssimulation auf PCs

Ernst von Lavante  
Universität GH Essen

## Übersicht

Die Rolle der PC Computer in numerischen Simulationen von realistischen Strömungen wird beschrieben. Von einem kurzen historischen Rückblick ausgehend, werden die Möglichkeiten der Strömungsfeldberechnung dargestellt, wobei die Betonung auf kompressiblen Strömungen liegt. Die Wahl der richtigen Berechnungsmethode wird besprochen, und viele Beispiele von Simulationen werden diskutiert. Am Ende wird versucht, die Zukunft der PCs in numerischer Strömungsmechanik anzudeuten.

## Einleitung

Die Rolle der PC Computer war bis vor kurzem hauptsächlich entweder auf unterstützende Aufgaben, wie zum Beispiel Textverarbeitung, oder auf strömungsmechanische Berechnungen von begrenzter Genauigkeit und Gültigkeit beschränkt. Der Grund dafür war die mangelnde Rechenleistung der bisherigen Generationen der PCs. Erst mit der Einführung der 80486DX CPU Chips hat der Chiphersteller Intel die Grundlage für einen leistungsfähigeren Microcomputer geschaffen.

Am Anfang stand im Jahr 1981 der erste PC von IBM. Mit seinem Intel 8088 Chip, getaktet auf 4.77 MHz, seinem 64K Speicher und meistens einem Floppylaufwerk war seine Leistungsfähigkeit, gemessen an heutigen Microcomputern, geradezu lächerlich. Er war allerdings der erste privat erschwingliche Computer, der tatsächlich, zumindest theoretisch, für numerische Strömungsmechanik nützlich war. Er wurde hauptsächlich bei der Entwicklung von neuen numerischen Methoden benutzt. Eine typische Anwendung war die Berechnung von quasi-eindimensionalen Düsen mit Verdichtungsstößen. Eine solche Düse mit dem resultierenden Machzahlverlauf ist in Abb. 1 gezeigt. Die Strömung hier wurde durch die quasi-eindimensionalen kompressiblen Eulergleichungen beschrieben. Getestet wurde die Fähigkeit der Methode, die steilen Gradienten der Strömungsvariablen an dem Stoß richtig aufzulösen. Diese ersten Versuche, den PC nützlich in numerischer Forschung zu verwenden, führten zur Entwicklung der populären Feldmethoden. Als Beispiel kann man hier die erfolgreichen Upwind-Methoden nennen.

Bei der Berechnung von zweidimensionalen Feldern hatte man weniger Glück. Die Rechenzeiten wurden, auch im Falle des einfachen Diffusors in Abb. 2, in Tagen gemessen. Diese Methoden erwiesen sich deshalb als unpraktisch, was zur Entwicklung der weitaus einfacheren, aber auch ungenaueren Randwertmethoden führte. Ein typisches Beispiel sind die Paneelmethoden, die in den 50-er und 60-er Jahren ihre Blüte erlebten. Mit etwas Phantasie und viel Empirizismus konnte man diese Methoden sogar, wenn auch in sehr begrenztem Maße, beim Design anwenden.

## Wahl der geeigneten Methode

Bei der Wahl der numerischen Methode zur Berechnung von kompressiblen, reibungsbehafteten Strömungen auf den PCs muß man Sorgfalt walten lassen. Abzuwägen ist ein Kompromiß zwischen Genauigkeit, Rechenzeit und Speichergebrauch, wobei allerdings die Physik der Strömung richtig zu simulieren ist.

Die Wahl der Diskretisierung ist eine Geschmacksache; man mit allen drei, finiten Elementen, finiten Differenzen und finiten Volumen, gute Ergebnisse erzielen. Die Methode selbst muß der Physik der Strömung angepaßt werden. Hier kann, zum Beispiel, im Fall von reibungsfreier, transonischer Strömung mit schwachen Stößen (bis  $M=1.3$ ) die Potentialmethode genommen werden. Bei einfachen externen Fällen kann man sie mit der Grenzschichtberechnung koppeln, um die Reibungseffekte zu approximieren.

Bei komplexeren internen oder externen Strömungen ist das nicht mehr möglich. Hier muß man entweder die Euler Gleichungen oder die vollen Navier-Stokes Gleichungen lösen. In letzter Zeit haben sich hier zwei Methoden bewährt: die einfachen, aber auch in der Grenzschicht ungenaueren und bei starken Stößen problematischeren Zentral-Differenzen-Methoden mit explizitem R-K Mehrstufenverfahren in Zeit, und die aufwendigeren Upwind-Methoden, die auf der lokalen Lösung des Riemann-Problems zwischen den jeweiligen Zellgrenzen basiert sind. Der Autor bevorzugt die letzteren, da sie wesentlich weniger Knotenpunkte in den viskosen Schichten benötigen, um einigermaßen realistische Ergebnisse zu liefern. Die Entwicklung eines solchen Schemas wie auch alle Details seiner Implementierung werden in der vollen Version des Vortrags gegeben.

## Beispiele

Trotz vieler Unzulänglichkeiten und Soft- und Hardwareprobleme ist es heutzutage möglich, die neueste Generation der PCs bei der numerischen Simulation von Strömungsproblemen nützlich einzusetzen. Die oben genannten Methoden werden fast ausschließlich mit FORTRAN programmiert, da bis vor Kurzem die Entwicklung dieser Compilers, insbesondere im Bezug auf die Optimierung der Laufzeit, den anderen Alternativen überlegen war. Es gibt einige wenige 32 Bit FORTRAN Compiler, die tatsächlich die neuen CPU Chips von Intel voll ausnutzen (eine ruhmreiche Ausnahme bei den PCs), und bei gleichzeitiger Anwenderfreundlichkeit Leistungen ermöglichen, die mit Workstations vergleichbar sind. Die jeweiligen Angaben von Laufzeiten zur vollen Konvergenz beziehen sich auf auf eine namelose 486DX/33 Maschine mit 16MB RAM und 256K CPU Cache.

Der einfachste Fall ist die Berechnung des Überschalldiffusors in Abb.2. Das hierzu benutzte Rechnernetz hatte  $65 \times 17$  Knotenpunkte. Die hier gezeigten Ergebnisse haben zwischen 242 und 142 s Laufzeit in Anspruch genommen. Deutlich zu sehen ist der von der oberen Wand ausgehende schräge Verdichtungsstoß. Der gleiche Diffusor, diesmal aber mit Reibung, ist in Abb.3 gezeigt. Die gezeigten Ergebnisse stimmen mit Meßdaten sehr gut überein, haben aber 18 Stunden CPU Zeit gebraucht.

Als Beispiel einer anspruchsvollen Rechnung ist die Simulation der Strömung im Abgaskrümmer eines Kolbenriebwerks in Abb.4 gezeigt. Das oben beschriebene Programm zur Lösung der Navier-Stokes Gleichungen wurde hier als Multiblock-Methode formuliert, um

die relativ komplexe Domäne zu diskretisieren. Das Rechnernetz besteht aus drei Blöcken mit  $78 \times 38$ ,  $98 \times 38$  und  $66 \times 38$  Punkten, zusammen also 8196 Stützpunkten. Die Rechenzeit betrug in diesem Falle etwa 47 700 s, das sind also 13.25 Stunden. Die Ergebnisse zeigen eine Sperrung am Ventil (kritischer Zustand) wie auch massive Ablösung im Kanal.

### Zukunftsansichten

Es ist klar, daß die oben genannte Berechnung des Abgaskrümmers am Rande des noch Machbaren und Vertretbaren liegt. Um die Simulationen zu beschleunigen, muß man entweder auf die nächste Generation der Rechner warten, einen besseren beschaffen, oder seine numerische Methode verbessern (oder auch alles zusammen).

Bei der Berechnung von stationären Vorgängen kann man eine wesentliche Beschleunigung durch den Einsatz der lokalen Zeitschritte erzielen. Vielversprechend ist auch die Anwendung des Multigrid (Mehrgitter) Verfahrens, wobei die störenden Niedrigfrequenzfehler auf größeren Netzen als Hochfrequenzfehler schnell eliminiert werden.

Die Qualität der Ergebnisse kann man durch lokale Verfeinerung der Netze, wie auch Anpassung der Netztopologie an die Ergebnisse, erreichen. Parallelisierung ist vorläufig nicht wichtig bei PCs, würde aber eine Berechnung auf mehreren PCs gleichzeitig erlauben. Die so entstandenen Programme sind allerdings außerordentlich komplex, und mit gewöhnlichen FORTRAN 77 Compilern fast unmachbar, und sicherlich nicht zu warten. Ob der neue FORTRAN 90 Standard Abhilfe bringt, ist abzuwarten. Die Verwendung von modernen objektorientierten Sprachen, wie zum Beispiel C++, scheint im Moment eher vielversprechend.

Von der Wahl der Programmiersprache unabhängig, ist die Zukunft der massiven Berechnungen auf PCs bestenfalls unsicher. Die Preise der vergleichbaren Workstations fallen so stark nach unten, daß sie zum ersten mal auf genau dem gleichen Niveau sind wie auch entsprechend ausgerüstete PCs. Dabei ist noch zu bedenken, daß auf typischen WSs die Software wesentlich besser integriert ist. Das archaische Betriebssystem DOS, welcher auch immer Version, ist wegen seiner lächerlichen Beschränkungen, die sich aus der vermeintlichen Kompatibilität zum ursprünglichen PC aus dem Jahr 1981 ergeben, dieser Aufgabe einfach nicht gewachsen. Es ist im Moment überhaupt nicht klar, welche andere Alternative sich in der Zukunft durchsetzen wird.

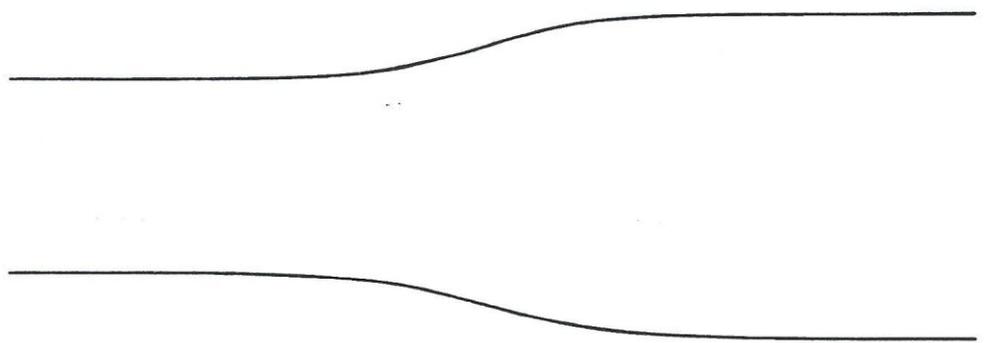
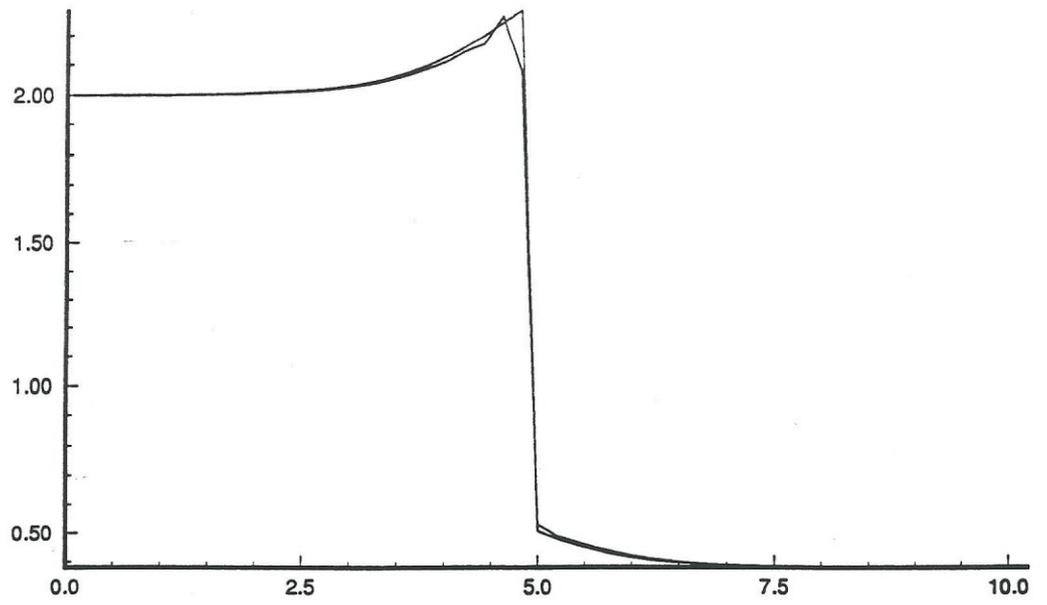


Abb. 1: 1.-dim. Düsenströmung

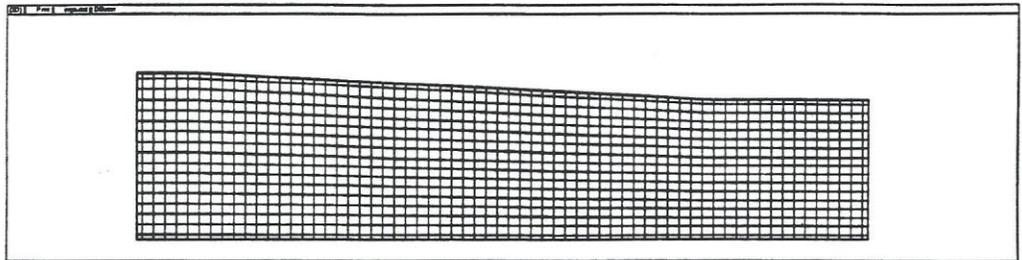
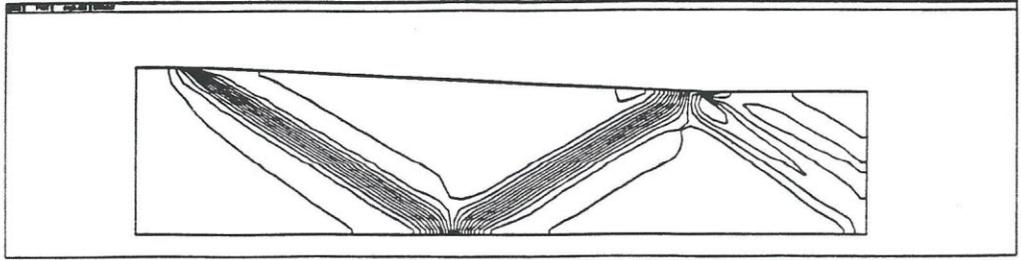


Abb. 2: 2.-dim. Überschalldiffusor, Euler-Rechnung

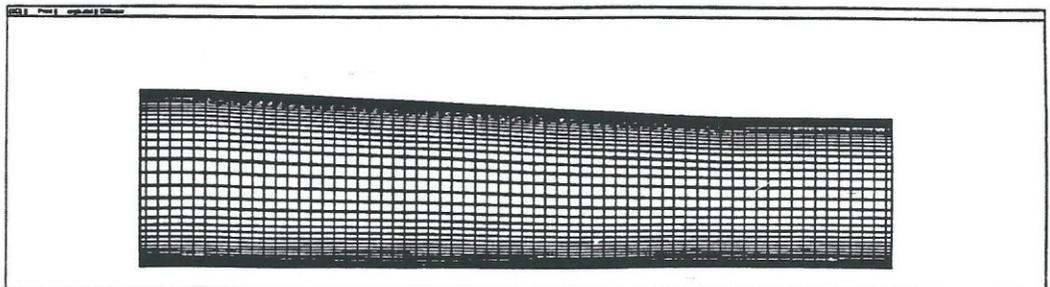
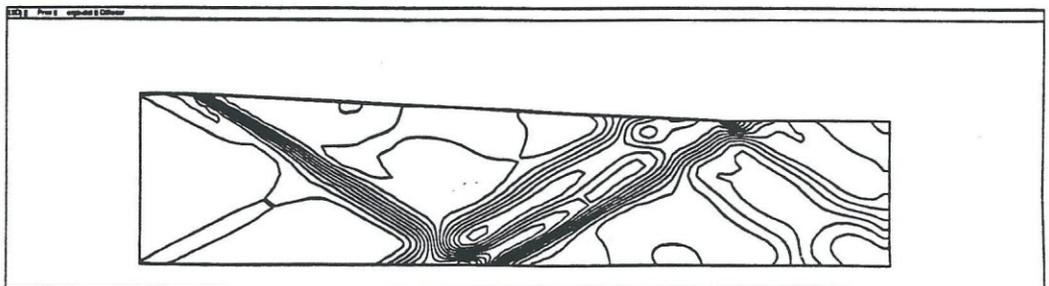


Abb. 3: 2.-dim. Überschalldiffusor, Navier-Stokes-Rechnung

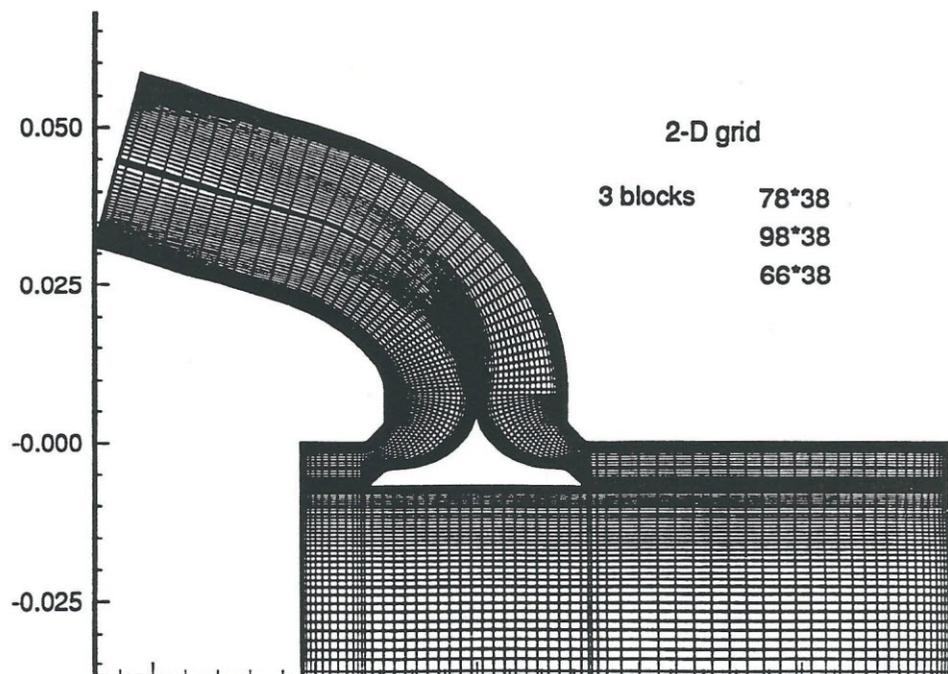
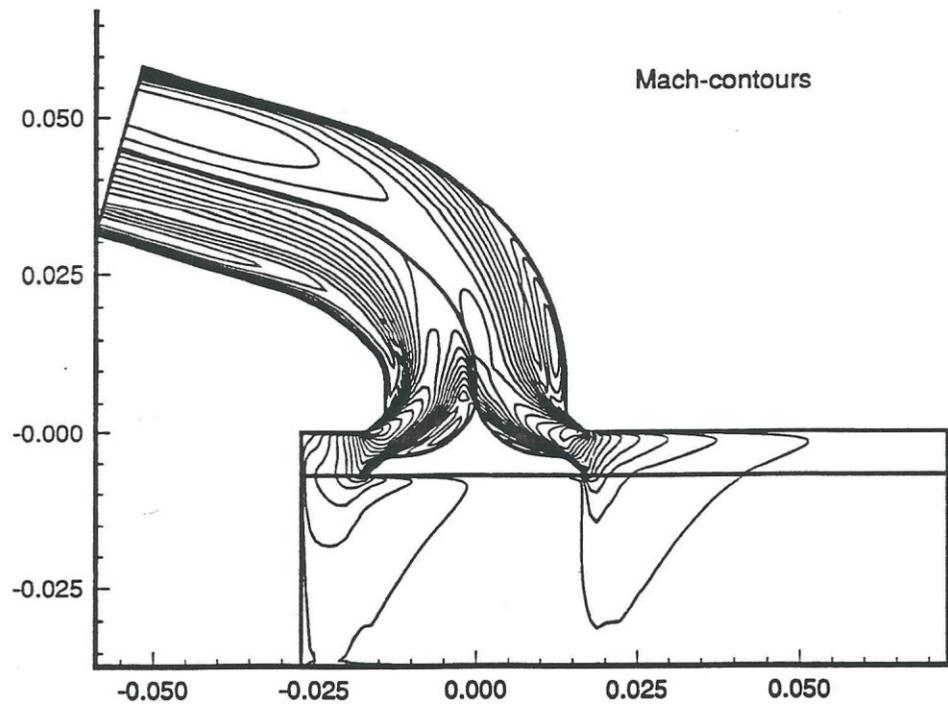


Abb. 4: 2.-dim. Abgaskrümmer, Navier-Stokes-Rechnung