

Ein Superrechner im Dienst der Meteorologie

Klimasimulation: Die Wetterküche im Computer

Einer der schnellsten Rechner der Welt macht es möglich, daß jetzt weltweite Klimaschwankungen systematisch erforscht werden können. Im Max-Planck-Institut für Meteorologie in Hamburg berechnen Forscher Klimasimulationen auf dem Cyber 205.

Meteorologen brauchen gute Nerven. Sie gehören nämlich zu den Menschen, die am häufigsten beschimpft werden. Wir machen sie nicht nur für falsche Wettervorhersagen verantwortlich, sondern oft auch für das schlechte Wetter selbst. Am Wetter werden wir auch in den nächsten Jahrzehnten nichts ändern können, aber die Wettervorhersage klappt vielleicht in 20 Jahren schon viel besser: Der Computer macht's möglich.

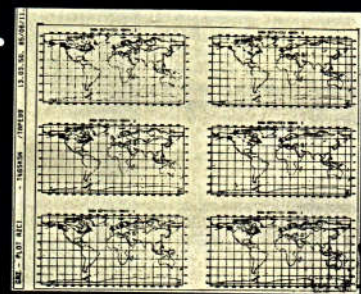
Mitte Mai wurde im Max-Planck-Institut für Meteorologie in Hamburg ein Supercomputer in Betrieb genommen, der die professionellen Wetterfrösche einen großen Schritt vorwärts bringt: Der Cyber 205 ist derzeit eine der schnellsten Rechenmaschinen der Welt. 400 Millionen Rechenoperationen pro Sekunde schafft seine Elektronik dank einer ausgefeilten Parallelverarbeitung. Vector-Processing heißt das Zauberwort, bei dem der Computer Hunderte von Einzelanweisungen nicht mehr hintereinander, sondern in einem einzigen Bearbeitungsschritt parallel verarbeiten kann. Er verfügt über einen Hauptspeicher von acht Millionen Byte (8 MByte) und kostet rund 18 Millionen Mark.

Daß man so viel Geld für einen Rechner ausgibt, hat natürlich seinen Grund, und der liegt in der Komplexität des Wettergeschehens. »Das Klimasystem«, erklärt Professor Egger vom Meteorologischen Institut an der Universität München, »ist vermutlich das komplexeste physikalische System, das je simuliert wurde.«

Noch vor wenigen Jahren erschien es als Utopie, das Wetter mit all seinen physikalischen Abläufen in Form mathematischer Gleichungen in einen Rechner zu packen. Die explosionsartige Verbesserung von Schnelligkeit und Speicherfähigkeit der Großcomputer in den letzten zehn Jahren hat jedoch die Hoffnungen auf diesem Gebiet wieder gestärkt.

Wetter im Computer simulieren, wie geht das vor sich?

Die Meteorologen wissen natürlich, welche Faktoren im Prinzip das Wetter beeinflussen. Die Hauptfaktoren sind das Festland, die Eiswüste der Antarktis, der Ozean mit seinen Eis- und Wassermassen und die Atmosphäre. Die drei letztgenannten Faktoren repräsentieren die drei Aggregatzustände des Wassers (Eis, Wasser, Dampf). Die Zeit, in der das Wasser jeweils in den einzelnen Formen



Bei der Simulation von Klimamodellen wird der ganze Globus in »Kästchen« unterteilt. In jedem dieser Kästchen kann man dann die physikalischen Vorgänge berechnen, mit den Nachbarkästchen verknüpfen und die Ergebnisse ausdrucken. Auf dem Satelliten-Foto wurden hier zwei Felder in Nord- und Südafrika herausgegriffen.

Wettercomputer: Das weltweite Klimanetz hat viele kleine »Maschen«

verharrt, charakterisiert die verschiedenen Zeitmaßstäbe, die die Dynamik des Klimas bestimmen.

Ein Simulationsprogramm muß nun versuchen, die Zusammenhänge der hier genannten Hauptfaktoren mit mathematischen Formeln zu beschreiben. Das klingt einfacher, als es in Wirklichkeit ist. Denn die einzelnen Faktoren beeinflussen sich untereinander, und wenn einer sich ändert, ändern sich die anderen automatisch auch, was wiederum eine Änderung der ersten Faktoren mit sich bringt. Mit anderen Worten, es gibt Rückkopplungen. Hier zwei Beispiele für Rückkopplungen von Land- bzw. Meereis im Klimasystem.

● Bei abnehmender Temperatur führen verstärkte Schneefälle zu einer Ausbreitung des Landeises. Dies wiederum bewirkt, daß die einfallende Sonnenstrahlung stärker reflektiert wird und die Erdoberfläche sich nicht mehr so stark erwärmen kann. Dadurch sinken die Temperaturen auf dem Land weiter, das Eis nimmt noch weiter zu. Eine Anfangsbedingung verstärkt sich also immer mehr.

Mit kurzen Zeitschritten werden Prognosen errechnet

● Der gegenteilige Effekt kann beim Meereis beobachtet werden; da gleicht sich eine anfängliche Störung immer wieder aus, und zwar so: Wenn sich das Meereis ausdehnt, nimmt dadurch die Wasseroberfläche des Ozeans ab, er kann nicht mehr so viel Wärme an die Atmosphäre abgeben; die Meerestemperatur erhöht sich. Dadurch schmilzt wieder Eis, die Oberfläche des Meeres nimmt wieder zu, es kühlt sich ab, Eisbildung setzt erneut ein, usw. ...

Solche Vorgänge lassen sich in mathematische Gleichungen fassen, in denen als Variable die Zeit vorkommt. Und wenn man den Computer solche Gleichungen nicht nur für einen Zeitpunkt ausrechnen läßt, sondern ihn kleine »Zeitschritte« machen läßt, das heißt, die Zeit bei jedem Durchlauf des Programms in einer Schleife um einen kleinen Schritt erhöht, kann man Prognosen ausrechnen.

Da läßt sich dann in unserem Beispiel vielleicht vorhersagen, wann die ganze Erde mit Eis bedeckt sein wird oder wie hoch am 27. April 2003 die mittlere Tem-



Professor Klaus Hasselmann (oberes Bild, Mitte) und seine Mitarbeiter haben mit dem Cyber 205 (rechts) jetzt einen Computer zur Verfügung, der aufgrund seiner Größe und Schnelligkeit Simulationen erlaubt, die vorher zu aufwendig waren. Mit Hilfe von Vector-Processing (mehr darüber im Bericht) schafft dieser Rechner 400 Millionen Rechenoperationen pro Sekunde. Rechts unten: ein Blick auf das Rechenwerk im geöffneten Computer.



Ein Extra-Rechner bereitet die Programme so auf, daß sie mit optimaler Geschwindigkeit vom Cyber verarbeitet werden können. Auf dem linken Monitor wird angezeigt, welches Programm gerade gerechnet wird.

peratur der Ozeane sein wird. Aber wenn interessiert das schon?

Was uns – und damit auch die Forscher – interessiert, sind erstens Vorgänge, die wesentlich mehr Faktoren berücksichtigen, also auch noch die Gestalt der Erdoberfläche, die Jahreszeit, die Meeresströmungen, die Zusammensetzung der Atmosphäre. Und zweitens Vorgänge, die nicht nur eine mittlere Temperatur für die ganze Erde ausrechnen oder die durchschnittliche Eisbedeckung, sondern die das Ganze regional aufschlüsseln; also sagen, wo es warm und wo es kalt ist.

Diese beiden Anforderungen machen die Geschichte erst richtig kompliziert. Nimmt man nämlich viele unterschiedliche Faktoren in die Rechnungen auf, werden die Gleichungen, die man zur mathematischen Beschreibung braucht, mehr, und sie sind komplizierter untereinander verflochten. Man spricht dann von einem System von Differentialgleichungen.

Ein solches System in einer halbwegs vernünftigen Zeit zu lösen, erfordert ein sehr gutes Rechenprogramm, das die Differentialgleichungen in einfachere Gleichungen umwandelt.

Um eine regionale Klima- oder gar Wettervorhersage zu bekommen, muß man den Globus in Stücke einteilen und das eben beschriebene Gleichungssystem für jedes Stückchen extra lösen. Das wäre noch gar nicht einmal so schlimm, wenn nicht die einzelnen Stückchen (oder Maschen, wie man sie nennt) auch noch untereinander zusammenhängen.

Man kann es sich leicht vorstellen: Der Wind, der in irgendeiner »Masche« aufkommt, erreicht schnell die nächste, und er bleibt dort nicht stehen, nur weil der Computer eine neue Masche begonnen hat. Oder: Die Temperatur am Rand von zwei benachbarten Maschen

muß natürlich übereinstimmen, denn im wirklichen Leben gibt es auch keine Temperaturstürze von einem Millimeter auf den anderen.

Auch Wasserdampf, der aus einer Masche herausströmt, muß in der angrenzenden Masche wieder auftauchen. Diese und ähnliche Bedingungen für den Luftdruck und die Zustände in der Atmosphäre bringen den Computer natürlich ganz schön »ins Schwitzen«.

Apertus Wasserdampf: Wolken haben die Erfinder von Simulationsprogrammen gar nicht gern. Bei einer Maschengröße von zum Beispiel 300 mal 300 Kilometern gibt es in den meisten Maschen irgendwo Wolken. Und wenn die dann auch noch abregnen, mußte man in den Gleichungen den Übergang von Wasserdampf in Wassertröpfchen und schließlich in Regentropfen miteinbeziehen. Da man aber nie genau weiß, wo Wolken sind und wo nicht, ist der Aufwand für eine genaue Berechnung zu hoch. Man behilft sich deshalb mit statistischen Werten und verändert nur bestimmte Parameter im Gleichungssystem, ohne jede einzelne Wolke zu beachten.

Wenn ein Simulationsprogramm auch nur die wichtigsten Faktoren berücksichtigen soll, verschlingt das Programm riesige Speichermengen und Rechenzeiten. Für jede von etwa 10000 Maschen müssen in jedem Zeitschritt alle Werte gespeichert werden und je nach den veränderten Bedingungen in jedem Schritt neu berechnet werden. So kommt man leicht auf Stunden und Tage Rechenzeit – selbst auf den größten Computern.

Der Cyber bekommt die Daten »vorgekauft« serviert

Zwei Arten von Vorhersagen kann man mit solchen Simulationen prinzipiell machen: Die »Vorhersage erster Art« stellt nur eine Prognose, wie das Klima (oder Wetter) sich im zeitlichen Ablauf entwickelt. Die »Vorhersage zweiter Art« hingegen gibt Auskunft über die Klimaentwicklung bei veränderten äußeren Umständen, also zum Beispiel, wenn der Kohlendioxid-Gehalt in der Atmosphäre weiter ansteigt.

Daß ein Vektorrechner für diese Art von Simulationsrechnungen besonders gut geeignet ist, leuchtet ein: Er ist so organisiert, daß er gleichartige Rechenoperationen zusammenfäßt und im Pipeline-Verfahren hintereinander durchzieht. Und bei den Simulationen kommen eben für jede Masche die gleichen Rechenschritte vor, ebenso für jeden Zeitschritt.

Um alles in die richtige Reihe zu bringen, ist dem Cyber noch ein weiterer Rechner vorgeschaltet, der die Programme und die Daten so aufbereitet, daß sie dann mit optimaler Geschwindigkeit durch den Zentralrechner sau-



Als verwirrendes Dickicht von Kabeln präsentiert sich die Rückseite der Rechnerschränke. Die Länge der einzelnen Kabel ist genau vermessen, weil durch sie die Laufzeit der Signale bestimmt wird.

Wettercomputer: 30 Jahre in die Zukunft blicken heißt das Ziel

sen können. Deshalb wird der auch als »Number-Cruncher« (Zahlenknacker) bezeichnet.

Ein anderer Rechner fertigt aus den Tausenden von ausgespuckten Daten Grafiken an, die für den Forscher eine Analyse der errechneten Vorhersagen erleichtern. Ein vierter Rechner ist schließlich für die Kontrolle des gesamten Computersystems zuständig.

Für 1985 haben sich die Hamburger Forscher drei Schwerpunkte vorgenommen, die sie mit Hilfe des neuen Superrechners bewältigen wollen:

– In einem Planspiel wird überprüft, wie sich der Anstieg von Kohlendioxid aus Schornsteinen und Autos auf unser Klima auswirkt – ob beispielsweise der gefürchtete Treibhauseffekt einsetzt und die Erde immer weiter aufheizt. Aber auch das Gegenmodell wird durchgerechnet: ob die immer größer werdenden Staubemissionen in der Luft eines Tages dazu führen, daß nicht mehr genug Sonnenstrahlung die Erde erreicht und dadurch eine neue Eiszeit entsteht.

Die unzähligen geographischen und Wetterdaten, die für eine Simulation nötig sind, werden auf Bändern gespeichert. Bei Bedarf sind sie über den Steuerungsrechner abzurufen.



– Der zweite Schwerpunkt: Jetzt können in Programmen, die so umfangreich sind, daß sie auf bisherigen Computern gar nicht bewältigt wurden, die Wechselwirkungen zwischen Ozean und Atmosphäre simuliert werden. Hier interessieren beispielsweise die Einflüsse des Golfstroms auf unser Wetter.

So geschieht es alle drei bis sieben Jahre, daß sich über die am Äquator von West nach Ost verlaufende Kaltwasserströmung warmes Oberflächenwasser schiebt. Die Folge ist eine Temperaturerhöhung um 5 Grad Celsius und ein katastrophales Fischsterben vor der peruanischen Küste, weil das warme Oberflächenwasser gegenüber der kalten Strömung sehr nährstoffarm ist.

Nun hatten die Hamburger Wetterforscher bereits ein Modell über das Zusammenspiel von Meeresströmungen und Windfeldern entwickelt, ebenso ein Modell für die atmosphärische Zirkula-

tion. Jetzt wollen sie auf dem neuen Superrechner beide Modelle kombinieren und hoffen damit, unser Klima besser in den Griff zu bekommen.

Geplant ist, etwa 30 Jahre in die Zukunft zu rechnen. Für zehn Jahre braucht der Computer etwa drei bis vier Tage Rechenzeit, daraus kann man abschätzen, um welche Mammut-Programme es sich hier handelt.

– Den dritten Schwerpunkt sollen regionale Klimamodelle bilden: Im Computer sollen die »Klima-Bilder« von Landschaften gespeichert werden. Daraus könnte man dann die Folgen menschlicher Eingriffe in die Landschaft für das Wetter im voraus abschätzen.

Das ehrgeizigste Ziel, das die Hamburger Klimaforscher verfolgen, geht aber noch weiter. Sie wollen eine Basis schaffen für zuverlässige, langfristige Klima-Vorhersagen. Das ist zwar noch nicht so wirkungsvoll wie eine (richtige) Wetterprognose, denn das Klima liefert immer nur mittlere Werte, während das Wetter jeweils genau für jeden Ort und jede Zeit angegeben werden muß.

Die technischen Daten

Cyber 205

Hersteller: Control Data
Preis: rund 18 Millionen Mark
Gewicht: 13 Tonnen
Schnelligkeit: 400 Millionen Rechenoperationen pro Sekunde, ausbaubar auf 800
Arbeitsweise: Vector-Processing
Taktzeit: 20 Nanosekunden
Hauptspeicher: 8 MByte, ausbaufähig auf 256 MByte
Periphere Speicher: 4 Plattenspeicher à 600 MByte
Front-end-Rechner: Cyber 830 zum Aufbereiten der Programme und zum Dialog mit dem Rechner;
VAX 750 zur grafischen Aufbereitung der Ergebnisse
Kühlmittel: Fluorkohlenstoff

Der Cyber 205 gehört zu den schnellsten Rechnern, die derzeit auf dem Markt sind, und ist in etwa vergleichbar mit dem CRAY X-MP 4. Aber es gibt inzwischen schon einen Computer, der ungefähr zehnmal schneller rechnet: der CRAY 2.

Bauern wüßten schon im Winter, wie gut die Ernte wird

In das Klimamodell müssen aber neben der Atmosphäre, den Ozeanen und dem Festland auch noch die arktischen und antarktischen Eismassen und die gesamte Biosphäre miteinbezogen werden. Erst dann kann es vernünftige Vorhersagen leisten.

Wenn ein solches Modell wirklich funktioniert (im Test wird es auf vergangene Bedingungen angewendet und mit der tatsächlichen Entwicklung verglichen), dann könnten seine Vorhersagen für die Erde einmal lebenswichtig werden. Zum Beispiel, wenn die Bauern schon am Anfang des Jahres wissen, was sie pflanzen oder säen sollen, wann es in welchem Landesteil trocken, feucht, heiß oder kalt ist.

Auf anderen Gebieten dagegen stehen sich Vor- und Nachteile hart gegenüber. Im Fremdenverkehr zum Beispiel. Wenn eine ganz präzise Urlaubsplanung möglich wäre, hätte das für Länder mit wechselhaftem Wetter nicht nur Vorteile...

Auch ein extrem strenger Winter wie der vergangene könnte dann niemanden mehr überraschen: Industrie, Privatpersonen und Energielieferanten könnten sich rechtzeitig darauf einstellen. So genaue Vorhersagen sind heute allerdings noch ein Traum. Wenn die Entwicklung bei den Computern jedoch in diesem Tempo weitergeht, kann er vielleicht in wenigen Jahren Wirklichkeit werden. Die Firma Control Data, die auch den Cyber 205 hergestellt hat, will bereits im nächsten Jahr einen Rechner vorstellen, der zwölfmal so schnell arbeitet – ein neuer Rekord.

Brigitte Röthlein