

Wirklich intelligente Rechner

In einem so ereignisreichen Feld wie dem Supercomputing ist es gelegentlich Zeit für eine Zwischenbilanz: Was hat sich in den letzten zwanzig Jahren getan? Was ist in den nächsten zwanzig Jahren zu tun?

Von Horst Simon

Jede technische Entwicklung hat ihre »Leuchttürme«: Errungenschaften, die ihresgleichen so überragen, dass sie noch Jahrzehnte später als prägend für die Epoche im Gedächtnis bleiben.

Was das Hochleistungsrechnen angeht, war der »Leuchtturm« vor zwanzig Jahren zweifellos die »Cray-2«. Sie bot die damals atemberaubende Spitzenleistung von 2 Milliarden Rechenoperationen pro Sekunde (2 Gigaflops). Jeder ihrer vier Prozessoren (Einzelrechner) hatte mit 50 Kilowatt die Leistungsaufnahme eines mittelgroßen Pkws. Zur Abfuhr der dadurch produzierten Wärme diente ein damals äußerst innovatives Kühlsystem, das dem ganzen Gerät seine charakteristische, geradezu kuschelige Anmutung gab. Mit einer Standfläche von 1,6 Quadratmetern passte die Cray-2 ohne Weiteres in ein durchschnittliches Wohnzimmer – ein Konzertsflügel ist wesentlich sperriger – und setzte sich damit deutlich von den hallenfüllenden Großrechnern ihrer Zeit ab.

Inzwischen sind die Supercomputer in ihren räumlichen Abmessungen wieder zu monumentaler Größe herangewachsen. Der »Earth Simulator«, der zweieinhalb Jahre lang, von 2002 bis 2004, die Rolle des Leuchtturms innehatte, füllt ein eigens für ihn errichtetes Gebäude von 3200 Quadratmeter Grundfläche (Spektrum der Wissenschaft 9/2002, S. 14). Verglichen damit ist der gegenwärtige Spitzenreiter »Blue Gene/L« von IBM mit 250 Quadratmetern schon wieder ziem-

lich kompakt gebaut. Mit einem Stromverbrauch von 1800 Kilowatt liegt er im mittleren Lokomotivenbereich.

Das Wesentliche aber: Die Rechenleistung ist verglichen mit der Cray-2 um den Faktor 200 000 gestiegen. Wie kommt dieser enorme Fortschritt zu Stande? Was sind die bedeutendsten Innovationen der letzten zwanzig Jahre?

An dieser Stelle pflegt man das Moore'sche Gesetz zu zitieren: Mit der Regelmäßigkeit eines Naturgesetzes steigt die Leistung eines Mikrochips, des zentralen Computerbauteils, pro Jahr um den Faktor 1,5; Platzbedarf und Preis pro Rechelement fallen mit der gleichen Rate. Dieser Erfahrungssatz feiert mittlerweile das vierzigste Jahr seiner Gültigkeit. Die merkwürdige Gleichmäßigkeit ist nur dadurch zu erklären, dass es nicht einzelne große Durchbrüche sind, sondern viele kleine Verbesserungen, die den Fortschritt vorantreiben. Und nach dem Moore'schen Gesetz allein hätte die Rechenleistung in zwanzig Jahren auch nur auf das 3300fache ansteigen dürfen.

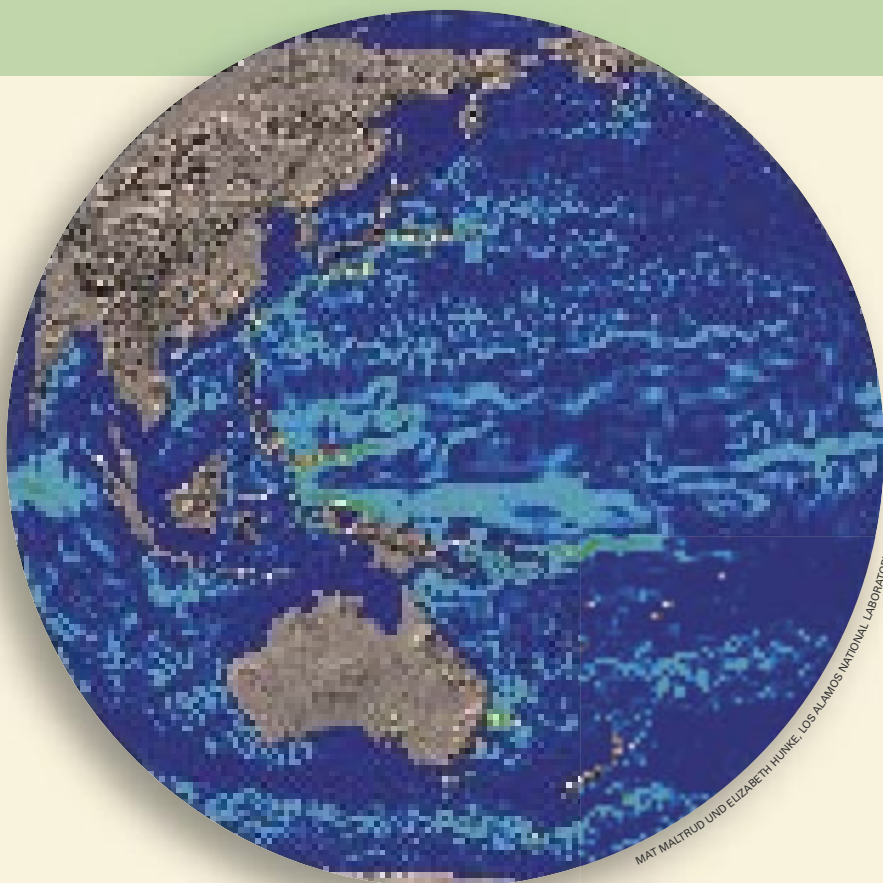
Der Anstieg der Leistung pro Prozessor fällt sogar überraschend mager aus: von 500 Megaflops (Millionen Rechenakte pro Sekunde) bei der Cray-2 auf 700 bei Blue Gene/L – ein etwas unfairer Vergleich zwischen einem absoluten Spitzenmodell damals und einem Mehrzweck-Massenprodukt heute. Aber der gegenwärtige »Leuchtturm« koordiniert immerhin 131 072 dieser eher gewöhnlichen Rechenbauteile, was in diesem Fall den Fortschritt ausmacht.

Was hat sich sonst noch Wesentliches ereignet? Ich habe eine Hitliste erstellt, von der ich die »Top Five« im Folgenden präsentieren werde. Einige Innovationen, die das Arbeiten mit Supercomputern gravierend beeinflusst haben, sind nicht darunter. Das gilt insbesondere für das Internet und die rapide angestiegene Geschwindigkeit der Datenübertragung, die auch für das räumlich verteilte Rechnen (*grid computing*) genutzt werden; man bedenke, dass man mit der Cray-2 noch über ein ziemlich beschränktes Terminal kommunizieren musste und sich glücklich schätzen durfte, wenn 9600 Bit pro Sekunde über die Datenleitung gingen.

Wesentliche Fortschritte in der Software sind ebenfalls nicht unter den Top Five, weil entscheidende Ideen zwar in den letzten zwanzig Jahren zur Wirkung kamen, aber bereits weit früher, in den 1960er Jahren, entwickelt wurden. Das bezieht sich insbesondere auf hierarchische Algorithmen zur Lösung großer Gleichungssysteme, deren prominenteste Vertreter die Mehrgitterverfahren sind (Spektrum der Wissenschaft 4/1990, S. 78).

Hier also meine – persönliche und wohl nicht in allen Punkten mehrheitsfähige – Bestenliste.

Nummer 5: der Angriff der Killermikros. Dieser von Eugene Brooks vom Lawrence-Livermore-Nationallaboratorium geprägte Ausdruck hat sich durchgesetzt, vor allem weil jeder dabei an den Trash-Film »Angriff der Killertomaten« denkt. Gemeint sind die Mikrochips, die durch den massenhaften Einsatz in ge-



◀ In diesem Modell des Weltozeans mit einem Gitter aus 177 Millionen Datenpunkten berechnen 448 Prozessoren mit bisher unerreichter Präzision den Transport von Wassermassen, die durch Gefrieren und Schmelzen unterschiedliche Salzgehalte aufweisen. Das Bild zeigt die Strömungsgeschwindigkeiten in 50 Meter Tiefe: von blau (0) bis rot (mehr als 1,5 Meter pro Sekunde).

im Raum einen Vektor, zum Beispiel den der Strömungsgeschwindigkeit, zuordnet.

Und genauso trocken und abstrakt sahen vor zwanzig Jahren die Ergebnisse mühsamer Simulationsrechnungen aus: Aus vielen Punkten eines Bilds ragten unbeholfen gezeichnete Vektorpfeile in die Gegend. Wo es besonders ungekämmt aussah, da waren die entscheidenden Stellen wie das Auge des Wirbelsturms oder die Stoßfront, die den Flugzeugflügel binnen Kurzem ruinieren würde. Bloß genau da sah man vor lauter Vektorpfeilen das Wichtige nicht mehr.

Hier hat sich Dramatisches getan. Farbe steht zur Verfügung, um eine weitere Dimension der Daten auszudrücken, die man bislang weglassen musste. Statt der abstrakten Vektoren lässt man die Computer sinnfällige Objekte zeigen, die der durch das Vektorfeld bestimmten Bewegung folgen: Kügelchen fliegen durch die Gegend, während ein künstliches, verblassendes Nachbild Richtung und Geschwindigkeit anzeigt. Bänder verlaufen in Strömungsrichtung. Oder es sieht so aus, als würde eingeblassener Rauch von der Strömung mitgerissen. Vor allem haben die Bilder laufen gelernt. Einen ereignisreichen Kurzfilm in flammenden Farben zu drehen ist einfacher geworden, als damals einen der unansehnlichen Schwarz-Weiß-Vektorigel darzustellen.

Das beeindruckt nicht nur Laien. Auch die Forscher selbst, die auf diese Weise das Unsichtbare sichtbar machen, entdecken in den von ihnen berechneten Kinofilmen Dinge, die ihnen in der abstrakten Form verborgen geblieben wären.

Nummer 2: MPI, das interne Telefonnetz eines Parallelrechners. Das innovativste Gebiet der Technik zeigt manchmal merkwürdige Anwendungen von Trägheit. Ein krasses Beispiel ist die Programmiersprache Fortran. Mitte der 1950er Jahre, als sie erfunden wurde, war sie ein ▶

wöhnlichen PCs ungeheuer billig geworden sind – so sehr, dass sie die eigens für Hochleistungsrechner entworfenen Prozessoren aus Preisgründen verdrängten. Durch Masse gleichen sie aus, was ihnen an Eignung für das Schnellrechnen fehlte, und das zu weitaus günstigeren Preisen. Das machte Supercomputer für zahlreiche Institutionen erst bezahlbar und verschaffte so dem Hochleistungsrechnen einen gewaltigen Aufschwung.

Im Rückblick erscheint diese Entwicklung alles andere als unvermeidlich. Angesichts der guten Alternativen, die es gab, ist es sogar erstaunlich, dass ausgerechnet ein zweckentfremdetes, für eine ganz andere Anwendung vorgesehenes Bauteil sich so machtvoll durchgesetzt hat.

Nummer 4: Beowulf. Das Gute ist des Besseren Feind. Das gilt in noch stärkerem Maß für eine Innovation, die den Angriff der Killermikros noch einen Schritt weiter führte: Thomas Sterling vom California Institute of Technology und vom Jet Propulsion Laboratory (beides in Pasadena) entwickelte Ende der 1990er Jahre eine Software, mit der man nicht nur die massenfertigten PC-Mikrochips verwenden konnte, sondern sich um deren Kommunikation untereinander nicht sonderlich kümmern musste.

Ein Beowulf-Cluster besteht aus vielen relativ lose zusammengestöpselten

PCs und ist aus diesem Grund nochmals um Klassen billiger in der Anschaffung (Spektrum der Wissenschaft 3/2002, S. 88). Es war die »Demokratisierung des Hochleistungsrechnens«: Die Software wurde im Rahmen der »Open Source«-Bewegung von Anfang an offen gelegt und so für jedermann verfügbar – mit phänomenalem Erfolg: Clusterrechner eroberten im November 2005 mehr als die Hälfte der Plätze in der Top500, der Liste der 500 weltchnellsten Computer.

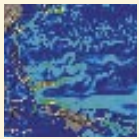
So groß wie der Erfolg war auch der angerichtete Schaden: Weil aus Preisgründen keine Innovation in der Rechnerarchitektur eine Anwendung gefunden hätte, kam der Fortschritt auf diesem Gebiet für fast zehn Jahre völlig zum Erliegen. Thomas Sterling hat sein eigenes Geisteskind inzwischen verstoßen und – frei nach Einstein – als »die größte Eselei meines Lebens« bezeichnet.

Nummer 3: die wissenschaftliche Visualisierung. Wissen Sie, was ein Vektorfeld ist und wie es aussieht? Es ist das Ziel aller Bemühungen, wenn es – zum Beispiel – darum geht, eine Strömung auszurechnen: Luft in einem Wirbelsturm oder gleich in der ganzen Atmosphäre, Verbrennungsgase in einem Motor oder entlang einer Turbinenschaukel, Luft über und unter einem Tragflügel ... Ein Vektorfeld ist eine Funktion, die jedem Punkt

▷ phänomenaler Durchbruch, erlaubte sie doch dem Wissenschaftler, sein Problem in einer sinnfälligen Form an den Computer weiterzureichen, ohne sich allzu sehr um dessen Innenleben zu kümmern.

Bald gab es Programmiersprachen, die viel besser waren. Aber Fortran hat sie alle überlebt, aus zwei Gründen: Niemand mochte seine alten Programme, für die er viel Mühe aufgewendet hatte, wegwerfen; und ein Computer, der nicht bei Fortran-Programmen gute Leistungen vorweisen konnte, hatte keine Marktchance. So waren die Hardwarehersteller gezwungen, die technische Basis für ein völlig veraltetes Programmierungskonzept zur Perfektion zu treiben. Das ist ihnen gelungen, woraufhin die völlig veralteten Programme der Anwender auf diesen Maschinen besser liefen als die fortgeschrittenere Software.

Es sieht ganz so aus, als hätten wir in den letzten zwanzig Jahren eine getreue



Ein veraltetes Programmierungskonzept, zur Perfektion getrieben, hat alle anderen überlebt

Wiederholung dieses Phänomens erlebt. Diesmal geht es um das Verfahren, mit dem die einzelnen Prozessoren eines Parallelrechners Informationen untereinander austauschen. Da die Geschwindigkeit des Speicherzugriffs weit geringer angewachsen ist als die Rechengeschwindigkeit, ist sie mittlerweile der am stärksten begrenzende Faktor. Es hilft dem Prozessor nicht, dass er rasend schnell rechnen kann, wenn er nicht rechtzeitig an die Zahlen kommt, mit denen er rechnen soll. Das klassische Konzept des gemeinsamen Speichers – alle Prozessoren greifen auf ein zentrales Datenlager zu – wurde daher zunehmend unpraktikabel. Zu häufig kommen sich die Einzelrechner beim Speicherzugriff in die Quere, wie auf dem Wühltisch im Schlussverkauf.

Stattdessen verwenden sie eine Art Telefon: Wer eine Neuigkeit für einen Kollegen hat, schaltet eine Leitung exklusiv zu diesem und ist ebenso wie der Empfänger ein Weilchen mit Nachrichtenübermittlung (*message passing*) beschäftigt. Nicht nur die Arbeitszeit, auch die Leitungskapazität ist knapp, weswegen das Telefonieren gut organisiert sein will.

Noch Ende der 1980er Jahre wurde auf diesem Gebiet intensiv geforscht. Aber

von den zahlreichen innovativen Projekten, die damals verfolgt wurden, sind die meisten in Vergessenheit geraten. Man erinnert sich kaum noch an ihre Namen.

Die weitere Entwicklung hat etliche Züge mit der biologischen Evolution gemeinsam: Sowie eine neue Umwelt – die massiv-parallelen Rechner – besiedelbar wurde, gab es zunächst eine Explosion der Formenvielfalt. Zahlreiche Lösungen desselben Problems konnten eine Weile existieren; aber dann machte sich bemerkbar, dass Supercomputing doch nur ein ziemlich kleines, inselartiges Ökosystem ist. Eine Art nach der anderen starb aus.

Unter den letzten Überlebenden waren sinnigerweise ein Abkömmling des Dinosauriers Fortran namens HPF (*High-Performance Fortran*) und eine Sammlung von elementaren Verfahren mit dem schlichten Namen MPI (*Message Passing Interface*). Und Letzteres wurde ungefähr ab 1998 zum De-facto-Standard des

Hochleistungsrechnens. Es ist zu befürchten, dass ihm eine ähnliche Lebensdauer beschieden ist wie der Sprache Fortran.

Warum hat sich ausgerechnet MPI durchgesetzt? Nicht wegen seiner prinzipiellen Überlegenheit. Das Konzept war schon Mitte der 1980er Jahre, als es noch aktuell war, eher hausbacken. Vielmehr handelt es sich, wie bei Fortran, um eine Koevolution mit der Umwelt! Die Hardware hat sich so entwickelt, dass MPI darauf am besten gedeihen konnte. Denn das war eine Hauptforderung der Kunden. Vielleicht lag es auch mit daran, dass die Anforderungen, die diese Kommunikationssoftware an die Maschinen stellte, am leichtesten zu realisieren waren; oder der Chefkonstrukteur eines Herstellers war davon überzeugt, dass MPI sich durchsetzen würde, investierte entsprechend viel in die Entwicklung geeigneter Hardware und machte damit seine eigene Prognose zur Realität.

Nummer 1: der Ausgang aus dem selbst verschuldeten Pessimismus. Es wird manchen überraschen, dass auf Platz 1 meiner Hitliste weder Soft- noch Hardware steht, noch nicht einmal das Konzept einer solchen. Vielmehr fand nach meiner persönlichen Auffassung die weit-

▶ Aus Magnetresonanz-(NMR-)Daten wurden nicht nur die Positionen der Atome in einem Kristall aus der Aminosäure Alanin visualisiert, sondern auch (mit Vektorpfeilen) die vom Magnetfeld induzierten elektrischen Ströme.

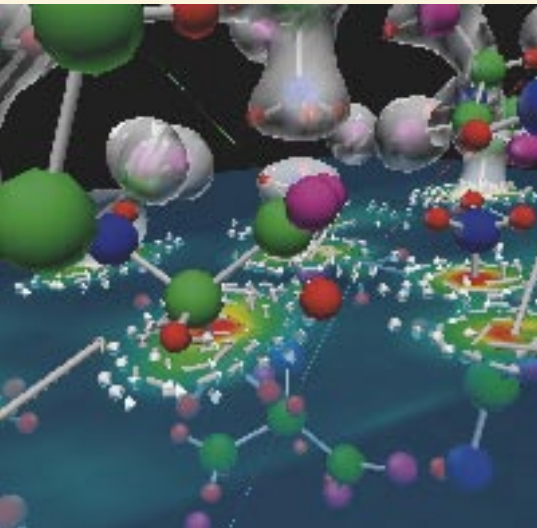
aus bedeutendste Umwälzung ausschließlich in den Köpfen der Beteiligten statt.

Es handelt sich um die Abkehr von einem Irrtum, der sehr hartnäckig war, weil er eine allgemeine, leicht einzusehende Wahrheit wiederzugeben schien. Delegiert man eine große Arbeit an N Sklaven, statt sie allein zu machen, dann sinkt die insgesamt benötigte Zeit theoretisch auf $1/N$. Aber wenn es sich um Rechenarbeit handelt, stimmt das nicht ganz. Irgendjemand muss ja die Teilergebnisse, welche die Sklaven ausgerechnet haben, zum Gesamtergebnis zusammenfassen. Bei großen Rechenaufgaben fallen derartige Arbeiten typischerweise immer wieder an. So ist zum Beispiel aus allen Einzelergebnissen ein Durchschnitt oder Ähnliches zu bilden, den sämtliche Sklaven zur Fortführung der Rechnung benötigen.

Nehmen wir an, bei einem großen Rechenprojekt betrage der nicht aufteilbare (der »serielle«) Anteil ein Prozent, und die restlichen 99 Prozent seien parallelisierbar. Die Arbeit nehme mit einem einzigen Prozessor hundert Stunden in Anspruch. Dann ist ein Parallelrechner mit hundert Prozessoren in knapp zwei Stunden fertig: Eine Stunde lang sind sie alle fleißig, und eine Stunde entfällt auf die Pausen, in denen der serielle Kollege das Zusammenfassen erledigt. Immerhin vervünfzigfacht sich dadurch die Rechengeschwindigkeit.

Aber: Tausend statt hundert Prozessoren auf dasselbe Problem anzusetzen bringt nicht viel. Die Rechenzeit sinkt – beim zehnfachen Aufwand – von knapp zwei Stunden auf eine Stunde und knapp sechs Minuten, und die tausend Sklaven stehen nicht die Hälfte, sondern ungefähr 90 Prozent der Zeit untätig herum. Und wenn es unendlich viele Prozessoren wären, würde die Gesamtzeit immer noch nicht unter eine Stunde sinken. Der *speed-up*, der Zuwachs an Geschwindigkeit, ist auf den Faktor 100 beschränkt, oder allgemein auf 1 geteilt durch den seriellen Anteil.

Diese unbestreitbar zutreffende Gesetzmäßigkeit ist als »Amdahl's Law« be-



BERND PROMMER, NERSC VISUALIZATION GROUP

kannt geworden, weil Gene Amdahl, ein Pionier der Hardwareentwicklung, sie bereits 1967 formuliert hat. Eine Folgerung scheint offensichtlich: Mehr als einige hundert, allenfalls tausend Prozessoren zu einem Parallelrechner zusammenschließen ist nichts als Materialverschwendung. Gleichwohl ist sie falsch.

John Gustafson, der heute beim Computerhersteller Clearspeed arbeitet, hat 1988 den verborgenen Denkfehler auf den Punkt gebracht. Amdahls Gesetz trifft zu, wenn man wirklich dasselbe Problem, das man bisher auf einem konventionellen (seriellen) Rechner bearbeitete, auf einen Parallelrechner überträgt. Das kommt aber praktisch nicht vor. Kaum hat der Nutzer die bessere Hardware zur Verfügung, stellt er ihr ein größeres Problem! Statt meteorologische Daten wie Temperatur und Windgeschwindigkeit alle zehn Kilometer zu berechnen, überzieht der Wirbelsturmforscher sein Rechengebiet mit einem dichteren Netz von einem Kilometer Maschinenweite und beschäftigt hundertmal so viele Prozessoren. Nur der Aufwand für die Zusammenfassung der Ergebnisse ist nicht wesentlich größer geworden.

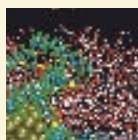
Wenn es also nicht um ein konkretes Problem geht, sondern um eine Familie von Problemen mit zunehmendem Rechenaufwand, dann sind sehr wohl *speed-ups* erreichbar, die gleich der Zahl der Prozessoren sind oder nur knapp darunter liegen. Parallelisierung, auch mit Zehntausenden von Prozessoren, ist ein lohnendes Geschäft. Auch das ist nicht schwer einzusehen; aber es hat Jahre gedauert, bis sich Ende der 1980er, Anfang der 1990er Jahre diese Einsicht in den Köpfen der Supercomputer-Betreiber

durchsetzte. Zu viele Komplikationen hatten den Blick verstellt, insbesondere die Tatsache, dass mit zunehmender Prozessoranzahl die interne Kommunikation immer schwieriger wird. Ohne diese Einsicht jedoch hätte der frühe Erfolg der Parallelrechner so nicht stattgefunden.

Kurzfristiger Trend: Rechnen mit 100 000 Prozessoren. Die folgenden Ausführungen sind weitaus weniger konkret als die bisherigen über die Vergangenheit. Denn nach einem bekannten Sprichwort sind Prognosen schwierig, vor allem, wenn sie die Zukunft betreffen. Aber für die unmittelbar vor uns liegende Zukunft sind die Anforderungen einigermaßen klar.

Was die schiere Rechengeschwindigkeit angeht, gerät das Moore'sche Gesetz bereits jetzt an seine Grenzen. Eine weitere Erhöhung der Taktrate geht mit einer Wärmeproduktion und anderen Problemen einher, die kaum noch zu beherrschen sind. Deswegen gehen die Chiphersteller bereits dazu über, mehrere Prozessoren in ein und denselben Chip einzubauen (die »Multi-Core«-Technik, siehe Spektrum der Wissenschaft 3/2005, S. 90). Will man die Leistung der schnellsten Rechner weiter steigern, so funktioniert das nur über die Anzahl der Prozessoren.

Die aktuelle Liste der 500 welt-schnellsten Computer, die Top500, zeigt das in aller wünschenswerten Deutlichkeit: Die Nummer 1 der Liste, Blue Gene/L von IBM, vollbringt ihre 280 Teraflops (Billionen Rechenoperationen pro Sekunde) mit 131 072 Prozessoren und liegt mit beiden Werten um eine ganze Größenordnung vor der Konkurrenz. (Der »Earth Simulator«, der vor nicht allzu langer Zeit die Amerikaner das Fürchten lehrte, ist



Wenn hunderttausend Köche in einem Brei rühren, sind neue Konzepte für die Koordination gefordert

auf Platz 7 abgerutscht.) Stand der Technik war bis zum vorigen Jahr, dass man einige tausend bis zu etwa 10 000 Prozessoren zu einigermaßen disziplinierter Kooperation bringen kann. Aber wenn wirklich 100 000 Köche in demselben Brei rühren, sind neue Ideen gefordert.

Das lässt sich illustrieren an der Hauptbeschäftigung wissenschaftlich rechnender Computer, dem Lösen linearer Gleichungssysteme. Ein solches Gleichungssystem ist die mathematische Darstellung

der Beziehungen zwischen zahlreichen »Elementen« (Unbekannten). Dabei ist ein Element zum Beispiel eines von vielen Molekülen in einem wild bewegten Gas; oder es ist ortsfest und repräsentiert Temperatur, Dichte und Geschwindigkeit der an ihm vorbeiströmenden Luft. Man denke sich je zwei Elemente, die etwas miteinander zu tun haben – zum Beispiel Kräfte aufeinander ausüben – durch einen Faden verbunden; dann ergibt sich ein großes Netz, und die Lösung des Gleichungssystems läuft darauf hinaus, das Netz aufzuknoten, sodass klar wird, was mit dem einzelnen Element geschieht.

Im Prinzip könnte jedes Element mit jedem zu tun haben. Allerdings wäre dann selbst bei bescheidenen 100 000 Elementen der Versuch einer Lösung zum Scheitern verurteilt: Selbst ein Supercomputer würde Jahre mit dem Aufdröseln dieses dicht geknüpften Netzes zubringen. Und es sind immer wieder aufs Neue Gleichungssysteme mit Millionen von Elementen zu lösen.

Also kann der Rechner nicht die Standardverfahren anwenden, sondern muss auf die Struktur des Beziehungsnetzes eingehen. Am schönsten wäre es, wenn man die Elemente in lauter Kleingruppen aufteilen könnte, deren Mitglieder viel miteinander und kaum etwas mit Auswärtigen zu tun haben. Dann könnte nämlich jeder Prozessor sich intensiv mit einer Kleingruppe befassen, und der mühsame und Zeit raubende Informationsaustausch unter Prozessoren hielte sich wegen der spärlichen Außenbeziehungen in erträglichen Grenzen.

Solche Kleingruppen sind durchaus zu finden. So haben Gasmoleküle immer

dann miteinander zu tun, wenn sie räumlich dicht benachbart sind. Nur ändert sich häufig die Gruppenzugehörigkeit, weil die Moleküle sich bewegen. Auf solche unstrukturierten Probleme sind die klassischen Vektorrechner, deren Stärke es ist, viele gleiche Operationen in vorherbestimmter Reihenfolge fließbandartig durchzuführen, nicht vorbereitet.

Obendrein darf man bei der Verständigung der Prozessoren untereinander nicht mehr von der Fiktion ausgehen, ein ▷

▷ »Telefongespräch« – eine MPI-Nachrichtenübermittlung – belege stets die gleiche Menge an Leitungen. Physikalisch ist ein Prozessor mit nur relativ wenigen Kollegen unmittelbar verbunden und muss die »entfernteren« über mehrere Teilstrecken hinweg ansprechen. Also sollte er sich möglichst nur mit seinen nächsten Nachbarn unterhalten, was umso schwerer zu erfüllen ist, je größer die Gesamtzahl der Prozessoren ist. Hier warten auch auf die Softwarespezialisten ganz neue und sehr interessante Aufgaben.

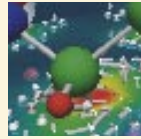
Mittelfristig: ein neues Ökosystem für Supercomputer. Für die Herausforderungen, die ungefähr in den Jahren 2010 bis 2018 auf uns zukommen werden, möchte ich wieder die biologische Metapher bemühen. Die Vektorrechner wie die Cray-2, die vor zwanzig Jahren unsere Bewunderung erregten, waren aus heutiger Sicht so etwas wie Dinosaurier. Sie gediehen über Jahre hinweg auf angehäuften Fortran-Code, ihre Nahrungsquellen, sprich das Geld von Militär und Ölbohrintustrie, schienen unerschöpflich, und sie waren an diese Umwelt perfekt angepasst. Ausgestorben sind sie binnen weniger Jahre – nicht etwa aus Unfähigkeit, sondern weil ihre Umwelt sich binnen weniger Jahre völlig verändert hat. Die militärische Energiequelle ist weit gehend versiegt, und eine konkurrierende Spezies, die PC-Cluster mit MPI-Verbindung, hat die Dinos aus ihrer ökologischen Nische verdrängt.

Das Aussterben hat – in der biologischen wie in der Technik-Entwicklung – nicht nur eine Ursache, sondern viele. Deswegen kann auch der Wiedereinführung einer ausgestorbenen Art in ihre frühere Nische kein Erfolg beschieden sein. Cray hat das mit seinem Vektorrechner Cray-X1 versucht und einen Achtungserfolg erzielt (Spektrum der Wissenschaft 3/2005, S. 85), aber auch nicht mehr.

Ein Versuch zur Einführung einer völlig neuen Art ist ebenfalls gescheitert. Der eingangs erwähnte Superrechner

Blue Gene/L von IBM beruhte auf einem gänzlich neuen Konzept; aber seinen phänomenalen Erfolg hatte er erst, nachdem er von 1999 bis 2005 allmählich zu einem MPI-Cluster mutiert war.

Das neue Ökosystem lebt von dem ungeheuer reichlichen, billigen Angebot an standardisierten PC-Mikrochips, und es gedeiht, weil die Industrie hohe Rechenleistungen in großen Mengen ver-



Wir können nicht einmal Turbulenz gut modellieren – wie dann erst das menschliche Denken?

langt. Softwarekomponenten wie das genannte MPI sind integrale Bestandteile dieses sehr stabilen Ökosystems.

Nur die Anwender am oberen Ende der Leistungsskala sind mit diesem Zustand nicht wirklich glücklich. Es ist abzusehen, dass mittelfristig die Cluster an ihre Grenzen geraten werden. Dann ist es nicht damit getan, einfach größere Cluster zu bauen. Ein ganzes Ökosystem muss her, mit Bestandteilen, die lange Zeit zum Heranwachsen benötigen.

Der weltweite Markt der Höchstleistungsrechner ist mit einem Volumen von einer Milliarde Dollar relativ klein. Auf der Nachfrageseite finden sich fast ausschließlich öffentliche Geldgeber – keine gute Nachricht für die Industrie, denn die öffentliche Nachfrage kann sich plötzlich und unkalkulierbar ändern. Der Nationale Forschungsrat der USA (*National Research Council*, NRC) hat daher in seinem jüngsten »Report on the future of supercomputing« ein langfristig angelegtes Engagement der öffentlichen Hand eingefordert.

Langfristig: kein Homunkulus. Auch wenn die Computerbauer viel Fantasie aufbringen, um die verschiedensten physikalischen Hürden zu umgehen: Spätestens wenn ein Bit durch weniger als ein Elektron repräsentiert werden soll, wird die Gültigkeit des Moore'schen Gesetzes

ein Ende finden. Extrapoliert man die bisherige Wachstumskurve, so wird das zwischen 2015 und 2020 der Fall sein.

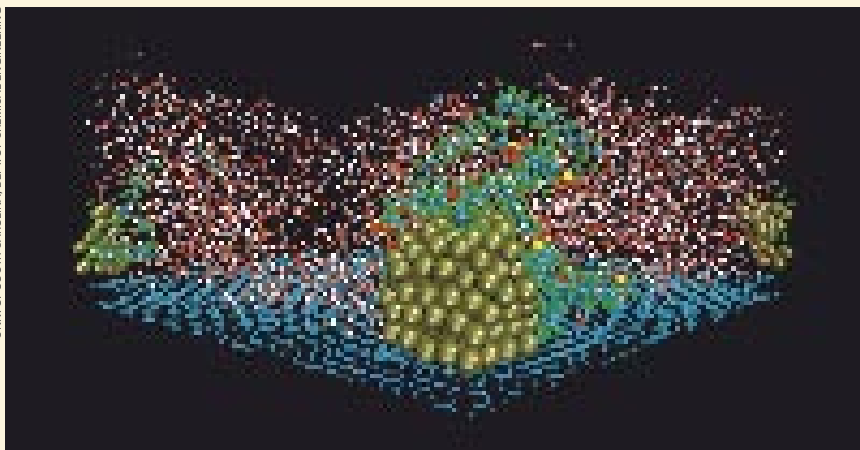
Damit ist absehbar, dass in den nächsten zwanzig Jahren neue Technologien die gegenwärtige Halbleitertechnik ablösen werden. Ob es die Quantencomputer sein werden, Nanotechnologie, biologische Rechner oder ein anderer der zahlreichen Forschungsansätze, ist noch völlig unklar.

Wenn – mit welcher Technologie auch immer – die Leistung der Rechner auch nach 2020 weiterhin exponentiell zunehmen sollte, wird man um 2030 zum Preis eines PCs eine Informationsverarbeitungskapazität kaufen können, welche die des menschlichen Hirns übertrifft. Berufspropheten wie Hans Moravec und Ray Kurzweil (Spektrum der Wissenschaft 1/2006, S. 100) werden nicht müde, uns die goldene Zukunft auszumalen, in welcher der Mensch das Denken endgültig an den Computer abtritt, weil der es in jeder Hinsicht besser kann.

Es ist zwar nicht unproblematisch, die Leistung des menschlichen Gehirns in Teraflops auszudrücken; aber bei dieser Einschätzung soll es uns auf eine oder zwei Größenordnungen nicht ankommen. Die Computer werden diese Zahl in wenigen Jahrzehnten in jedem Fall übertreffen.

Daraus allerdings direkt zu schließen, der Computer werde schon 2050 dem Menschen das menschliche Denken abnehmen können, halte ich für falsch. Der Harvard-Psychologe und Buchautor Howard Gardner hat mit seiner »Theorie der multiplen Intelligenzen« auf den Punkt gebracht, dass es abwegig ist, geistige Leistungen des Menschen mit einem Zahlenwert auf einer einzigen Skala messen zu wollen. Gardner zählt sechs Dimensionen

EDUARDO J. LAMAS, UNIV. OF SOUTH CAROLINA, DEPT. OF CHEMICAL ENGINEERING



◀ Mit einem aus *first principles* hergeleiteten Modell berechnen Perla Balbuena und ihre Arbeitsgruppe an der Universität von South Carolina das Zusammenspiel zwischen Platin-Nanopartikeln (goldene Kügelchen) und Hilfspolymeren in einer noch zu entwickelnden Brennstoffzelle.

der Intelligenz auf: verbal-linguistische, logisch-mathematische, räumliche, körperlich-kinästhetische, musikalische und interpersonale Intelligenz. Auf einer einzigen dieser Skalen, der logisch-mathematischen, übertrifft der Computer den Menschen um viele Größenordnungen. Auf allen anderen hat er bislang nur klägliche Resultate zu bieten.

Wenn aber erst einmal die Hardware zur Verfügung steht, dann wäre die Bereitstellung der übrigen Intelligenzformen nur noch eine Frage der geschickten Programmierung? Das glaube ich nicht. Nehmen wir ein sehr mechanisches Beispiel: die Turbulenz. Es gelingt seit einem halben Jahrhundert nicht, das Strömungsverhalten eines nur mäßig wilden Bergbachs einigermaßen befriedigend mathematisch zu modellieren, und die Chancen dafür, dass es in den nächsten fünfzig Jahren gelingt, stehen nach allgemeiner Überzeugung schlecht. Dabei handelt es sich um ein Problem, an dessen Lösung Flugzeug- und Raketenbauer – und nicht nur sie – brennend interessiert sind. Wenn also schon ein alltägliches Phänomen wie die

Turbulenz allen Versuchen der mathematischen Modellierung widersteht – von einer Computersimulation ganz zu schweigen –, wie soll das mit dem ebenso alltäglichen, aber weitaus komplexeren Phänomen des menschlichen Denkens gelingen?

Nicht dass man es nicht versuchen würde. Am neu gegründeten »Brain Mind Institute« der Technischen Hochschule Lausanne (EPFL) wird ein Höchstleistungsrechner vom Typ Blue Gene genau dafür eingesetzt. Henry Markram und seine Mitarbeiter haben das Fernziel, ein Gehirn *from first principles* zu verstehen: Die einzigen expliziten Annahmen, die in die Modellierung eingehen, betreffen die Funktion des einzelnen Neurons. Alles andere bis hin zum Gedächtnis oder gar zum Bewusstsein soll sich im Verlauf der Simulation ergeben.

Damit schließt sich der Kreis. Eine der kreativsten Anwendungen von heutigen Superrechnern ist es, das menschliche Gehirn zu simulieren. Ein derart simuliertes Gehirn ist in ferner Zukunft vielleicht fähig, wirklich intelligente Rechner zu bauen. ◀



Horst Simon hat an der Technischen Universität Berlin 1978 das Diplom in Mathematik abgelegt und 1982 an der Universität von Kalifornien in Berkeley

promoviert. Seit 2004 ist er als Associate Laboratory Director für alle rechnerbezogene Aktivitäten des Lawrence-Berkeley-Nationallaboratoriums in Berkeley (Kalifornien) zuständig: Forschung, Informationstechnik und Betrieb des Hochleistungsrechenzentrums NERSC. Dieser Artikel entstand aus einem Hauptvortrag, den Horst Simon bei der Internationalen Supercomputer-Konferenz in Heidelberg gehalten hat.

Intelligenzen. Die Vielfalt des menschlichen Geistes. Von Howard Gardner. Klett-Cotta, Stuttgart 2002

Reevaluating Amdahl's law. Von John L. Gustafson in: Communications of the ACM, Bd. 31, Nr. 5, S. 532, 1988. Online unter www.scl.ameslab.gov/Publications/Gus/AmdahlsLaw/Amdahls.html

Weblinks zu diesem Thema können Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis« finden.