

E-Mail, E-Book, E-Commerce, E-Business – die Welt ist in den Neunzigern von einer „E-ifizierung“ erfasst worden, die vor nichts Halt macht. Alles wird nach und nach von Computern gesteuert und miteinander vernetzt. Als habe jemand die Parole ausgegeben, auch Kühlschränke sollten mit Handys kommunizieren können. So unsinning das erscheinen mag, technisch ist dies möglich dank einer Technologie, die seit fast 30 Jahren immer winziger und immer leistungsfähiger wird: der des Silizium-Chips.

Für Computernutzer äußert sich dieser „Fortschritt“ darin, dass der schnellste Rechner von heute schon morgen eine lahme Kiste ist. Seit der amerikanische Hardware-Hersteller Intel 1971 den ersten Mikroprozessor i4004 entwickelte, auf dem die digitalen Schaltkreise in einen einzigen Siliziumblock integriert waren, hat die Faustregel von Intel-Mitbegründer Gordon Moore Bestand. Nach diesem „Moore’schen Gesetz“ verdoppelt sich die Zahl der Transistoren – der elektronischen Grundbausteine – eines Chips alle 18 Monate.

Finden inzwischen auf dem Pentium III 28 Millionen Transistoren Platz, waren es vor 20 Jahren auf Intels damaligem Superchip ganze 29 000. Hatten die Leiterbahnen des i4004 noch 10 000 Nanometer Durchmesser, durchziehen nun hauchfeine 180 Nanometer dicke Drähte den Pentium III/E – ein menschliches Haar ist 400-mal dicker.

Die Miniaturisierung hat viele Gründe: Die Software-Industrie schafft immer komplexere Programme, die nur mit noch leistungsfähigeren Prozessoren zufrieden stellend laufen. Um die Datenübertragung aus dem Internet auf mehrere Megabit pro Sekunde zu pushen – unverzichtbar für das kommende Multimedia-Web –, sind Berechnungen nötig, die noch in den Achtzigern nur schrankgroße Computer bewältigt hätten. Auch die immer realistischere Modellierung dreidimensionaler Computerwelten oder rechenintensive Spracherkennungs- und Dolmetsch-Programme verlangen immer mehr Leistung.

Das aber bedeutet mehr Schaltkreise auf einem Chip. Bleiben die gleich groß, muss eben der Chip größer werden. Der schluckt dann jedoch mehr Strom und produziert mehr Abwärme. Verkleinert man dagegen die Leiterbahnen, können weniger Elektronen fließen, und der Chip wird nicht so heiß. Der amerikanische Verband der Halbleiter-Industrie erwartet für das Jahr 2006 Transistoren von nur 100 Nanometer Breite.

In diese Fortschritts-Euphorie platzte allerdings im Sommer dieses Jahres eine Studie aus den berühmten Bell Labs, die ein für alle Mal klarstellte, was eigentlich kein Geheimnis war: Es gibt eine physikalische Grenze für die Verkleinerung von Silizium-Chips. Spielverderber ist die Isolierschicht zwischen der Gatter-Elektrode eines Mikrotransistors und dem leitenden Silizium-Sockel des Chips.

Diese Schicht besteht aus dem nicht leitenden Siliziumdioxid und hat gegenwärtig eine Dicke von 20 Silizium-Atomen. Schrumpft sie auf fünf Atome, können Elektronen die Isolierschicht passieren – der Transistor wird unbrauchbar. Bei dem gegenwärtigen Entwicklungstempo wird das in zwölf Jahren der Fall sein. Leider kann man die Isolierschicht nicht bei sechs Atomen Dicke belassen, die Elektroden aber beliebig kleiner machen. „Die Theorie der Siliziumtransistoren verlangt, dass alle Bauteile im gleichen Maßstab schrumpfen“, erläutert Paul Packan,



# Jenseits des Siliziums

Die heutige Chip-Technologie ist in wenigen Jahren am Ende. Künftig sollen Computer mit Nervenzellen, Licht oder DNS rechnen

VON NIELS BOEING

Chip-Entwickler bei Intel. Das bedeutet, das bei 50 Nanometer Leitungsdicke Schluss ist.

Warum aber eigentlich mit Strom rechnen, wo doch die Elektronen mit 60 Kilometern pro Sekunde durchs Silizium fast kriechen, während Licht 5000-mal schneller ist? Licht gibt auf seinem Weg durch ein Medium keine Wärme ab wie die sich ständig an Atomen stoßenden Elektronen. Schon heute werden Bits auf den Backbones des Internets selbstverständlich als Laserpulse durchs Glasfaserkabel geschickt.

Um mit Licht auch zu rechnen, müssten die Laserpulse in einem „optischen Chip“ auch um Ecken geschickt oder angehalten werden können – wie Elektronen in einem Halbleiter-Chip. Dies ist verschiedenen Forschergruppen mit Hilfe speziell gezüchteter „photonischer Kristalle“ aus Silizium in den letzten anderthalb Jahren gelungen.

Auch der Lichtrechner basiert jedoch noch auf dem theoretischen Modell einer Rechenmaschine, das der exzentrisch-geniale Mathematiker Alan Turing 1936 formulierte. Diese „Turing-Maschine“ besteht aus den vier Komponenten Input, Rechenregeln, Speicher und Output. In

Ein 120 000-Dollar-Rechner von Digital aus dem Pionierjahr 1958 (oben); die **COMPUTER DER ZUKUNFT** werden möglicherweise mit Neuronen (unten) rechnen; der **Silizium-Chip** hat dann ausgedient (Mitte)

ihr ist eine Berechnung immer eine lineare Abfolge verschiedener Zustände, die die Maschine einnehmen kann. Niemals werden zwei oder mehr Programmschritte gleichzeitig ausgeführt.

Hier setzen nun zwei Computerkonzepte an, die unsere Vorstellungskraft arg strapazieren: das Rechnen mit Molekülen des Genmaterials DNS oder mit Quanten-Systemen. Mit beiden lassen sich komplexe Berechnungen in vielen parallel stattfindenden Operationen in atemberaubend kurzer Zeit vornehmen – zumindest in der Theorie.

Beim DNS-Rechner besteht die Kunst darin, das zu lösende Problem in kleinen Ketten der vier DNS-Grundbausteine Guanin, Adenin, Cytosin und Thymin zu codieren. Dabei nutzt man die Eigenschaft aus, dass sich Adenin nur mit Thymin und Guanin nur mit Cytosin verbindet.

An eine Kette ATC könnte sich also nur die Kette TAG anlagern – so wie Schlüssel und Schloss zusammenpassen. Der Rechengang besteht nun darin, solche Ketten in einem Reagenzglas zu mischen. Das Ergebnis ist dann eine lange Doppelkette, die sich decodieren lässt.

Dass so etwas prinzipiell funktioniert, zeigte der Mathematiker Leonard Adleman 1993. Das von ihm bearbeitete Problem bestand darin, die kürzeste Strecke bei einer Reise durch sieben Städte zu finden, wenn nicht alle Städte direkt miteinander verbunden werden können, sondern nur bestimmte Routen erlaubt sind. Städte und Verbindungen codierte Adleman als DNS-Ketten, die zusammengesetzte Doppelkette ergab dann erstaunlicherweise die gewünschte Route.

Ähnlich verblüffend ist der Quantencomputer. Während ein herkömmlicher Transistor auf den Informationswert 0 oder 1 Bit geschaltet ist, kann ein Quantensystem wie der Spin eines Elektrons die Zustände 0 und 1 gleichzeitig einnehmen – und mit beiden Werten lässt sich im Prinzip auch gleichzeitig rechnen. Ein Quantenbit (Qubit) stellt also zwei Ziffern dar, zwei gekoppelte Qubits repräsentieren vier Ziffern.

Mit all diesen Ziffern wollen die Forscher dann parallel rechnen. Wird das Ergebnis allerdings gelesen, ist die Parallelität dahin. Denn im Moment der Messung „entscheidet“ sich jedes Quantensystem für einen der alternativen Zustände. „Man muss deshalb beim Auslesen der Information an alle Qubits eine gemeinsame Frage stellen“, sagt Anton Zeilinger, Quantenphysiker an der TU Wien. Das könnte etwa die Suche nach einem Buch in einer Bibliothek sein. In diesem Fall spielt es keine Rolle, dass die restliche Information verloren geht, weil einzig der Standort des Buches zählt. Ein Quantenrechner – so hoffen die Forscher – könnte diese Suche in einem Bruchteil der Zeit durchführen, die ein herkömmlicher Rechner braucht.

Das dritte revolutionäre Konzept sind Neuro-Chips, die die überlegenen Rechenfähigkeiten des Gehirns nutzbar machen sollen. Das menschliche Großhirn ist ein zwar langsamer, aber paralleler Rechner von 100 Millionen Gigabyte Speicherplatz, bei einem Volumen von nur einem Liter. Die Milliarden Neuronen können sich außerdem ständig neu verschalten, ohne dass ein „Programm“ dazu

nötig wäre. US-Forschern gelang es bereits, ein kleines Netz aus Blutegel-Neuronen in einer Petrischale dazu zu bringen, einfache Additionen auszuführen.

Niemand wagt derzeit eine Prognose, wann aus diesen Konzepten ausgereifte Computer werden könnten. Vielleicht verzögert sich das Ende der Miniaturisierung aber aus einem anderen Grund: Immer mehr Verbraucher sind mit ihren Rechnern so zufrieden, dass sie nicht mehr jeden teuren Innovationszyklus mitmachen. Die Hersteller könnten dann gezwungen sein, das Tempo des Fortschritts selbst zu drosseln – das Moore’sche Gesetz würde seine Gültigkeit verlieren.

Aus der Architektur heutiger Chips lässt sich aber noch einiges herausholen. Zum einen mit neuen Materialien: Das Aluminium der Prozessor-Drähte kann durch das viel besser leitende Kupfer ersetzt werden, Silizium durch den Halbleiter Germanium, in dem Strom doppelt so schnell fließt.

Inzwischen gibt es auch umprogrammierbare, so genannte FPGA-Chips. Mit einem einfachen Steuerbefehl wechseln sie ihre Verschaltung. Eben noch ein hoch spezialisierter Grafikprozessor, wird aus dem Chip in Sekundenbruchteilen eine Allround-CPU. „Von 10 Millionen Transistoren kann man 5 Millionen zur Steuerung ausnutzen“, sagt Dietmar Müller, FPGA-Experte an der TU-Chemnitz.

Der Fortschritt in der Computertechnik aber, auf den User in aller Welt sehnsüchtiger warten als auf jede Hardware-Innovation, ist ganz schlicht: benutzerfreundliche und fehlerfreie Software.

„Ich glaube, dass es einen Weltmarkt für höchstens fünf Computer gibt“



THOMAS WATSON  
(1914–1993)  
Gründer von IBM