



Rechnen mit dem Dreh: Messgerät für den Spin (Drehimpuls) von Teilchen, der als Funktionsgrundlage von Quantencomputern dienen könnte.

DAS ENDE DER ELEKTRONIK

>>> **COMPUTERTECHNIK.** Noch werden Chips jedes Jahr schneller – aber nicht mehr lange. Deshalb basteln Forscher schon an Rechnern auf Basis der Quantentheorie.

Eins und eins ist vier – diese dem gesunden Menschenverstand kaum zugängliche Regel ist, stark vereinfacht, das Grundprinzip eines neuartigen Computers, der nach den Gesetzen der Quantentheorie funktionieren soll. Noch existieren derartige Rechner nur in den Labors. Doch klar ist: Prinzipiell sind die Quantencomputer der Elektronik überlegen.

Mit ihnen sollen sich Aufgaben lösen lassen, bei denen herkömmliche PCs versagen müssen. Sie sollen dann einen Ausweg bieten, wenn sich die Leistungsfähigkeit elektronischer Chips nicht mehr steigern lässt, weil sich deren Transistoren aus physikalischen Gründen nicht mehr weiter schrumpfen lassen (siehe Kasten rechts).

Klassische Computer, wie sie heute an jedem Schreibtisch zu finden sind, funktionieren nach sehr simplen Prinzipien. Sie reduzieren jede Information auf Bits – elektronische Schalter, die offen oder geschlossen sein können und damit Nullen und Einsen symbolisieren. Jeder dieser Schalter kann jedoch zu bestimmter Zeit nur entweder eine Null oder eine Eins darstellen.

Alle Werte gleichzeitig

Ein Quantencomputer funktioniert ganz anders. Er macht sich die Eigenschaft kleinster Teilchen zu Nutze, die nicht nur den Wert 0 und 1, sondern auch beide Werte gleichzeitig in einer Überlagerung, wissenschaftlich Superposition genannt, annehmen können.

Aus der Schulphysik ist bekannt, dass sich beispielsweise Elektronen auf bestimmten Bahnen um den Atomkern bewegen. Im einfachsten Fall sind zwei Bahnen möglich – ein Grundniveau („0“) und ein angeregtes Niveau („1“). Durch Energiezufuhr lässt sich das Elektron umschalten – aus der niederen in die höhere Bahn bringen.

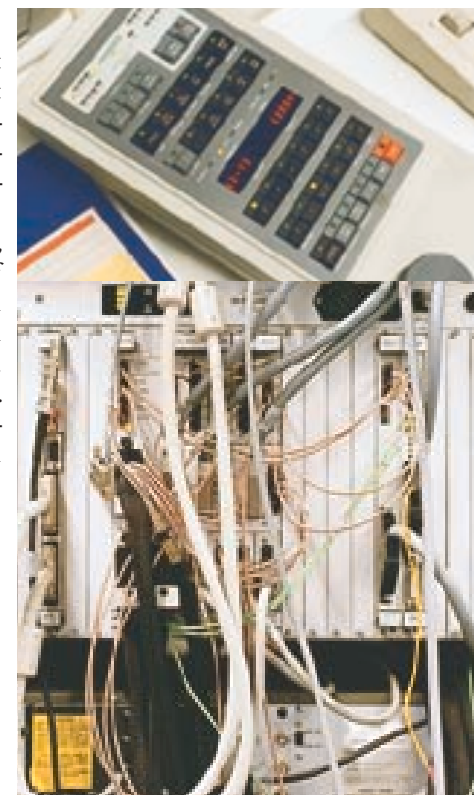
Projekt Zukunft: Quantenrechner existieren bisher nur in den Labors, in Computersimulationen und in wissenschaftlichen Arbeiten – doch auch die ersten Elektronenrechner waren vom schicken Design heutiger PCs weit entfernt.

Fotos: S. Sahmy/ebm

Allerdings ist dieses einfache Modell nur die halbe Wahrheit. Die Quantenphysik hat nachgewiesen, dass ein Elektron auch beide Zustände gleichzeitig einnehmen kann. So wie ein Schalter, der nur zur Hälfte eingeschaltet ist. Anders als ein elektronisches Bit kann deshalb ein Quantenbit (Qubit) 0 und 1 gleichzeitig darstellen. Der Clou dabei: Mathematische Operationen beziehen sich immer auf alle in den Qubits enthaltenen Werte. So erfährt der Nutzer im einfachsten Fall auf einen Streich sowohl, welchen Wert $1+1$ ergibt, als auch die Lösung von $1+0$, $0+1$ und $0+0$.

Der Quantencomputer hat dem Elektronenrechner also eines voraus: Er berechnet Ergebnisse parallel. Wie viele Operationen er gleichzeitig ausführen kann, hängt von der Anzahl seiner Rechenbits ab. Quantencomputer mit bis zu sieben Qubits wurden bereits im Labor realisiert. Das klingt, verglichen mit heutiger Megabit-Elektronik, sehr bescheiden. Durch die Parallelität sind jedoch „nur“ gut hundert Qubits nötig, um die Leistung konventioneller PCs zu erreichen.

Die Quantentheorie bringt allerdings auch neue Probleme mit sich: Einerseits wird das Rechenergebnis durch



Die Grenzen des Prozessors

Seit der Erfindung des integrierten Schaltkreises hat sich dessen **Kapazität zirka alle 18 Monate verdoppelt**. Diese als Mooresches Gesetz bekannte Regel wird, da sind sich die Experten einig, auch noch in den nächsten **zehn, fünfzehn Jahren** ihre Gültigkeit behalten. Doch klar ist: Der Elektronik sind **physikalische Grenzen** gesetzt. Bei der Miniaturisierung elektronischer Bauteile stoßen die Forscher auf **immer neue Schwierigkeiten**. Leiterbahnen können zum Beispiel **nicht beliebig eng** aneinander liegen, ohne sich gegenseitig zu beeinflussen. Und: Durch den elektrischen Widerstand **entsteht in jedem Chip Wärme**. Je dichter die Transistoren gepackt werden, desto schwieriger wird es, den Prozessor **ausreichend zu kühlen**. Außerdem bekommt es der Elektronikingenieur ab einem bestimmten Miniaturisierungsgrad zwangsläufig mit **Quanteneffekten** zu tun – ob ein Bit den Zustand 0 oder 1 hat, lässt sich dann nicht mehr mit 100-prozentiger Wahrscheinlichkeit vorhersagen.

Einen möglichen Ausweg bieten **optische Computer**: Darin werden die Elektronen durch **Lichtteilchen**, Photonen, ersetzt, die sich weder gegenseitig beeinflussen noch Wärme erzeugen. Wissenschaftler sind zurzeit auf dem besten Wege, den Transistoren äquivalente „Licht-Schalter“ zu entwickeln. **Am Prinzip** der digitalen Computer **ändert sich aber nichts**, wenn Photonen statt Elektronen durch die Leitungsbahnen flitzen. Es wird weiter mit **Nullen und Einsen** gerechnet – erst Quantencomputer ersetzen die **Evolution durch eine Revolution**.

