

| | |
|---------------------|---|
| Zeitschrift: | Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses |
| Herausgeber: | Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen |
| Band: | 90 (1999) |
| Heft: | 19 |
| Artikel: | Der perfekte Laptop : wieviel schneller können die Computer noch werden |
| Autor: | Hirstein, Andreas |
| DOI: | https://doi.org/10.5169/seals-901983 |

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 20.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Der perfekte Laptop

Wieviel schneller können die Computer noch werden?

In den vergangenen fünfzig Jahren hat die Rechenleistung der Computer eine exponentielle Steigerung erfahren. Wie lange wird diese Entwicklung noch anhalten, wie schnell können Computer überhaupt werden, und wie wird der endgültige Computer aussehen? Seth Lloyd vom Massachusetts Institute of Technology hat sich mit diesen Fragen beschäftigt. Seine Antwort: Der perfekte Computer schafft in jeder Sekunde 10^{50} Operationen, und er ist ein Schwarzes Loch.

Als der spätere Intel-Gründer Gordon Moore im Jahre 1965 die Aussage wagte, dass sich die Speicherkapazität zukünftiger Halbleiterchips etwa alle 18 Monate verdoppeln würde, schien diese Prognose nicht viel mehr wert zu sein als beliebige andere Prophezeiungen, von denen die Einführung neuer Technologien häufig begleitet wird. Seit den frühen siebziger Jahren, als sich die Entwicklung integrierter Schaltkreise gerade erst abzuzeichnen begann, hat sich die Voraussage

Chips so dünn sein, dass sie ihre isolierende Wirkung nahezu verlieren, so dass die integrierten Transistoren und Kondensatoren den Strom nicht mehr schalten und Ladungen nicht mehr speichern können.

Die Forschung sucht daher heute nach grundlegend neuen Rechnerkonzepten, die den vor über siezig Jahren von Konrad Zuse vorgestellten klassischen Binärrechner ablösen sollen. Geplant wird der Abschied vom Digitalrechner, der nur die beiden Zustände Null und Eins unterscheiden kann, zugunsten des sogenannten Quantencomputers, mit dem beliebige Mischzustände der beiden Grundzustände verarbeitet werden können. Mit einem solchen Rechntyp, von dem be-

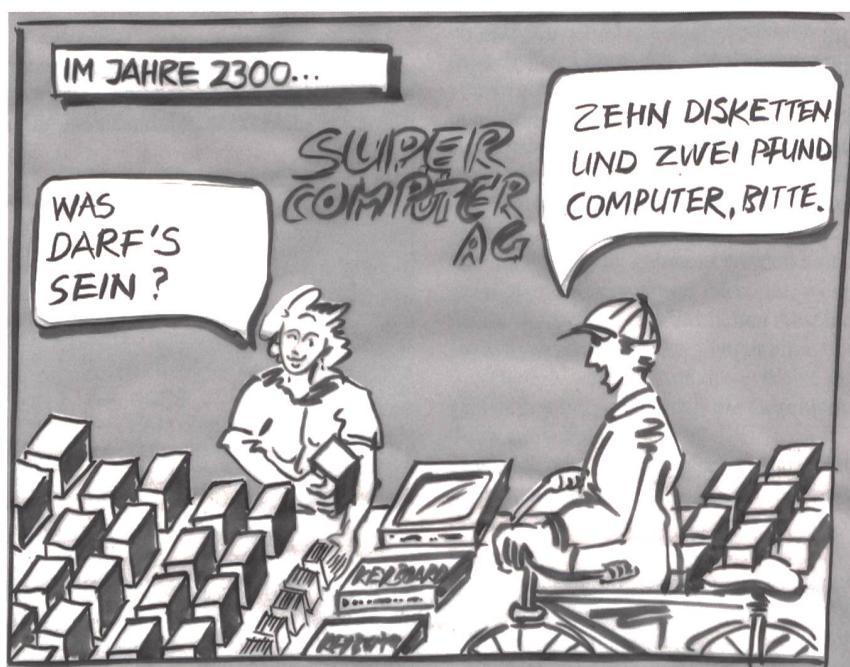
reits einige primitive Prototypen entwickelt wurden, ließen sich eine Reihe rechenintensiver Aufgaben (z.B. das Entschlüsseln von Geheimcodes) sehr viel schneller und effizienter lösen als mit den heute üblichen Computern.

Aber unabhängig davon, ob sich der Quantencomputer jemals realisieren lässt, gibt es physikalische Gesetze, die eine unbegrenzte Erhöhung der Rechenleistung verbieten und die Moores Gesetz früher oder – dank dem Quantencomputer – später zu Fall bringen werden. Die Frage, die sich auf Grund dieser Gesetze stellt, ist also nicht, ob Moore irgendwann einmal widerlegt wird, sondern lediglich, wann dies der Fall sein wird.

Der Ein-Kilogramm-Computer

Zuletzt hat Seth Lloyd vom Massachusetts Institute of Technology (MIT) diese Frage gestellt. [2] Die Antwort des amerikanischen Assistenzprofessors wird die Arbeit der Hardwareentwickler allerdings kaum vereinfachen. Vermutlich werden Lloyds Überlegungen eher als ziemlich akademische Gedankenexperimente ohne reellen Bezug zur Praxis angesehen werden. Denn Lloyd kümmert sich nicht um das Problem, wie dieser schnellste denkbare Rechner funktionie-

jedoch mit so erstaunlicher Präzision erfüllt, dass sie, bekannt unter dem Namen Mooresches Gesetz, heute in keinem Vortrag über die Zukunft der Halbleiterindustrie mehr fehlen darf. Dabei ist natürlich klar, dass es sich bei diesem «Gesetz» im Grunde um nicht viel mehr als eine mehr oder weniger gerechtfertigte Abschätzung der zukünftigen Entwicklung handelt. Bisher war der Fortschritt nicht nur der kontinuierlichen Verkleinerung der Strukturgrössen auf den Chips zu verdanken, sondern in etwa gleichem Ausmass auch der Fähigkeit, immer grössere Siliziumwafer herzustellen und zu verarbeiten. [1] Dass Moores Voraussage jedoch nicht die Qualität eines Naturgesetzes besitzt, das für unbegrenzte Zeiten Gültigkeit behält, wird um so deutlicher, je näher sich die modernen Halbleiterprozesse ihren prinzipiellen physikalischen Grenzen nähern. Nach aktuellen Schätzungen wird diese Grenze in den nächsten zwei Jahrzehnten erreicht werden. Dann werden die Oxidschichten auf den



ren könnte, welche Technologien zu seiner Herstellung notwendig wären oder gar ob sich dieser Rechner überhaupt jemals wird realisieren lassen. Der Wissenschaftler interessiert sich lediglich für die prinzipielle Grenze, die selbst mit der fortschrittlichsten Technik niemals überschritten werden kann. Deswegen muss er von allen technischen Einzelheiten und Funktionsprinzipien abssehen und die einfachste, auf den ersten Blick absurd wirkende Frage stellen: Wie schnell kann man mit einem Computer rechnen, der ein Kilogramm wiegt und ein Volumen von einem Liter einnimmt? Klingt tatsächlich unsinnig, aber Lloyd hat eine Antwort gefunden, die ausser von den genannten Randbedingungen der Masse und des Volumens nur noch von einigen Naturkonstanten wie der Lichtgeschwindigkeit und dem Planckschen Wirkungsquantum abhängt. Das Resultat: Der «ultimative Laptop», wie Lloyd seinen Ein-Kilogramm-Rechner nennt, kann in jeder Sekunde 10^{50} Operationen ausführen und umfasst einen Arbeitsspeicher von rund 10^{31} Bit. Hinter diesen Zahlen verbergen sich Rechenleistungen, die mit keinem der heutigen Supercomputer auch nur annähernd erreicht werden können und denen man sich selbst mit der gesamten heute weltweit verfügbaren Rechenleistung nicht wesentlich nähern könnte.

$E = m c^2$

Computer sind physikalische Systeme. Jeder Taktzyklus kann als Übergang des physikalischen Systems aus einem Anfangszustand in einen Endzustand aufgefasst werden. Die minimale Forderung, die man hierbei an die verschiedenen Zustände des Computers stellen muss, lautet, dass jeder einzelne Zustand vom jeweils darauffolgenden Zustand unterscheidbar ist. Denn nur, wenn der Computer eine Reihe von unterschiedlichen Zuständen durchläuft, kann überhaupt von einem determinierten Rechenablauf gesprochen werden. Übersetzt in die Sprache der physikalischen Grössen, bedeutet diese Bedingung, dass die den Zuständen zugeordneten Energiewerte um einen bestimmten Mindestbetrag voneinander abweichen müssen. Mit Hilfe einer der berühmtesten Aussagen der Quantenmechanik, der Heisenbergschen Unschärferelation, kann aus dieser Aussage die maximal erreichbare Taktrate des ultimativen Laptops abgeschätzt werden.

Die Unschärferelation gibt an, mit welcher Genauigkeit bestimmte physikalische Grössen eines Systems gleichzeitig gemessen werden können. In einer bekannten Form beschränkt sie beispiels-



weise die Genauigkeit einer *simultanen* Zeit- und Energiemessung in einem physikalischen System:

$$\Delta t \Delta E > \hbar \quad (1)$$

wobei Δt und ΔE die Ungenauigkeiten der Zeit- und der Energiemessung bezeichnen. Die Konstante \hbar ist das Plancksche Wirkungsquantum. Die Ungleichung (1) sagt aus, dass die Energie eines Systems zwangsläufig mit einer Ungenauigkeit von ΔE gemessen wird, wenn für diese Messung ein Zeitintervall von Δt zur Verfügung steht. Mit anderen Worten: Je kürzer man misst, desto grösser wird die Ungenauigkeit des Energie-Messwerts. Andernfalls könnte das Produkt auf der linken Seite von (1) nicht grösser als \hbar sein, und die Ungleichung wäre verletzt.

Im Beispiel des Computers, dessen maximale Taktrate bestimmt werden soll, steht Δt für die Dauer eines Taktzyklus und ΔE für den Energieunterschied zwischen den verschiedenen unterscheidbaren Zuständen, die der Computer nacheinander durchläuft. Um die Taktrate zu bestimmen, muss daher zunächst ein realistischer Wert für die Energie der Zustände gefunden werden. Dazu bedient sich Lloyd Albert Einsteins Gleichung über die Äquivalenz von Masse und Energie: $E = m c^2$. Nach dieser Gleichung ist die Masse des Computers ($m=1$ kg) multipliziert mit dem Quadrat der Lichtgeschwindigkeit äquivalent zur Energie E des Computers. Das heisst, jeder Masse entspricht ein Energiewert, und umgekehrt kommt jedem Energiebetrag auch eine Masse zu (jedes elektrische Feld be-

sitzt also eine wenn auch kleine Masse!). Durch Einsetzen von Einsteins Gleichung in die Heisenbergsche Unschärferelation ergibt sich für $\Delta t = 3,7 \cdot 10^{-51}$ s. Aus dem Kehrwert erhält man schliesslich die maximale Taktrate von $2,7 \cdot 10^{50}$ Operationen pro Sekunde.

Die einzige Voraussetzung, die zur Berechnung dieses Wertes gemacht wurde, war die Festlegung der Masse des Computers auf ein Kilogramm. Technische Fragen blieben dagegen vollkommen unbeachtet, da sie das Ergebnis der Abschätzung nicht beeinflussen würden. Man könnte sich fragen, ob die Geschwindigkeit des Computers durch die Art und Weise, wie er Berechnungen durchführt, verändert werden könnte. Liesse sich beispielsweise durch eine parallele Architektur des Rechners eine weitere Beschleunigung erreichen? Die Antwort ist nein. Denn durch die Verteilung der verschiedenen Rechenschritte auf N parallel arbeitende Untersysteme müsste zwangsläufig auch die Energie beziehungsweise die Rechnermasse auf diese N Subsysteme verteilt werden. Entsprechend würde die Taktrate auf den Wert $2,7 \cdot 10^{50}/N$ Operationen pro Sekunde sinken und damit den Vorteil der Parallelisierung zunichte machen.

Entropie definiert die Speicherkapazität

Wie in einem klassischen Computer, so hängt auch die Rechenleistung des ultimativen Laptops ausser von der Taktrate von der Grösse des zur Verfügung stehenden Speichers ab. Um die prinzipi-

elle Grenze dieser Grösse zu bestimmen, genügt es, die Anzahl der unterschiedlichen Zustände des Computers «abzuzählen». Der österreichische Physiker Ludwig Boltzmann hat sich bereits im vorigen Jahrhundert mit diesem Problem beschäftigt. Nach seiner Formel hängt die Anzahl der Zustände mit der sogenannten Entropie eines Systems zusammen. Die Entropie kann als Mass für die Ordnung eines thermodynamischen Systems aufgefasst werden. Die Ordnung ist perfekt, wenn nur ein einziger Zustand eingenommen werden kann. In diesem Fall beträgt seine Entropie Null. Für den ultimativen Laptop wäre diese Situation allerdings vollkommen ungeeignet. Er benötigt eine möglichst grosse Anzahl verschiedener Zustände, die während der Berechnungen durchlaufen werden können. Nach Boltzmanns Formel hängt die Entropie und damit die Anzahl der physikalischen Zustände von der Energie des Systems und vom zur Verfügung stehenden Volumen ab. Der einen Liter grosse und ein Kilogramm schwere Laptop würde laut Entropieformel über einen Speicherumfang von rund 10^{31} Bit verfügen. Da alle Bits in einem Würfel mit dem Volumen von einem Liter untergebracht werden müssen, ergibt sich eine überwältigende Speicherdicthe. So beträgt der Abstand zwischen zwei benachbarten Bits nur etwa einen Zehntel Angström ($1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$). Dieser Wert liegt sechs Größenordnungen unterhalb der heute mit lithographischen Methoden erreichbaren Strukturbreite und würde bedeuten, dass die Rechnungen auf subatomarer Grössen- skala durchgeführt werden müssten.

Der Computer als Schwarzes Loch

Als sei mit diesen Resultaten noch nicht hinreichend deutlich, dass an eine Realisierung eines solchen Rechners zumindest in den kommenden Jahrzehnten nicht zu denken sein wird, treibt Seth Lloyd seine Überlegungen noch einen Schritt weiter. Was, so fragt er, würde passieren, wenn wir das Volumen des Rechners immer weiter verkleinern? Die maximale Taktrate des Computers würde, da sie nur von der Masse abhängt, nicht verändert werden. Dagegen nähme der Speicherplatz des schrumpfenden Computers auf Grund des Entropierückgangs ab. Für jedes einzelne Bit bedeutet dies, dass es mit einer höheren Rate geschaltet werden könnte. Vor allem aber müsste wegen des kleineren Volumens weniger Zeit für den internen Datentransport des Computers aufgewendet werden. So benötigt ein würfelförmiger Rechner mit

Volumen von einem Liter mindestens 10^{-10} s, um Informationen zwischen Speicherbits, die sich an gegenüberliegenden Würfelkanten befinden, auszutauschen. In dieser Zeit könnten jedoch mit jedem Bit 10^9 Operationen durchgeführt werden. Der notwendige Datentransport würde daher Wartezeiten verursachen und den Rechner verlangsamen. Für viele Rechenaufgaben erscheint es somit sinnvoll zu sein, das Volumen so weit zu verkleinern, dass die Zeit des Datenaustauschs nicht grösser ist als die Dauer eines Taktzyklus. In diesem Fall liessen sich Wartezeiten eliminieren, und jedes Bit könnte in jedem Zyklus zur Aufgabenlösung beitragen.

Nach Lloyds Berechnungen wäre dieser Zustand allerdings erst erreicht, wenn die Massendichte bereits Werte erreicht hat, die den Computer in ein Schwarzes Loch der Masse ein Kilogramm verwandeln. Die Grösse des Computers würde dann nur noch 10^{-38} m betragen, und der Speicherplatz würde auf 10^{16} Bit sinken. Ein Wert, der auch von heutigen Computern annähernd erreicht werden kann. Da sich alle Bits dieses Computers auf sehr engem Raum befinden und daher alle praktisch miteinander verbunden sind, eignet sich das Schwarze Loch insbesondere für Aufgaben, die seriell abgearbeitet werden können. Der Ein-Liter-Rechner dagegen könnte eher als Parallelrechner aufgefasst werden, der seine Vorteile bei Aufgaben hat, die parallel bearbeitet werden müssen, aber nur einen geringen internen Datenaustausch erfordern.

Obwohl die von Lloyd ausgelotete prinzipielle Leistungsgrenze bei unverändert anhaltendem Fortschritt in der Halbleitertechnik in etwa 250 Jahren erreicht sein würde, ist doch klar, dass mit den Überlegungen des Wissenschaftlers

kein realistisches Programm zur Entwicklung neuer Superrechner verknüpft werden kann. Auf Längenskalen von 10^{-38} m stösst man in Bereiche vor, in denen die theoretische Physik bis heute keine allgemein akzeptierte Theorie entwickeln konnte. Man weiss im Grunde nicht, wie sich die vier bekannten fundamentalen Naturgesetze auf dieser Grössenskala verhalten würden. Von der Schwierigkeit, Schwarze Löcher zu programmieren und zu bedienen, einmal ganz abgesehen. Da es ein hervorstechendes Merkmal eines Schwarzen Lochs ist, alles Licht und alle Materie in seiner Nähe zu verschlucken und nie wieder entweichen zu lassen, ist insbesondere unklar, wie der Computernutzer jemals an die Rechenergebnisse seines Superrechners gelangen könnte.

Trotzdem mag man sich fragen, warum moderne Computer so unvorstellbar weit von der Leistungsfähigkeit des perfekten Laptops entfernt sind. Schliesslich wiegen moderne Geräte meist mehr als nur ein Kilogramm. Der Grund ist, dass ein grosser Teil der Computermasse für den Bildschirm, das Gehäuse oder für Batterien reserviert ist und die Datenverarbeitung darüber hinaus hochgradig redundant organisiert ist, um hohe Fehlerraten zu vermeiden. Für die eigentliche Rechenarbeit steht nur die verschwindend kleine Masse der freien Elektronen in den Computerchips zur Verfügung. Die Masse der Chips selbst bleibt in diesem Sinne ebenfalls vollkommen ungenutzt.

Literatur

- [1] William F. Brinkmann, Mark R. Pinto: The Future of Solid-State Electronics. Bell Labs Technical Journal 2(1997)4, pp. 57-75.
- [2] Seth Lloyd: Physical limits to computation. Online Preprint Archive: <http://xxx.lanl.gov/ps/quant-ph/9908043>.

L'ordinateur portable parfait

Au cours des cinquante dernières années, la puissance de calcul des ordinateurs a crû suivant une courbe exponentielle. Combien de temps cette évolution va-t-elle se poursuivre, quelle vitesse les ordinateurs peuvent-ils finalement atteindre et à quoi ressemblera l'ordinateur définitif? Seth Lloyd du Massachusetts Institute of Technology s'est penché sur ces questions.

La puissance de calcul d'un ordinateur est définie essentiellement par sa fréquence de rythme et sa capacité de mémoire. Sans vouloir faire des hypothèses quelconques sur le fonctionnement de l'ordinateur parfait, les calculs de Lloyds montrent que la fréquence maximale est limitée par l'énergie de l'ordinateur et la capacité de mémoire par le nombre d'états physiques accessibles. L'ordinateur parfait arrive à 10^{50} opérations par seconde et dispose d'une capacité de mémoire de 10^{31} bits. Ces valeurs pourraient être atteintes dans 250 ans à condition que le rythme actuel de l'évolution puisse encore être maintenu aussi longtemps, ce qui cependant paraît très improbable.