



Der Sycamore-Prozessor von Google war der erste Quantencomputer, der einen Quantenvorteil erzielte.

ROCCO CESELIN

«Man wird sich wundern, was mit Quantencomputern alles funktioniert»

Noch sind es ziemlich nutzlose Aufgaben, die ein Quantencomputer schneller erledigen kann als jeder klassische Computer. Doch das könnte sich schon in wenigen Jahren ändern. VON CHRISTIAN J. MEIER

Supercomputer rechnen unvorstellbar schnell – der weltweit schnellste schafft über eine Trillion Rechenschritte pro Sekunde – und ist doch viel zu langsam für eine ganze Reihe von relevanten Aufgaben. Dazu gehören etwa die Optimierung von logistischen Netzwerken oder die Risikoanalyse von Aktienportfolios. In letzter Zeit haben Quantencomputer zwar bewiesen, dass sie einige sehr spezielle Probleme sehr viel schneller lösen können als selbst die schnellsten Superrechner. Doch praktisch nutzbare Lösungen erzielen sie noch nicht.

Das wollen Forscher, Tech-Giganten wie Google und IBM sowie mehrere Startups ändern. Ausgestattet mit vielen Milliarden US-Dollars an staatlicher und privater Förderung liefern sie sich einen Wettlauf, wer als Erster den «Quantenvorteil» erreicht. Damit könnten Quantenrechner auch wirtschaftlich wichtige Aufgaben in bisher unerreichtem Tempo lösen. «In zwei bis drei Jahren könnte es so weit sein», sagt Wolfgang Lechner von der Universität Innsbruck, dessen Startup ParityQC dieses Ziel auch anstrebt.

Elektroautos effizient laden

Ein Beispiel für eine hochkomplexe Aufgabe ist das optimale Verteilen von Elektrofahrzeugen auf mehrere Ladesäulen, auch Smart Charging genannt. Angenommen, die Fahrzeuge brauchen unterschiedlich lange zum Laden und es gibt mehr Wagen als Ladesäulen: Organisiert man die Reihenfolge suboptimal, dauert das Laden der ganzen Flotte länger als nötig. Das Ziel ist, die Kombination von Ladezeiten und Fahrzeugen zu finden, die die Flotte am schnellsten lädt. Mit welchen Fahrzeugen lässt sich das mit Block und Bleistift berechnen. Doch jedes Vehikel und jede Ladesäule mehr vervielfacht die Kombinationsmöglichkeiten. Der Rechenaufwand explodiert regelrecht. Bei mehreren hundert Fahrzeugen ist selbst der stärkste Superrechner überfordert.

Mit einigen hundert Qubits lassen sich mehr Werte parallel berechnen, als es Atome im gesamten Universum gibt.

Quantenrechner sind dieser «kombinatorischen Explosion» viel eher gewachsen. Die Quantenphysik erlaubt es winzigen Teilchen wie Elektronen oder Lichtteilchen (Photonen), mehrere Möglichkeiten simultan zu verwirklichen. Ein einzelnes Teilchen kann zum Beispiel gleichzeitig durch zwei Spalte eines Schirmes treten. Die parallele Existenz lässt sich als «Quantenbit» (kurz: Qubit) nutzen, die elementare Recheneinheit eines Quantencomputers. Anders als das klassische Bit kann es die beiden Werte 0 und 1 nicht nur hintereinander aufnehmen, sondern eben simultan. Das erlaubt das parallele Verarbeiten beider Werte. Der Clou ist nun: Jedes weitere Qubit verdoppelt die Anzahl der Werte, die sich parallel verarbeiten lassen. Bei zwei Qubits sind es vier Werte, bei drei Qubits schon acht und so weiter. Mit einigen hundert Qubits lassen sich mehr Werte parallel berechnen, als es Atome im gesamten Universum gibt.

Daraus ergibt sich theoretisch ein haushoch überlegenes Rechentempo

gegenüber normalen Computern, die Rechenschritte nur nacheinander ausführen können. Erstmals in der Praxis zeigte Google die «Quantenüberlegenheit» im Jahr 2019. Ein fingernagelgrosser Quantenchip namens Sycamore mit 53 Qubits löste eine Aufgabe binnen Minuten, die per Superrechner 10 000 Jahre dauere, wie Google damals behauptete.

Weil Sycamore bei seiner Berechnung alle 53 Qubits einbezog, kombinierte es unvorstellbar viele Werte miteinander, was einem klassischen Rechner naturgemäß schwerfällt. Allerdings hat das Ergebnis keine praktische Relevanz. Google wollte lediglich zeigen, dass Quantencomputer nicht nur theoretisch schneller rechnen. Bald darauf relativierte sich allerdings Sycamores Überlegenheit: Im Januar 2022 gelang es chinesischen Physikern, die Berechnung mit 60 normalen Grafikprozessoren innerhalb von fünf Tagen zu reproduzieren – immer noch länger als Sycamore, aber nicht mehr so viel länger.

Zu kompliziert für alte Rechner

Vor kurzem baute das kanadische Startup Xanadu die Quantenüberlegenheit wieder aus, mit einer Methode namens Boson-Sampling. Dabei fliegen Tausende Photonen durch ein Netzwerk aus Lichtleitern. Jedes einzelne Photon kann simultan mehrere Wege durch das Netzwerk nehmen. An den Kreuzungspunkten der Lichtleiter interagieren die Photonen. Durch vielfältige Möglichkeiten von Wegen und Interaktionen entsteht am Ausgang des Netzwerkes ein komplexes Lichtmuster.

Dieses erzeugt der optische Quantencomputer binnen 36 Mikrosekunden. Der zweitgeschellteste Supercomputer der Welt, der japanische Fugaku, würde 9000 Jahre brauchen, um das Lichtmuster zu berechnen, wie Xanadus Forscher schätzen. Sie sind sich sicher, dass es diesmal nicht gelingen wird, das Problem klassisch schneller zu erledigen, da

es zu den komplexesten Aufgaben überhaupt gehört.

Wie das Experiment von Google hat das Boson-Sampling noch keine Anwendung. Allerdings ähnelt es einem Problem in der Molekülphysik, nämlich der Berechnung von Molekülschwingungen. Diese spielen etwa bei der Absorption von Wärmestrahlung durch Treibhausgas eine Rolle. Dass photonische Quantenrechner wie der von Xanadu zur Erforschung solcher Schwingungen nutzbar sind, ist allerdings unter Experten umstritten.

Für brauchbare Vorteile haben heutige Quantenrechner noch zu wenige Qubits. Die Firma IBM überwand im letzten Herbst zwar die Schwelle von 100. Um das Smart Charging von Elektroautos besser als heute möglich zu optimieren, brauchte ein Quantencomputer jedoch mehrere 10 000 Qubits, schätzt Wolfgang Lechner. Mit Quantenrechnern dieser Grösse könnte auch das Verlustrisiko komplexer Finanzportfolios schneller als heute abgeschätzt werden, wie Stefan Woerner und Daniel Egger vom IBM-Forschungszentrum in Rüschlikon bei Zürich 2019 berechneten.

Wenn der Ausbau der Qubit-Zahl im gleichen Tempo weiterginge wie bisher, würde es bis zum Quantenvorteil noch dauern. Doch der Zuwachs an Qubits gehe immer schneller, betont Wolfgang Lechner. «Schon im nächsten Jahr könnten wir 10 000 Qubits sehen», sagt er.

Quantenbits machen Fehler

Ob das automatisch zum Quantenvorteil führt, ist indessen nicht sicher. Denn Qubits sind sehr empfindlich. Kleinste Umwelteinflüsse können die Überlagerung aus 0 und 1 zerstören. Bei verschiedenen Arten von Qubits geht das unterschiedlich schnell: Qubits aus supraleitenden Metallschleifen, wie sie Google oder IBM nutzen, schaffen nur wenige Mikrosekunden. Ein Qubit in

Form eines elektrisch geladenen Atoms kann zwar über eine Stunde lang leben. Jedoch lassen sich Ionen bis jetzt nur zu einem Rechner mit 24 Qubits kombinieren. Zwar forschen Physiker an Fehlerkorrekturverfahren, die längere Rechenzeiten ermöglichen sollen. Doch der Fortschritt ist langsam. Erst nach 2030 rechnen Expertinnen und Experten mit einem fehlerkorrigierten Quantencomputer.

Doch die Jäger des Quantenvorteils glauben, dass die fehlerfreie Rechenzeit zusammen mit höheren Qubit-Zahlen für manche Aufgaben ausreichen wird. Mathematisch beweisen lässt sich diese Annahme jedoch nicht. «Man muss es praktisch herausfinden», sagt Lechner. Ersehrend kommt hinzu: Was mit einer Art von Quantencomputer schlecht funktioniert, könnte mit einer anderen besser gehen. «Die verschiedenen Plattformen müssen verglichen werden», sagt Lechner. Seine Firma ParityQC will die Suche beschleunigen. Sie erstellt Baupläne für Quantenrechner, die von der Art der Qubits unabhängig ist und es Hardwareherstellern erleichtern soll, schneller zu grösseren Qubit-Zahlen zu kommen.

Angenommen, der Quantenvorteil würde bald erzielt. Wie werden die ersten Quantencomputer dann eingesetzt? «Zunächst als Co-Prozessoren von klassischen Rechnern», prognostiziert Lechner. Der klassische Rechner würde weiterhin unentbehrlich bleiben, meint der Physiker. Auch in zehn oder fünfzehn Jahren, wenn sie mehr könnten, würden Quantenrechner nicht in jeder Hosentasche stecken, sondern in der Cloud oder in Rechenzentren arbeiten, schätzt der Experte. Ihr Einfluss auf den Alltag wird also indirekt sein, in Form eines flüssigeren Verkehrs vielleicht oder sicherer Wettervorhersagen über eine Woche hinweg. «Es wird so ähnlich sein wie heute mit künstlicher Intelligenz», sagt Lechner. «Man wird sich wundern, was plötzlich alles funktioniert.»

Eingeweide von Mumien liefern neue Erkenntnisse

Im alten Ägypten wurden die Organe der Toten separat in speziellen Gefässen einbalsamiert. Wissenschaftler haben nun erstmals genetisches Material daraus gewonnen. VON ESTHER WIDMANN

Schon in Ägypten vor viertausend Jahren galt: In der Verpackung ist nicht immer drin, was draufsteht. So gibt es zum Beispiel Tiermumien, die aussen eine Katze, ein heiliges, kostbares Tier, vorgaukeln, aber innen gar keinen Körper enthalten. Nicht klar ist dabei, wer hier eigentlich getauscht werden sollte: die Menschen, die die vermeintliche Katzenmumie aus religiösen Gründen kaufen sollten – oder gleich die Götter?

Das Gleiche gilt für die Gefässe mit den Eingeweiden, die in den Gräbern standen. Darin soll sich zwar, das weiss man aus Schriftquellen, unter anderem der Darm des Toten befinden. Aber schon vor einigen Jahren haben Untersuchungen mit CT oder MRI gezeigt, dass die Gefässe zum Teil innen gar nicht genug Volumen haben, um vollständige menschliche Organe aufzunehmen. Und wer könnte schon sagen, wie ein viertausend Jahre lang in einem Steintopf aufbewahrter Darm auszu-sehen hat? Oder ob der Darm wirklich zu der Mumie gehört, neben der das Gefäss stand?

Einer Gruppe von Wissenschaftlern von der Universität Zürich ist jetzt ein wichtiger Schritt gelungen, um den Inhalt der Kanopen als biomedizinische Informationsquelle zu nutzen: Sie haben erstmals DNA aus diesen Gefässen gewonnen und analysiert. Damit könnten auch neue Erkenntnisse über Krankheiten oder Verwandtschaftsverhältnisse möglich werden, vor allem in Fällen, in denen die Mumie selbst nicht erhalten ist.

Archive für Krankheitserreger

Nach dem Tod, davon waren die Menschen in Ägypten überzeugt, ging das Leben im Jenseits weiter. Dafür gab es aber einige Voraussetzungen. Eine war, dass der «Ka» und der «Ba», zwei nichtkörperliche Aspekte des menschlichen Wesens, den Körper des Toten als Zuhause nutzen konnten. Der Körper musste also erhalten werden, und so entwickelten die Ägypter Techniken zur Mumifizierung. Die Eingeweide wurden entnommen; einige waren aber so wichtig, dass sie separat einbalsamiert wurden. So bekam jeder, dessen Familie sich eine solche Behandlung des Toten leisten konnte, vier Gefässe mit ins Grab: eins für die Leber, eins für die Lunge, eins für den Magen, eins für den Darm.

Die Wissenschaftler um Frank Rühli vom Institut für evolutionäre Medizin



Diese 31 Zentimeter hohen Kanopen enthalten die Eingeweide eines Mannes, der um 700 v. Chr. in Theben bestattet wurde. GETTY

hatten in einem mehrjährigen Projekt Zugang zu 140 dieser Gefässe, die Ägyptologen heute als Kanopen bezeichnet. Obwohl Eingeweide perfekte Archive für Krankheitserreger und chronische Leiden seien, sei der Inhalt von Kanopen bisher nicht bio-

medizinisch untersucht worden, schreibt Rühli und seine Kollegen. Genetische Analysen habe es noch gar nicht gegeben – wohl auch, weil das in ihnen enthaltene Material stark zersetzt und schwierig zu bearbeiten sei. DNA erhält sich besser in Knochen oder Zäh-

nen als in Weichteilen. Hinzu kämen oft moderne Verunreinigungen.

Bakterien-DNA kaum erhalten

Nur 61 der 140 untersuchten Gefässe enthielten überhaupt organisches Ma-

terial. Die Zürcher Forscher entnahmen jeweils 50 bis 500 mg Material und sequenzierten das gesamte Genom – sowohl das menschliche als auch das der enthaltenen Bakterien. Sie hofften, auf diese Art und Weise nicht nur herauszufinden, ob es sich tatsächlich um menschliche Eingeweide handelt, sondern auch, ob der oder die Tote an etwaigen Krankheiten litt.

Doch die extrahierte Bakterien-DNA war nicht gut genug erhalten, um Krankheitserreger zu identifizieren oder Bakterien, die nur im menschlichen Mikrobiom vorkommen. Die gefundenen Bakterien waren unspezifisch: Sie treten in den meisten Umgebungen auf. Das deutet darauf hin, dass sie wohl durch Verunreinigungen aus der Umwelt in das Material gelangt sind.

Grundlage für die Forschung

Diese mögliche Kontaminierung beeinträchtigt auch die Suche nach Haplogruppen, also genetischen Mustern, die zum Beispiel auf eine bestimmte geografische Herkunft hinweisen.

Moderne Kontaminationen, etwa wenn «vor zwanzig Jahren in einem Museum ein Kurator da reingehustet hat», wie Rühli sagt, liessen sich wegen der viel besseren Erhaltung noch recht gut aussortieren. Aber ob die antiken DNA-Reste von der toten Person oder vom Einbalsamierer stamme, werde sich kaum je unterscheiden lassen. Die Wissenschaftler geben deshalb selbst zu: Ihre Arbeit ist vor allem als Grundlage für weitere Forschung anzusehen. «DNA aus Kanopen wird auch in Zukunft eher nicht die Methode der Wahl sein», sagt Rühli.

«Es gibt aber Fälle wie zum Beispiel den der Hefephores, der Mutter des Pharaos Cheops, des Erbauers der grossen Pyramide in Gizeh: Von ihr sind nur die Gefässe mit möglichen Resten der Eingeweide erhalten, sie sind die einzige Informationsquelle.» Wo hingegen sowohl Mumie als auch Kanopen vorhanden sind, könne man anhand der DNA abgleichen, ob sie tatsächlich vom gleichen Individuum stammen.

Sollte sich herausstellen, dass viele Kanopen gar nicht den erwarteten Inhalt haben, würde das eine Vermutung bestätigen, die Ägyptologen schon lange hegen: Den Ägyptern ging es oft weniger ums Tatsächliche als ums Rituelle. Als es Mode wurde, die einbalsamierten Organe zurück in den toten Körper zu packen, standen trotzdem noch Kanopen im Grab. Es waren Attrappen ohne Hohlraum.

La Niña verlängert die Dürre am Horn von Afrika erneut

Fast überall ist es wärmer als sonst, nur im tropischen Pazifik nicht – das hat globale Konsequenzen für das Wetter

SVEN TITZ

Im bevorstehenden Herbst wird das Wetter rund um den Pazifik wahrscheinlich wieder durch «La Niña» bestimmt werden. Mit dem spanischen Ausdruck, der übersetzt «das Mädchen» bedeutet, bezeichnen Wetter- und Klimaforscher ein Phänomen im Ozean: Liegen die Wassertemperaturen im Osten des tropischen Pazifiks niedriger als in einem durchschnittlichen Jahr, sprechen Fachleute von La Niña.

Wenig Wasser und Nahrung

Die Auswirkungen spüren die Menschen weltweit. Für viele Länder auf der Erde ist die Vorhersage von La Niña eine Hiobsbotschaft: Am Horn von Afrika – also in der Region um Somalia – verlängert sich die Dürre. Sie hält dort ohnehin schon seit zwei Jahren an, weil Regenzeiten nacheinander sind schwächer

ausgefallen als gewöhnlich. Mit hoher Wahrscheinlichkeit wird es auch in der nächsten Regenzeit, die normalerweise von Oktober bis Dezember dauert, zu wenig Niederschlag geben.

Gemäss der International Food Security and Nutrition Working Group, einem regionalen Netzwerk für Ernährungssicherheit, handelt es sich am Horn von Afrika um die schlimmste Dürre seit 70 Jahren. 16 Millionen Menschen würden dort unter einem Mangel an Trinkwasser leiden. Für 18 bis 21 Millionen Menschen in Somalia, Äthiopien und Kenia sei die Ernährung derzeit nicht gesichert. Setze die Regenzeit erneut aus, könnten bis Februar 2023 noch 5 Millionen Betroffene hinzukommen.

Auch in anderen Regionen der Welt zeigen sich die Folgen von La Niña. So wird die Trockenheit im Südwesten der USA ebenfalls intensiviert. Im Nordatlantik ist theoretisch die Wahrscheinlichkeit einer lebhaften Hurrikansaison

erhöht – was an realen Wirbelstürmen allerdings noch nicht zu erkennen war. Das Australian Bureau of Meteorology wies während darauf hin, dass es im Osten Australiens erneut zu heftigen Regenfällen und zu Überschwemmungen kommen könne.

Die Ursachen sind in allen Fällen Fernwirkungen von La Niña. Auch ein Einfluss auf das Wetter in Europa ist vorhanden, er gilt aber als gering. Insofern kann die hiesige Dürre in diesem Sommer nicht auf das Phänomen im Pazifik zurückgeführt werden; sie hat eher mit dem Verhalten des Jetstreams zu tun, der auch von zahlreichen anderen Faktoren beeinflusst wird.

Pendant zum Christkind

Die Bezeichnung La Niña wählten Forscher in Analogie zu dem Gegenstück: «El Niño» heisst die alle zwei bis sieben Jahre wiederkehrende Erwärmung

des tropischen Pazifiks vor der Küste Südamerikas. Abgeschwächte Passatwinde ermöglichen, dass vor der Küste Perus die Wassertemperatur steigt. Das ist vor allem in der Weihnachtszeit zu beobachten. «El Niño» ist der spanische Ausdruck für «der Bub» oder auch «das Christkind». Daher wurde der Begriff auf die ozeanische Erwärmung übertragen. Zwischen zwei El-Niño-Phasen kommt es zu verstärkten Passatwinden und damit zur Abkühlung vor Peru. Diese Phänomene wurde dann als La Niña bezeichnet.

In einem riesigen Meeresgebiet, das sich südlich von Hawaii entlang des Äquators erstreckt, macht sich La Niña (wie auch El Niño) immer besonders stark bemerkbar. Dort liegen die Wassertemperaturen derzeit ungefähr 0,6 Grad Celsius niedriger als im langjährigen Durchschnitt. Mehrere grosse Zentren zur Wetter- und Klimavorhersage sagen voraus, dass die Temperaturen in

den kommenden Monaten noch ein wenig sinken könnten.

Unklar, wie oft La Niña kommt

Dass drei Jahre nacheinander La-Niña-Bedingungen herrschen, passiert nur selten. Seit dem Jahr 1900 sei dies erst zweimal geschehen, so das Australian Bureau of Meteorology. Der letzte Dreierpack wurde von 1998 bis 2000 verzeichnet. Wie lang eine derartige Phase mit niedrigen Temperaturen andauern kann, ist derzeit in der Wissenschaft noch nicht klar.

Eine positive Wirkung hat La Niña auch: Im laufenden Jahr wird noch kein neuer Rekord der globalen Mitteltemperatur aufgestellt werden. Denn wenn der tropische Pazifik kühl ist, wirkt sich das immer etwas bremsend auf die Erderwärmung aus. Sollte aber im kommenden Jahr El Niño folgen, könnte in der Folge ein neues globales Temperaturmaximum zu verzeichnen sein.