

Quanten- computer

Von **Stefan Filipp**

Können wir damit rechnen?

Im weltweiten Wettbewerb um die besten Lösungen erforscht das **Walther-Meißner-Institut** für Tieftemperaturforschung der BAdW, welche Technologien sich am besten für Quantencomputer eignen.

Es scheint nur eine Frage des technischen Fortschritts der Halbleiterindustrie zu sein, dass Computer bald alle erdenklichen Aufgaben schnell und effizient berechnen können. In vielen Fällen stoßen herkömmliche Rechner jedoch an prinzipielle Grenzen: Bei wachsender Komplexität der Problemstellung steigt der Rechenaufwand exponentiell an. Selbst zukünftige Supercomputer werden damit überfordert sein, und wenn überhaupt, nur mehr näherungsweise Antworten liefern können. Quantenrechner hingegen versprechen einige Probleme tatsächlich lösen zu können. Dies hat in den letzten Jahren zu einem enormen Interesse geführt, nicht nur aus den Naturwissenschaften, sondern auch von Unternehmen. Sie wollen die Quantenalgorithmen gewinnbringend

einsetzen, etwa, um komplexe Moleküle für die Chemie- und Pharmaindustrie zu berechnen oder Optimierungsaufgaben im Verkehrs- oder Finanzwesen zu lösen.

Vorteile eines Quantenrechners

Die Idee hinter einem Quantenrechner besteht in der geschickten Manipulation von sogenannten Quantenbits (Qubits), den Bausteinen eines Quantencomputers. Ähnlich wie sein klassisches Analogon, das Bit, kann ein Qubit die Werte ‚0‘ oder ‚1‘ annehmen. Darüber hinaus kann es aber auch gleichzeitig im Zustand ‚0‘ und ‚1‘ sein. Man spricht dann von Superposition. Erst bei der Messung des Qubits findet man einen der Werte ‚0‘ oder ‚1‘, und zwar mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit, die sich zur gezielten Manipulation

an dem Qubit einstellen lässt. Interessant wird es bei der Verwendung von mehreren Qubits: Zwei Qubits können schon in 2 mal 2, also vier verschiedenen Zuständen (‚00‘, ‚01‘, ‚10‘ und ‚11‘) gleichzeitig sein, drei Qubits in 8 usw. Die Anzahl der gleichzeitigen Möglichkeiten steigt exponentiell mit der Anzahl der Qubits (2^N). Durch Operationen an zwei oder mehreren Qubits können im Prinzip beliebige Kombinationen der Möglichkeiten mit wählbaren Wahrscheinlichkeiten realisiert werden. Man spricht dann von Quantenverschränkung. Der Quantenvorteil liegt nun darin, dass alle Möglichkeiten in nur N Qubits gespeichert werden können, während klassische Computer exponentiell viel Speicherplatz (2^N) benötigen. Ein Quantenzustand mit 50 Qubits benötigt mehr als 2.000 Terabyte Speicherplatz, und bei etwas mehr



BLUEFORS

**„Quantencomputer haben
das Potential, bislang
unlösbare Problemstellungen
lösbar zu machen.“**

Stefan Filipp (l.), Direktor am
Walther-Meißner-Institut,
mit Doktorand Leon Koch im
Quantencomputing-Labor.



**„Quanten-
computer
bringen viel-
versprechen-
de Anwen-
dungen,
etwa für die
Medizin,
die Chemie
oder das
Finanzwesen
mit sich.“**

Julia Lamprich, ehemalige
Masterstudentin am WMI, bei
der Arbeit an einem Kryostat.

Qubits kann die Vielzahl an Möglichkeiten nicht mehr auf herkömmlichen Speichermedien abgespeichert werden: Klassische Computer geraten dann an ihre Grenzen.

Quantencomputer können nun durch geschicktes Manipulieren der Qubits die exponentiell wachsende Anzahl an Möglichkeiten ausnutzen, um Algorithmen durchzuführen. Bei Anwendungen aus der Molekularchemie können etwa die verschiedenen Konfigurationsmöglichkeiten der Elektronen in einem Quantenzustand gespeichert und so die Bindungsenergie berechnet werden.

Die Herausforderung besteht jedoch in der physikalischen Umsetzung, um mit geeigneten Qubits einen realen Quantenrechner zu bauen. Weltweit hat der Wettbewerb der verschiedenen Technologien begonnen. Als eine der am weitesten entwickelten Technologien für Qubits haben sich supraleitende Quantenschaltkreise herauskristallisiert, eine Technologie, bei der am Walther-Meißner-Institut für Tieftemperaturforschung der BAdW schon

Pionierarbeit geleistet wurde und die auch in Zukunft am Institut eine große Rolle spielen wird. Diese Qubits basieren auf Strömen in supraleitenden Schaltkreisen, die widerstandslos in zwei verschiedene Richtungen fließen können oder eben in zwei verschiedene Richtungen gleichzeitig. Auch gefangene geladene Atome, in denen elektronische Zustände der Atome als Qubit verwendet werden, eignen sich hervorragend als Quantenprozessor. Darüber hinaus gibt es noch andere erfolgversprechende Ansätze, z. B. basierend auf neutralen Atomen, auf elektronischen Spins in Festkörpern oder auf optischen Photonen.

Das Ziel bei allen Technologien ist es, möglichst viele Qubits mit hoher Genauigkeit ansteuern zu können. Die Qubits müssen dafür genügend lang Superpositionszustände behalten können, also „kohärent“ bleiben. Am besten gelänge dies durch ihre perfekte Abschirmung von der Außenwelt. Um Operationen auf dem Quantenrechner auszuführen, braucht es

jedoch auch von außen angelegte Kontrollsignale, die wiederum eine Quelle von Störeinflüssen sein können. Dieses Dilemma kann nur durch ein genaues Verständnis der physikalischen Grundprinzipien zur Vermeidung von Störungen und gemeinsam mit technologischen Weiterentwicklungen in der Kontrolle gelöst werden.

Eine weitere wichtige Zutat zum Bau eines funktionstüchtigen Quantenrechners sind Methoden der Fehlerkorrektur, die es erlauben, Fehler zu identifizieren, aber gleichzeitig den Quantenzustand der Qubits nicht zu stören. Dazu werden mehrere physikalische Qubits zusammengefasst, um ein sogenanntes „logisches“ Qubit zu bilden, das besser gegen Störeinflüsse geschützt ist. Damit diese Methoden in der Praxis funktionieren, müssen Störeinflüsse auf ein Minimum reduziert und die Anzahl der verfügbaren Qubits um mindestens das 1000-Fache gesteigert werden. Schlussendlich ist dies die Grundlage eines „universellen Quantenrechners“, der das Potential der Quantenmechanik voll ausnutzen kann.

Aktuelle Herausforderungen

Bis dahin müssen wir noch einige Herausforderungen meistern. Dennoch sind erste Quantenrechner schon heute in der Lage, spezifische Probleme zu lösen und die grundlegende Funktionsweise von Quantenalgorithmen auch ohne Fehlerkorrekturmethode aufzuzeigen. Sehr vielversprechend sind Algorithmen, die den Quantenrechner als Co-Prozessor in einer quantenklassischen Hybridarchitektur einbinden, sogenannte Variationalalgorithmen. Diese wurden schon an mehreren Problemstellungen erfolgreich getestet, etwa für kleine Wasserstoffverbindungen. Auf Plattformen mit mehr als 50 Qubits demonstrierte Google erste Anzeichen eines Quantenvorteils anhand eines Zufallsalgorithmus, und Firmen wie IBM bieten cloud-basierte Quantenrechner für eine breite Nutzerbasis an. Es ist aber bislang noch niemandem gelungen, bei einer wissenschaftlich oder wirtschaftlich relevanten Problemstellung einen echten Vorteil von Quantencomputern gegenüber herkömmlichen Rechnern zu zeigen. Neben der Hardwareentwicklung liegt also eine weitere Herausforderung in den Algorithmen. Diese müssen mit möglichst

wenigen Operationen auskommen, um innerhalb der Kohärenzzeit der Qubits das gewünschte Ergebnis zu liefern. Insbesondere wird auch die Frage untersucht, welche Art von Quantenvorteil wir für spezifische Problemstellungen erwarten können: Ein Quantenrechner wird nicht generell effizienter und schneller als ein herkömmlicher Rechner sein. Wie groß der Vorteil für verschiedene Problemklassen sein wird, ist eine spannende Fragestellung. Durch die Forschung an verschiedenen Arten von Algorithmen wie auch an deren Optimierung und Anpassung an vorhandene Hardwarearchitekturen ist hier jedoch mit einer rasch fortschreitenden Erweiterung der Möglichkeiten von Quantencomputern zu rechnen.

Motiviert durch diese vielversprechenden Perspektiven wird in Deutschland derzeit eine Vielzahl an Initiativen im Quantencomputing lanciert. Dazu werden sowohl auf der Bundesebene als auch in Bayern durch das Munich Quantum Valley die Kräfte gebündelt, um innerhalb der nächsten fünf Jahre einen Quantencomputer made in Germany zu bauen. Dies soll durch eine enge Verzahnung von Universitäten, außeruniversitären Forschungseinrichtungen und Unternehmen ermöglicht werden. Insbesondere ist es ein Ziel, junge Unternehmen und Ausgründungen zu fördern, wie zum Beispiel durch das jüngst gegründete Venture Lab Quantum der TU München und der UnternehmerTUM, das am Walther-Meißner-Institut der BAdW angesiedelt wird. Entscheidend wird es jedoch sein, rasch Kompetenzen in allen Bereichen der Hardware und Software aufzubauen und diese den Nutzern zur Verfügung zu stellen. Hier wird dem Leibniz-Rechenzentrum der BAdW durch die Möglichkeiten der Integration von Quantenrechnern in eine bestehende Großrechnerarchitektur eine führende Rolle zukommen.

Zusammenfassend stehen wir am Anfang einer spannenden Entwicklung mit großem Potential für Wissenschaft und Wirtschaft. Mithilfe eines Quantencomputers können wir Rechenaufgaben lösen, die mit herkömmlichen Methoden unlösbar bleiben. Dies bietet einen enormen Anreiz, sich den Herausforderungen zu stellen, um das langfristige Ziel eines universellen Quantenrechners zu erreichen.

Quantencomputer und -simulation: zukünftige Anwendungen



Biotechnologie

Simulation von komplexen Molekülen in Wissenschaft und (Chemie- und Pharma-)Industrie



Prozessoptimierung

Verkürzung von Rechenzeiten bei der Optimierung von Geschäftsprozessen

Prof. Dr. Stefan Filipp

ist seit 2020 Direktor am Walther-Meißner-Institut für Tieftemperaturforschung der BAdW und Inhaber des Lehrstuhls für Technische Physik an der TU München. Er war zuvor für IBM Research in New York und Zürich tätig. Sein Forschungsgebiet ist das Quantencomputing.