



Quantencomputer sind Hardware und Algorithmus zugleich



praktisch nutzbare Systeme haben, werden noch einige Jahre vergehen. Universelle Quantencomputer haben wir aktuell im Umfang von 5 QBits. Damit kann ich zum Beispiel die Zahl 15 in Primfaktoren zerlegen lassen, also ein durchaus komplexes mathematisches Problem lösen, aber bei einem Echtweltproblem – zum Beispiel Stau freies Fahren für eine sehr große Anzahl von Fahrzeugen – hilft das gar nichts.

Wie universelle Quantencomputer nutzen auch Annealing-Systeme Quanteneffekte zur Berechnung: Superposition, Verschränkung und Tunneling, die während der Berechnung aufrechterhalten werden. Im Gegensatz zu klassischen Computern arbeiten Quantenrechner mit Quantenbits. Während ein Bit entweder die Werte 1 und 0 annehmen kann, ist ein Quanten- oder QBit in der Lage, beide Werte gleichzeitig anzunehmen. Das ist die Superposition – einer der quantenphysikalischen Effekte, der für die bemerkenswerte Beschleunigung vorgenommener Berechnungen verantwortlich ist.

JavaSPEKTRUM sprach mit Dr. Florian Neukart, Principal Data Scientist im Code Lab der Volkswagen Konzern-IT in San Francisco, über das Quantencomputer-Projekt bei Volkswagen. Anhand seines Projekts, bei dem es darum geht, dass Pekinger Taxis schneller ans Ziel kommen, erklärt Neukart Vorteile und Potenzial des Quantenrechnens sowie seine Auswirkungen auf die IT.

JavaSPEKTRUM: Warum arbeiten Sie mit Quantencomputern und nicht mit klassischen Computern?

Dr. Florian Neukart: Wir arbeiten sowohl mit klassischen als auch mit Quantencomputern (QC). Quantencomputer werden klassische Computer, zumindest die nächsten zehn Jahre, nicht ersetzen. Heute kombinieren wir das Beste aus beiden Welten. Betreffend QC sind aktuell zwei Architekturen interessant. Das eine ist der Gate Model Computer oder der universelle Quantencomputer. Bei der anderen Architektur handelt es sich um sogenannte Quantum Annealing-Systeme. Das ist eine einfachere Variante, die für Optimierungsprobleme und Sampling Tasks sehr gut geeignet ist.

Universelle Quantencomputer können theoretisch jedes beliebige komplexe Problem lösen. Diese Rechner hätten wir alle gern, aber sie gibt es erst in eingeschränktem Umfang. Bis wir

■ Können Sie das auch einem Laien erklären?

Quantenbits können zum Beispiel über Elektronenspins dargestellt werden – etwa stellt Spin-Up den Zustand 0 dar, Spin-Down den Zustand 1. Andere Formen sind photonische QBits, Quantum Dots oder supraleitende QBits. Wenn wir zum Beispiel einen kleinen Lösungsraum von 10 Funktionen annehmen, die Lösungen zum präsentierten Problem darstellen, dann evaluiert ein Quantencomputer alle simultan. Ist eine Funktion davon die Lösung zum präsentierten Problem, kann so die korrekte Lösung in einem Evaluierungsdurchlauf gefunden werden. Um dieses Ergebnis mit einem klassischen Computer zu erreichen, müsste der Computer jede dieser Funktionen in Sequenz evaluieren. Das macht das Rechnen mit Quantencomputern so absurd schnell. Er evaluiert jeden möglichen Zustand gleichzeitig.

Mittels Pekinger Taxis (siehe Kasten) haben wir das Verkehrsflussproblem betrachtet. Dabei geht es darum, Tausende von Fahrzeugen auf unterschiedliche Routen zu verteilen, ohne dass diese nach der Neuverteilung an der neuen Position Verkehrsflussprobleme bereiten. Aber auf die Frage, welche Verteilung auf das Verkehrssystem die beste ist, gibt es Milliarden oder Billionen mögliche Antworten. Mit klassischem Computing lässt sich die optimale Lösung nicht in kurzer Zeit finden. Im schlimmsten

Volkswagen nutzt Quantencomputer für Verkehrsflussoptimierung

Als weltweit erstes Automobilunternehmen erprobt der Volkswagen Konzern intensiv die Nutzung von Quantencomputern. Hierzu arbeitet Volkswagen mit D-Wave Systems zusammen, einem Spezialisten für Quantencomputing aus Kalifornien. In einem ersten Forschungsprojekt wurde ein Algorithmus zur Verkehrsflussoptimierung entwickelt und erprobt.

In diesem Forschungsprojekt haben Data Scientists und Big-Data-Experten auf Grundlage der Daten von 10 000 öffentlichen Taxis in Peking erfolgreich gezeigt, dass sie mit einem Quantencomputer den Verkehrsfluss in der Mega-Metropole optimieren können. Der Algorithmus steuert die Fahrzeuge so, dass Staus vermieden werden.

Die Konzern-IT von Volkswagen erwartet ein breites Feld an Einsatzmöglichkeiten für Quantencomputing, etwa in den Bereichen autonomes Fahren, Robotic Enterprise (KI-gestützte Prozesssteuerung), vernetzte Fertigung, maschinelles Lernen und intelligente Mobilitätslösungen.

Quantencomputer können hochkomplexe Aufgaben um ein Vielfaches schneller lösen als herkömmliche Super-Rechner. Das Rechenprinzip eines Quantencomputers, etwa jener von D-Wave Systems, eignet sich dafür besonders, weil es auf sogenannte Optimierungsprobleme spezialisiert ist. Vereinfacht geht es dabei um die Frage, wie eine Ressource Zeit, Geld oder Energie optimal in einem bestimmten Szenario nutzen kann.

Fall findet sich gar keine. Mit Quantum Annealing ergibt sich die beste Lösung in Millisekunden.

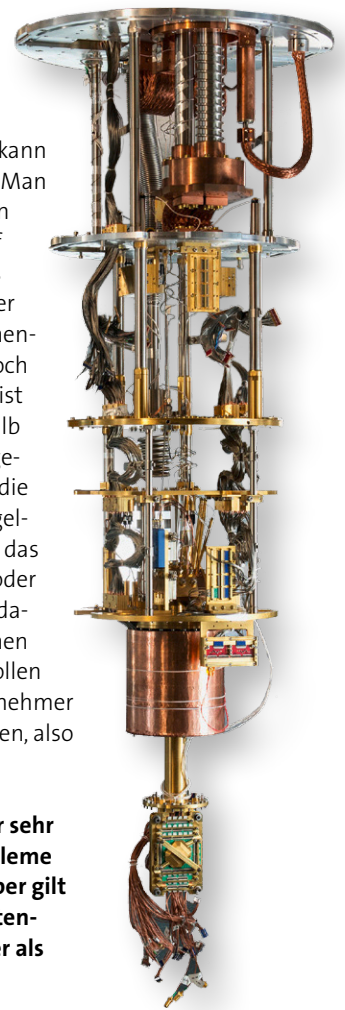
Das führt uns zum zweiten, für das Quantum Annealing wichtigen Effekt: das Tunneling. Stellen Sie sich ein Teilchen vor, das sich mit einem bestimmten Energielevel durch den Raum bewegt. Plötzlich stößt es auf eine Barriere mit höherer Energiedichte, die es nicht durchdringen kann, genauso wie Menschen nicht durch Wände gehen können. Aber in der Quantenphysik, auf atomarer oder subatomarer Ebene geht das. Das Teilchen kann dann durch die Wand „tunneln“.

Wenn ich das eben erwähnte Verkehrsflussproblem als Energieproblem darstelle, kann ich den Tunneling-Effekt nutzen. Das funktioniert, indem ich für jedes eingesetzte Fahrzeug die Zeit, nicht die Strecke minimieren möchte, in der es sich von A nach B bewegt. Darüber hinaus soll diese kürzeste Zeit für alle Fahrzeuge gleichzeitig ermittelt werden und die Fahrzeuge sollen nach der Neuverteilung nirgendwo anders einen Stau verursachen. Da wir Positionsdaten von Fahrzeugen in 1 – 5 Sekundenintervallen bekommen und optimale Verteilungen auch in Sekundenintervallen neu ermitteln möchten, müssen wir also eine optimale Lösung in kurzer Zeit finden, was für klassische Computer, auch mit entsprechender Parallelisierung, eine Herausforderung ist.

Ein klassischer Computer/Algorithmus nähert sich einer optimalen Lösung nur an – meistens bleibt er in einem lokalen Minimum stecken. Man kann sich den Lösungsraum für dieses Verkehrsflussproblem als Hügellandschaft vorstellen: Eine hohe Erhebung repräsentiert große Ungenauigkeit, ein Tal eine genauere Lösung. Die beste Lösung ist also das tiefste Tal. Wir starten die Evaluierung, indem wir eine Kugel einen Hügel hinabrollen lassen. Sie bleibt in einem Tal liegen. Sehr wahrscheinlich ist genau dieses

Tal nicht das tiefste der gesamten Landschaft, da wir mit beliebig vielen Dimensionen und Milliarden oder mehr Hügeln und Tälern arbeiten. Ein klassischer Algorithmus kann diese Landschaft nur „abwandern“. Man könnte natürlich die Anzahl der Kugeln erhöhen, aber niemals alle Täler auf einmal prüfen. Das führt dazu, dass der klassische Algorithmus ungenauer ist, also die optimale Lösung gegebenenfalls nicht findet und dafür auch noch viel Zeit benötigt. Was wir brauchen, ist die optimale Lösung, und das innerhalb möglichst kurzer Zeit. Vereinfacht gesagt, fliegt beim Quantencomputing die Kugel dank Tunneling durch die Hügelketten hindurch zum tiefsten Tal, und das in sehr kurzer Zeit (Millisekunden oder Sekunden). Neben Position und der daraus abgeleiteten, ungefähr möglichen Geschwindigkeit des Fahrzeugs sollen zukünftig auch andere Verkehrsteilnehmer und Infrastruktur berücksichtigt werden, also etwa Ampeln und Fußgänger.

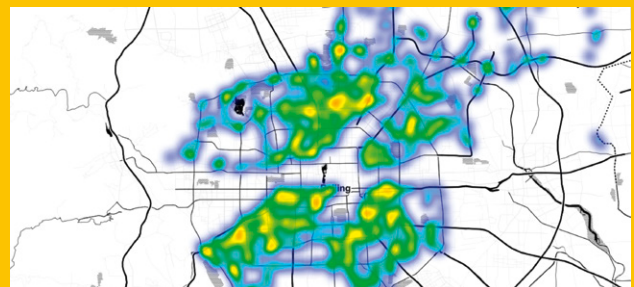
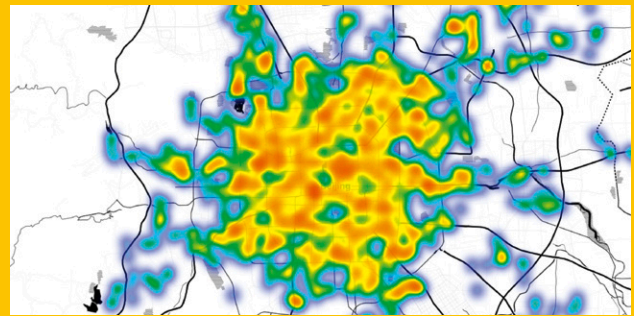
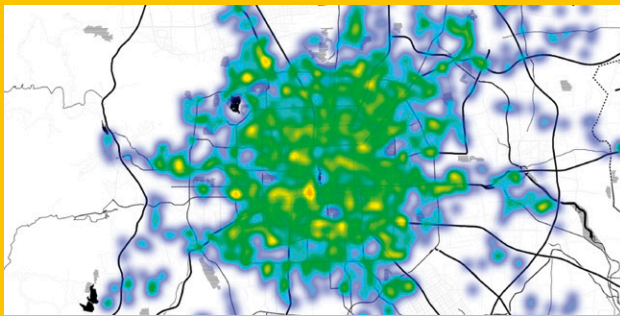
Quantenrechner können offenbar sehr viel schneller sehr komplexe Probleme lösen als traditionelle Rechner. Aber gilt das für alle Probleme? Sind Quantencomputer in allen Belangen besser als traditionelle Universalrechner?



Sehr oft lösen klassische Computer Probleme schon so gut, dass eine Ablösung durch Quantencomputer keinen Mehrwert bringt. Bei speziellen Problemen allerdings, wie bei dem eben beschriebenen Verkehrsflussproblem, bei welchem eine optimale Lösung innerhalb von Sekunden gefunden werden muss, schaffen QC einen enormen Mehrwert oder lösen gar ein Problem, das zuvor unlösbar war.

Bei unserem Beispiel habe ich bei einem Fahrzeug 39 000 Kombinationen, wie man Streckenabschnitte variieren kann, um von A nach B zu fahren. In unserem Beispiel, das wir für VW errechnet haben, lassen wir aber 10 000 Fahrzeuge von A nach B fahren. Ich kann mich an einen Streckenabschnitt vom Flughafen in die Innenstadt von Peking erinnern. Wir haben 418 Fahrzeuge gleichzeitig auf diesem Abschnitt eingesetzt. Um sie staufrei in die Innenstadt zu lotsen, müssen wir nicht nur die Route eines Fahrzeugs errechnen, sondern die aller Fahrzeuge sowie alle Auswirkungen von Routenänderungen auf jedes einzelne andere Fahrzeug. Schon bei 3 Routenänderungen hat der Lösungsraum eine Größe von 3418. Das können sie mit klassischen Rechnern nicht innerhalb von Millisekunden lösen. Der Quantum Annealer startet in einer Konfiguration, in der alle Lösungen zu einer Zeit existieren, endet im Energieminimum und bei der Messung erhalten wir somit die, auf das Optimierungsziel Zeit bezogen, beste Lösung. Das ist jene, die die Gesamtzeit im Verkehrsgraphen minimiert.

In Sachen simulierter Physik zum Beispiel setzt man auch große Hoffnungen in Quantencomputer – immer, wenn größere Quantensysteme simuliert werden sollen, stoßen klassische Computer an ihre Grenzen. Niedrigtemperaturphysik oder Hoch-



Verkehrsflüsse in Beijing

temperatursupraleitung können ebenfalls klassisch nicht simuliert werden. Mit Quantencomputern sollte das möglich werden. Und natürlich die Suche in sehr großen Lösungsräumen.

Zurück zum Stau in Peking: Die Lösung wird gefunden, weil der Quanten Annealer immer nach dem Energieminimum strebt?

Ja, wenn ich ein Problem so darstellen kann, dass die Lösung ein Energieminimum ist – bei uns also das Minimieren der Zeit – dann macht das ein Quanten Annealer automatisch.

Dann muss ein solcher Rechner gar nicht programmiert werden?

Doch, wir müssen es ja so aufbereiten, dass der Rechner es „verstehen“ kann. Deshalb wird es meiner Meinung nach immer eine Kombination sein von Quanten- und traditionellem Computing. Außerdem muss nicht nur der Input aufbereitet werden, sondern auch der Output muss ja rückübersetzt werden. Angenommen, unser Problem ist zehnp-parametrig, dann müssen diese Parameter so auf die zwei-parametrig Optimierungsfunktion des Annealers übersetzt werden, dass nach der Berechnung eine Rücktransformation passieren kann. Es hilft ja gar nichts, wenn wir zeigen, welche Lösung das Energieminimum darstellt, wir müssen die Strecke und das betreffende Fahrzeug zeigen und zum Beispiel bei autonomen Fahrzeugen in Steuerbefehle übersetzen.

Diese Vor- und Nachbereitungen werden dann klassisch erarbeitet?

Ja, wir nutzen dafür Python, Matlab und C. Ich kann die Quantenhardware auch direkt manipulieren, aber das ist extrem aufwendig. Deshalb sind wir sehr dankbar, dass es schon APIs gibt, die uns die Nutzung der höheren Programmiersprachen erlauben.

Wie sieht so ein Quantenrechner aus?

Ohne Mikroskop sehen Sie praktisch keinen Unterschied. Die Chips sind kleiner als eine Armbanduhr, können aber simultan mehr Möglichkeiten überprüfen, als Atome im sichtbaren Universum vorhanden sind. Der Vergleich stammt nicht von mir, sondern stand im Los Alamos Science and Technology Magazine 1663. Er beschreibt sehr eindrucksvoll, was mit Quantenrechnern möglich ist.

Wie kommen Sie an die Rechenleistung des Quantenrechners? Besitzt VW einen?

Nein, wir mieten Rechenzeit über die Cloud beim Hersteller des Annealer-Quantenrechners D-Wave. Da ich meine Ergebnisse innerhalb von Millisekunden erhalte, komme ich mit einer Stunde schon extrem weit. Rechenzeit zu mieten, ist auch deshalb vorteilhafter, weil ich immer auf den neuesten Rechnern arbeiten kann. D-Wave verdoppelt die Anzahl der QBits pro Jahr.

Stellt Quantencomputing die Zukunft dar? Werden Quantencomputer die bisherigen Rechnerarchitekturen ablösen?

Alles, was ich heute mit klassischen Computern lösen kann, wird auch in Zukunft in solchen Architekturen gelöst. Wenn Quantencomputer irgendwann genauso preiswert herstellbar sind wie heutige Rechner, stellt sich die Frage vielleicht neu. Dazu müssten dann, etwa im Fall von supraleitenden QBits, allerdings Herausforderungen wie Hochtemperatur-Supraleitung gelöst sein, sodass nicht mehr auf so extreme Temperaturen gekühlt werden muss.

Wird es für Quantencomputer Programme geben wie Software für heutige Rechner? Wer entwickelt diese Software? Wird es Compiler geben und so fort?

Ja. Gibt es schon. Bei D-Wave gibt es QMI. Das steht für Quantum Machine Interface. Das übersetzt die Programmiersprache Python und erzeugt Funktionsaufrufe, die der Quantenrechner versteht. Das heißt, Informatiker entwickeln die Software, keine Physiker. Jemand, der programmieren kann, ist schon auf dem guten Weg zum QC-Programmierer. Es bedarf nur ein wenig Umdenken bei der Darstellung des Problems, damit es der Quantencomputer versteht.

Wenn ich Entwickler bin oder Architekt, der sich für Quantencomputing interessiert, wo kann ich mich schlau machen?

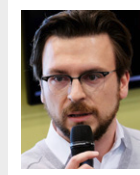
Man sollte sich vor allem mit den Effekten des Quantencomputings vertraut machen. Zwei haben wir schon besprochen: Superposition und Tunneling. Der dritte wichtige Effekt ist die sogenannte Verschränkung.

Aha?

Als Informatiker muss ich nur wissen, Bits können so miteinander verbunden werden, dass durch eine Veränderung an einem Bit die anderen verschränkten Bits gleichzeitig auch verändert werden, ohne dass Information übertragen wird. Das heißt, wenn ich verschränkte Bits habe, die einen hier, andere in der Andromeda-Galaxie, wieder andere auf dem Erdmond, erfahren alle die gleiche Veränderung gleichzeitig. Wie das physikalisch funktioniert, muss der Informatiker nicht wissen, aber er kann den Effekt nutzen. Er kann mit einem Bit beliebig viele andere, an welchem Ort auch immer befindliche Bits zeitgleich beeinflussen.

Wir haben jetzt schon leistungsfähige Special Purpose Quantenrechner und in zwei bis drei Jahren General Purpose Rechner. Ab wann wird der Einfluss des Quantencomputings auf das traditionelle Computing spürbar werden? Wann verlagern sich zum Beispiel Workloads von bisherigen Supercomputern auf Quantenrechner.

Das hat schon begonnen. Es existieren viele Echtweltprobleme, die durch Quantencomputing erstmals lösbar werden. Wir bei Volkswagen beschäftigen uns als weltweit erstes Automobilunternehmen intensiv mit den Möglichkeiten, die Quantencomputing bietet. Branchenübergreifend werden sicher viele Industrien versuchen, auf den Zug aufzuspringen.



Dr. Florian Neukart arbeitet als Principal Data Scientist im Volkswagen Code Lab in San Francisco. Schon zuvor arbeitete er als Data Scientist und Analyst im Volkswagen Data Lab in München und ist vor allem spezialisiert auf die Themen Künstliche Intelligenz, Machine Learning und Quantencomputing. Er hält einen Dokortitel zum Thema Künstliche Intelligenz von der Universität in Brasov (Rumänien) sowie Mastertitel in den Bereichen Computer Science und Informatik.

*Text: Christoph Witte, E-Mail: cwitte@wittcomm.de,
Fotoquellen: Volkswagen AG, D-Wave Systems*