

QUANTENCOMPUTER

EINE EINFÜHRUNG IN DAS THEMA MIT BEZUG ZUR KÜNSTLICHEN INTELLIGENZ

MARCEL HEISLER
HOCHSCHULE DER MEDIEN STUTTGART
mh313@hdm-stuttgart.de

im Rahmen der Veranstaltung
AKTUELLE THEMEN
August 2019

Abstract

In diesem Paper wird zunächst auf die Funktionsweise von Quantencomputern eingegangen, um ein besseres Verständnis für die anschließenden Anwendungsmöglichkeiten zu schaffen. Im Rahmen der Anwendungsbereiche wird u.a. die künstliche Intelligenz (KI) betrachtet. Abschließend wird auf zu lösende Probleme für Quantencomputer und (teils auf KI gestützte) Lösungsmöglichkeiten eingegangen, sowie ein Ausblick auf die Zukunft von Quantencomputern gegeben.

1 Einleitung

Der Wunsch die Natur besser simulieren und damit verstehen zu können, veranlasste den Physiker Richard Feynman 1982 zu folgender Aussage: “Nature isn’t classical, dammit, and if you want to make a simulation of nature, you’d better make it quantum mechanical, and by golly it’s a wonderful problem, because it doesn’t look so

easy.”[25] Heute wird diese Aussage als eine der ersten Motivationen angesehen, Quantencomputer zu realisieren.

Neben der Möglichkeit die Natur exakter zu simulieren, versprechen Quantencomputer außerdem eine Leistungssteigerung bei bestimmten Aufgabenstellungen gegenüber klassischen Computern. Das Moorsche Gesetz, nach dem sich etwa alle 12 bis 24 Monate die Anzahl der Schaltkreiskomponenten auf einem Computerchip verdoppelt, stößt langsam an seine physikalischen Grenzen.[12] Umso interessanter wird ein Leistungszuwachs durch alternative problemspezifische Technologien.

2 Funktionsweise

Um zu verstehen, warum Quantencomputer zu solchen Leistungssteigerungen führen könnten, ist es nötig zunächst ihre Funktionsweise genauer zu betrachten. Dazu empfiehlt sich ein Vergleich zu klassischen Computern für den Einstieg.

2.1 Qbits statt Bits

Bei klassischen Computern ist die kleinste Informationseinheit ein Bit. Dieses wird realisiert durch einen Transistor, für den der Strom entweder an oder aus sein kann. Ein Bit kann also exakt zwei Zustände annehmen, die in der Regel mit 0 und 1 bezeichnet werden.

Ein Quantencomputer arbeitet mit Qbits statt Bits. Dabei handelt es sich um kleinste Teilchen, wie Atome, Elektronen oder Photonen. Diese weisen quantenmechanische Eigenschaften auf. Besonders von drei dieser Eigenschaften wird in Quantencomputern Gebrauch gemacht: Superposition, Verschränkung und Interferenz.

2.2 Superposition

Durch die Eigenschaft der Superposition kann ein Qbit, im Gegensatz zu einem Bit, nicht nur entweder 0 oder 1 als Wert annehmen, sondern zusätzlich auch 0 und 1 zugleich. Sobald nachgemessen wird welchen Wert ein Qbit hat, geht die Superposition verloren und es nimmt mit einer Wahrscheinlichkeit abhängig von der derzeitigen Superposition entweder den Wert 0 oder 1 an. Zur Darstellung der möglichen Zustände kann die Bloch-Kugel verwendet werden. (Abb. 1)

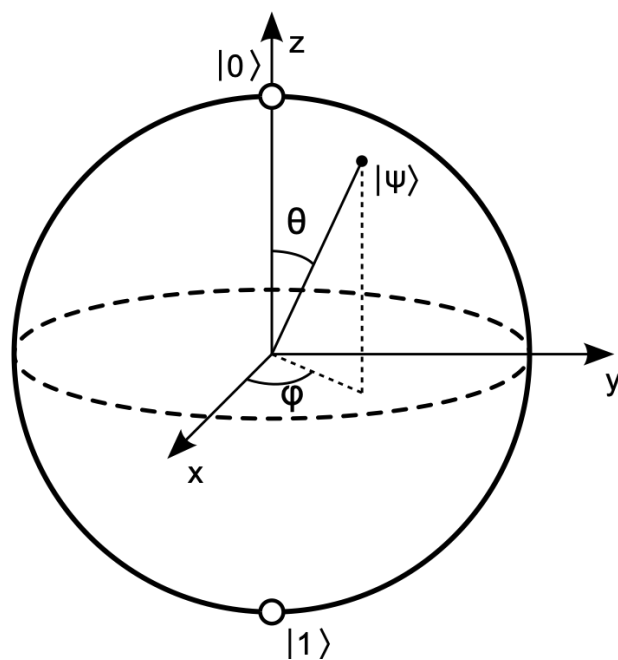


Abbildung 1: Ein Qbit kann als Zustand einen beliebigen Punkt auf der Bloch-Kugel annehmen. Wird der Zustand ausgelesen nimmt das Qbit entweder 0 (oben) oder 1 (unten) als Zustand an, je nach dem was näher ist. Quelle: [3]

Um eine bessere Vorstellung dieses Phänomens zu bekommen, kann das Doppelspalt Experiment betrachtet werden. Dabei werden Teilchen

wie z.B. Elektronen durch eine Abdeckung mit zwei spaltförmigen Öffnungen gefeuert. (Abb. 2) Auf einem Beobachtungsschirm hinter der Abdeckung treten Interferenzmuster auf. Dies wurde für Teilchen nicht erwartet, weil es bedeutet, dass sie sich wellenförmig bewegen. Wird dem Versuch ein Detektor hinzugefügt, der misst durch welchen der Spalte sich ein Teilchen bewegt, verschwinden die Interferenzmuster und der Beobachtungsschirm zeigt nur zwei Streifen hinter den Spalten. Aufgrund der Superposition kann sich ein Teilchen mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit durch beide Spalte gleichzeitig bewegen, beim Nachmessen wird ein Weg festgelegt.[1, 19]

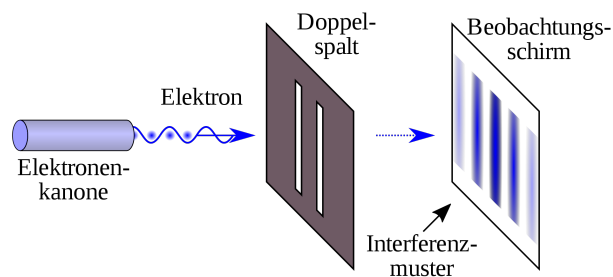


Abbildung 2: Doppelspaltexperiment, Quelle: [4]

Eine weitere Hilfe zum Verständnis der Superposition, stellt das Gedankenexperiment "Schrödingers Katze" dar.[21] Dabei ist anzunehmen eine Katze sei in eine Kiste gesperrt, mit einem Glasbehälter voller Gift und einem radioaktiven Material, das innerhalb einer bestimmten Zeitspanne mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit strahlt. Wird Strahlung des radioaktiven Materials gemessen, wird automatisch der Glasbehälter zerstört und die Katze stirbt. Ohne die Kiste zu öffnen, kann jedoch nicht bestimmt werden, ob dies der Fall war oder nicht. Die Katze ist deshalb zur gleichen Zeit sowohl tot als auch lebendig. Mit dem Öffnen der Kiste wird nachgemessen

sen und einer der beiden Zustände festgelegt.

2.3 Verschränkung

Zwei oder mehr Qbits können miteinander verschränkt werden. Dann verhalten sie sich abhängig voneinander, völlig unabhängig von ihrer Position im Raum. Werden beispielsweise zwei miteinander verschränkte Qbits betrachtet, die sich beide in einer Superposition befinden, kann keine Aussage über ihre Werte getroffen werden. Sobald eines der beiden gemessen wird, steht jedoch auch der Wert des anderen fest. Wird also eine 1 an einem Qbit gemessen steht fest, dass eine Messung des anderen ebenfalls eine 1 ergeben wird, egal wie weit die beiden Teilchen räumlich voneinander entfernt sind.

2.4 Interferenz

Die dritte wichtige Eigenschaft von Qbits ist die wohl verständlichste: Quanteninterferenz funktioniert sehr ähnlich der Welleninterferenz, die beispielsweise aus Noise-Canceling Kopfhörern bekannt ist. Dabei verstärken oder verringern sich die Amplituden von überlagernden Wellen, abhängig von deren Phase. In Quantencomputern wird Interferenz verwendet, um die Wahrscheinlichkeit zu erhöhen, dass ein encodierter Startzustand in ein gewünschtes Ergebnis überführt wird.[19]

2.5 Quanten-Gatter

Um diese besonderen Eigenschaften der Qbits in Berechnungen nutzen zu können, benötigt ein Quantencomputer außerdem besondere Operatoren. In klassischen Computern genügten Logik-Gatter, um mit Operationen wie “AND”, “OR”, “NOT” usw. Bits von einem beliebigen Zustand in jeden anderen überführen zu können. Auf

Qbits werden sogenannte Quanten-Gatter angewandt. Diese stimmen teilweise mit den logischen Operationen überein. Ein X-Gatter beispielsweise überführt ein Qbit von 1 in 0 und umgekehrt; es entspricht also einem logischen “NOT”. Auf der Bloch-Kugel (Abb. 1) lässt es sich durch eine Rotation um 180° um die X-Achse beschreiben. Diese Beschreibung lässt sich auch auf Y- und Z-Gatter übertragen, was verdeutlicht warum ein einfaches “NOT” für Quantencomputer nicht genügt. Neben vielen weiteren sollte noch das Hadamard-Gatter hervorgehoben werden. Es überführt ein Qbit in eine Superposition und bei erneuter Anwendung wieder zurück.

2.6 D-Wave Quantenoptimierer

Bisher wurde in diesem Paper die Funktionsweise von universellen Quantencomputern beschrieben, die prinzipiell programmiert und verwendet werden können, um jede Art von Berechnung durchzuführen. Die ersten Geräte, die bereits 2010 von D-Wave Systems als Quantencomputer verkauft wurden, werden teilweise auch als Quantenoptimierer bezeichnet, weil sie, bedingt durch eine andere Funktionsweise, nur Optimierungsprobleme lösen können. Hier kommt “Quantum Annealing” zum Einsatz, was sich am ehesten als “Abkühlen” oder “Entspannen” übersetzen lässt. Dabei wird sich zu Nutzen gemacht, dass die Qbits sich in einen Zustand mit minimalem Energieverbrauch versetzen, was der Lösung eines Optimierungsproblems entspricht. Neben den bereits erläuterten quantenmechanischen Eigenschaften spielt dabei auch der Tunneleffekt eine Rolle, der es Qbits ermöglicht auf ihrer Suche nach dem Energieminimum Barrieren zu durchtunneln statt sie überwinden zu müssen.[17, 14]

3 Anwendungsbereiche

Der Fokus auf der Suche nach möglichen Anwendungen von Quantencomputern liegt derzeit in den Bereichen Physik, Chemie und Informatik. Fortschritte in diesen Bereichen wirken sich i.d.R. schnell auf weitere Branchen wie z.B. Medizin, Finanzen oder Militär aus. In diesem Paper wird der Bereich der Informatik und dort speziell die KI ausführlicher betrachtet als andere.

3.1 Chemie und Physik

Wie bereits in der Einleitung erwähnt, sind Quantencomputer prädestiniert dazu, Quantensimulationen zu ermöglichen. Solche Simulationen ermöglichen einen Verständnissgewinn im Bereich physikalischer Gesetze. Was unter anderem zur Optimierung von Quantencomputern selbst beitragen würde. Quantencomputer sind auch für Simulationen anderer Art gut geeignet, weil sie aufgrund von Superpositionen enorm viele Möglichkeiten gleichzeitig betrachtet können. Mit derartigen Simulationen könnten neue Materialien oder Moleküle am Computer entworfen und getestet werden, um so z.B. bessere Solarzellen und Batterien zu entwickeln oder eine Metalllegierung zu finden, die verlustfrei Strom leitet. Noch weiter vorausplanend wird bereits über die Planung von Marskolonien oder Maschinen, die riesige Mengen Kohlendioxid aus der Luft filtern, nachgedacht.[23, 26, 9]

3.2 Informatik

In der Informatik können derartige Simulationen hilfreich sein, um Programme auf verschiedensten Input zu testen. Zum Auffinden von Bugs in der Steuerungssoftware von Kampfjets werden bereits jetzt D-Wave Systeme eingesetzt.[26]

Auch zur Koordination von Verkehrsflüssen wird bereits auf diese Quantenoptimierer zugegriffen. Z.B. in einer App von VW, die Besucher des Web Summit in Lissabon den schnellsten Heimweg berechnet.[9]

Für weitere Bereiche der Informatik existieren bereits Algorithmen, die diese revolutionieren können, sobald die universellen Quantencomputer leistungsfähig genug sind. So ist Grovers Algorithmus in der Lage unsortierte Datenbanken mit einer Komplexität von $O(\sqrt{N})$ zu durchsuchen, was im Zusammenhang mit "Big Data" eine große Rolle spielt.[6]

Mit Shors Algorithmus wird es auf entsprechenden Quantencomputern möglich große Zahlen in ihre Primfaktoren zu zerlegen. Damit wäre das asymmetrische Verschlüsselungsverfahren RSA gebrochen, das derzeit standardmäßig zum Aufbau von verschlüsselter Kommunikation über das Internet verwendet wird. Auch die mathematischen Probleme, die anderen asymmetrischen Verschlüsselungsverfahren zu Grunde liegen, können durch Shors Algorithmus effizient gelöst werden.[24] Unter dem Stichwort "Post-Quanten-Kryptographie" wird an Algorithmen geforscht, die auch Angreifern mit Zugang zu entsprechend leistungsfähigen Quantencomputern standhalten können. Bei sogenannter Quantenkryptografie werden dazu Eigenschaften der Quantenmechanik selbst mit einbezogen, was beispielsweise einen Quantenschlüsselaustausch ermöglicht. Dabei ist es aufgrund physikalischer Gesetze einem Dritten nicht möglich unbemerkt einen Schlüssel abzufangen.

Auch das Internet an sich könnte durch Quantencomputer revolutioniert werden, da sich durch verschränkte Qbits neue Möglichkeiten zur Datenübertragung ergeben. Sogar von Datenteleportation ist im Rahmen dieses QuantenInternets die Rede.[5]

3.3 Künstliche Intelligenz

Ein weiteres vielversprechendes Anwendungsgebiet für Quantencomputer ist die KI, insbesondere der Teilbereich maschinelles Lernen (ML). So hat sich “Quantum Machine Learning” bereits zum neuen Buzzword im Bereich der Quantencomputer entwickelt. Quantencomputer könnten auf zwei verschiedene Arten zu Fortschritten in ML beitragen: als spezielle Hardware und durch neue Algorithmen.[22]

3.3.1 Spezielle Hardware

Ähnlich wie GPUs (graphics processing units), die durch die Parallelisierung von Operationen das Training von neuronalen Netzen beschleunigen und dadurch DeepLearning ermöglichen, könnten auch Quantencomputer bestimmte Teilprobleme des ML beschleunigen.

Zu diesen Problemen zählt Lineare Algebra bzw. die Manipulation von Matrizen, die durch Quantencomputer exponentiell beschleunigt werden könnte. Mathematisch ausgedrückt führt ein Quanten-Gatter eine Multiplikation extrem großer Matrizen in einer einzelnen Operation durch. Da künstliche Neuronale Netze mathematisch ausgedrückt aus vielen aneinander gereihten Matrixmultiplikationen bestehen, wäre es von großem Vorteil diese zu beschleunigen.

Auch zum Feature Mapping können Quantencomputer verwendet werden. Dabei werden Eingabedaten in einen höherdimensionalen Raum transformiert, in dem sie besser unterscheidbar sind. Dies wird derzeit z.B. bei Support Vector Machines (SVMs) eingesetzt. Statt der tatsächlichen Transformation wird eine Kernel-Funktion verwendet, die unter Annahme der passenden Verteilung der Daten, das gleiche Ergebnis liefert. Mit Quantencomputern könnte das inne-

re Produkt der hochdimensionalen Matrizen tatsächlich berechnet werden und es müssten keine Annahmen über die Verteilung der Ausgangsdaten mehr getroffen werden. Es existiert bereits eine Umsetzung, die auf der Verschränkung von Qbits basiert und eine Klassifikation in zwei Klassen auf einem Quantencomputer der IBM realisiert. [8]

Auch zum Sampling sind Quantencomputer gut geeignet, weil jeder Quantencomputer prinzipiell ein Sampler ist, der mit einer einfachen Wahrscheinlichkeitsverteilung über alle möglichen Ergebnismessungen anfängt, eine kompliziertere Verteilung berechnet und durch eine Messung ein Ergebnis sampelt. Dies kann hilfreich beim stochastischen Lernen sein, das z.B. mit Boltzmann-Maschinen umgesetzt wird.[16, 22]

Das nichtparametrische K-Nearest-Neighbor Klassifikationsverfahren, muss in einer naiven Implementierung, für ein zu klassifizierendes Objekt die Distanz zu allen Objekten in den Trainingsdaten berechnen, um die nächsten Nachbarn zu ermitteln. Auf Quantencomputern könnte dieser Vorgang stark beschleunigt werden, indem die nächsten Nachbarn mit Grovers Algorithmus gesucht werden.[28]

Wie bereits erwähnt sind Quantencomputer und die Quantenoptimierer von D-Wave Systems besonders geeignet Optimierungsprobleme zu lösen. Auch die meisten Problemstellungen, die derzeit durch ML gelöst werden, sind Optimierungsprobleme. Es ist also naheliegend, dass auch hier Quantencomputer sehr hilfreich sein können. Es gibt bereits mehrere Umsetzungen von ML-Tasks auf D-Wave Systemen, wie die Klassifikation von Straßenbildern in “Auto” und “kein Auto” oder Protonenkollisionen in “Higgs Boson” und “kein Higgs Boson”. Außerdem wurde das Einordnen mehrerer Städte in zwei Regionen auf einem Quantenoptimierer umgesetzt, was beson-

ders komplex ist weil eine Einordnung alle anderen beeinflusst. Auch ein GAN (Generative Adversarial Network), das handgeschriebene Ziffern von 0 bis 9 erkennen und anschließend selbst erzeugen konnte, wurde auf einem D-Wave System umgesetzt. Bei diesen Aufgaben wurden manche Teilaufgaben von klassischen Computern gelöst und der Quantencomputer beispielsweise zur Lösung einer schwer zu berechnenden Kostenfunktion hinzugezogen.[16, 22]

3.3.2 Neue Algorithmen

Statt vorhandene ML-Modelle mit Hilfe von Quantencomputern zu beschleunigen und zu optimieren, gibt es auch Forschungen, die neue Ansätze erproben, welche ausschließlich auf Quantencomputern umsetzbar sind.

Statt die zuvor erwähnten Boltzmann-Maschinen mit Samples nach klassischen Boltzmann-Verteilungen zu trainieren, wurden bessere Ergebnisse erzielt, wenn stattdessen nach der natürlichen Quantenverteilung gesampelt wurde.

Ein weiteres Beispiel für spezifische Quanten-ML-Modelle sind sogenannte "Variational quantum circuits". Dabei wird ein programmierbarer Quantencomputer an sich als überwacht ML-Modell betrachtet, das aus einem Input x und trainierbaren Variablen θ eine Prediction y berechnet: $y = f(x, \theta)$ Wobei die Parameter θ durch klassische Optimierung angepasst werden.[22]

4 Probleme

Nachdem im vorigen Abschnitt aufgezeigt wurde, wie viel Potential Quantencomputer für diverse Anwendungen haben, wird nun darauf eingegangen welche Probleme es zu lösen gibt, um solche Anwendungen tatsächlich umsetzen zu können.

Außerdem werden einige Lösungsansätze betrachtet.

4.1 Hardware

Wie bereits zu Beginn des Papers erläutert, können Qbits auf verschiedene Arten aus unterschiedlichen Teilchen gewonnen werden. Derzeit am weitesten fortgeschritten (gemessen an der Anzahl an programmierbaren Qbits) sind Quantencomputer auf Basis von supraleitenden Metallen. Die Quantencomputer von IBM (20 Qbits)[20] und Google (72 Qbits)[11] basieren auf dieser Technologie. Diese supraleitenden Metalle, wie Niobium oder Aluminium, haben die Eigenschaft, dass ihr elektrischer Widerstand beim Unterschreiten einer Sprungtemperatur auf 0 fällt. Damit Qbits entstehen müssen die Chips also stark gekühlt werden, da diese Sprungtemperatur bei 15°mK (etwa -273°C) liegt.[10] Um die relativ kleinen Silicium-Träger, auf denen sich die supraleitenden Metalle befinden, derart kühlen zu können, wächst der gesamte Quantencomputer auf Schrankgröße an.

Eine vielversprechende Alternative sind einzelne Atome, genauer gesagt Ionen, im Vakuum, die beim Auslesen durch Laser sichtbar gemacht werden. Diese Funktionsweise ist vergleichbar mit Atomuhren.[15]

An der Universität Stuttgart wurde an Qbits auf Basis von Diamanten geforscht, die keine besonderen Ansprüche an ihre Umgebung stellen.[29, 27] Aktuell gibt es jedoch keine Meldungen zu Fortschritten, die auf dieser Technologie basieren und vergleichbar mit dem Stand der zuvor erläuterten Quantencomputern sind.

Neben diesen drei Ansätzen gibt es Forschungen zur Umsetzung von Quantencomputern, die auf mindestens 15 weiteren verschiedenen Methoden zur Erzeugung der Qbits beruhen.[18] Dies zeigt,

dass es sich dabei noch immer um eine sehr junge Technologie handelt und nicht geklärt ist welche Variante langfristig die effizienteste ist.

4.2 Dekohärenz

Das größte Problem derzeitiger Quantencomputer ist die Fehleranfälligkeit von Qbits. Der State eines Qbits wird durch Rauschen so stark beeinflusst, dass eine Berechnung nach kurzer Zeit komplett verfälscht wird. Googles Quantenprozessor kann derzeit rund $30\mu\text{s}$ am Stück genutzt werden, das neueste Modell von IBM schafft etwas über $100\mu\text{s}$. [23, 13] Die Quantencomputer werden bereits isoliert. Dennoch werden die Qbits durch die allgegenwärtige kosmische Hintergrundstrahlung oder benachbarte Qbits beeinflusst. [10]

4.3 Programmierung

Ein weiteres Problem mit Quantencomputern ist, dass sie sehr komplex zu programmieren sind. Bereits die Eingabe von klassischen Daten in einen Quantencomputer ist nicht trivial. Meist kommt eine maschinennahe Programmiersprache zum Einsatz, die mit Assembler vergleichbar ist. Es gibt bereits Schnittstellen in höheren Programmiersprachen wie Python mit Libraries, die einzelne Konzepte abstrahieren. Dennoch ist es nötig die Funktionsweise von Quantencomputern zu verstehen, um sie programmieren und ihre Vorteile nutzen zu können.

4.4 Lösungsmöglichkeiten

Für die eben genannten Probleme, die es für Quantencomputer noch zu lösen gilt, gibt es bereits diverse Lösungsmöglichkeiten. Am einfachsten ist das Problem der Hardwareanforderungen

zu lösen. Da Quantencomputer nur für bestimmte Probleme sinnvoll einzusetzen sind, ist es nicht nötig sie in derzeitige Computer integrieren zu können. Es genügt ein Cloud-Zugang, wie er bei IBM bereits umgesetzt ist. Ob es jemals sinnvoll oder technisch möglich wird Quanten-PCs oder Laptops zu verwenden ist nicht absehbar.

Es wurde bereits mathematisch bewiesen, dass das Problem der Fehleranfälligkeit durch sogenannte "logische Qbits" gelöst werden kann. Dabei werden mehrere physische Qbits zusammengefasst, um daraus ein fehlertolerantes logisches Qbit berechnen zu können. Derzeit wären etwa 5.000 bis 500.000 physische Qbits für ein logisches Qbit nötig. Außerdem gibt es viele weitere Forschungsrichtungen, um einzelne physische Qbits fehlertoleranter zu machen oder die Fehlerkorrektur zu verbessern und dadurch die Anzahl an benötigten physischen Qbits für ein logisches Qbit zu senken.

4.4.1 KI für Quantencomputer

Ein solcher Ansatz für bessere Fehlerkorrektur basiert auf KI und funktioniert ähnlich der KI, die den Weltmeister in AlphaGo geschlagen hat. Allerdings spielt die KI jetzt ein Spiel gegen das Rauschen, das versucht Fehler zu verursachen und hat zum Ziel diese Fehler zu korrigieren. Besonders schwer wird dieses Spiel, weil die KI das aktuelle Spielbrett nicht sehen darf. Dies entspräche einer Messung eines Qbits und würde dessen Zustand zerstören. Stattdessen dürfen nur hin und wieder benachbarte Qbits betrachtet werden, die die gleiche Berechnung durchführen, also genau diese zusätzlichen Qbits die zur Fehlerkorrektur benötigt werden und deren Anzahl möglichst gering gehalten werden soll. [2]

Auch das Problem der komplexen Programmierung von Quantencomputern wird versucht

durch den Einsatz von KI zu lösen. Dazu werden KIs trainiert, die automatisch klassische Daten in Quantenzustände codieren oder Problemstellungen in neue Quantenalgorithmen übersetzen sollen.

Quantencomputer erzeugen stetig Daten, wie die Ein- und Ausgaben oder die Performanz der Gatter. Auch diese Daten werden mittels KI gestützter Methoden ausgewertet, mit dem Ziel die Entwicklung der Hardware in Quantencomputer zu verbessern.[22]

5 Ausblick

In diesem Paper wurde gezeigt, dass für leistungsstarke Quantencomputer sowohl mehr Qbits als auch fehlertolerantere Qbits nötig sind. Außerdem wurde verdeutlicht, dass es sich bei Quantencomputern um eine sehr junge Technologie handelt. Deshalb gibt es nur recht ungenaue Äußerungen seitens der Fachexperten, wann die potentiellen Anwendungen tatsächlich umgesetzt werden können.

2017 gab der Quantenforscher Dr. Michael Marthaler vom Karlsruher Institut für Technologie in einer Präsentation[14] einen Ausblick auf die Entwicklung von Quantencomputern: Davon ausgehend, dass sich die Anzahl an physischen Qbits wie bei klassischen Bits jährlich verdoppeln wird und es keine großen Durchbrüche in deren Fehlertoleranz oder -korrektur geben wird, wird es etwa 17 bis 24 Jahre dauern bis es Quantencomputer mit 100 logischen Qbits gibt. Auf diesen können viele der potentiellen Anwendungen umgesetzt werden. Marthaler weist außerdem darauf hin, dass es wichtig ist Anwendungen zu finden, die keine komplette Fehlerfreiheit benötigen und dadurch bereits deutlich früher mit etwa 100 bis 1000 physischen Qbits umgesetzt

werden können. Er selbst forscht auf diesem Gebiet und versucht Quantensimulationen zu realisieren.(Abb. 3)

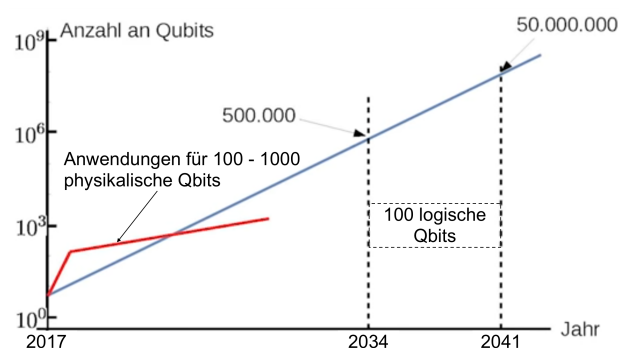


Abbildung 3: Ausblick, Nach: [14]

Ein weiterer Meilenstein auf dem Weg zu nutzbringenden Quantencomputern ist die “Quantum Supremacy”. Diese gilt als erreicht sobald ein Quantencomputer irgendeine Aufgabe schneller berechnen kann als ein klassischer Supercomputer. Die Chancen stehen gut, dass dieses Ziel noch in diesem Jahr erreicht wird.[7]

Quellen

- [1] Anil Ananthaswamy. *Through two doors at once. The elegant experiment that captures the enigma of our quantum reality*. Dutton, Aug. 2018.
- [2] *Artificial intelligence controls quantum computers*. Max-Planck-Gesellschaft, Okt. 2018. URL: <https://www.mpg.de/12322336/artificial-intelligence-controls-quantum-computers>.
- [3] *Bloch sphere*. Wikipedia. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Bloch_sphere.
- [4] *Doppelspaltexperiment*. Wikipedia. URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Doppelspaltexperiment>.
- [5] Shohini Ghose. *Quantum computing explained in 10 minutes*. 2019. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=QuR969uMICM>.
- [6] Lov K. Grover. "A Fast quantum mechanical algorithm for database search". In: (1996). arXiv: [quant-ph/9605043](https://arxiv.org/abs/quant-ph/9605043) [quant-ph].
- [7] Kevin Hartnett. *Quantum Supremacy Is Coming: Here's What You Should Know*. Juli 2019. URL: <https://www.quantamagazine.org/quantum-supremacy-is-coming-heres-what-you-should-know-20190718/>.
- [8] Vojtěch Havlíček u. a. "Supervised learning with quantum-enhanced feature spaces". In: *Nature* 567.7747 (2019), S. 209–212. DOI: [10.1038/s41586-019-0980-2](https://doi.org/10.1038/s41586-019-0980-2). URL: <https://doi.org/10.1038/s41586-019-0980-2>.
- [9] Christiaan Hetzner. *How VW, Bosch, Ford, Daimler aim to gain from quantum computing*. Mai 2019. URL: <https://europe.autonews.com/automakers/how-vw-bosch-ford-daimler-aim-gain-quantum-computing>.
- [10] *IBM Q Experience*. URL: <https://quantum-computing.ibm.com/>.
- [11] Julian Kelly. *A Preview of Bristlecone, Google's New Quantum Processor*. März 2018. URL: <https://ai.googleblog.com/2018/03/a-preview-of-bristlecone-googles-new.html>.
- [12] Bernd Kling. *Nvidia-CEO: Moore's Law ist am Ende*. Jan. 2019. URL: <https://www.zdnet.de/88351453/nvidia-ceo-moores-law-ist-am-ende/>.
- [13] Frederic Lardinois. *IBM unveils its first commercial quantum computer*. 2019. URL: <https://techcrunch.com/2019/01/08/ibm-unveils-its-first-commercial-quantum-computer/>.
- [14] Michael Marthaler. *Der Quantencomputer: Vision und Wirklichkeit*. 2017. URL: https://www.youtube.com/watch?v=FLltg_fRWus.
- [15] Christopher Monroe. *Preparing for a Quantum Leap*. Sep. 2018. URL: <https://events.technologyreview.com/video/watch/christopher-monroe-maryland-quantum-computing/>.
- [16] George Musser. *Job One for Quantum Computers: Boost Artificial Intelligence*. Jan. 2018. URL: <https://www.quantamagazine.org/job-one-for-quantum-computers-boost-artificial-intelligence-20180129/>.

- [17] *Quantum Computing. How D-Wave Systems Work*. D-Wave Systems. URL: <https://www.dwavesys.com/quantum-computing>.
- [18] *Quantum computing*. Wikipedia. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Quantum_computing.
- [19] *Quantum Computing: Untangling the Hype*. The Royal Institution. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=wE10CXvaDtc>.
- [20] *Quantum systems*. IBM. URL: <https://www.research.ibm.com/ibm-q/technology/devices/>.
- [21] Erwin Schrödinger. “Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik”. In: *Naturwissenschaften* 23 (1935).
- [22] Maria Schuld. *Quantum Machine Learning 1.0. A big future for small devices*. Juni 2018. URL: <https://medium.com/xanaduai/quantum-machine-learning-1-0-76a525c8cf69>.
- [23] Thomas Schulz. *Quantencomputer - Diese Maschine wird unser Leben ändern*. Mai 2019. URL: <https://www.spiegel.de/plus/quantencomputer-diese-maschine-wird-unser-leben-aendern-a-00000000-0002-0001-0000-000163955854>.
- [24] Peter W. Shor. “Polynomial time algorithms for prime factorization and discrete logarithms on a quantum computer”. In: *SIAM J. Sci. Statist. Comput.* 26 (1997), S. 1484. DOI: 10.1137/S0097539795293172. arXiv: [quant-ph/9508027](https://arxiv.org/abs/quant-ph/9508027) [quant-ph].
- [25] “Simulating Physics with Computers”. In: *International Journal of Theoretical Physics* 21 (1982), S. 467–488. URL: <https://people.eecs.berkeley.edu/~christos/classics/Feynman.pdf>.
- [26] Philipp Alvares de Souza Soares. *Wettlauf um den Quantencomputer. Das nächste große Ding*. Aug. 2016. URL: <https://www.spiegel.de/netzwelt/web/quantencomputer-die-naechste-dimension-der-it-a-1109142.html>.
- [27] Matthias Steiner. “Towards diamond-based quantum computers”. Diss. University of Stuttgart, 2009. DOI: <http://dx.doi.org/10.18419/opus-5133>.
- [28] Nathan Wiebe, Ashish Kapoor und Krysta Svore. “Quantum Algorithms for Nearest-Neighbor Methods for Supervised and Unsupervised Learning”. In: *Quantum Information & Computation* (2014).
- [29] Jörg Wrachtrup. *Quantencomputer: Information ist Physik*. 2014. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=Darh4dzW6oI>.