

### Adiabatischer Quantencomputer

### Prinzip Quantenparallelität

## Aktueller Stand

Es gibt derzeit verschiedenste Ansätze für die Art der verwendeten Qubits, wobei synthetische Moleküle, Photonen und Supraleitende Mikrochips derzeit eine große Rolle spielen. Bereits 2001 wurde mit einem 7-Qubit-System aus eigens synthetisierten Molekülen erstmals die Faktorisierung einer Zahl erfolgreich ausgeführt, ein Algorithmus, an dem bis heute gearbeitet wird, und 2016 wurde mittels verschränkter Photonen eine sogenannte Quantenteleportation über ein städtisches Glasfasernetz durchgeführt<sup>[2,3]</sup>. Dabei handelt es sich um die Übertragung eines Quantenzustands zwischen Sender und Empfänger, wobei kein physischer Überträger ausgetauscht, sondern die Information direkt mittels Quantenverschränkung übertragen wird<sup>[3,8]</sup>.

Kommerziell sind aktuell sogenannte adiabatische Quantencomputer oder „Quantum Annealing Computer“, die einen beschränkten, spezialisierten Funktionsumfang haben und nicht Turing-vollständig sind. Mithilfe dieser Rechner können beispielsweise globale Maxima oder Minima komplexer Funktionen bestimmt werden oder optimale Lösungen für Probleme mit extrem vielen Einflussfaktoren bestimmen. So wurden beispielsweise mit Systemen der Firma D-Wave bereits in Kooperationen vereinfachte Probleme der Missionsplanung für Satelliten und des Luftverkehrsmanagements gelöst<sup>[4]</sup>. 2016 brachte D-Wave ein aktuelles System mit 2000 Qubits auf den Markt, das mit supraleitenden Mikrochips arbeitete. Obwohl die Quantenrechner theoretisch erheblich schneller als konventionelle Rechner sein sollten, konnte es bisher in der Praxis nicht abschließend nachgewiesen werden<sup>[5]</sup>. Der Aufbau des aktuellen D-Wave 2000Q ist in der oberen Abbildung gezeigt.

Ein universeller, Turing-kompletter Quantenrechner konnte bisher nicht realisiert werden, da aufgrund der benötigten Mechanismen zur Fehlerkorrektur, quantenmechanischen Effekten wie der Dekohärenz und der Relaxation von Quantensystemen keine ausreichend großen Qubit-Systeme erreicht werden konnten.<sup>[1,9]</sup>

## Grundlagen

In der klassischen Informationsverarbeitung werden alle Daten in Form von Bits gespeichert, digitalen Einheiten, die entweder den Zustand 0 oder 1 einnehmen können. Durch die Manipulation dieser Bits können Informationen verarbeitet und später ausgelesen werden. Bei Quantencomputern werden Informationen stattdessen in Systemen aus Quanten-Bits oder „Qubits“ gespeichert und prozessiert. Der entscheidende Unterschied zu einem klassischen Bit besteht darin, dass ein Qubit neben den beiden Zuständen 0 und 1 auch eine Superposition der beiden Zustände einnehmen kann, wobei es sich um einen Zustand zwischen 0 und 1 handelt. Wird der Zustand des Qubits gemessen, ist es mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit der Zustand 0 oder mit der entsprechenden Gegenwahrscheinlichkeit der Zustand 1. Ein System aus Qubits wird durch Vektoren in der Form  $|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$  beschrieben, wobei sich der Superpositionszustand  $|\psi\rangle$  aus der Linearkombination der beiden Zustände  $|0\rangle$  und  $|1\rangle$  mit den jeweiligen Wahrscheinlichkeiten  $\alpha$  und  $\beta$  ergibt.<sup>[1]</sup>

Die Datenverarbeitung erfolgt in einem Quantencomputer, indem ein System aus mehreren Qubits durch quantenmechanische Operationen gezielt so beeinflusst wird, dass sich die Wahrscheinlichkeiten der jeweiligen Zustände der Qubits entsprechend der Operationen verändern. Beispielsweise würde eine Negation eines Qubits die Wahrscheinlichkeiten für die Zustände  $|0\rangle$  und  $|1\rangle$  vertauschen. Die tatsächliche quantenmechanische Beeinflussung, um diese logische Operation auszuführen, ist abhängig von der Art und Anzahl der eingesetzten Qubits.<sup>[1,9]</sup>

Viele Quantenrechner verwenden für die Manipulation der Qubits als Gesamtsystem den Effekt der Quantenverschränkung, bei dem erreicht wird, dass die Zustände von Qubits voneinander abhängig sind. Ein einfaches Beispiel ist die Verschränkung von zwei Elektronen bezüglich ihres Spins. Nimmt ein Elektron einen bestimmbaren Spin an, besitzt das damit verschränkte Elektron automatisch einen gegensätzlichen Spin. Diese Verschränkung kann künstlich herbeigeführt werden und ist Grundlage für viele Algorithmen der Quanteninformatik.<sup>[1]</sup>

## Anwendungsgebiete und Vorteile

Aufgrund der Superposition der Qubits ist es möglich, mehrere Zustände pro Qubit zu bearbeiten und aufgrund dieser Quantenparallelität schneller große Mengen von Möglichkeiten zu bearbeiten. Das Prinzip der Quantenparallelität ist in der unteren Abbildung abgebildet. Weiterhin ist es mit Quantenrechnern möglich, Wechselwirkungen zwischen Atomen und Molekülen realitätsgetreu zu rekonstruieren und zu untersuchen, was besonders bei der Untersuchung und Simulation von Biomolekülen Anwendung findet. Aktuell wird die Möglichkeit von sogenannten „Quanten-Simulatoren“ diskutiert, die speziell zur Erforschung von Wechselwirkungen innerhalb von realen Systemen eingesetzt werden sollen.<sup>[6,7]</sup>

Weitere Anwendungen der Quanteninformatik sind die sichere Übertragung von Informationen mittels Quantenteleportation und die Faktorisierung von großen Zahlen mithilfe von Shors Algorithmus, wodurch viele aktuelle Verschlüsselungen einfach aufgelöst werden könnten. Weiterhin wird erwartet, dass Suchalgorithmen und Optimierungsaufgaben einige tausend Mal schneller ausgeführt werden können als mit konventioneller Hardware.<sup>[5]</sup>

## Quellen

[1] David McMahon: Quantum Computing Explained, Wiley-Interscience, 2008

[2] IBM Research Division: IBM's Test -Tube Quantum Computer Makes History; First Demonstration Of Shor's Historic Factoring Algorithm, ScienceDaily, 2001

[3] Frédéric Grosshans: Quantum communications: Teleportation becomes streetwise, Nature Photonics 10, 2017

[4] Lobe, Elisabeth: Ein Quantensprung? - Neuste Entwicklungen im Quantencomputing, 10. Forschungstag Raumfahrt, DLR Köln-Porz, 2017

[5] K. Karimi, N. Dickson, F. Hamze et al.: Investigating the Performance of an Adiabatic Quantum Optimization Processor, arXiv:1006.4147 [quant-ph], 2011

[6] SA Harris, VM Kendon: Quantum-assisted biomolecular modelling, Philosophical Transactions 368, 2010

[7] T.H. Johnson, S.R. Clark, D. Jaksch: What is a quantum simulator?, EPJ Quantum Technol. 1: 10, 2014

[8] Niklas Johansson, Jan-Åke Larsson: Realization of Shor's Algorithm at Room Temperature, arXiv: 1706.03215 [quant-ph], 201

[9] A. Trabesinger: Quantum Leaps, bit by bit, Nature 543, 2017