



Rechenkunst mit Quantentricks

Quantencomputing mit gespeicherten Ionen

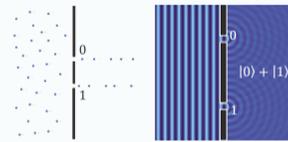
Qubits

Ein Qubit kann, ähnlich wie ein Bit im klassischen Computer, bei einer Messung in zwei Zuständen $|0\rangle, |1\rangle$ vorgefunden werden. Im Gegensatz zum klassischen Bit jedoch ist auch ein Superpositionszustand $|0\rangle + |1\rangle$ möglich, in dem das Qubit sich in beiden Zuständen gleichzeitig befinden kann, und dann bei einer Messung zufällig mal im einen, mal im anderen vorgefunden wird.

$0, 1 \rightarrow |0\rangle, |1\rangle$ $|\psi_{\text{sup}}\rangle \sim |0\rangle + |1\rangle$
 ▲ Bits und Qubits ▲ Superpositionszustand

Quanten-Interferenz

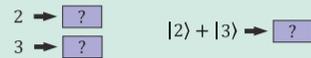
Anders als beim Würfeln ist es jedoch nicht nur einfach unbekannt, welches Ergebnis vorgefunden wird, das Teilchen befindet sich tatsächlich in beiden Zuständen gleichzeitig. Analog dem klassischen Bit muss ein Teilchen ein Hindernis entweder auf der eine oder der anderen Seite passieren. Eine Welle hingegen kann das Hindernis auf beiden Seiten gleichzeitig umströmen. Diese Gleichzeitigkeit offenbart sich in charakteristischen Interferenzmustern hinter dem Hindernis.



▲ Klassische Teilchen (links) durchqueren entweder den einen oder den anderen Spalt. Eine Welle oder ein quantenmechanisches Teilchen (rechts) kann beide Spalte gleichzeitig durchqueren, erkennbar am charakteristischen Interferenzmuster.

Quanten-Parallelismus

Durch die Möglichkeit der Superposition kann ein Quantencomputer mehreren möglichen Lösungen gleichzeitig nachgehen. Dies erlaubt es beispielsweise, große Zahlen in Primfaktoren zu zerlegen und zwar sehr viel effizienter und damit schneller, als ein klassischer Computer das kann.



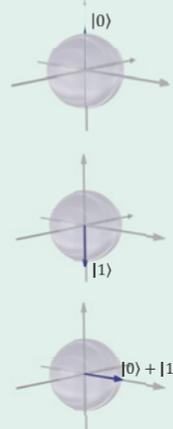
▲ Die klassische Primfaktorenzerlegung der Zahl 15 muss jeden Teiler bis zur Größe $\sqrt{15}$ überprüfen. Quantenmechanisch lässt sich eine Superposition der möglichen Teiler in einem Durchgang prüfen.

▼ Quantenalgorithmen können beim maschinellen Lernen effektiver, also schneller entscheiden: Der intelligente Agent erlernt eine Lösungsstrategie, indem Handlungsmuster belohnt werden, welche sich in der Analyse als vielversprechend herausstellen.



Ionen-Qubits

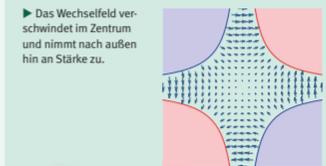
In unseren Quantencomputern sind die Qubits als Spinzustände eines Elektrons in Ionen realisiert. Wie beim Nordpol eines kleinen Magneten kann der Spin quasi nach oben oder unten zeigen, oder, als Superposition, auch in jede beliebige andere Richtung. Die Ausrichtung des Spins kann mit Feldern beliebig geändert werden.



▲ Ein Spin-Qubit in den Zuständen $|0\rangle, |1\rangle$ und der Superposition $|0\rangle + |1\rangle$

Ionenfalle

Die Ionen werden von einem Wechselfeld in der Falle gehalten. Dieses Wechselfeld ist so geformt, dass es an einem Ort verschwindet und umso stärker wird, je weiter man sich von diesem Ort entfernt. Die Ionen werden vom Wechselfeld zum Schwingen gezwungen, und halten sich vorzugsweise am Ort kleinster Schwingung auf, also dort, wo das Wechselfeld verschwindet.



► Das Wechselfeld verschwindet im Zentrum und nimmt nach außen hin an Stärke zu.
 ◀ Dreidimensional segmentierte Ionenfalle mit schematischem Kühlaser.



► Ionenkristalle: eindimensionale Kette und dreidimensionaler Ionenkristall
 Das Ausstellungsstück zeigt eine segmentierte Ionenfalle, in der Kristalle aus geladenen Partikeln gefangen werden können.

Quantencomputer



▲ Ein Quantencomputer mit durch Mikrowellen manipulierten Ionen

Der Transport, sowie das Teilen und Zusammenfügen von Ionenkristallen sind elementare Operationen für einen skalierbaren Quantenrechner mit Ionen, die auch am Ausstellungsstück beobachtet werden können.

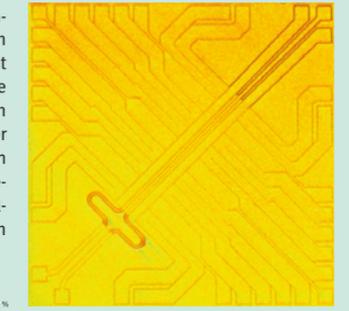
Zweidimensionale, sogenannte planare Ionenfallen, erlauben die einfache Konstruktion und Fabrikation skalierbarer komplexer Fallen-Geometrien sowie die Integration von Mikrowellen und Magnetfeldern.

Skalierung

Ein vielversprechender Ansatz, Quanteninformationsverarbeitung in Ionenfallen mit vielen Qubits zu realisieren, besteht in der Unterteilung von Fallen in viele Speicher- und Prozessorsegmente. In diesen können Register handhabbarer Größe manipuliert werden, der Austausch von Information zwischen Registern geschieht z. B. durch Ionen-transport, welcher den Zustand mit einer Fidelity von 99.9994(6)% übertragen kann.



▲ Ionen können 20 Millionen mal verlustfrei über eine Strecke von fünf Kilometern transportiert werden. So konnte man messen, dass quantenmechanische Zustand pro Transportoperation einen Fehler von unter 0.0006% erleidet.



▲ Planare Falle mit segmentierten DC-Elektroden und Spulen, sowie Elektroden zur Erzeugung von Radiofrequenz- und Mikrowellenfeldern