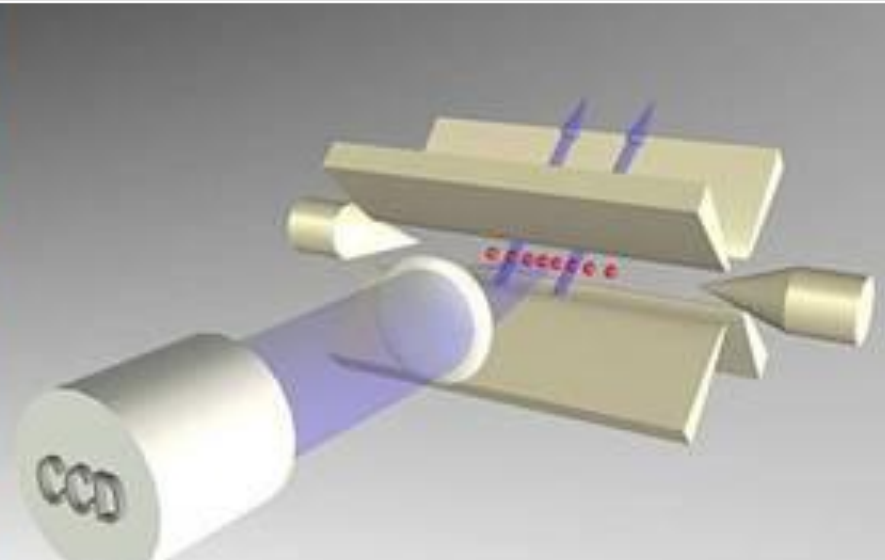


Quantencomputing mit Ionenfallen

Hauptseminar: Physik des Quantencomputers



Inhalt

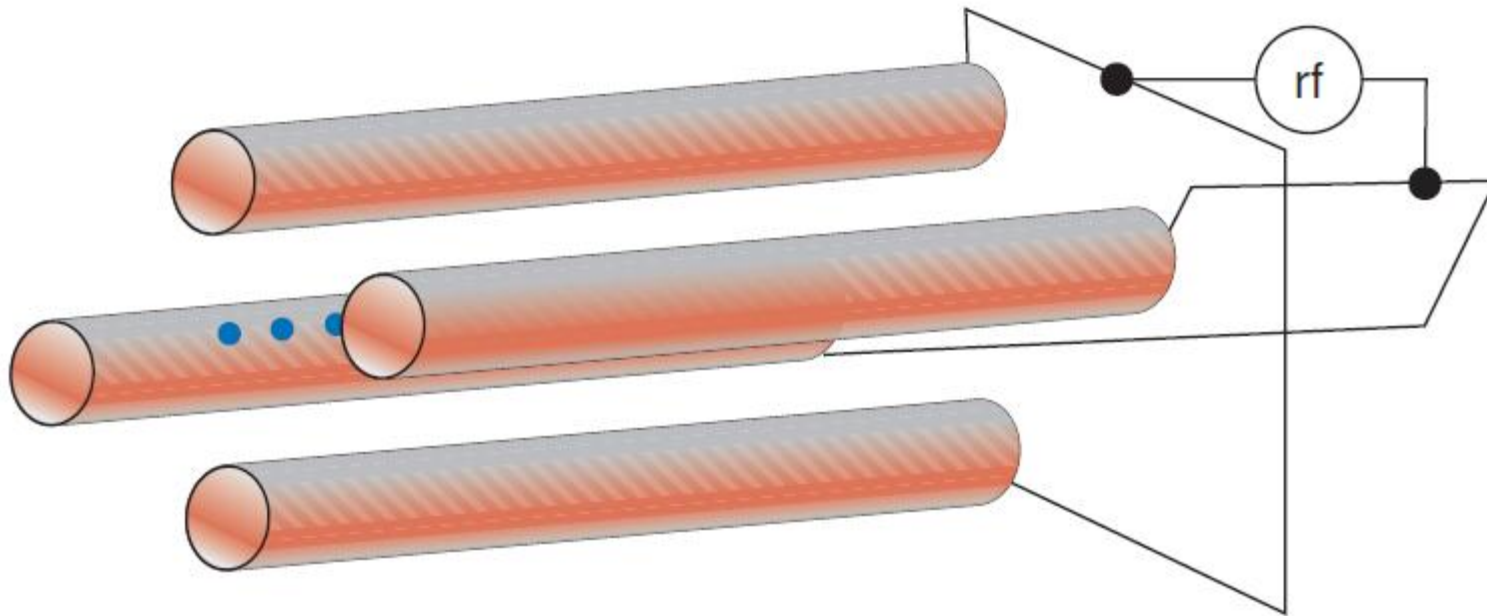
- Ionenfallen → Bsp.: die lineare Paul-Falle
- DiVincenzo-Kriterien
- Umsetzung bei Ionenfallen
- Experimentelle Erfolge
- Zusammenfassung

Ionenfallen >> i. Qubits >> ii. Initialisierung >> iii. Kohärenzzeit >> iv. Quantengatter >> v. Auslesen >> Zusammenfassung

Allgemeines über Ionenfallen

- **Ziel:** Ionen frei schwebend an einem Ort „gefangen“ zu halten
- **Verwende:** elektrische und magnetische Felder
- **Anwendung:** Massenspektrometer, Quantencomputing
- z.B.: Penning-Falle, Paul-Falle

Die Lineare Paul-Falle

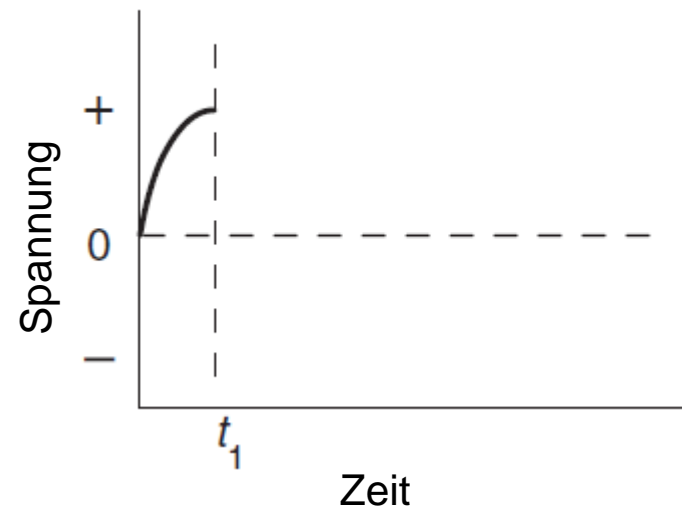
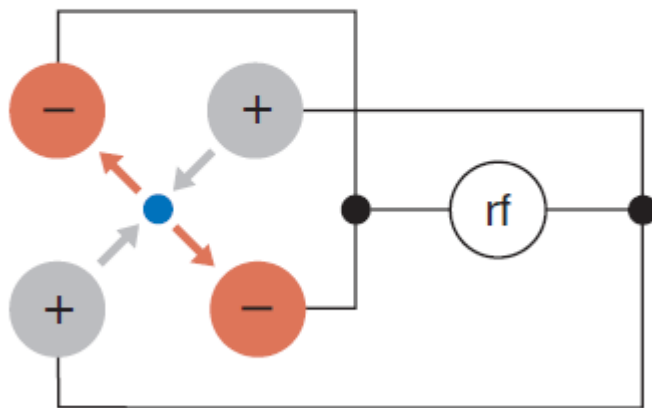


Holzschteier: Ion-Trap Quantum Computation. In: Los Alamos Science Nr. 27, 2002

Ionenfällen ➤ i. Qubits ➤ ii. Initialisierung ➤ iii. Kohärenzzeit ➤ iv. Quantengatter ➤ v. Auslesen ➤ Zusammenfassung

Die Lineare Paul-Falle

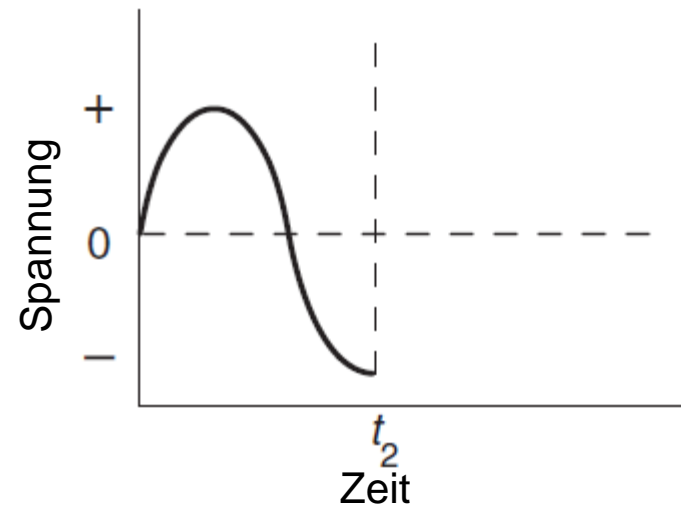
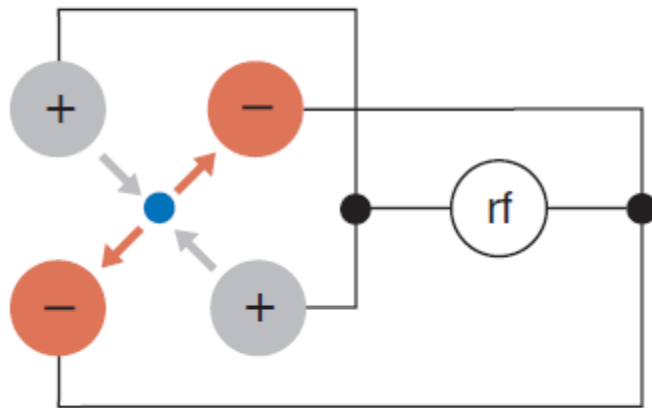
$t = t_1$



Ionenfällen >> i. Qubits >> ii. Initialisierung >> iii. Kohärenzzeit >> iv. Quantengatter >> v. Auslesen >> Zusammenfassung

Die Lineare Paul-Falle

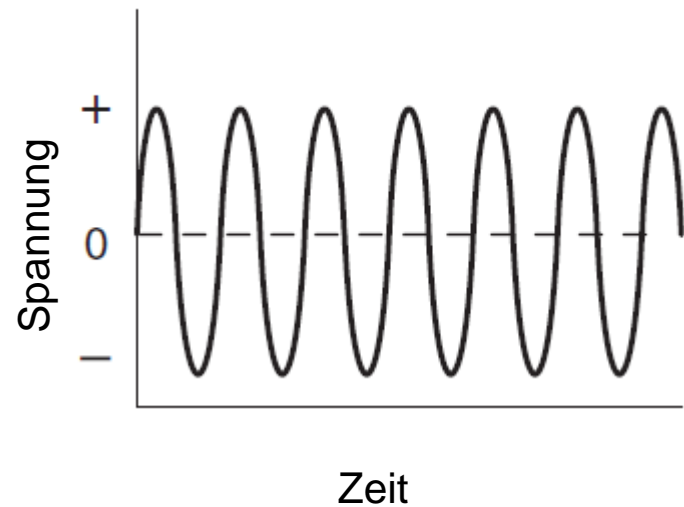
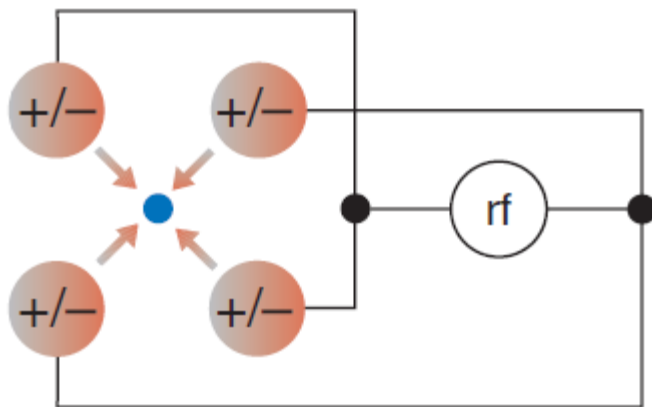
$t = t_2$



Ionenfällen >> i. Qubits >> ii. Initialisierung >> iii. Kohärenzzeit >> iv. Quantengatter >> v. Auslesen >> Zusammenfassung

Die Lineare Paul-Falle

zeitlich gemittelt



Ionenfalle >> i. Qubits >> ii. Initialisierung >> iii. Kohärenzzeit >> iv. Quantengatter >> v. Auslesen >> Zusammenfassung

Die Lineare Paul-Falle

■ Potentiale: $\Phi_{DC} = \kappa U_0 (z^2 - \frac{1}{2}(x^2 + y^2))$

$$\Phi_{RF} = \frac{1}{2} (V_0 \cos(\Omega_T t) + U_r) (1 + \frac{1}{R^2} (x^2 - y^2))$$

■ Hamiltonoperator:

$$H = \sum_{i=1}^N \frac{M}{2} \left(\omega_x^2 x_i^2 + \omega_y^2 y_i^2 + \omega_z^2 z_i^2 + \frac{|\vec{p}_i|^2}{M^2} \right) + \sum_{i=1}^N \sum_{j>i} \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 |\vec{r}_i - \vec{r}_j|}$$

Weinland et. al.: Experimental Issues in Coherent Quantum-State Manipulation of Trapped Atomic Ions. In: Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, Volume 103, Number 3, May–June 1998

Ionenfalle >> i. Qubits >> ii. Initialisierung >> iii. Kohärenzzeit >> iv. Quantengatter >> v. Auslesen >> Zusammenfassung

Die DiVincenzo-Kriterien

- i. Wohldefinierte Qubits, Skalierbarkeit
- ii. Möglichkeit einen Zustand zu initialisieren: z.B. $|000\dots\rangle$
- iii. Ausreichend lange Kohärenzzeit
- iv. Universelles Set an Quantengattern
- v. Zuverlässiger Auslesemechanismus

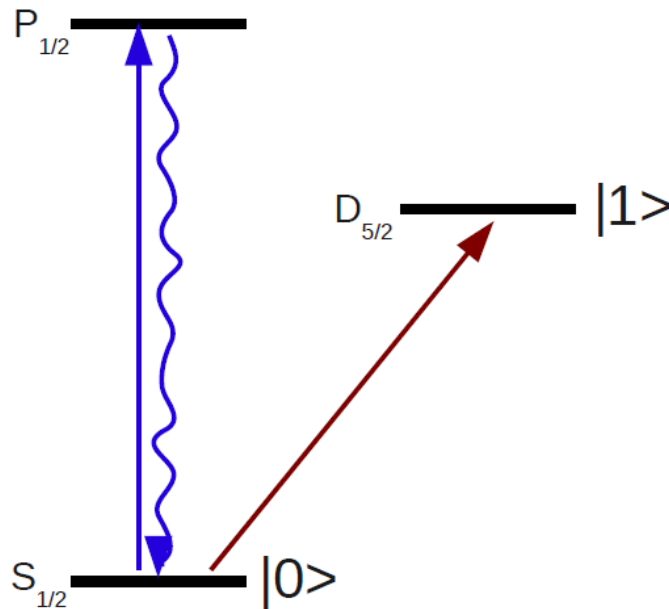
DiVincenzo: The Physical Implementation of Quantum Computation, 2008

Ionenfallen ➤ i. Qubits ➤ ii. Initialisierung ➤ iii. Kohärenzzeit ➤ iv. Quantengatter ➤ v. Auslesen ➤ Zusammenfassung

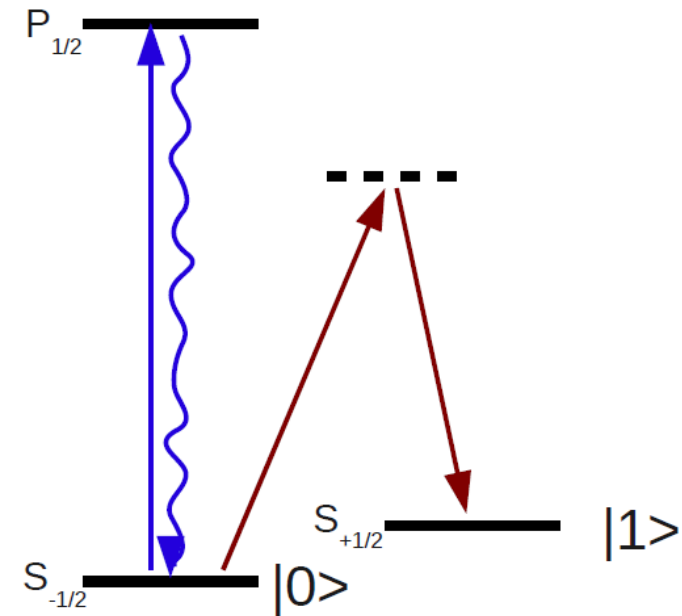
i. Wohldefinierte Qubits

■ Qubits: Ionen in der Paul-Falle

Optische Übergänge



Hyperfeinstruktur

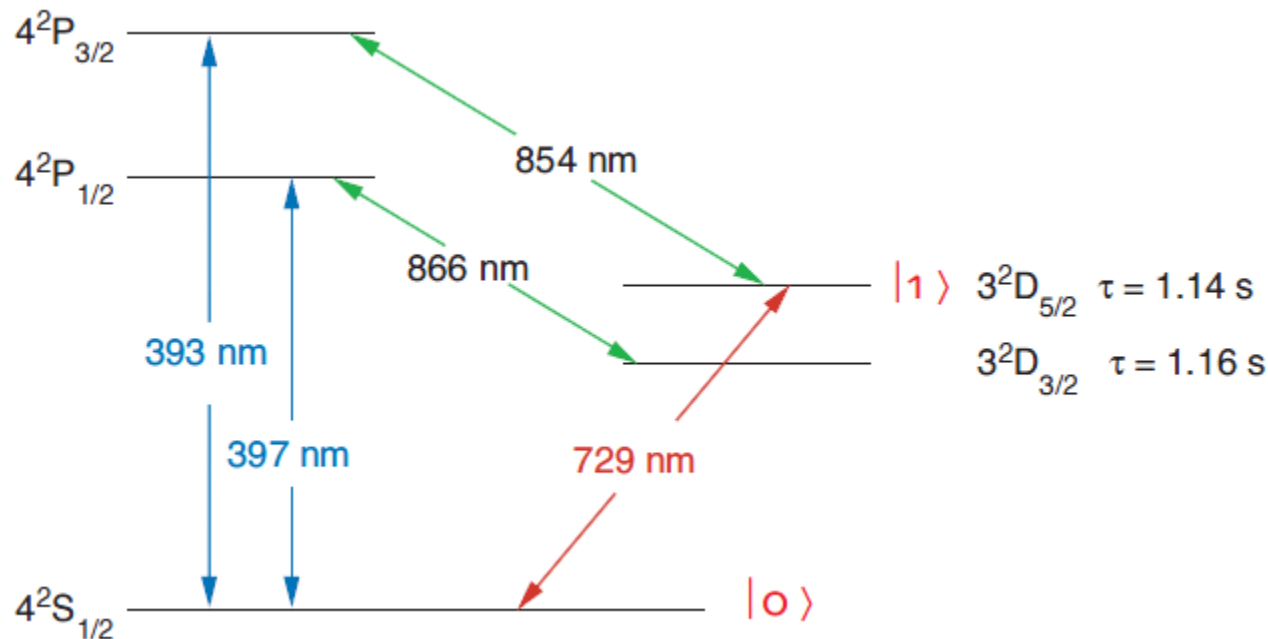


Holzschleiter: Ion-Trap Quantum Computation. In: Los Alamos Science Nr. 27, 2002

Ionenfallen \gg i. Qubits \gg ii. Initialisierung \gg iii. Kohärenzzeit \gg iv. Quantengatter \gg v. Auslesen \gg Zusammenfassung

i. Wohldefinierte Qubits

■ Energie-Niveaus von Calcium



Holzschleiter: Ion-Trap Quantum Computation. In: Los Alamos Science Nr. 27, 2002

Ionenfallen \gg i. Qubits \gg ii. Initialisierung \gg iii. Kohärenzzeit \gg iv. Quantengatter \gg v. Auslesen \gg Zusammenfassung

i. Wohldefinierte Qubits

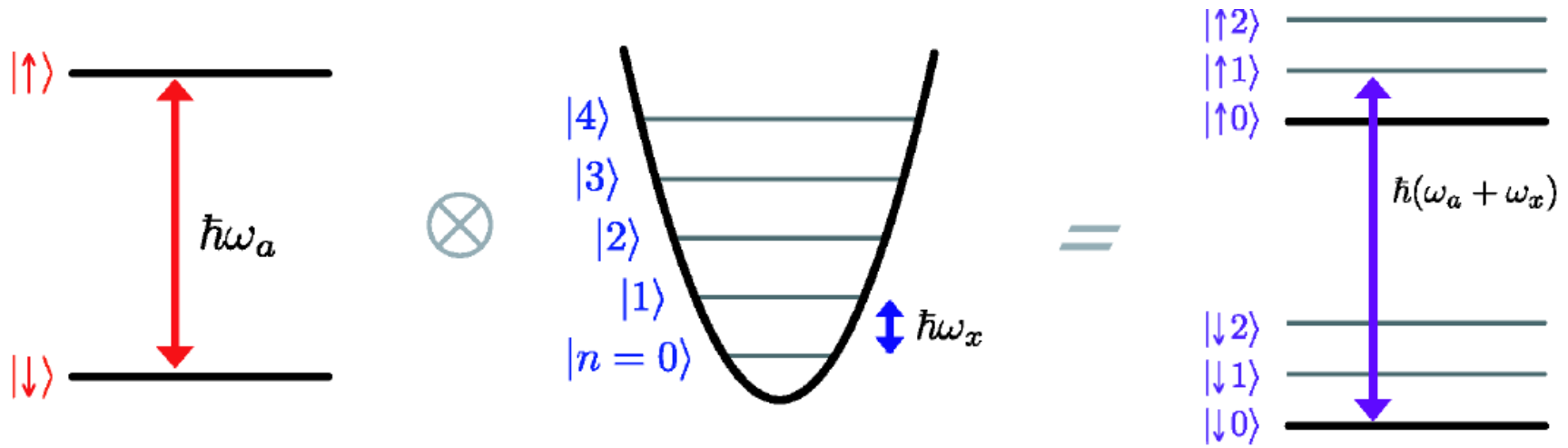
- Qubits: Ionen in der Paul-Falle
- Kopplung in axialer Richtung

$$|n\rangle$$

Anzahl n Phononen in der Schwerpunktsmode

i. Wohldefinierte Qubits

■ Qubits: Ionen in der Paul-Falle



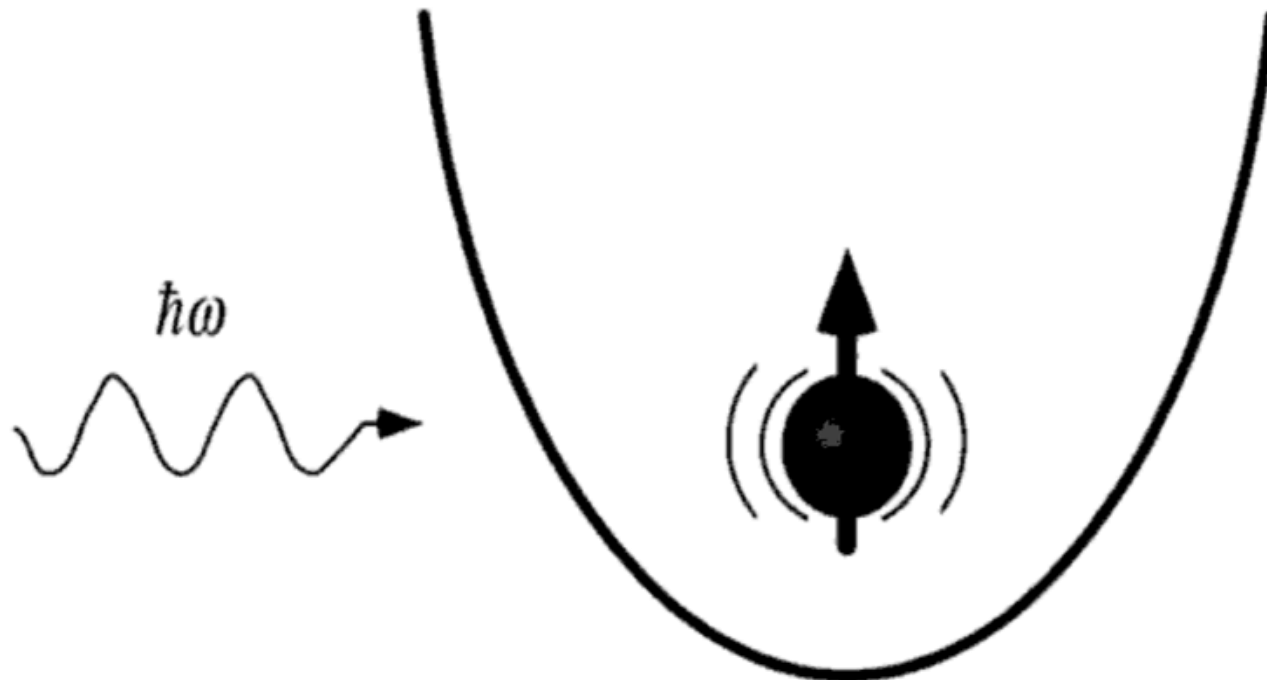
Zustand von k Qubits: $|q_1, q_2 \dots q_k\rangle |n\rangle$

Wang: *Ion Trap Quantum Computation*. In: *iQulSE lecture: implementations of quantum computing, 2010*

[Ionenfallen](#) \gg
[i. Qubits](#) \gg
[ii. Initialisierung](#) \gg
[iii. Kohärenzzeit](#) \gg
[iv. Quantengatter](#) \gg
[v. Auslesen](#) \gg
[Zusammenfassung](#)

i. Wohldefinierte Qubits

- Modell: 2-Niveau-Atom in harmonischem Potential mit elektromagnetischer Dipol-Anregung



Nielsen/Chuang: Quantum Computation and Quantum Information. Cambridge University Press, 2000

Ionenfallen >> **i. Qubits** >> ii. Initialisierung >> iii. Kohärenzzeit >> iv. Quantengatter >> v. Auslesen >> Zusammenfassung

i. Wohldefinierte Qubits

- Modell: 2-Niveau-Atom in harmonischem Potential mit elektromagnetischer Dipol-Anregung

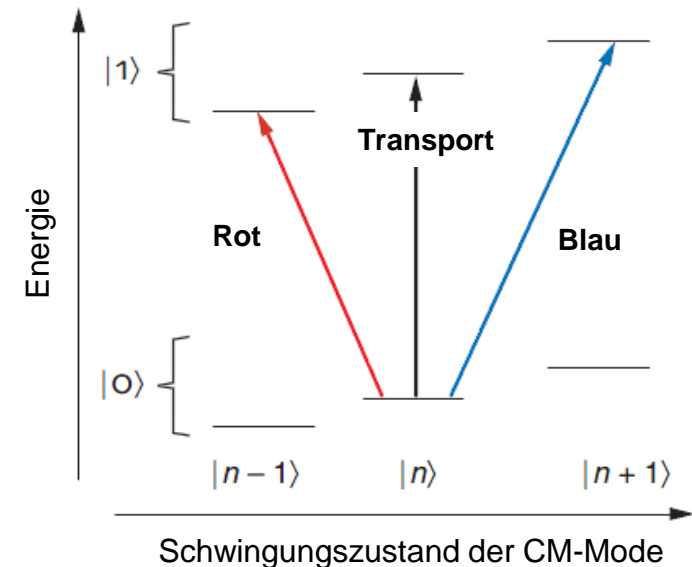
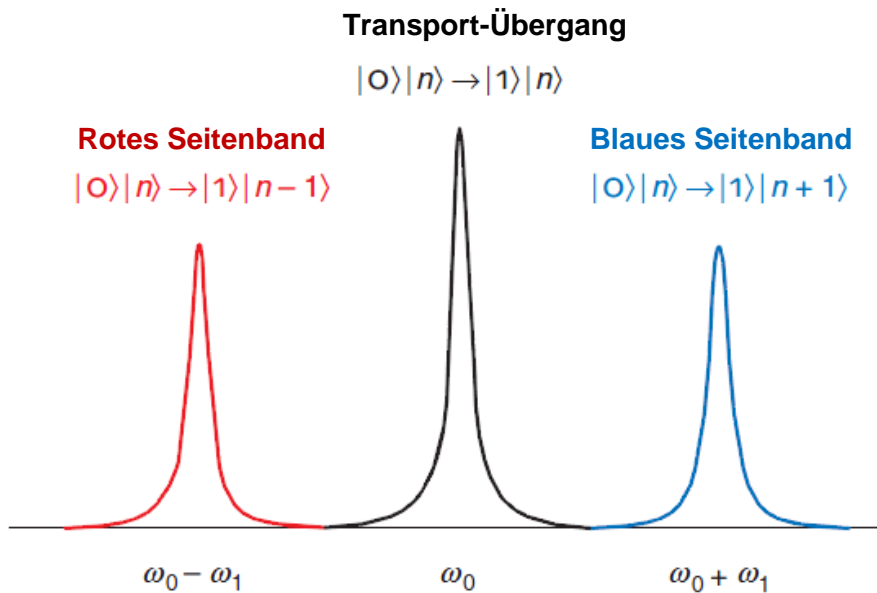
- $\Delta = 0$: Transport-Übergang: $H = \frac{\hbar\Omega}{2} (\sigma_+ e^{i\phi} + \sigma_- e^{-i\phi})$

- $\Delta = \omega_1$: blaues Seitenband: $H = \frac{i\hbar\Omega\eta}{2} (\sigma_+ a^\dagger e^{i\phi} - \sigma_- a e^{-i\phi})$

- $\Delta = -\omega_1$: rotes Seitenband: $H = \frac{i\hbar\Omega\eta}{2} (\sigma_+ a e^{i\phi} + \sigma_- a^\dagger e^{-i\phi})$

i. Wohldefinierte Qubits

■ Seitenband-Struktur



Holzscheiter: Ion-Trap Quantum Computation. In: Los Alamos Science Nr. 27, 2002

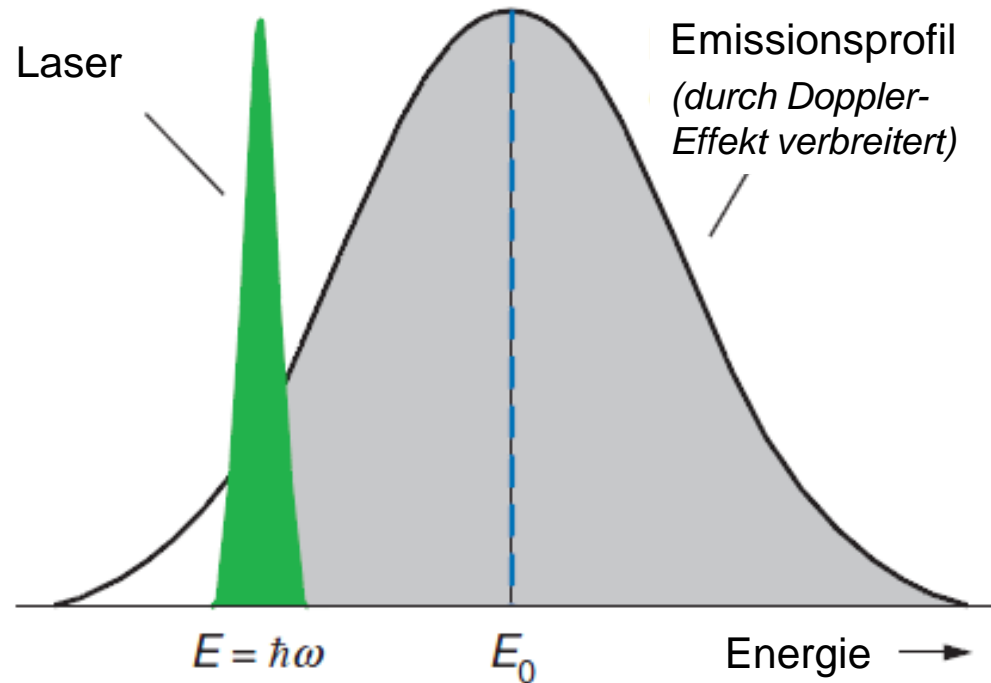
Ionenfallen \gg **i. Qubits** \gg ii. Initialisierung \gg iii. Kohärenzzeit \gg iv. Quantengatter \gg v. Auslesen \gg Zusammenfassung

ii. Initialisierung von Zuständen

- **Ziel:** Präparation des Grundzustands $|0\rangle$ der Schwingung
- **benötigt:** $k_B T \ll \hbar \omega_z$ durch „Kühlung“ der Ionen

ii. Initialisierung von Zuständen

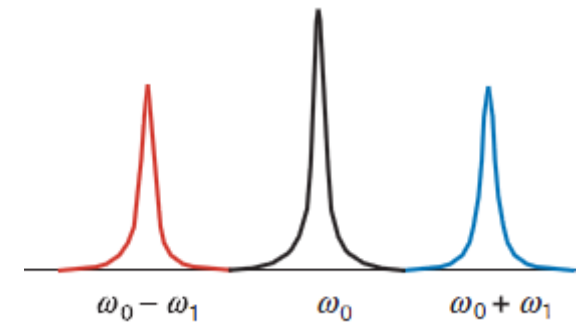
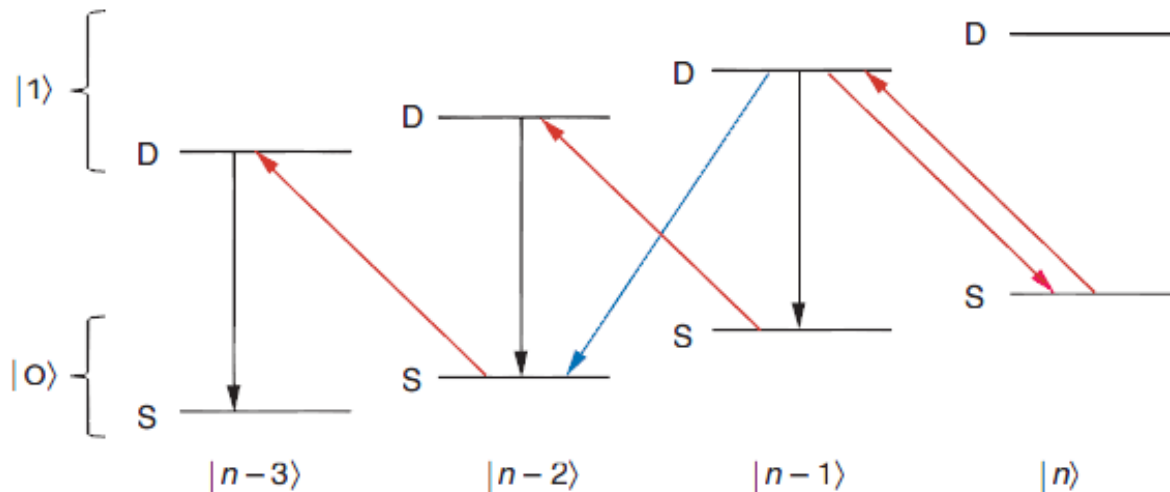
■ Doppler-Kühlung



Zustände $|n = 30\rangle$ bis $|n = 10\rangle$ möglich

ii. Initialisierung von Zuständen

■ Seitenband-Kühlung



Holzscheiter: Ion-Trap Quantum Computation. In: Los Alamos Science Nr. 27, 2002

iii. Kohärenzzeit

- typ. Zeit für eine Quantengatter-Operation: $\sim 10\mu s - 1ms$
- Hyperfeinstrukturlevel: >1 Jahr; bei Qubits: $>10min$
- optische Übergänge z.B. beim Calcium: $\sim 1s$

→ Kohärenzzeit: $\sim 1s$

iv. Universelles Set an Quantengattern

- CNOT + alle 1-Qubit-Gatter = alle N-Qubit-Gatter
 - vollständiger Satz an Quantengattern

iv. Universelles Set an Quantengattern

■ 1-Qubit-Gatter:

■ alle 1-Qubit-Gatter erreichbar durch

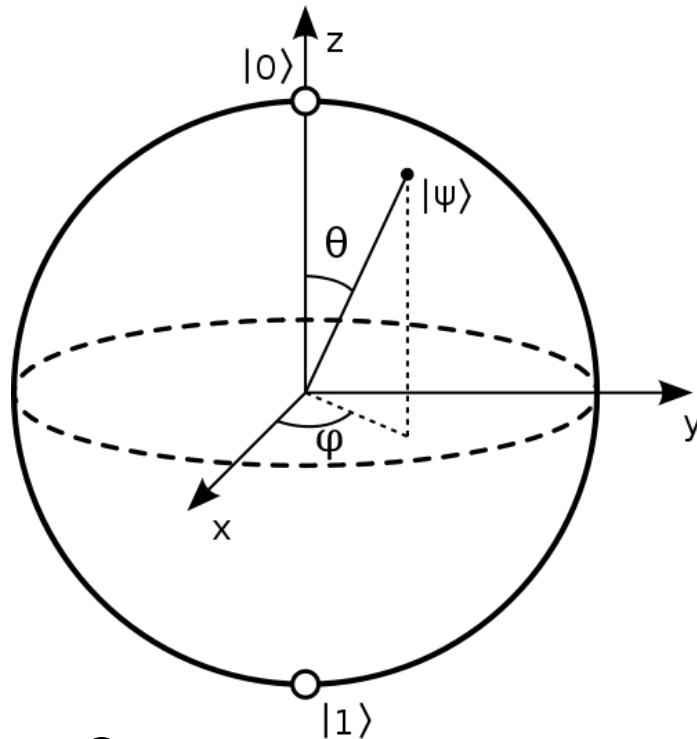
$$U = e^{i\alpha} R_z(\beta) R_y(\gamma) R_z(\delta)$$

■ Umsetzung mit Rabi-Oszillationen

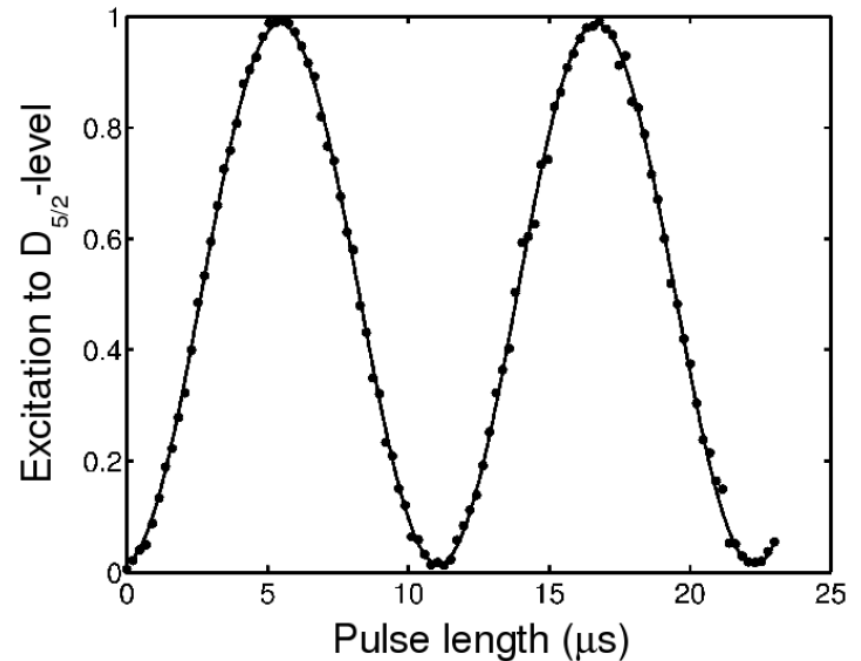
$$H = \frac{\hbar\Omega}{2} (\sigma_+ e^{i\phi} + \sigma_- e^{-i\phi})$$

iv. Universelles Set an Quantengattern

■ 1-Qubit-Gatter:



$$\theta = \Omega t$$

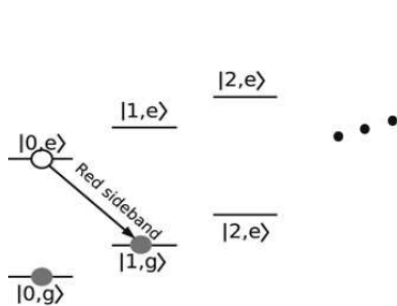


Häffner: Quantum computing with trapped ions

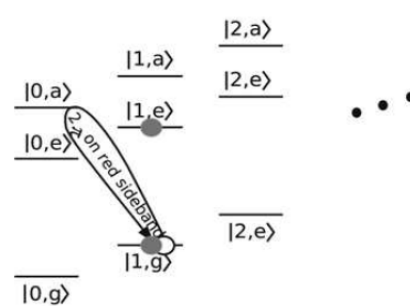
iv. Universelles Set an Quantengattern

■ 2-Qubit-Gatter: CNOT

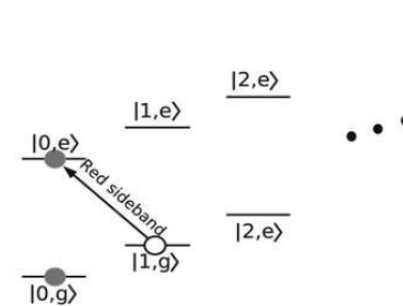
$$\begin{aligned} |00\rangle &\rightarrow |00\rangle \\ |01\rangle &\rightarrow |01\rangle \\ |10\rangle &\rightarrow |11\rangle \\ |11\rangle &\rightarrow |10\rangle \end{aligned}$$



Kontrollbit: Übertragung auf den Schwingungszustand



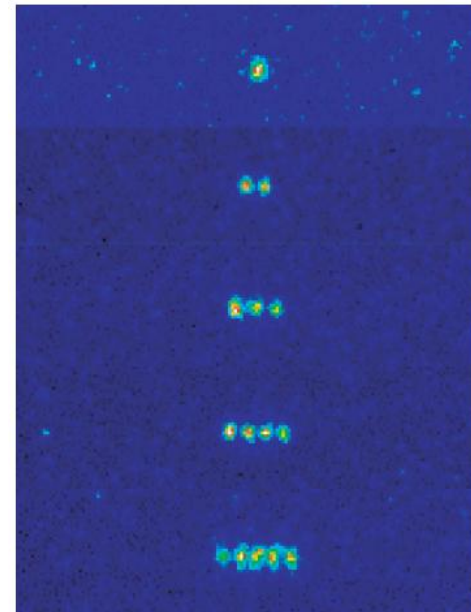
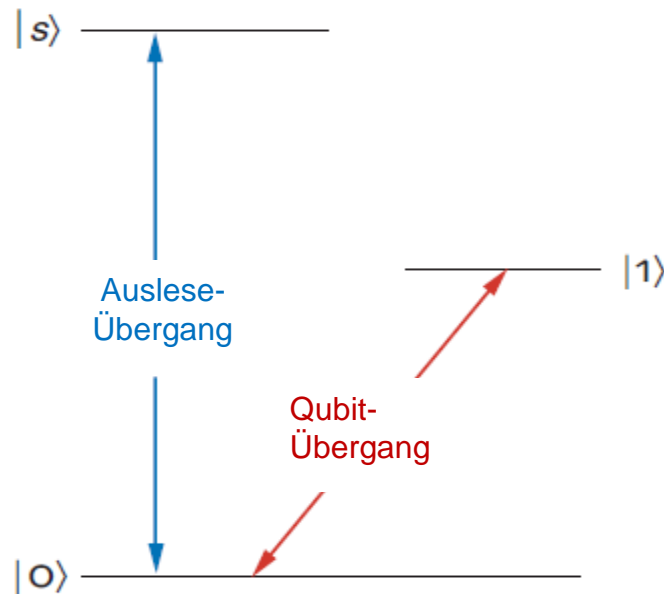
Zielbit: 1-Qubit-CNOT-Gatter (durch Phasen Anpassung)



Kontrollbit: Übertragung aus dem Schwingungszustand auf das Ion

v. Auslesemechanismus

- Anregung eines $|s\rangle$ nur bei besetztem $|0\rangle \rightarrow$ Fluoreszenz



Holzscheiter: Ion-Trap Quantum Computation. In: Los Alamos Science Nr. 27, 2002

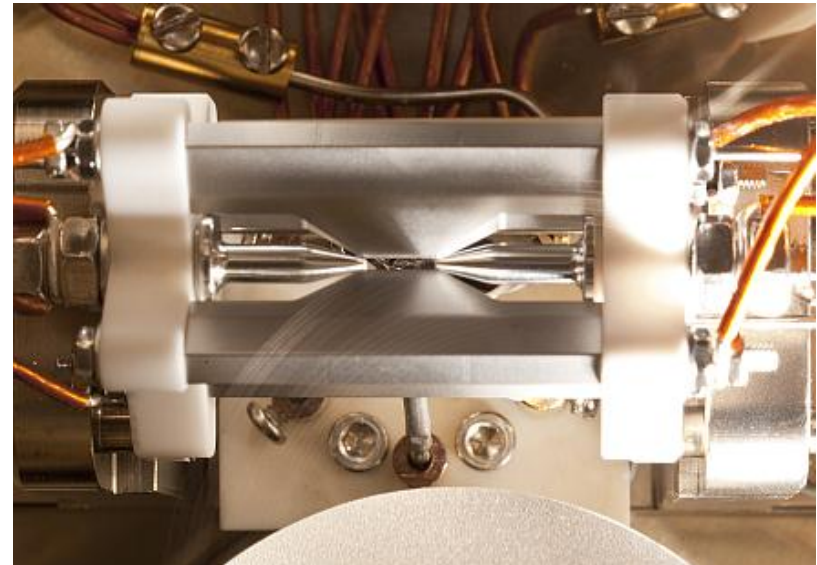
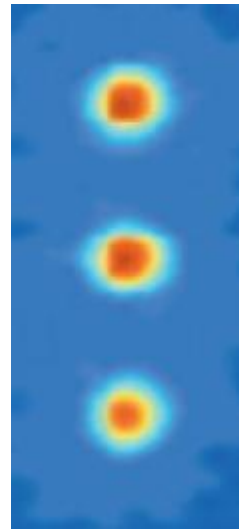
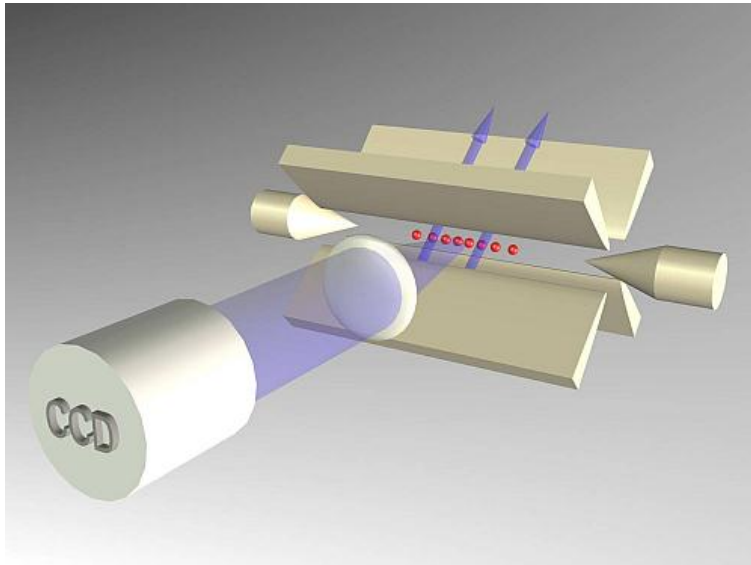
Ionenfallen \gg i. Qubits \gg ii. Initialisierung \gg iii. Kohärenzzeit \gg iv. Quantengatter \gg **v. Auslesen** \gg Zusammenfassung

Experimentelle Erfolge

- Präparation eines Zustandes: 99,9%
- Kohärenzzeit: 1-2 Größenordnungen > Quantengatterzeit
- 1-Qubit-Gatter: 99,9%
- 2-Qubit-Gatter: über 90% erreicht
- Auslesevorgang: 99,99% erreicht

Experimentelle Erfolge

■ Universität Innsbruck



➔ 14 Ionen erreicht

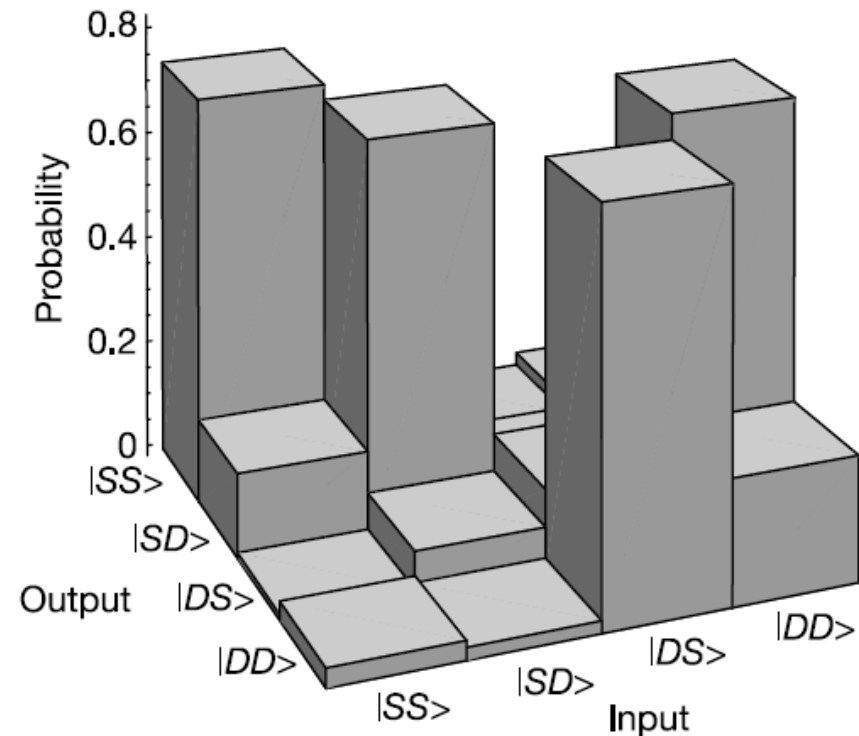
Quantum Optics and Spectroscopy Group, Institut für Experimentalphysik, Universität Innsbruck

Ionenfallen ➤ i. Qubits ➤ ii. Initialisierung ➤ iii. Kohärenzzeit ➤ iv. Quantengatter ➤ v. Auslesen ➤ **Zusammenfassung**

Experimentelle Erfolge

■ CNOT-Gatter erstmals realisiert

$$\begin{array}{c}
 |00\rangle \\
 |01\rangle \\
 |10\rangle \\
 |11\rangle
 \end{array}
 \begin{pmatrix}
 |00\rangle & |01\rangle & |10\rangle & |11\rangle \\
 \hline
 1 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 1 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 1 \\
 0 & 0 & 1 & 0
 \end{pmatrix}$$



Ionenfallen \gg i. Qubits \gg ii. Initialisierung \gg iii. Kohärenzzeit \gg iv. Quantengatter \gg v. Auslesen \gg **Zusammenfassung**

Experimentelle Erfolge

- Präparation eines Zustandes: 99,9%
- Kohärenzzeit: 1-2 Größenordnungen > Quantengatterzeit
- 1-Qubit-Gatter: 99,9%
- 2-Qubit-Gatter: über 90% erreicht
- Auslesevorgang: 99,99% erreicht
- **Herausforderungen:** Skalierbarkeit, Vereinigung aller einzelnen Erfolge in einem System

Zusammenfassung

- Ionen in Paul-Falle als Qubits
- Zustand gekennzeichnet durch interne und externe Freiheitsgrade: $|q_1, q_2 \dots q_k\rangle |n\rangle$
- 1- und 2-Qubit-Gatter realisierbar mit Laserpulsen
- Auslesen mit Fluoreszenz
- **Fazit:** aussichtsreiche Möglichkeit für die Realisierung eines Quantencomputers