

# **Quantencomputing mit Ionenfallen**

Hauptseminar: Physik des Quantencomputers



## **Inhalt**



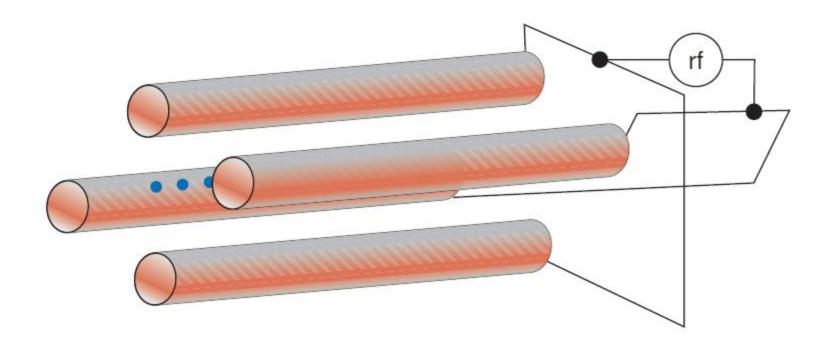
- Ionenfallen → Bsp.: die lineare Paul-Falle
- DiVincenzo-Kriterien
- Umsetzung bei Ionenfallen
- Experimentelle Erfolge
- Zusammenfassung

# 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



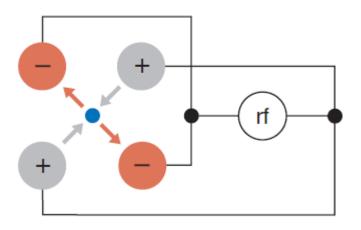


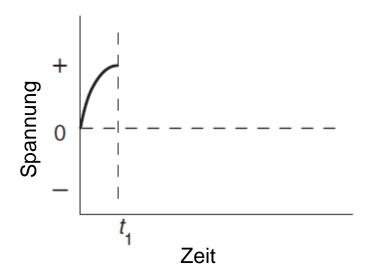
Holzscheiter: Ion-Trap Quantum Computation. In: Los Alamos Science Nr. 27, 2002

lonenfallen ≫ i. Qubits ≫ ii. Initialisierung ≫ iii. Kohärenzzeit ≫ iv. Quantengatter ≫ v. Auslesen ≫ Zusammenfassung



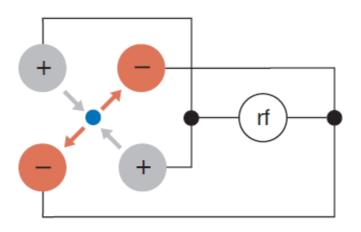
$$t = t_1$$

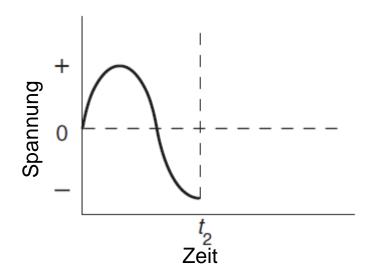






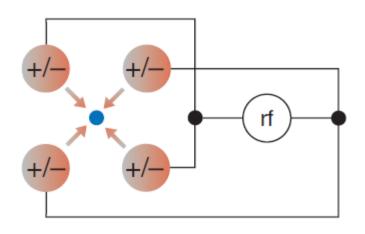
$$t = t_2$$

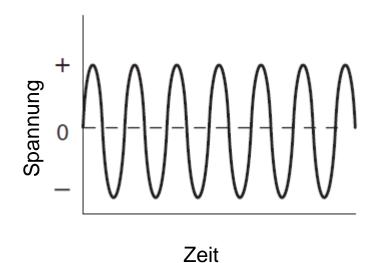






#### zeitlich gemittelt





Ionenfallen 

i. Qubits 

ii. Initialisierung 

iii. Kohärenzzeit 

iv. Quantengatter 

v. Auslesen 

Zusammenfassung



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

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

Hamiltonoperator:

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

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

Ionenfallen 

i. Qubits 

ii. Initialisierung 

iii. Kohärenzzeit 

iv. Quantengatter 

v. Auslesen 

Zusammenfassung

### Die DiVincenzo-Kriterien



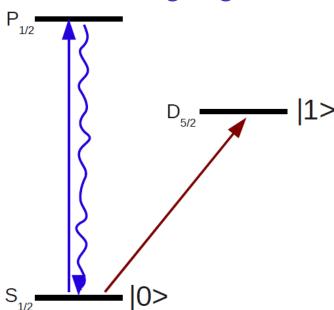
- i. Wohldefinierte Qubits, Skalierbarkeit
- ii. Möglichkeit einen Zustand zu initialisieren: z.B. |000...)
- iii. Ausreichend lange Kohärenzzeit
- iv. Universelles Set an Quantengattern
- v. Zuverlässiger Auslesemechanismus

DiVincenzo: The Physical Implementation of Quantum Computation, 2008

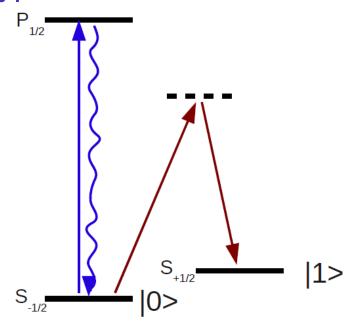


Qubits: Ionen in der Paul-Falle

## Optische Übergänge



### Hyperfeinstruktur

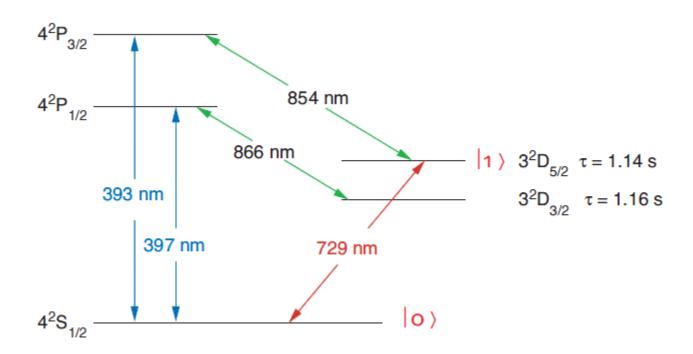


Holzscheiter: Ion-Trap Quantum Computation. In: Los Alamos Science Nr. 27, 2002

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



Energie-Niveaus von Calcium



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



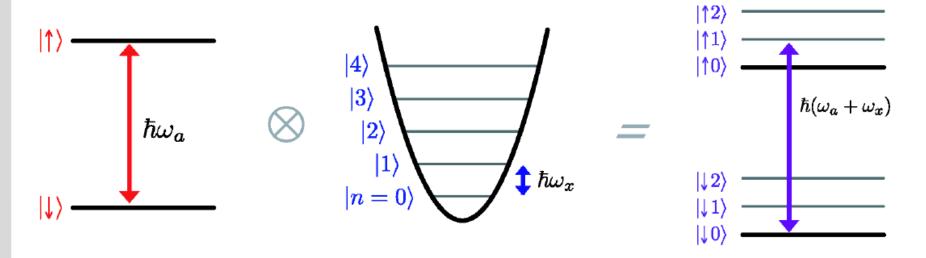
- Qubits: Ionen in der Paul-Falle
- Kopplung in axialer Richtung

 $|n\rangle$ 

Anzahl n Phononen in der Schwerpunktsmode



Qubits: Ionen in der Paul-Falle



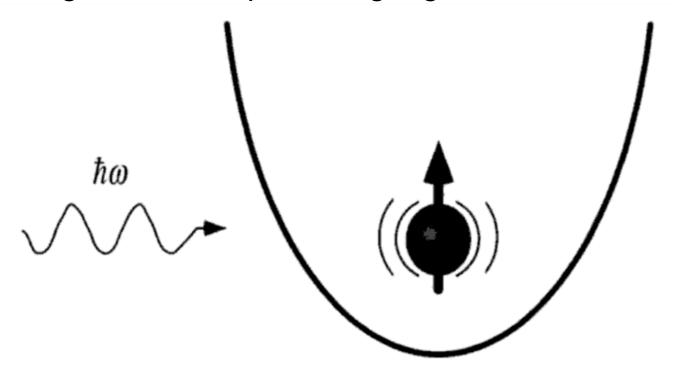
Zustand von k Qubits:  $|q_1, q_2 ... q_k\rangle |n\rangle$ 

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

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



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



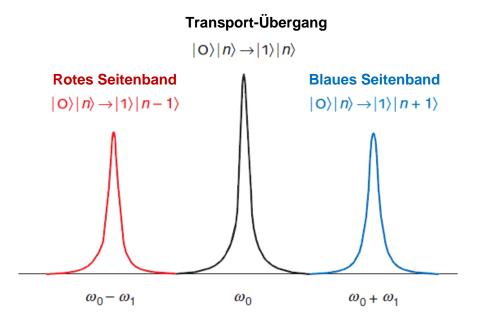
Modell: 2-Niveau-Atom in harmonischem Potential mit elektromagnetischer Dipol-Anregung

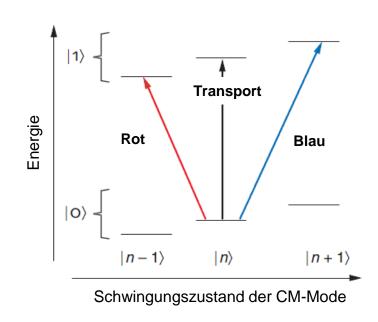
- $\Delta = 0$ : Transport-Übergang:  $H = \frac{\hbar\Omega}{2} (\sigma_+ e^{i\phi} + \sigma_- e^{-i\phi})$
- lacktriangle  $\Delta = \omega_1$ : blaues Seitenband:  $H = \frac{i\hbar\Omega\eta}{2} \left(\sigma_+ a^\dagger e^{i\phi} \sigma_- a e^{-i\phi}\right)$
- $\Delta = -\omega_1$ : rotes Seitenband:  $H = \frac{i\hbar\Omega\eta}{2} \left(\sigma_+ a e^{i\phi} + \sigma_- a^{\dagger} e^{-i\phi}\right)$

29.05.2012



### 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

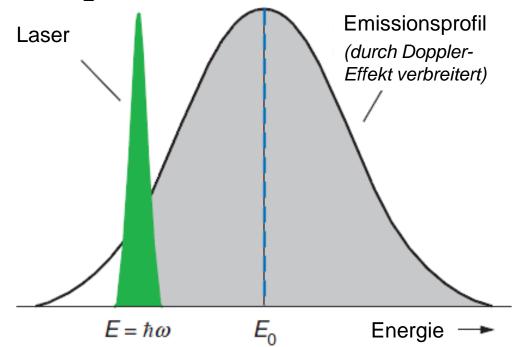


- Ziel: Präparation des Grundzustands |0> der Schwingung
- **benötigt:**  $k_BT \ll \hbar\omega_z$  durch "Kühlung" der Ionen

# ii. Initialisierung von Zuständen



Doppler-Kühlung

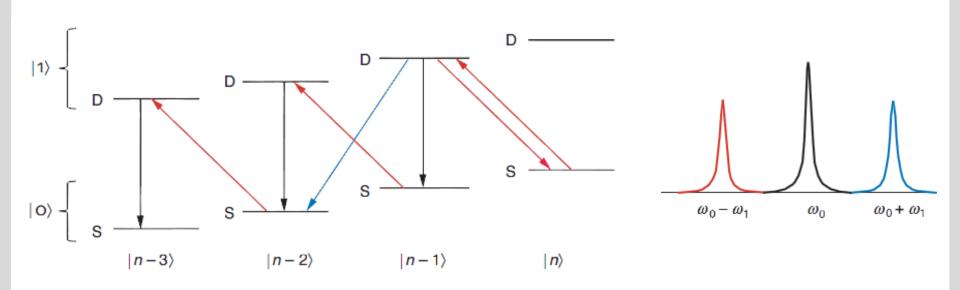


Zustände  $|n = 30\rangle$  bis  $|n = 10\rangle$  möglich

# 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:  $\sim 10 \mu s 1 ms$
- Hyperfeinstrukturlevel: >1 Jahr; bei Qubits: >10min
- lacktriangle optische Übergänge z.B. beim Calcium:  $\sim 1s$

**→** Kohärenzzeit: ~1s



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



- 1-Qubit-Gatter:
- alle 1-Qubit-Gatter erreichbar durch

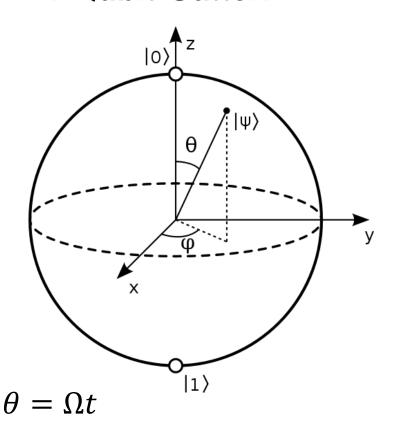
$$U = e^{i\alpha} R_z(\beta) R_y(\gamma) R_z(\delta)$$

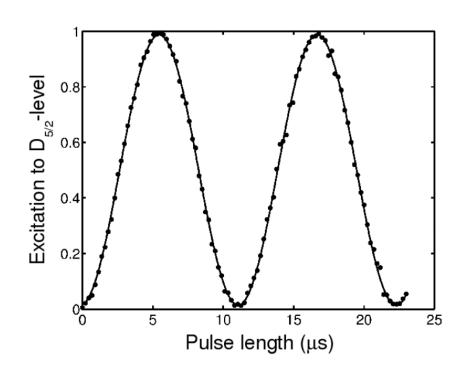
Umsetzung mit Rabi-Oszillationen

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



#### 1-Qubit-Gatter:





Häffner: Quantum computing with trapped ions

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



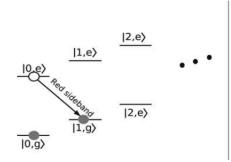
### 2-Qubit-Gatter: CNOT

$$|00\rangle \rightarrow |00\rangle$$

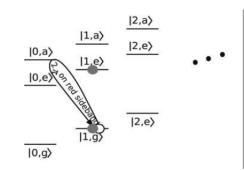
$$|01\rangle \rightarrow |01\rangle$$

$$|10\rangle \rightarrow |11\rangle$$

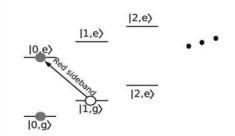
$$|11\rangle \rightarrow |10\rangle$$



Kontrollbit: Übertragung auf den Schwingungszustand



Zielbit: 1-Qubit-CNOT-Gatter (durch Phasenanpassung)



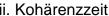
Kontrollbit: Übertragung aus dem Schwingungszustand auf das Ion



















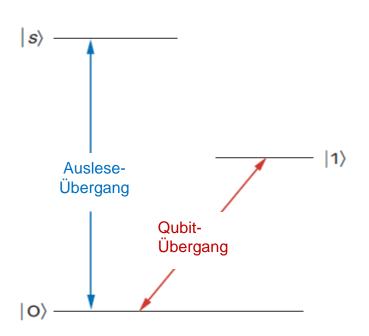


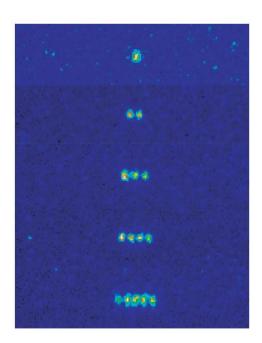


## v. Auslesemechanismus



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





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

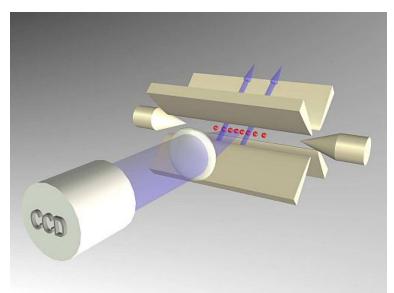
Ionenfallen  $\geq$  i. Qubits  $\geq$  ii. Initialisierung  $\geq$  iii. Kohärenzzeit  $\geq$  iv. Quantengatter  $\geq$  v. Auslesen  $\geq$  Zusammenfassung

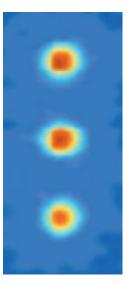


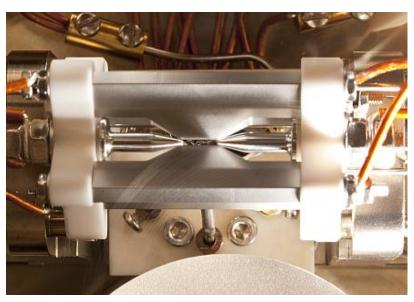
- Präparation eines Zustandes: 99,9%
- Kohärenzzeit: 1-2 Größenordnungen > Quantengatterzeit
- 1-Qubit-Gatter: 99,9%
- 2-Qubit-Gatter: über 90% erreicht
- Auslesevorgang: 99,99% erreicht



Universität Innsbruck







→ 14 Ionen erreicht

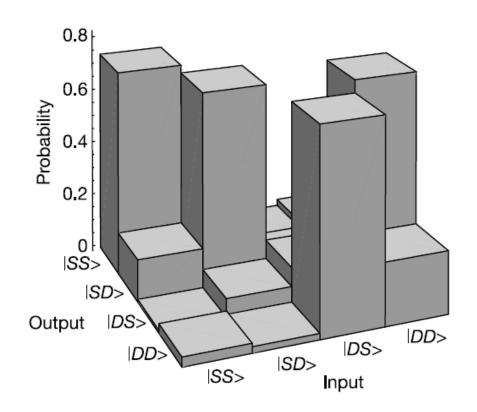
Quantum Optics and Spectroscopy Group, Institut für Experimentalphysik, Universität Innsbruck

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



#### CNOT-Gatter erstmals realisiert

$$\begin{vmatrix}
|00\rangle & |01\rangle & |10\rangle & |11\rangle \\
|00\rangle & 1 & 0 & 0 & 0 \\
|01\rangle & 0 & 1 & 0 & 0 \\
|10\rangle & 0 & 0 & 1 & 0 \\
|11\rangle & 0 & 0 & 1 & 0
\end{vmatrix}$$





- 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

29.05.2012

# Zusammenfassung



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