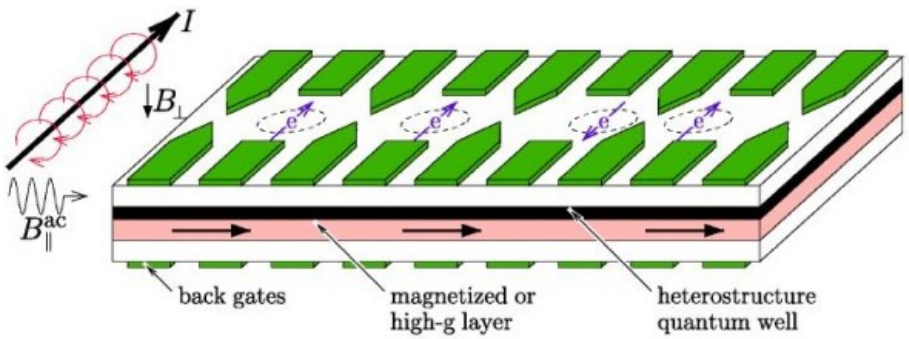
Karlsruher Institut für Technologie

Quantencomputer mit Spins in Quantenpunkten

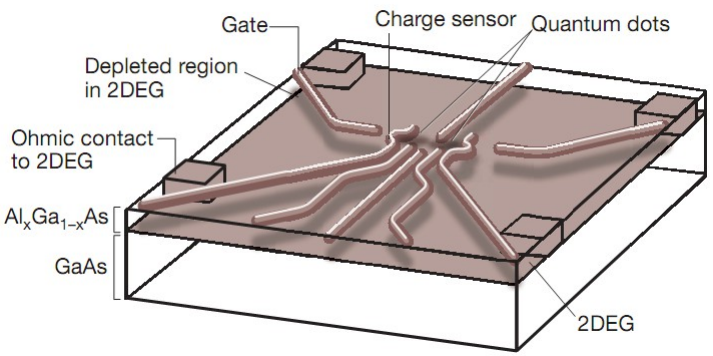
Vortrag von Lennart Piro

Seminar Physik des Quantencomputers, Institut für Theoretische Festkörperphysik



$$H = \sum_{\langle ij \rangle} J_{ij}(t)\mathbf{S}_i \cdot \mathbf{S}_j + \sum_i (g_i \mu_B \mathbf{B}_i)(t) \cdot \mathbf{S}_i$$

n.n. exchange local Zeeman



DiVincenzo Kritierien für Quantencomputer

1) Wohldefinierte Qubit-Zustände

2) Initialisierung in einen reinen Zustand

$|00 \ldots 0\rangle$

3) Universelle Gatter (z.B. Rotation+cNOT)

4) Messung der Qubits

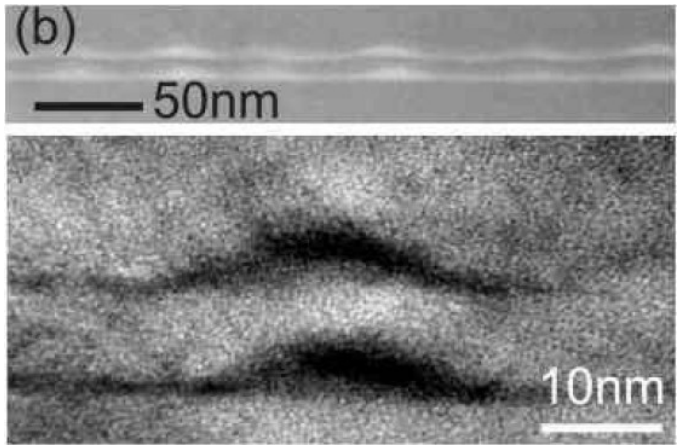
5) Lange Kohärenzzeit (ca. 10^4 länger als Dauer der Gatteroperationen)

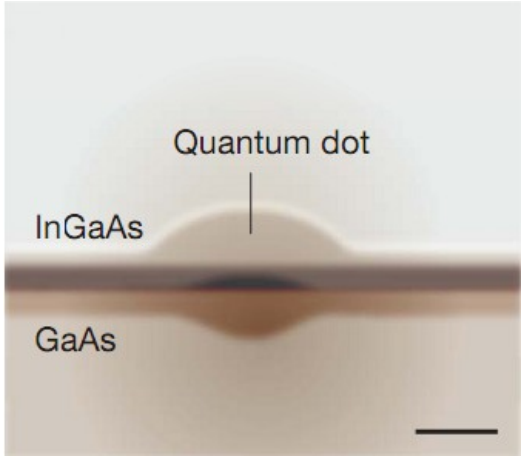
Quantenpunkte

- Ladungsträger (Elektron oder Loch), der in allen 3 Raumdimensionen eingeschränkt ist → nur diskrete Energieniveaus, keine kontinuierliche Bewegung
- Größenordnung meist zwischen 10 und 100nm
- Auch bekannt als „Designer-Atome/-Moleküle“
- Ca. 10^4 bis 10^6 Atome pro Quantenpunkt

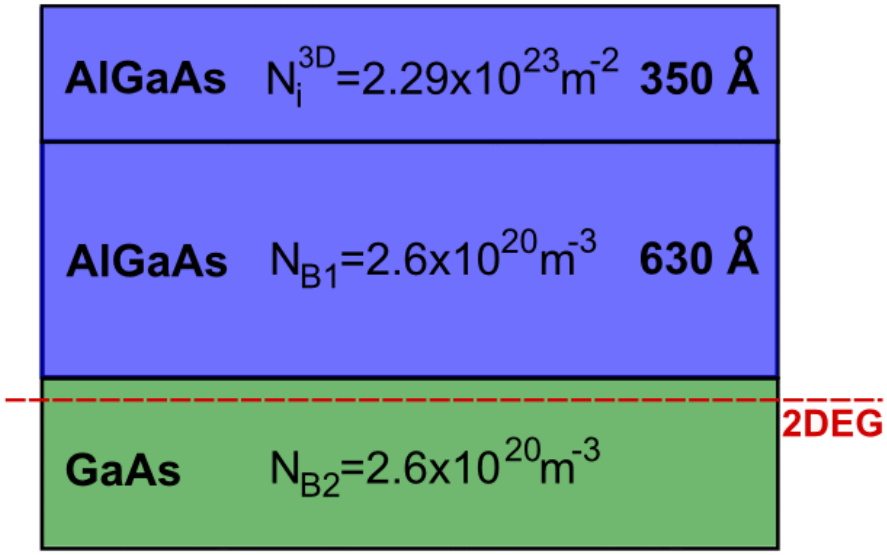
„Self-assembled“ Quantum Dots

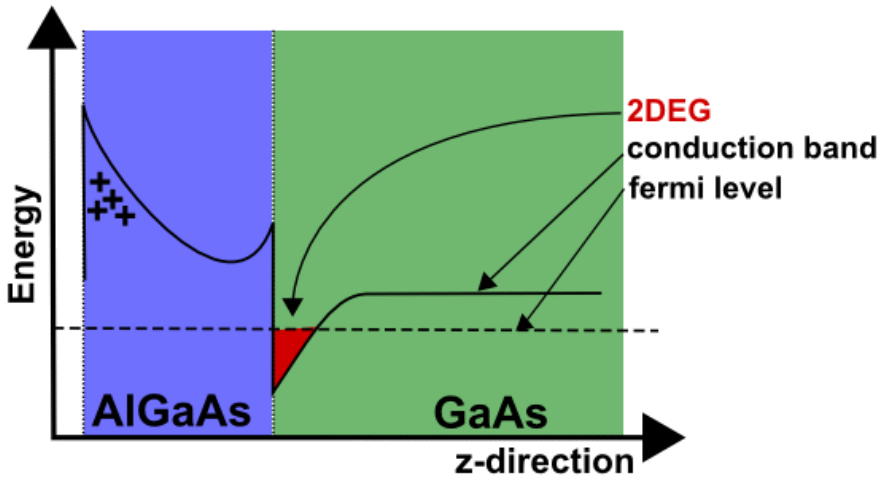
- Entstehen beim Kristall-Wachstum
- Oft verwendet: Wenige Schichten InGaAs die auf GaAs aufgetragen werden. Unterschiedliche Gitterkonstanten führen zu Quantenpunkten.
- Meist Linsen-förmig
- Durchmesser etwa 20nm, Höhe 5nm in Wachstumsrichtung





2D-Elektronengas (2DEG)

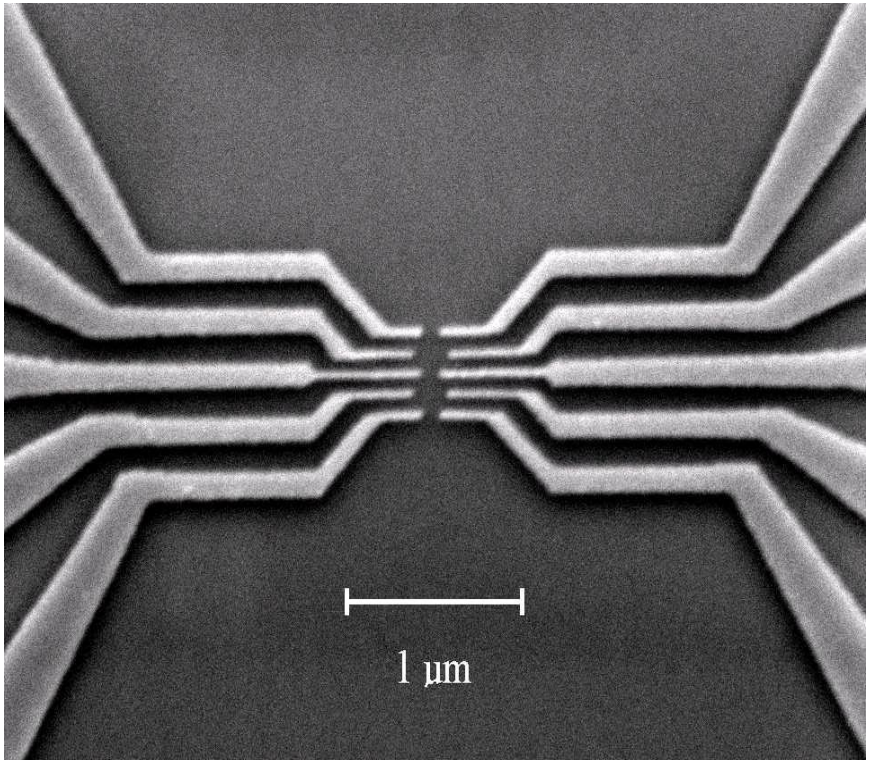




- 2 Halbleiter mit unterschiedlichem Leiterband
- Elektronen können sich nur entlang der Grenzfläche bewegen

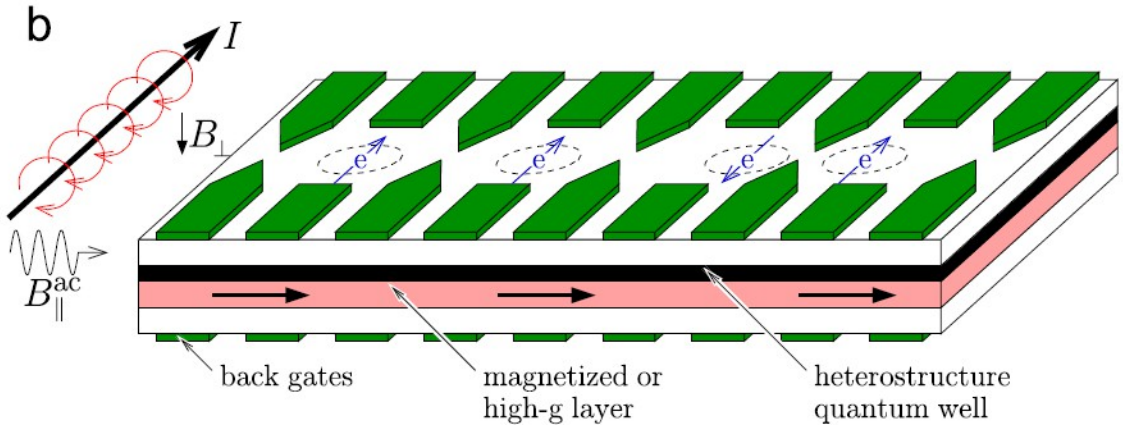
Quantenpunkte im 2DEG

- Schränke Bewegung in verbleibenden Dimensionen durch Gate-Elektroden ein:



- Elektroden auf der Oberfläche sind etwa 100nm über dem 2DEG

Single-Spin-Qubits



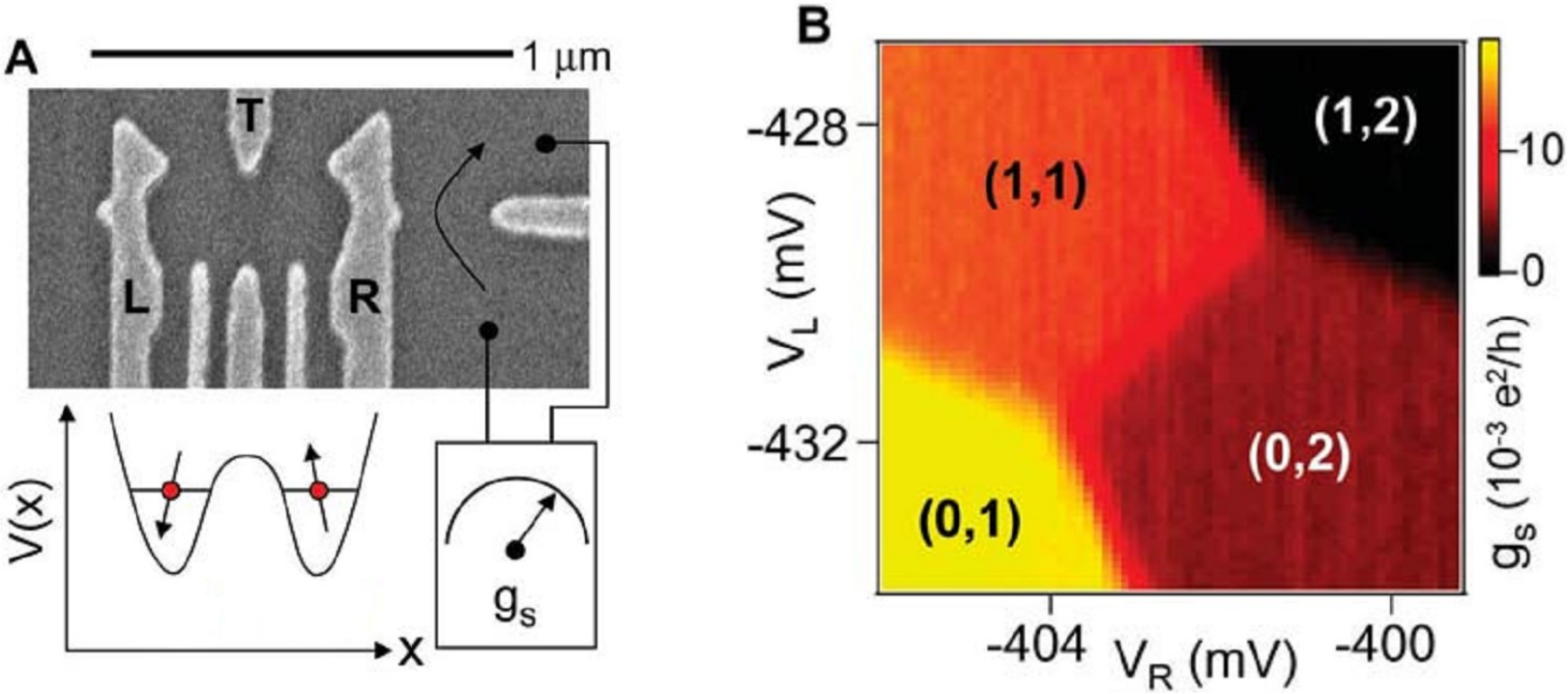
$$H = \sum_{\langle ij \rangle} J_{ij}(t)\mathbf{S}_i \cdot \mathbf{S}_j + \sum_i (g_i \mu_B \mathbf{B}_i)(t) \cdot \mathbf{S}_i$$

n.n. exchange local Zeeman

- Ein Qubit entspricht dem Spin eines Elektrons in einem Quantenpunkt
- Rotation einzelner Spins über „back gates“
- Nachteile:
  - Kurze Dekohärenzzeit
  - Schwierig auszulesen

Potential und Stabilitätsdiagramm

- Potentialbarriere regelbar über Spannung V_T am Gate T
- „Kippen“ des Potentials über Spannungen V_L und V_R
  → Änderung des Ladungszustands!
- Quantum Point Contact (QPC) g_S erlaubt Messung der Ladung



Double-Quantum-Dot Qubit

- Ein Qubit besteht aus **zwei** benachbarten Quantenpunkten
- Die Zustände 0 und 1 entsprechen dem Singlet-Zustand S und dem Triplet-Zustand T_0

$$\left.\begin{aligned} |T_+\rangle &= |1,1\rangle &&= \uparrow\uparrow \\ |T_0\rangle &= |1,0\rangle &&= (\uparrow\downarrow + \downarrow\uparrow)/\sqrt{2} \\ |T_-\rangle &= |1,-1\rangle &&= \downarrow\downarrow \end{aligned}\right\} \quad s = 1 \quad \text{(triplet)}$$

$$|S\rangle = |0,0\rangle = (\uparrow\downarrow - \downarrow\uparrow)/\sqrt{2} \Big\} \quad s = 0 \quad \text{(singlet)}$$

Das Pauli-Prinzip

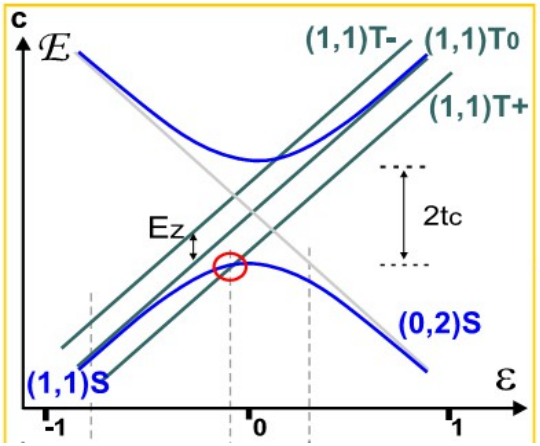
- Durch „kippen“ des Potentials wollen beide Elektronen nach rechts, also nach (0,2)
- Aber: Pauli-Prinzip! Die Gesamtwellenfunktion eines Systems von Fermionen muss total antisymmetrisch bezüglich der Vertauschung zweier Teilchen sein:

$$\psi(\vec{r}_1, s_1; \vec{r}_2, s_2) = -\psi(\vec{r}_2, s_2; \vec{r}_1, s_1)$$

- Triplet-Zustand nicht antisymmetrisch → bleibt in (1,1)

$$\left.\begin{aligned} |T_+\rangle &= |1,1\rangle &&= \uparrow\uparrow \\ |T_0\rangle &= |1,0\rangle &&= (\uparrow\downarrow + \downarrow\uparrow)/\sqrt{2} \\ |T_-\rangle &= |1,-1\rangle &&= \downarrow\downarrow \end{aligned}\right\} \quad s = 1 \quad \text{(triplet)}$$

$$|S\rangle = |0,0\rangle = (\uparrow\downarrow - \downarrow\uparrow)/\sqrt{2} \Big\} \quad s = 0 \quad \text{(singlet)}$$

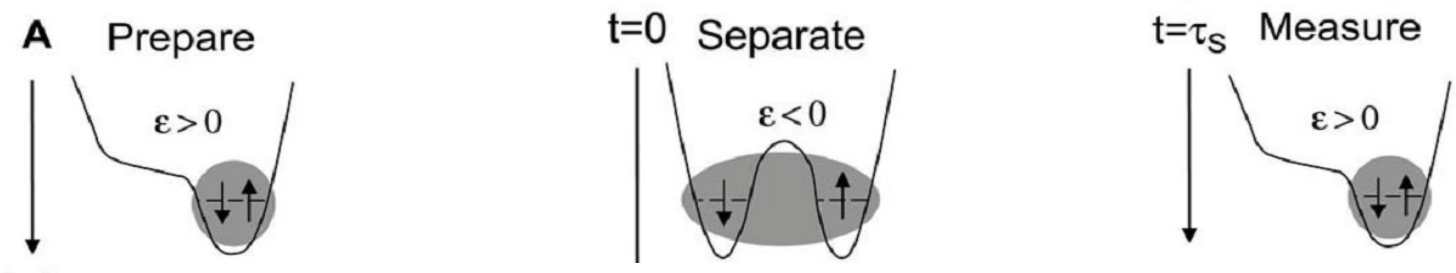


$\varepsilon \propto V_R - V_L$

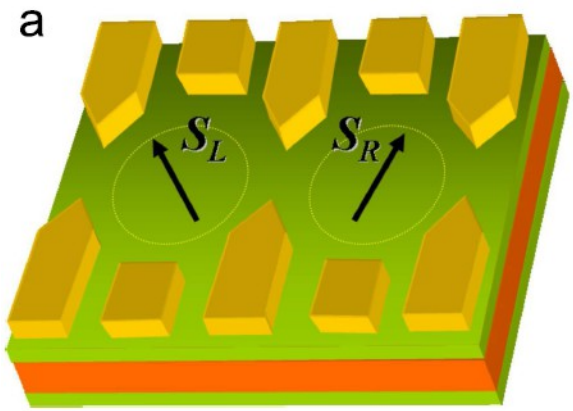
Initialisieren und Auslesen

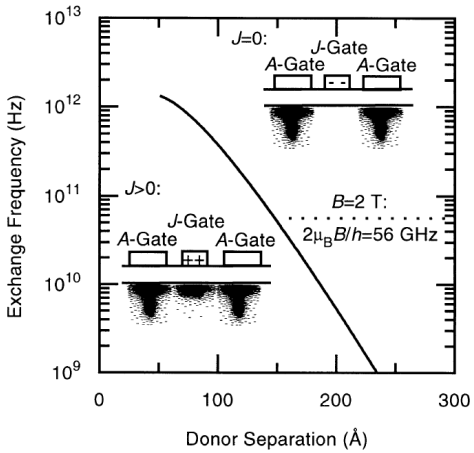
Kippen des Potentials erlaubt also:

- Initialisierung: Lange genug warten, Übergang Triplet → Singlet
- Auslesen: Unterscheide Ladungszustände (1,1) und (0,2)



Kopplung benachbarter Spins





- Kopplung benachbarter Spins über Austauschwechselwirkung:

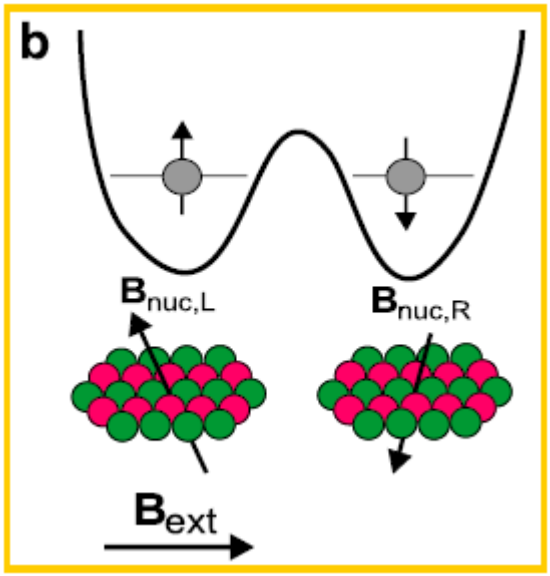
$$H = J(t)\vec{S}_L \cdot \vec{S}_R$$

- Wechselwirkung lässt sich über Spannung am mittleren Gate kontrollieren

Einfluss der Atom-Spins

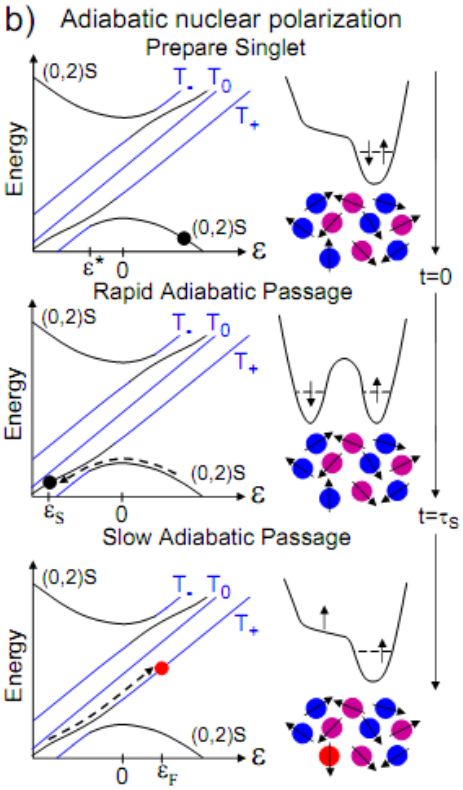
- 10^6 Atome pro QP, die durch ihren Spin ein Magnetfeld erzeugen
- Differenz $\Delta B = B_{nuc,L} - B_{nuc,R}$ lässt sich für Rotation um zweite Achse ausnutzen
- Beide Rotationen zusammen ergeben bezüglich der Singlet/Triplet-Basis den Hamiltonian:

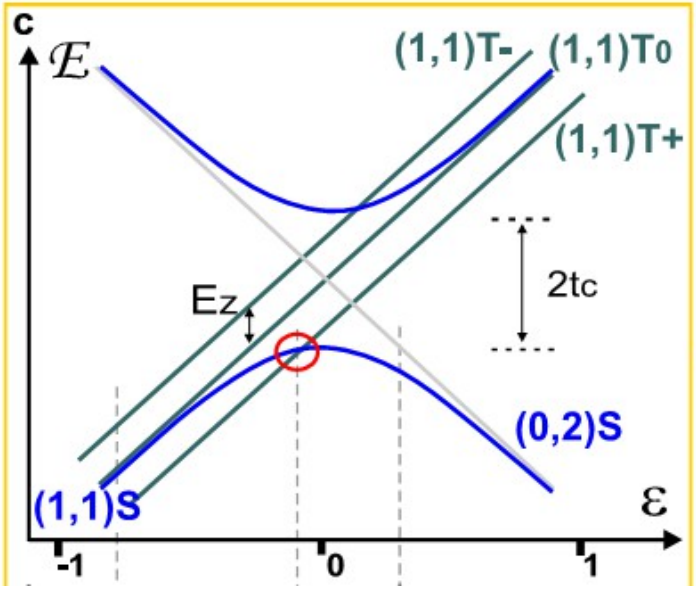
$$H = J \cdot \sigma_z + \Delta B \cdot \sigma_x$$



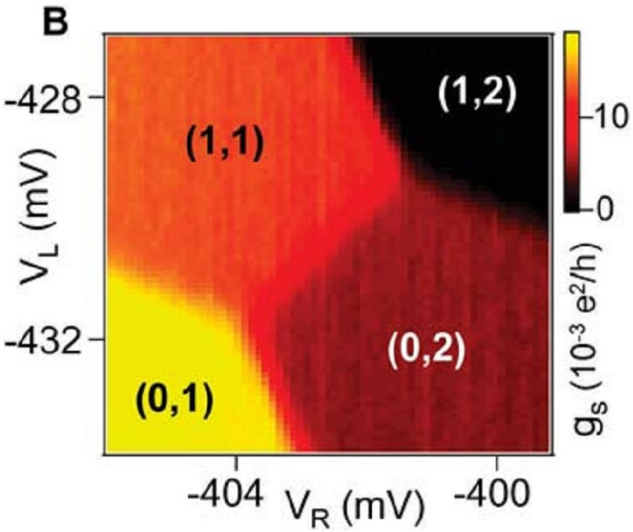
Einfluss der Atom-Spins

- Dekohärenz durch Schwankung im B-Feld
- Verringere Schwankung im B-Feld durch Polarisierung der Atom-Spins



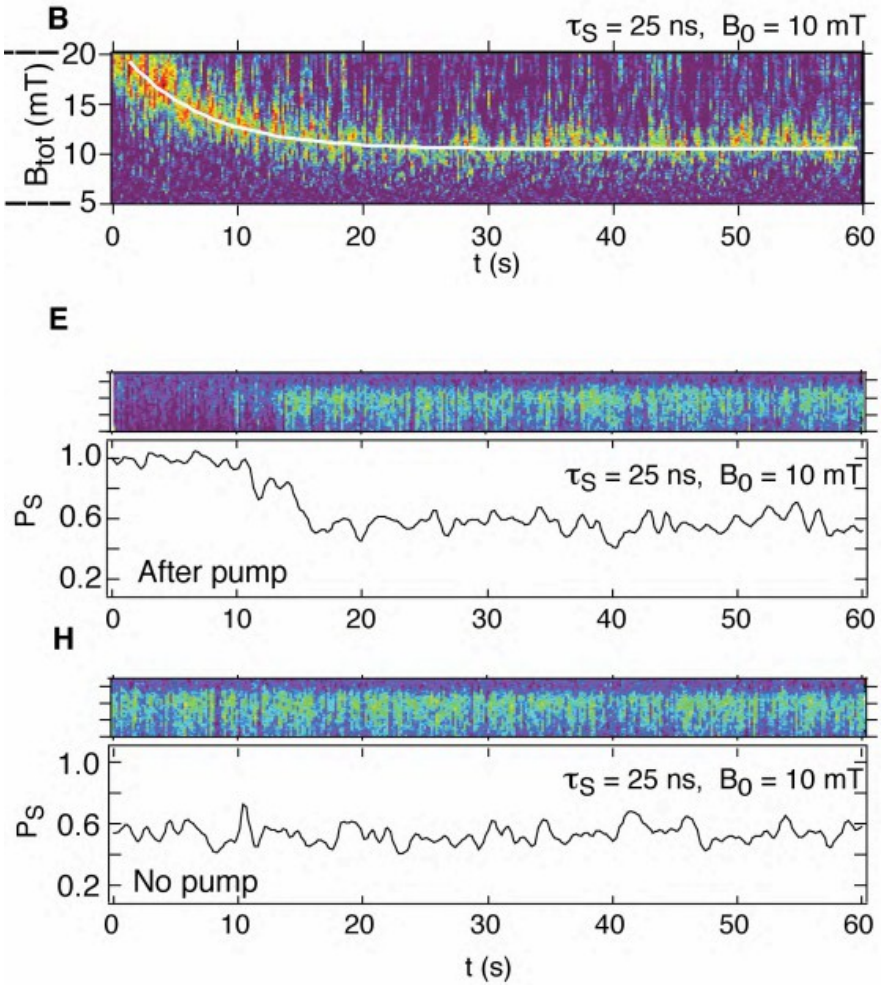


$$\varepsilon \propto V_R - V_L$$



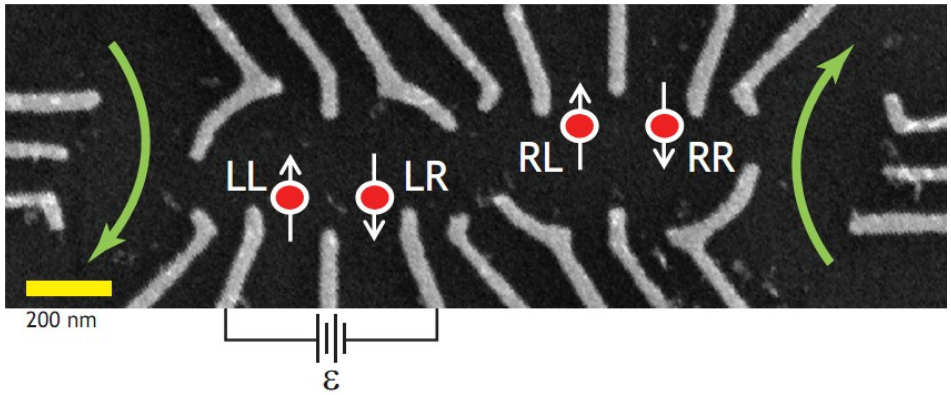
Experimentelle Ergebnisse

Polarisierung der Atom-Spins



Erreichte Zeiten & Genauigkeiten

- Relaxationszeit: T_1=5ms
- Dekohärenzzeit: T_2=276µs
- Dephasierungszeit: T_2*=94ns
- Auslese-Genauigkeit: 97%
- ca. $9{,}2 \cdot 10^3$ Operationen in T_2

Skalierbarkeit

- Momentaner Stand: Erste Versuche mit 2 Qubits laufen, erreichte Fidelity: 0,7 (Shulman, Dial, *et al.* 2012)
- Hoffnung: Nachdem man 2 Qubits hat lässt sich das System sehr schnell auf viele Qubits skalieren