NATURE NEWS BLOG

D-Wave quantum computer solves protein folding problem

17 Aug 2012 | 18:26 BST | Posted by Geoffrey Brumfiel | Category: Physics & Mathematics

NATURE NEWS BLOG

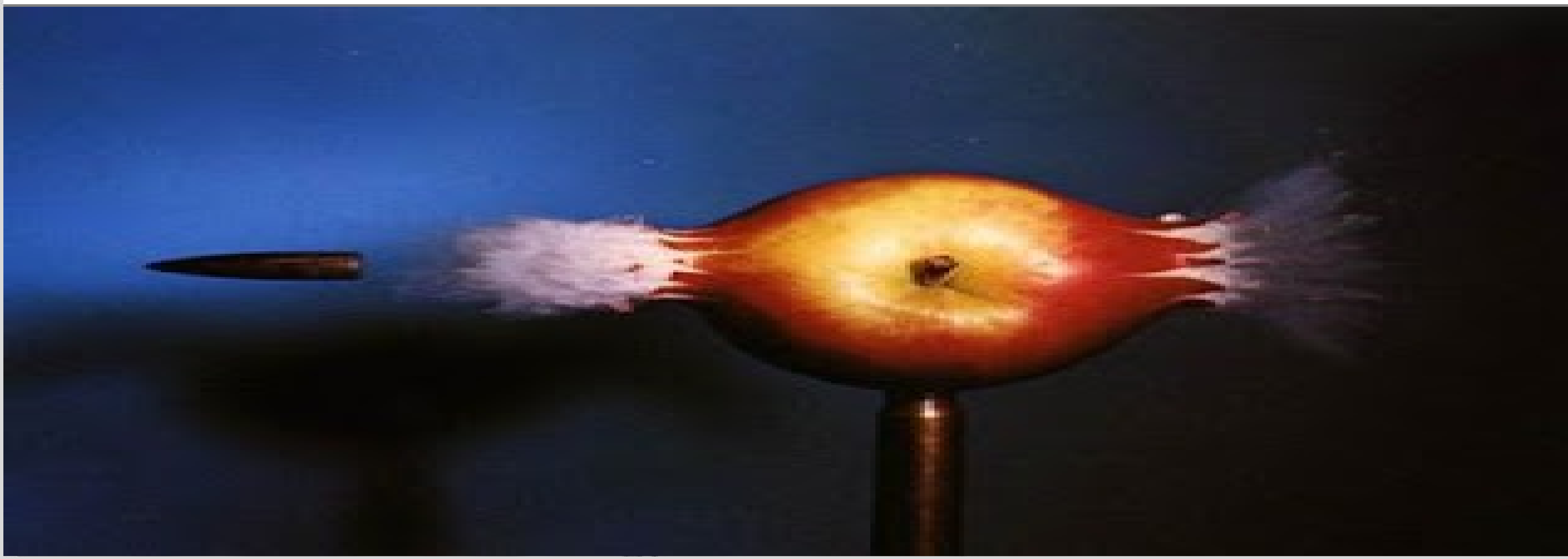
Quantum computer passes speed test

09 May 2013 | 20:24 BST | Posted by nicola jones | Category: Technology

Adiabatisches Quanten Computing

Hauptseminar-Vortrag von: Matthias Hecker

Datum 25.06.2013



Gliederung

1. Adiabatisches Theorem
2. AQC
    1. Vorgehensweise
    2. Bsp. SAT
3. Laufzeit T
4. Grover-Algorithmus
5. Firma D-Wave

Gliederung

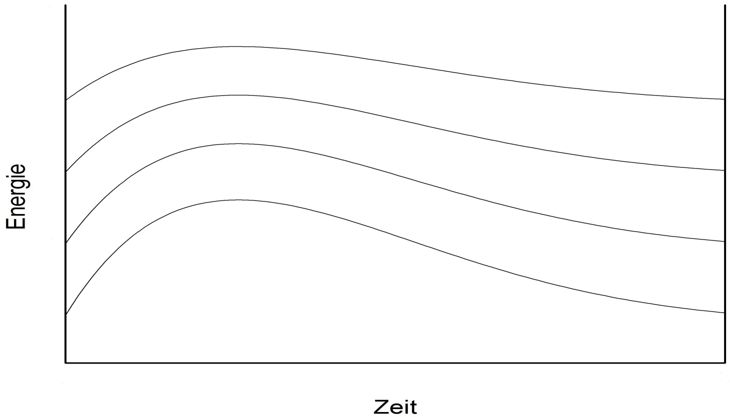
Adiabatisches Theorem

- Änderung des Hamiltonop. unendlich langsam
- → System befindet sich immer im instantanen Eigenzustand

$$H(t_0)\,|n(t_0)\rangle = E_n(t_0)\,|n(t_0)\rangle$$

Wesentliches:

- Keine Sprünge zwischen Energielevel
- Speziell Grundzustand bleibt Grundzustand



Gliederung

1. Adiabatisches Theorem
2. *AQC*
   1. *Vorgehensweise*
   2. *Bsp. SAT*
3. Laufzeit T
4. Grover-Algorithmus
5. Firma D-Wave

Prinzip des adiabat. Computings

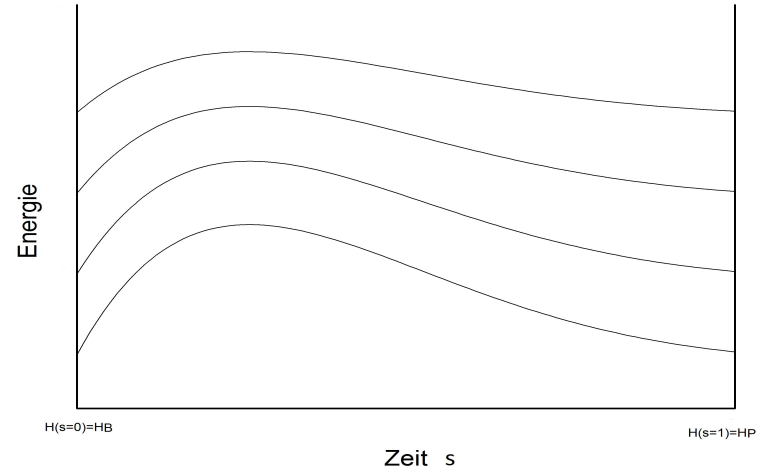
4 Schritte:

1) Anfangshamilton H_B mit bekanntem Grundzustand $|\psi_0(s=0)>$
2) Problemhamilton H_P
3) Laufzeit T (später mehr)
4) Messung von $z_1,\ldots,z_n$

$$H(t) = (1 - \tfrac{t}{T})H_B + (\tfrac{t}{T})H_P$$

bzw.:

$$\tilde{H}(s) = (1 - s)H_B + sH_P$$



Prinzip des adiabat. Computings

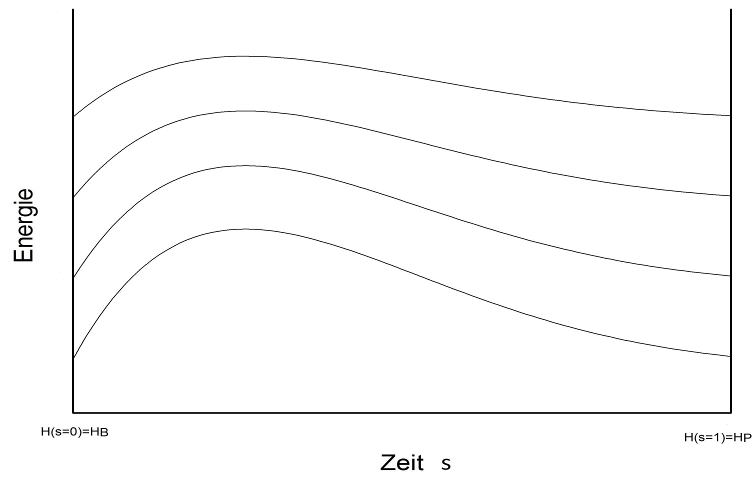
4 Schritte:

1) Anfangshamilton H_B mit bekanntem Grundzustand $|\psi_0(s=0)\rangle$
2) Problemhamilton H_P
3) Laufzeit T (später mehr)
4) Messung von $z_1,\ldots,z_n$

$$H(t) = (1-\frac{t}{T})H_B + (\frac{t}{T})H_P$$

bzw.:

$$\tilde{H}(s) = (1-s)H_B + sH_P$$



Anfangs-Hamilton (H_B)

$$|\hat{0}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}\begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$|\hat{1}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}\begin{pmatrix} 1 \\ -1 \end{pmatrix}$$

- Wähle H_B so:

$$H_B = \sum_{z \neq \{0^n\}} |\hat{z}\rangle \langle \hat{z}|$$

mit Grundzustand: $$|\psi_0\rangle = |\hat{0}_1, \hat{0}_2, ..., \hat{0}_n\rangle$$

- Für 1 Qubit (n=1):

$$H_B = |\hat{1}\rangle \langle \hat{1}| = \frac{1}{2}(|0\rangle - |1\rangle)(\langle 0| - \langle 1|) = \frac{1}{2}\begin{pmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{pmatrix}$$

Anwendung auf 3SAT (H_B)

- Beispiel 1 Qubit mit einer Bedingung:

Hamilton: $$H_B = \frac{1}{2}(1 - \sigma_x) = \frac{1}{2}\begin{pmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{pmatrix}$$

Grundzustand: $$|\psi_0(s=0)\rangle = |\hat{0}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle)$$

Prinzip des adiabat. Computings

Karlsruhe Institute of Technology

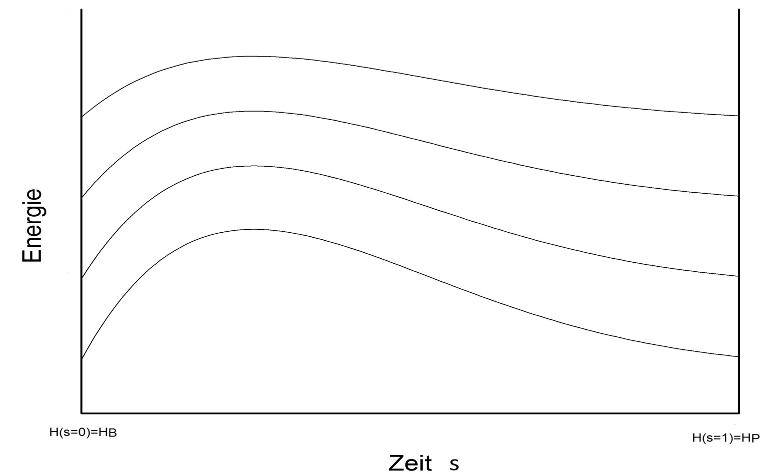
4 Schritte:

1) Anfangshamilton H_B mit bekanntem Grundzustand $|\psi_0(s=0)>$
2) Problemhamilton H_P
3) Laufzeit T (später mehr)
4) Messung von $z_1,\ldots,z_n$

$$H(t) = (1 - \frac{t}{T})H_B + (\frac{t}{T})H_P$$

bzw.:

$$\tilde{H}(s) = (1 - s)H_B + sH_P$$



Satisfiability (Erfüllbarkeit)

- Erstes bekanntes NP-Complete Problem
- Können alle Bedingungen erfüllt werden ?

$$(X1 \text{ or } X2 \text{ or } \overline{X3})$$
$$(\overline{X1} \text{ or } \overline{X2} \text{ or } X3)$$
$$(\overline{X1} \text{ or } \overline{X2} \text{ or } \overline{X3})$$
$$(\overline{X1} \text{ or } X2 \text{ or } X3)$$

Anwendung auf 3SAT (H_P)

- Für jede Bedingung C: Energiefunktion h_C

  Hamilton $H_{P,C}$

so, dass gilt: $$H_{P,C}\left|z_1, z_2, ..., z_n\right\rangle = h_C(z_i, z_j, z_k)\left|z_1, z_2, ..., z_n\right\rangle$$

mit $$h_C(z_i, z_j, z_k) = \begin{cases} 0, & \text{wenn } (z_i, z_j, z_k) \text{ erfüllen Bed. C} \\ 1, & \text{wenn } (z_i, z_j, z_k) \text{ verletzen Bed. C} \end{cases}$$

$\rightarrow$ $$H_P = \sum_C H_{P,C}$$

Anwendung auf 3SAT (H_P)

- Einfachstes Problem: 1 Qubit + 1 Bedingung C
- Bedingung sei: $$h_C(z) = \begin{cases} 0, & \text{wenn } z = 1 \\ 1, & \text{wenn } z = 0 \end{cases}$$

$$\longrightarrow \qquad H_P = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$$

- Hier: Grundzustand $|\psi_o\rangle = |1\rangle$ bereits bekannt. I.A. jedoch nicht.

Prinzip des adiabat. Computings

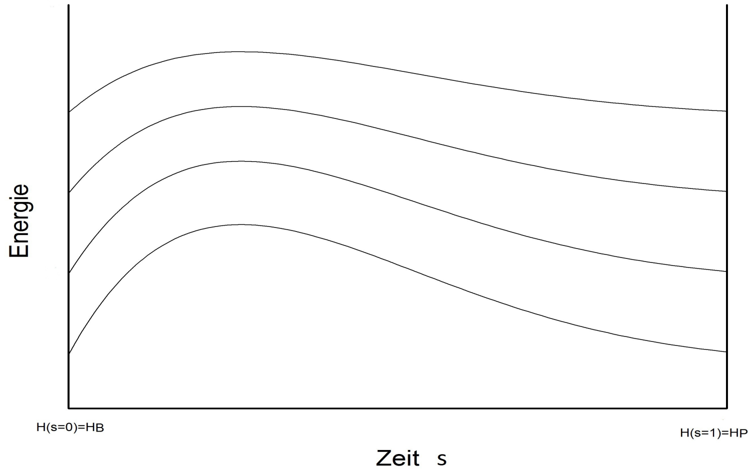
4 Schritte:

1) Anfangshamilton H_B mit bekanntem Grundzustand $|\psi_0(s=0)>$
2) Problemhamilton H_P
3) *Laufzeit T (später mehr)*
4) *Messung von $z_1,\ldots,z_n$*

$$H(t) = (1-\frac{t}{T})H_B + (\frac{t}{T})H_P$$

bzw.:

$$\tilde{H}(s) = (1-s)H_B + sH_P$$

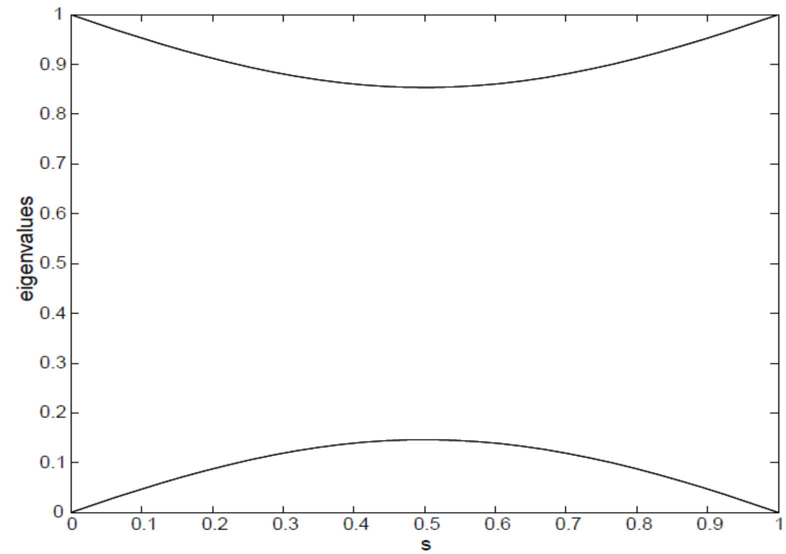


Anwendung auf 3SAT (Energielevel)

- Ziel: Eigenwerte von $\tilde{H}(s)$

$$\tilde{H}(s) = (1-s)H_B + sH_P = \frac{1}{2}\begin{pmatrix} 1+s & -1+s \\ -1+s & 1-s \end{pmatrix}$$

$$\longrightarrow \quad E_{1,2} = \frac{1}{2} \pm \frac{1}{2}\sqrt{1+2(s^2-s)}$$



Gliederung

1. Adiabatisches Theorem
2. AQC
   1. Vorgehensweise
   2. Bsp. SAT
3. *Laufzeit T*
4. Grover-Algorithmus
5. Firma D-Wave

Laufzeit T

- Kriterium: $$T >> \frac{\langle 0|\frac{d\tilde{H}}{ds}|1\rangle}{g_{min}^2}$$

Ordnung eines typischen Eigenwertes. Nicht zu groß.

Ausschlaggebend.
I.A. schwer analytisch zu bestimmen.

- Probleme wenn $g_{min} \propto a^{-N}$ (anti-crossing) oder gar g_{min}=0 (level crossing)

Level Crossing

- $E_1(s)=E_0(s)$
- Allg. 2x2 Hamilton: $\tilde{H}(s)=\begin{pmatrix} a(s) & c(s)+id(s) \\ c(s)-id(s) & b(s) \end{pmatrix}$

a=b
c=d=0

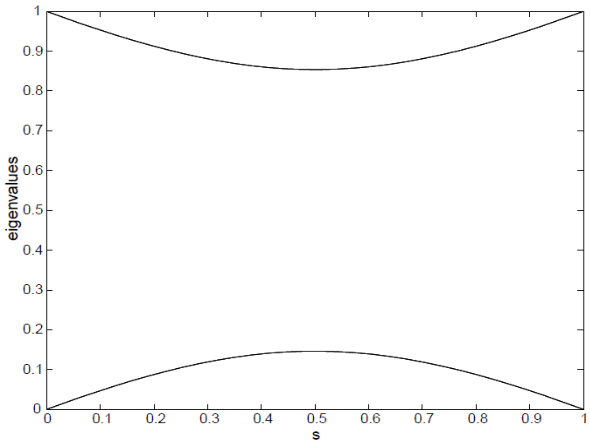
Wahrscheinlich nur für Symmetrien

- Bsp $[H,\sigma_x]=0$ → a=b und d=0
- Auch für NxN Hamilton: keine Symmetrie
  → kein Level Crossing

Rechtfertigung für H_B-Wahl

- Wir wählten: $H_B = \frac{1}{2}\begin{pmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{pmatrix}$

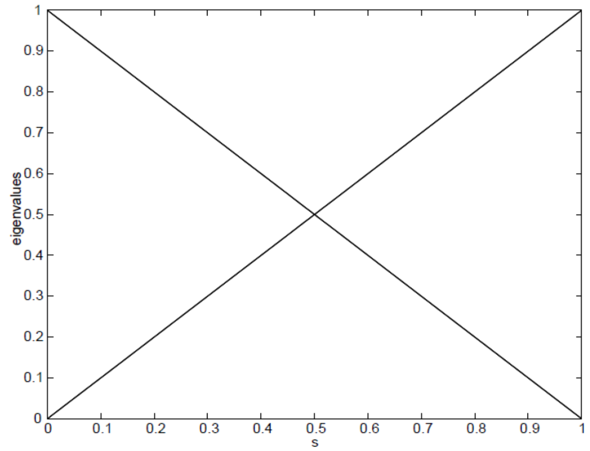
$$\longrightarrow \quad \tilde{H}(s) = \frac{1}{2}\begin{pmatrix} 1+s & -1+s \\ -1+s & 1-s \end{pmatrix}$$



- Hätten wir beispielsweise gewählt:

$$H_B' = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\longrightarrow \quad \tilde{H}(s) = \begin{pmatrix} s & 0 \\ 0 & 1-s \end{pmatrix}$$

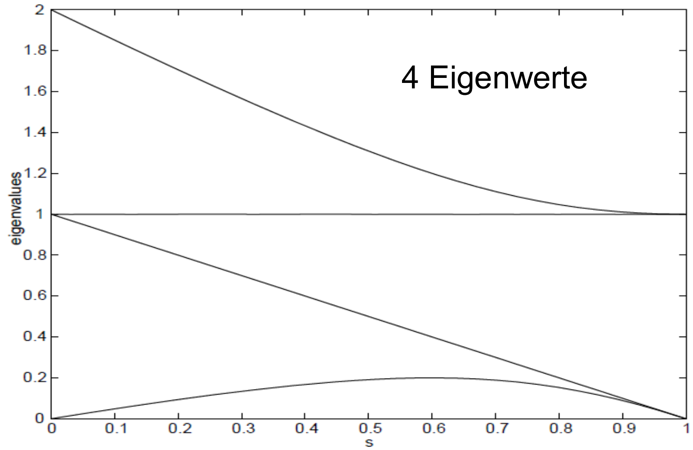


Quelle: Ref.: Quantum Computation by Adiabatic Evolution (Edward Farhi, Jeffrey Goldstone, Sam Gutmann, Michael Sipser) Jan.2000

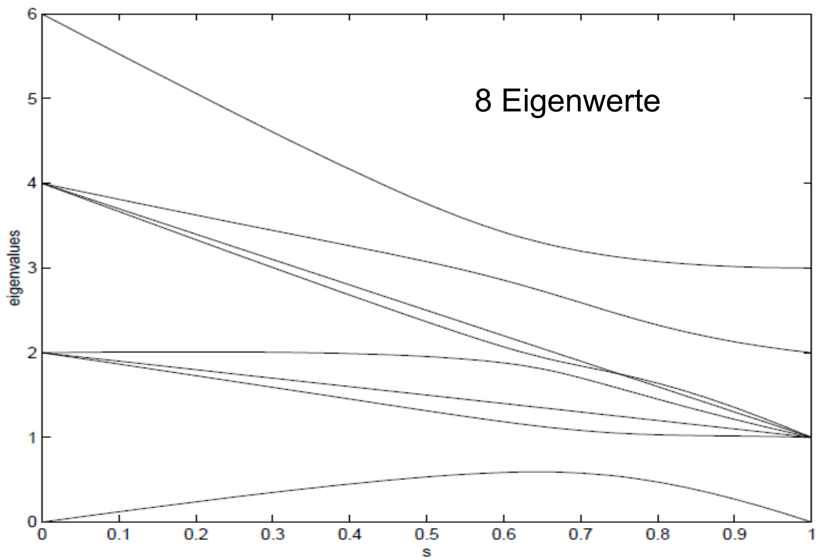
2SAT mit mehreren Qubits und Bed. 'Disagree'

- 2-Qubit Disagree:

$$h_C(z_1, z_2) = \begin{cases} 0, & \text{wenn } |01\rangle \text{ oder } |10\rangle \\ 1, & \text{wenn } |00\rangle \text{ oder } |11\rangle \end{cases}$$



- 3-Qubit auf einem Ring:



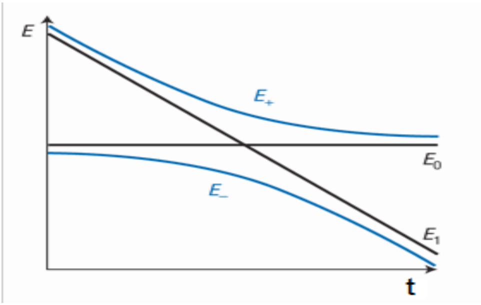
Quelle: Ref.: Quantum Computation by Adiabatic Evolution (Edward Farhi, Jeffrey Goldstone, Sam Gutmann, Michael Sipser) Jan.2000

- N-Qubit auf einem Ring (Agree und Disagree):

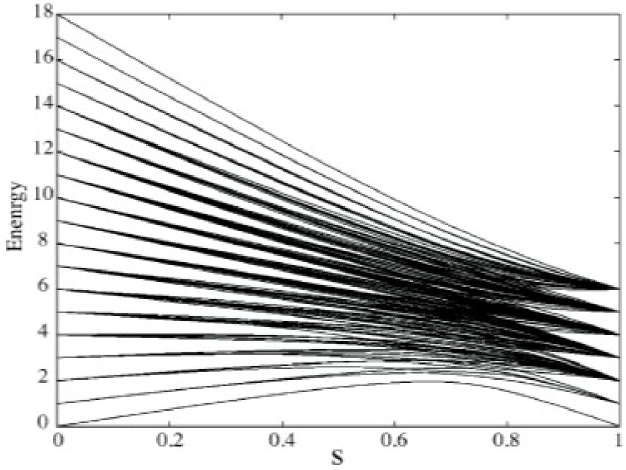
Man findet: $g_{min} \approx \frac{4\pi}{3N} \longrightarrow T >> \frac{\langle 0 | \frac{d\tilde{H}}{ds} | 1 \rangle}{g_{min}^2} \approx \frac{O(N)}{O(N^{-2})} = c \cdot N^3$

Exponentiell kleine Gaps (anti-crossings)

- 2011 Dickson & Amin: -Algorithmus zum Eliminieren kleiner Gaps (AQO)
  -Speziell für IsingChain



Quelle: http://www.nature.com/nphys/journal/v1/n2/fig_tab/nphys159_F1.html



Quelle: Robustness of adiabatic quantum computation (Andrew M. Childs, Edward Farhi, John Preskill) 2001

- 7-Qubit Fall von Exact Cover

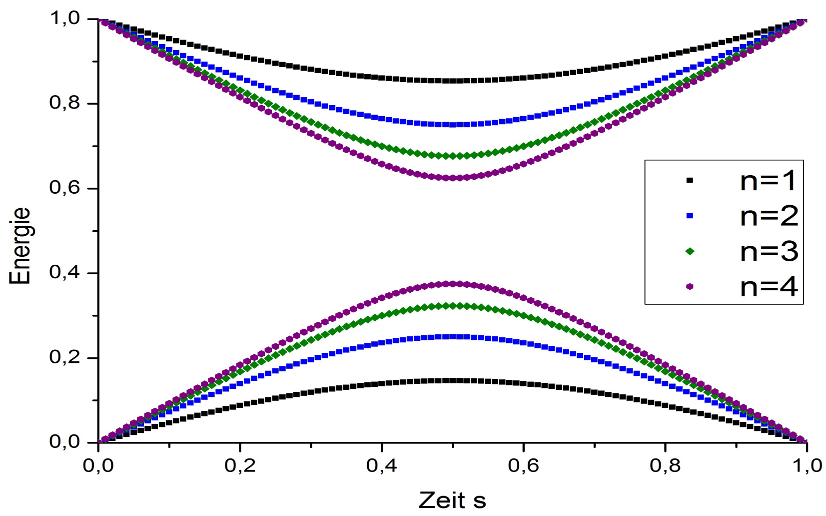
Gliederung

1. Adiabatisches Theorem
2. AQC
    1. Vorgehensweise
    2. Bsp. SAT
3. Laufzeit T
4. *Grover-Algorithmus*
5. Firma D-Wave

Beispiel Grover-Algorithmus

- Lov Grover (1996)
- Algorithmus durchsucht Datenbank: Klassisch $O(N)$

  Grover $O(\sqrt{N})$
- Mögliche Anwendung: Invertierung $y = f(x) \quad \rightarrow \quad x = g(y)$



Gliederung

1. Adiabatisches Theorem
2. AQC
    1. Vorgehensweise
    2. Bsp. SAT
3. Laufzeit T
4. Grover-Algorithmus
5. *Firma D-Wave*

D:Wave
The Quantum Computing Company™

- Gegründet 1999, Canada
- Ursprünglich Nebenzweig der UBC
- Finanzierte Forschung im Bereich 'Quantum Computing'
  → Zusammenarbeit mit versch. Universitäten
  → viele Veröffentlichungen
- Heute ca. 60 Mitarbeiter

Erarbeitung eines Konzepts

- Welche Art von Quanten ?

  Atome, Flux Qubits, ...

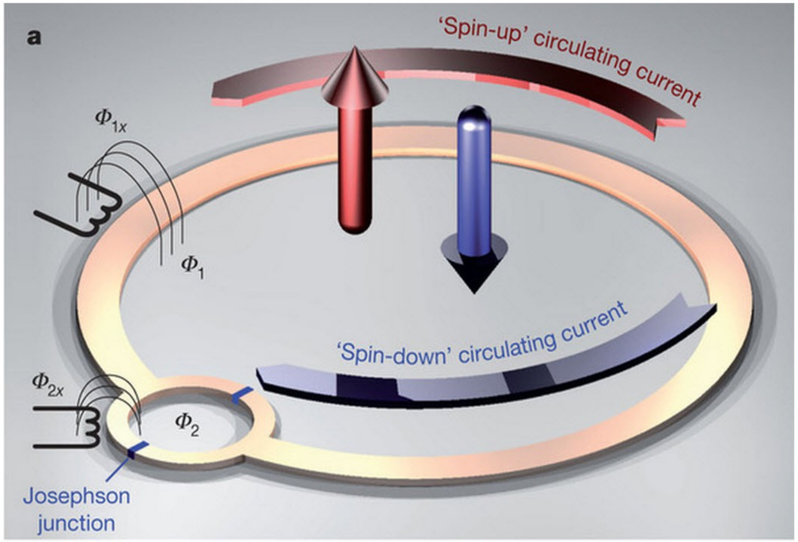
- Welche Methode ?

  Circuit Model, AQC (QA), ...

Supraleitende Flux Qubits

Gründe:

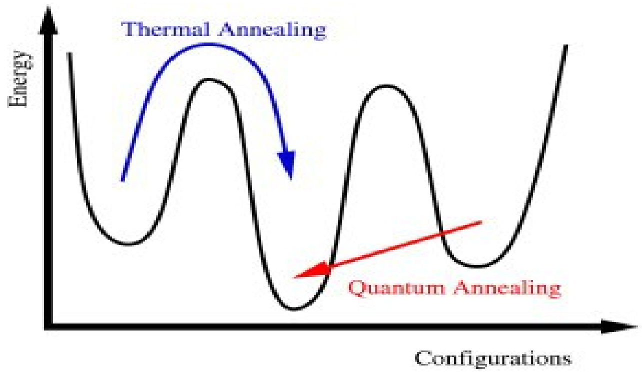
- Halbleiter-Wissen vorhanden zur Fabrikation
- Relativ groß:
  1) leichter kontrollierbar
  2) Programmierung durch Standard-Signale möglich
- Kritikpunkt: Verschränkung ?!



Quelle: http://www.kurzweilai.net/lockheed-martin-buys-first-d-wave-quantum-computing-system

Quantum Annealing

- Gründe:
  Grundzustand 'natürlich', im Gegensatz zu instabilen Anregungszuständen



- D-Wave Hydra Prozessoren widmen sich 2D-Ising Modell

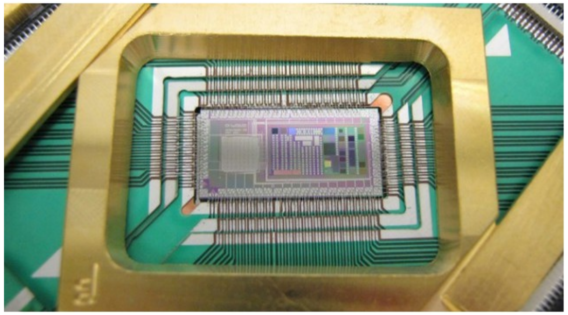
$$H = \underbrace{\sum_i h_i \sigma_i^z + \sum_{i,j} J_{ij} \sigma_i^z \sigma_j^z}_{H_p} + \underbrace{\sum_i \Delta_i(t) \sigma_i^x}_{H'}$$

Produkte

Quelle: http://www.forbes.com/sites/alexknapp/2011/05/26/q-and-a-with-d-waves-dr-geordie-rose-on-quantum-computing/

- 2007: Prototyp Orion System
  - -16 Qubit
- 2011: D-Wave One
  - -Kosten $10 Mio.
  - -128 Qubit
  - -neuer Vertragspartner: Lockheed Martin
- Anf. 2013: D-Wave Two
  - -512 Qubit
  - -Investoren: NASA & Google

Dr. Geordie Rose



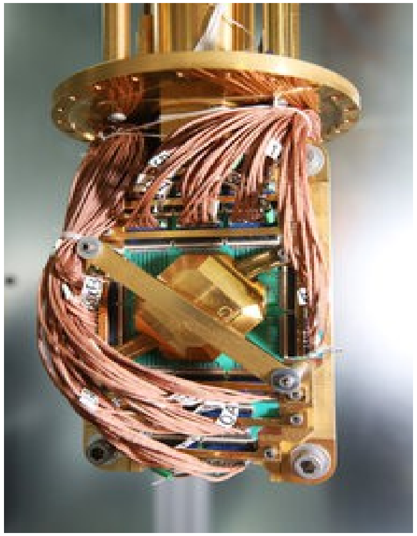
Quelle: http://www.extremetech.com/extreme/155380-quantum-computer-wins-first-ever-speed-test-against-a-conventional-intel-pc

FunFact:

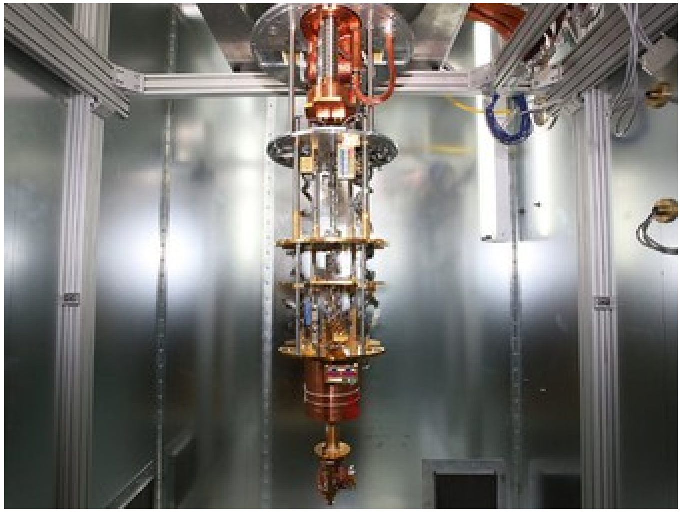
- Patent Portfolio versichert Monopol für weitere mind. 15 Jahre

Quellen

- **Quantum Computation by Adiabatic Evolution** (Edward Farhi, Jeffrey Goldstone, Sam Gutmann, Michael Sipser) Jan.2000
- **How Powerful is Adiabatic Quantum Computation?** (Wim van Dam, Michele Mosca, Umesh Vazirani)2002
- **On Quantum Simulators and Adiabatic Quantum Algorithms** (Sarah Mostame) 2008
- **Robustness of adiabatic quantum computation** (Andrew M. Childs, Edward Farhi, John Preskill) Aug.2001
- http://www.dwavesys.com/en/company.html
- http://en.wikipedia.org/wiki/D-Wave_Systems



Quelle: http://bits.blogs.nytimes.com/2013/05/08/a-quantum-computer-aces-its-test/



Quelle: http://bits.blogs.nytimes.com/?s=a+quantum+computer+aces+its+test