

# Ein Quantensprung?

## Neuste Entwicklungen im Quantencomputing

Elisabeth Lobe

Simulations- und Softwaretechnik

Software für Raumfahrtsysteme und interaktive Visualisierung

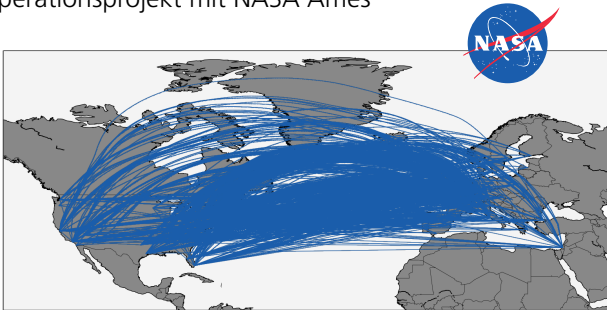
10. Forschungstag Raumfahrt • „Neue Horizonte“ • 26. April 2017

Wissen für Morgen



# Motivation: (zu) komplexe Probleme

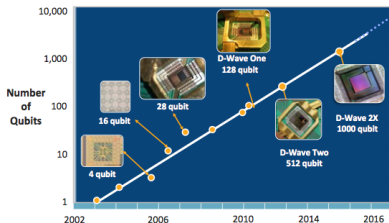
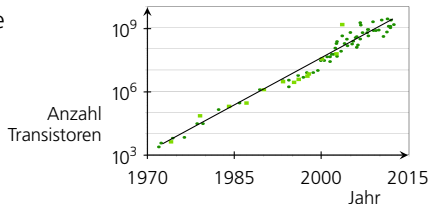
- Problem: 984 transatlantische Flüge am Tag
- Ausgangsdaten: Wind-optimale Trajektorien [1]
- Ziel: Vermeidung von Konflikten bei minimaler Verzögerung
- Kooperationsprojekt mit NASA Ames



# Ende des Mooreschen Gesetzes?

Verdoppelung der Transistorenzahl alle 2 Jahre

- Mit zunehmender Transistordichte werden störende Quanteneffekte relevanter
- Ablösung der klassischen Halbleitertechnik?



⇒ Quantentechnologien könnten der nächste Schritt sein

Beispiel D-Wave Systems [2]



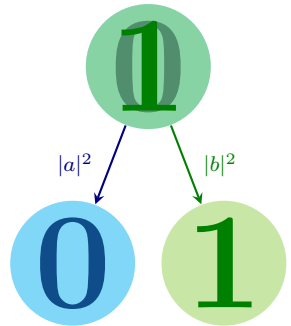
# Gliederung

1. Überblick Quantencomputing
2. Adiabatisches Quanten-Annealing
3. Anwendungen



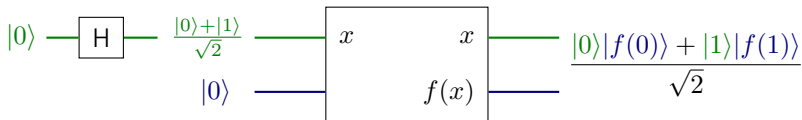
# Quantenbits (Qubits)

- Wert eines klassischen Bits ist **entweder „0“ oder „1“**
- Zustand eines Quantenbits ist Superposition von „0“ **und** „1“  
 $|\phi\rangle = a|0\rangle + b|1\rangle$
- Messung verändert Zustand in
  - $|\phi\rangle = |0\rangle$  mit Wahrscheinlichkeit  $|a|^2$
  - $|\phi\rangle = |1\rangle$  mit Wahrscheinlichkeit  $|b|^2$
- Ergebnis entspricht klassischer Information



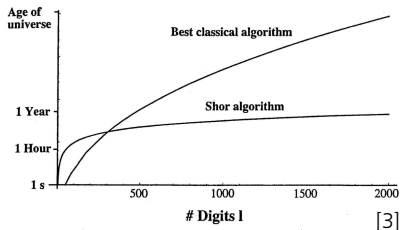
# Universeller Quantencomputer

- Rechnen auf Qubits durch
  - Zusammenfassen von Qubits in Quantenregistern
  - Manipulation der Quantenzustände durch Verändern der Parameter
- Quantenparallelität: Gleichzeitiges Rechnen auf „0“ **und** „1“
- Verschränkung: Wert des 1. an Wert des 2. Qubits gebunden
- Messung liefert nur ein Ergebnis:  $|0\rangle|f(0)\rangle$  **oder**  $|1\rangle|f(1)\rangle$



# Quantenalgorithmen

Algorithmus	Laufzeit		Anwendung
	klassisch	QC	
Deutsch-Josza	$2^n$	1	Akademisch
Grover	$n$	$\sqrt{n}$	Suche in unsortierten Datenbanken
Shor	$2^n$	$n^4$	Primfaktorzerlegung, Kryptographie

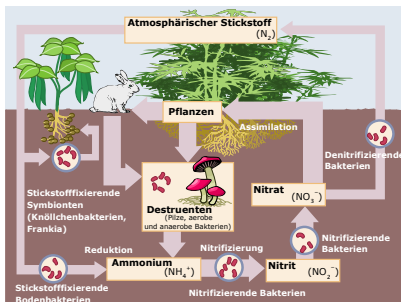


- Manipulation bis Erfolgswahrscheinlichkeit maximal
- Probabilistisch: Keine Garantie, dass Ergebnis richtig ist



# Erforschung von Quantensystemen

- ➔ Klassische Simulation nur bis 50 Qubits möglich
- ➔ Naheliegend: Quantensimulation mit Quantencomputern
- ➔ Mögliche „Killerapplikation“: Stickstofffixierung



Stickstoffkreislauf [4]

400 Qubits in universellem  
Quantencomputer



⇒ Verständnis der  
quantenchemischen  
Prozesse in Bakterien



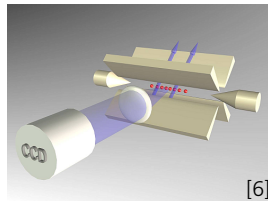
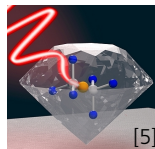
Entwicklung eines  
günstigen Katalysators





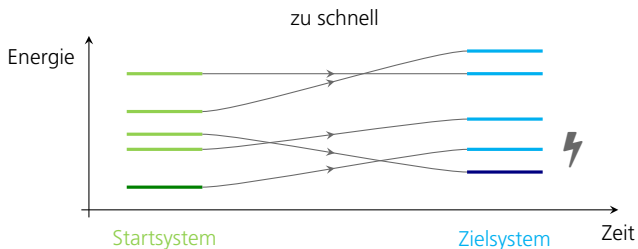
# QC – Stand der Technik

- Verschiedene Ansätze zur Realisierung von Qubits
  - Verunreinigungen im Diamantgitter
  - Ionenfallen
- Rekord: 2011, Universität Innsbruck, 14 Qubits [7]
- Problematisch
  - Realisierung der Verschränkung
  - Dekohärenz
  - Relaxation
- Derzeit noch eine Zukunftstechnologie



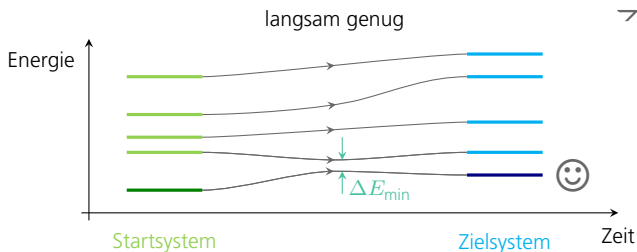
# Ausgangspunkt: Adiabatisches Theorem

- Quantensysteme haben diskrete Energieniveaus (Beispiel Atom)
  - Grundzustand: niedrigste Energie
- Überführung von einem Quantensystem in ein anderes
  - Beispielsweise durch Änderung äußerer Einflüsse



# Ausgangspunkt: Adiabatisches Theorem

- Quantensysteme haben diskrete Energieniveaus (Beispiel Atom)
  - Grundzustand: niedrigste Energie
- Überführung von einem Quantensystem in ein anderes
  - Beispielsweise durch Änderung äußerer Einflüsse



- minimale Laufzeit

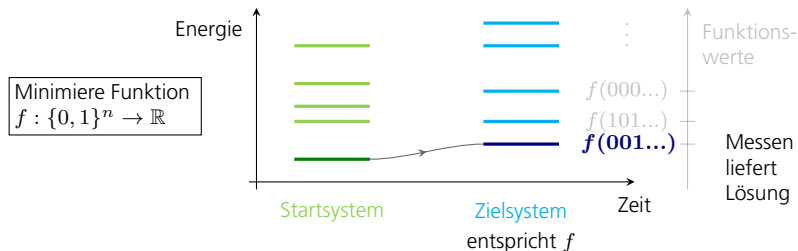
$$\approx c \cdot \frac{1}{\Delta E_{\min}}$$



# Adiabatische Optimierung

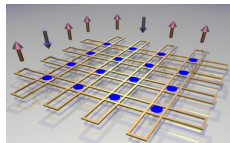
Lösen von Minimierungsproblemen über adiabatische Entwicklung

- Kodieren der Lösung im Grundzustand eines Quantensystems
- Präparieren eines Startsystems mit bekannten Grundzustand
- Langsame Überführung liefert Zielgrundzustand



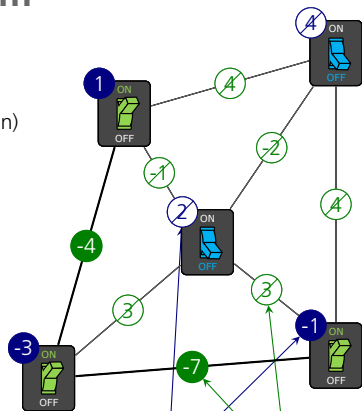
# AQA - Stand der Technik

- Erstes kommerzielles System von D-Wave Systems Inc. [2]
  - Kunden: Google/NASA,  
Lockheed Martin/USC,  
Los Alamos National Laboratory
  - Das Quantensystem bilden ca. 2000  
überlappende supraleitende Spulen
  - Die Spinrichtungen der magnetischen  
Felder der Spulen entsprechen Qubits
  - DLR hat Zugriff auf die Maschine  
durch Kooperation mit NASA
- Weitere Computer in Entwicklung
  - u.a. durch Google und Lincoln Labs



# The D-Wave 2000Q™ System

- Optimierer für QUBO-Probleme (quadratic unconstrained binary optimization)
  - mit binären Variablen
  - über quadratischen Zielfunktion
  - ohne Nebenbedingungen
- Startzustand:
  - alle Qubits in Superposition gleichgewichtet 0 und 1
  - Gewichte auf 0
- Entwicklung:
  - Anschalten der Gewichte
  - Auflösen der Superpositionen



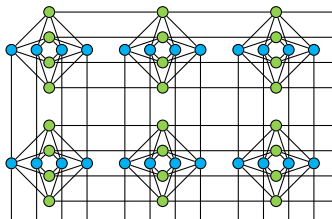
$$f(x) = \sum_i H_i x_i + \sum_{i < j} J_{ij} x_i x_j$$

mit  $x_i \in \{0, 1\}$

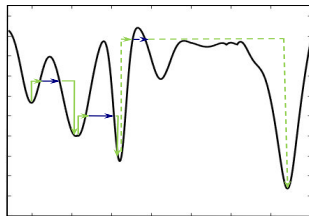


# Fragestellungen

- Welche Probleme lassen sich auf die Rechnerarchitektur übertragen und wie?
- Zeigt sich eine Überlegenheit für diese Probleme?
- Gibt es darunter relevante Anwendungsprobleme?



QUBOs mit stark eingeschränkter Graphenstruktur

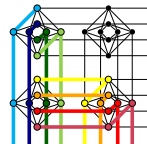


Quanten-Tunneln durch hohe und schmale Barrieren [8]



# Theoretische Forschungsschwerpunkte

- Bestmögliche Einbettung in Rechnerstruktur
- Partitionierung großer Instanzen
- Kombination klassischer und Quantencomputer
- Algorithmenentwurf, Komplexitätstheorie
- Simulation des Ablaufs, Vergleich mit Experiment
- Überlegenheitsnachweis, Benchmarking
- Neuartige Rechnerstrukturen mit höherem Kopplungsgrad



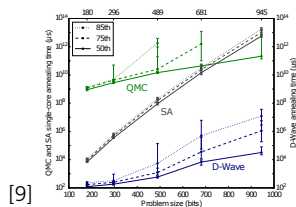
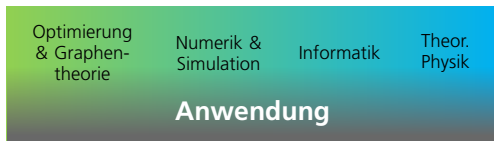
**Algorithm 1** QUBO-Preprocessing

**Input:** Graph  $G = (V, E)$ ,  $w \in \mathbb{R}^V$ ,  $S \in \mathbb{R}^E$

**Output:**  $x \in \{-1, 0, 1\}^V$

```

1: procedure PREPROCESS( $V, E, w, S$ )
2:    $sthChanged \leftarrow \text{True}$ 
3:    $x \leftarrow -1_V$ 
4:   while  $sthChanged$  do
5:      $sthChanged \leftarrow \text{False}$ 
6:     for  $v \in V$  do
7:        $\sigma^+ \leftarrow \frac{1}{2} \sum_{e \in \delta^+(v)} (S_e + |S_e|)$ 
    
```





# Allgemeine Übertragbarkeit

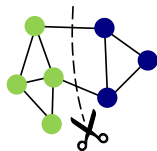
Kombinatorische Optimierungsprobleme, z.B.

- Graphenpartitionierung
- Erfüllbarkeitsproblem

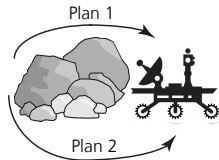
⇒ Einige Standardmethoden etabliert

Fortgeschrittene Anwendungen (NASA)

- Planungsprobleme
  - Machine-Job-Scheduling [10]
  - Mars-Lander Operations [12]
- Maschinelles Lernen [13]



$$(x \wedge y) \vee (x \wedge \bar{y}) = \text{wahr?}$$

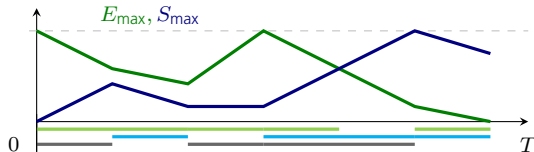
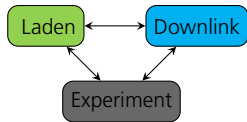


# Satellitenmissionsplanung

- Satellit nimmt verschiedene Zustände an
- Orbit durch Simulation gegeben
  - Einschränkungen Ausführbarkeit der Zustände
- Beschränkte Kapazitäten
  - **Energie** – Laden der Batterien in der Sonne
  - **Speicher** – Datendownload zur Bodenstation
- Missionsziele
  - Ausführen verschiedener Experimente
  - Maximale Datenmenge sammeln

Nebenbedingungen

Zielfunktion



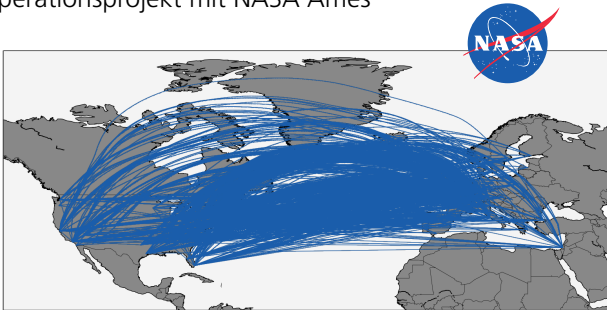
# Satellitenmissionsplanung – Status

- QUBO aufgestellt
- Obwohl sehr stark vereinfachtes Problem
  - Sehr geringe Zahl an Zeitschritten möglich
  - Nebenbedingungen erfordern hohe Zahl an zusätzlichen Variablen
  - Starke Einschränkung durch ganzzahlige Parameter
- Weitere Schritte
  - Beispielhafte Berechnungen auf der D-Wave-Maschine
  - Auswertung der Parameterwahl
  - Betrachtung ähnlicher Probleme mit reduzierten Nebenbedingungen



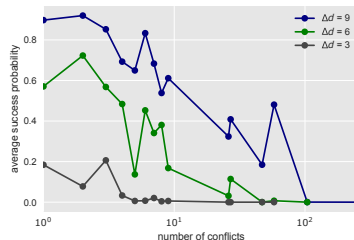
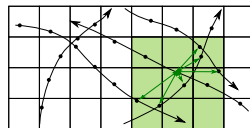
# Luftverkehrsmanagement

- Problem: 984 transatlantische Flüge am Tag
- Ausgangsdaten: Wind-optimale Trajektorien [1]
- Ziel: Vermeidung von Konflikten bei minimaler Verzögerung
- Kooperationsprojekt mit NASA Ames



# Luftverkehrsmanagement – Status

- Optimierungsproblem als QUBO darstellbar
- Erhebliche Vorverarbeitung der Daten nötig
  - Konflikterkennung aus Flugdaten
  - Clustern abhängiger Konflikte
- Kleine Instanzen bereits berechnet
- Vorläufige Ergebnisse
  - Erfolgswahrscheinlichkeit sinkt bei zunehmender Problemgröße
  - Eingeschränkte Genauigkeit der Parameter
- Weitere Schritte
  - Verfeinerung des Modells
  - Evaluation und Anpassung der Parameter



# Zusammenfassung – Ein Quantensprung?

- Physikalische Dimension übertroffen
- Metaphorische noch nicht erreicht

- Adiabatische Quanten-Annealer können Luft- und Raumfahrtprobleme lösen
- Quantencomputer werden zukünftig relevant, z.B. für Betrachtung von Quantensystemen
- Deutliche Hinweise auf Überlegenheit

- Statistische Auswertung der Ergebnisse nötig
- Überlegenheit von Quantencomputern ist noch nicht zweifelsfrei nachgewiesen
- Weitere intensive Forschung nötig



# Referenzen

Dr. Tobias Stollenwerk SC-HPC – tobias.stollenwerk@dlr.de

- *Experiences with Scheduling Problems on Adiabatic Quantum Computers*, T. Stollenwerk, A. Basermann, 2016
- *Quadratische binäre Optimierung ohne Nebenbedingungen auf Chimera-Graphen*, E. Lobe, 2016
- [1] Daten und Bild von O. Rodionova, NASA
- [2] [www.dwavesys.com/](http://www.dwavesys.com/)
- [3] *Quantum Computing: A Short Course from Theory to Experiment*, J. Stolze, D. Suter, 2008
- [4] [de.wikipedia.org/wiki/Stickstoffkreislauf](http://de.wikipedia.org/wiki/Stickstoffkreislauf)
- [5] [www.uni-saarland.de/nc/aktuelles/artikel/nr/16403.html](http://www.uni-saarland.de/nc/aktuelles/artikel/nr/16403.html)
- [6] [www.weltderphysik.de/gebiet/technik/quanten-technik/quantencomputer](http://www.weltderphysik.de/gebiet/technik/quanten-technik/quantencomputer)
- [7] [www.uibk.ac.at/ipoint/news/2011/mit-14-quantenbits-rechnen.html.de](http://www.uibk.ac.at/ipoint/news/2011/mit-14-quantenbits-rechnen.html.de)
- [8] [nirsd.wordpress.com/category/quantum/](http://nirsd.wordpress.com/category/quantum/)
- [9] [arstechnica.co.uk/information-technology/2015/12/google-nasa-our-quantum-computer-is-100-million-times-faster-than-normal-pc/](http://arstechnica.co.uk/information-technology/2015/12/google-nasa-our-quantum-computer-is-100-million-times-faster-than-normal-pc/)
- [10] *Quantum Annealing Implementation of Job-Shop Scheduling*, D. Venturelli u.a., 2016
- [11] [techblog.aimms.com/2012/11/13/scheduling-example-narrowing-time-window-for-smaller-jobs/](http://techblog.aimms.com/2012/11/13/scheduling-example-narrowing-time-window-for-smaller-jobs/)
- [12] *Explorations of Quantum-Classical Approaches to Scheduling a Mars Lander Activity Problem*, T. Tran u.a., 2016
- [13] *Quantum-assisted learning of graphical models with arbitrary pairwise connectivity*, M. Benedetti u.a., 2016



# Fragen?

Elisabeth Lobe

Simulations- und Softwaretechnik

Software für Raumfahrtssysteme und interaktive Visualisierung

[elisabeth.lobe@dlr.de](mailto:elisabeth.lobe@dlr.de)



Wissen für Morgen

