

Ein Quantensprung?

Neuste Entwicklungen im Quantencomputing

Elisabeth Lobe

Simulations- und Softwaretechnik

Software für Raumfahrtsysteme und interaktive Visualisierung

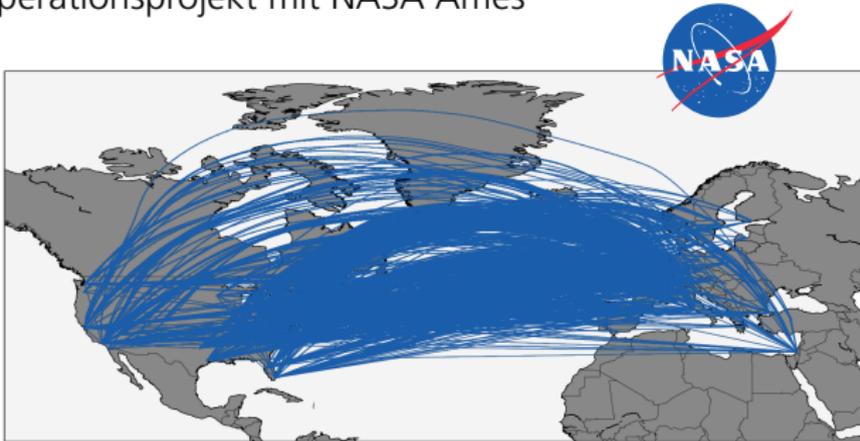
10. Forschungstag Raumfahrt • „Neue Horizonte“ • 26. April 2017

Wissen für Morgen



Motivation: (zu) komplexe Probleme

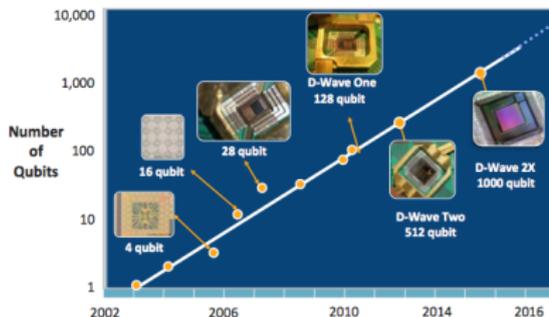
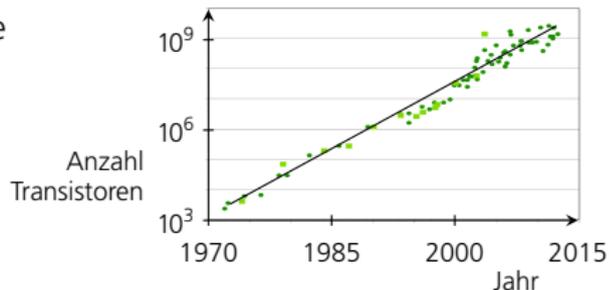
- Problem: 984 transatlantische Flüge am Tag
- Ausgangsdaten: Wind-optimale Trajektorien [1]
- Ziel: Vermeidung von Konflikten bei minimaler Verzögerung
- Kooperationsprojekt mit NASA Ames



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]



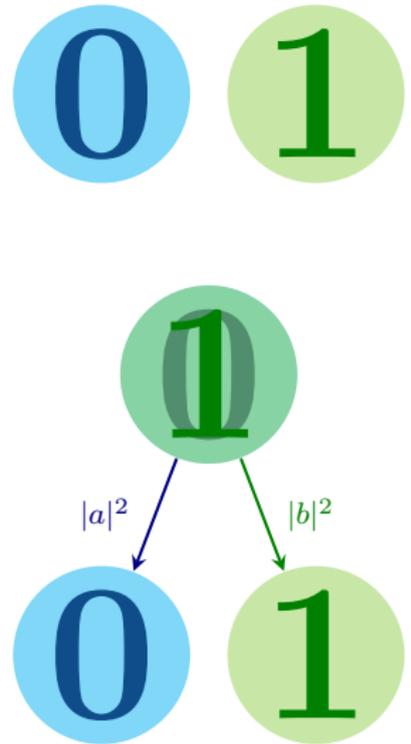
Gliederung

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



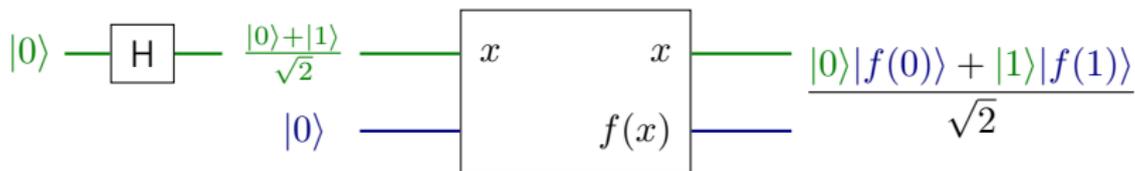
Quantenbits (Qubits)

- 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



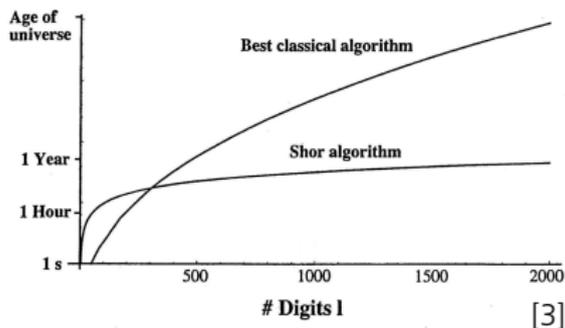
Universeller Quantencomputer

- 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

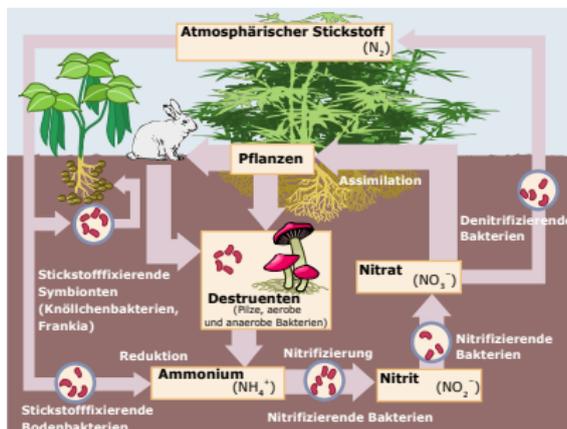


- Manipulation bis Erfolgswahrscheinlichkeit maximal
- Probabilistisch: Keine Garantie, dass Ergebnis richtig ist



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

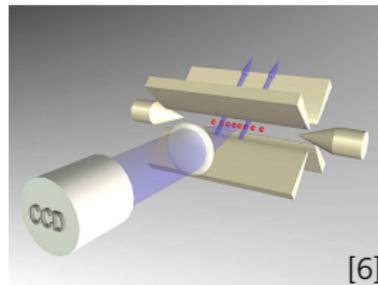
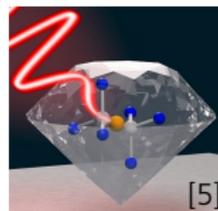


Entwicklung eines
günstigen Katalysators



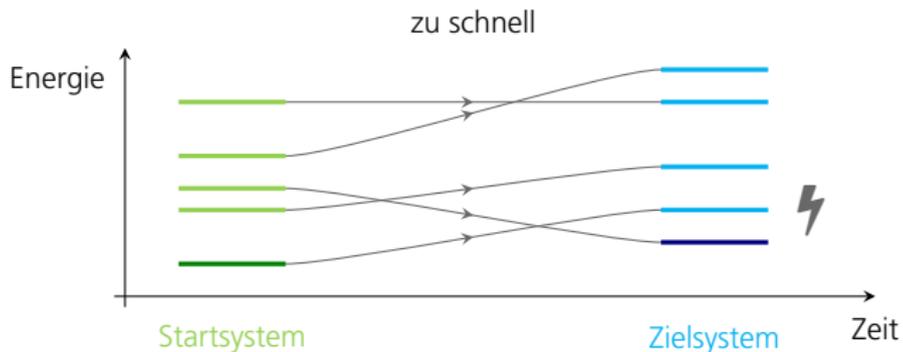
QC – Stand der Technik

- 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



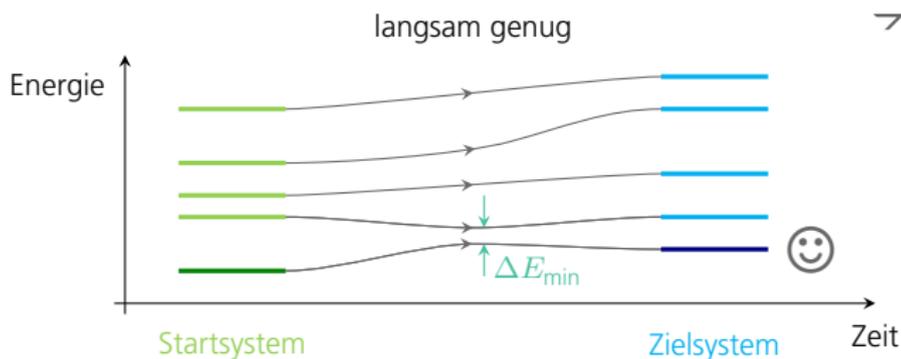
Ausgangspunkt: Adiabatisches Theorem

- 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

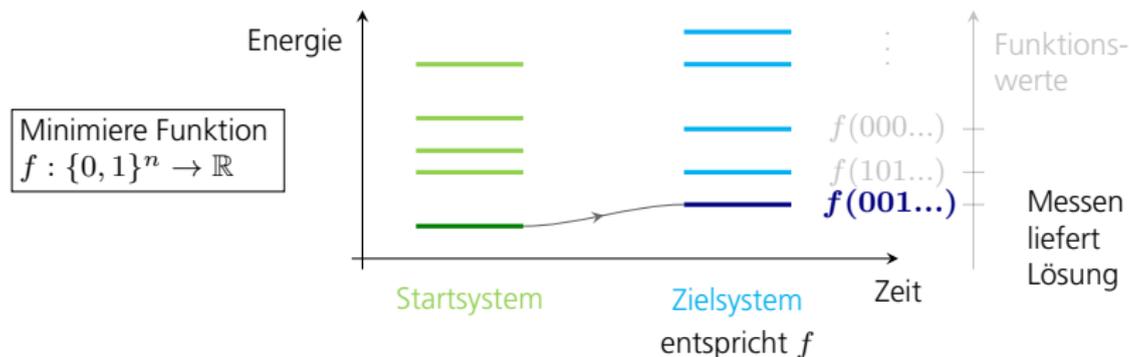
$$\approx c \cdot \frac{1}{\Delta E_{\min}}$$



Adiabatische Optimierung

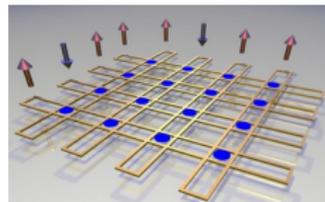
Lösen von Minimierungsproblemen über adiabatische Entwicklung

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



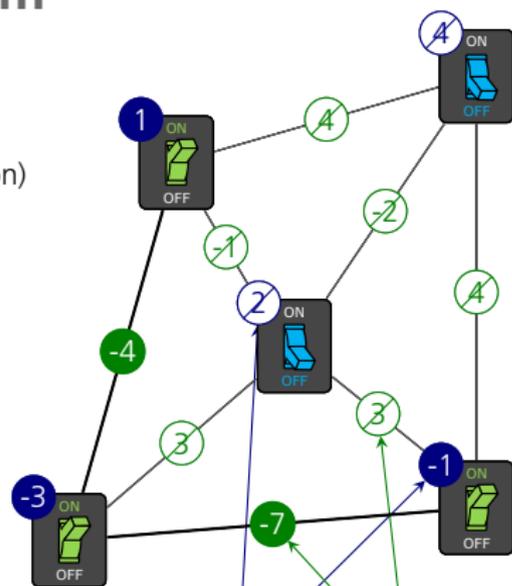
AQA - Stand der Technik

- 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



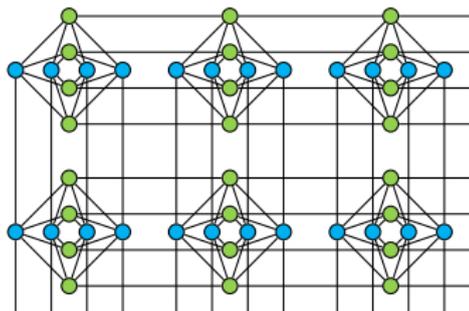
$$f(x) = \sum_i H_i x_i + \sum_{i < j} J_{ij} x_i x_j$$

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

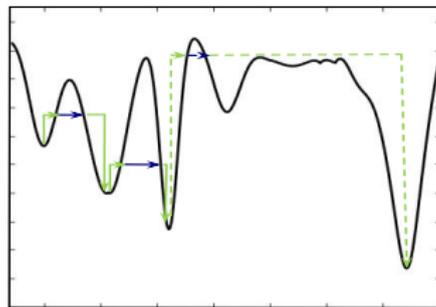


Fragestellungen

- 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

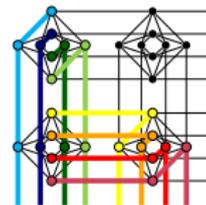


Quanten-Tunneln durch hohe und schmale Barrieren [8]



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

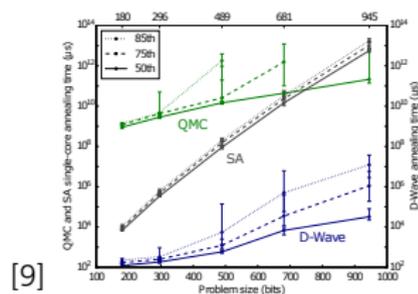
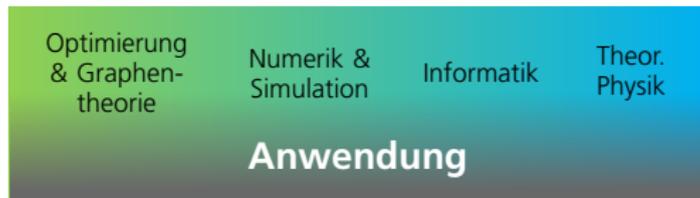
Input: Graph $G = (V, E)$, $w \in \mathbb{R}^V$, $S \in \mathbb{R}^E$

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

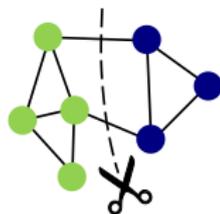
Kombinatorische Optimierungsprobleme, z.B.

- Graphenpartitionierung
- Erfüllbarkeitsproblem

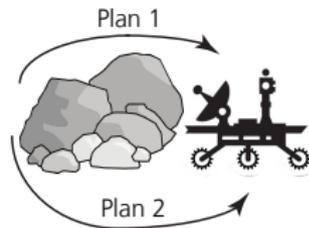
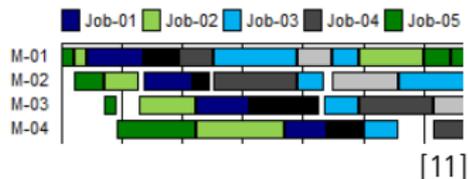
⇒ Einige Standardmethoden etabliert

Fortgeschrittene Anwendungen (NASA)

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



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

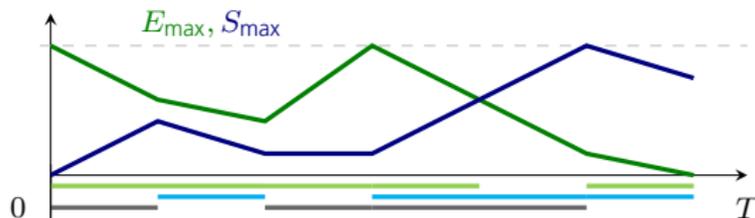
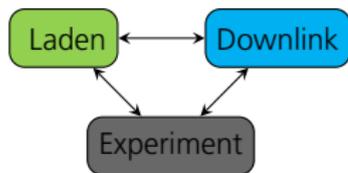


Satellitenmissionsplanung

- 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



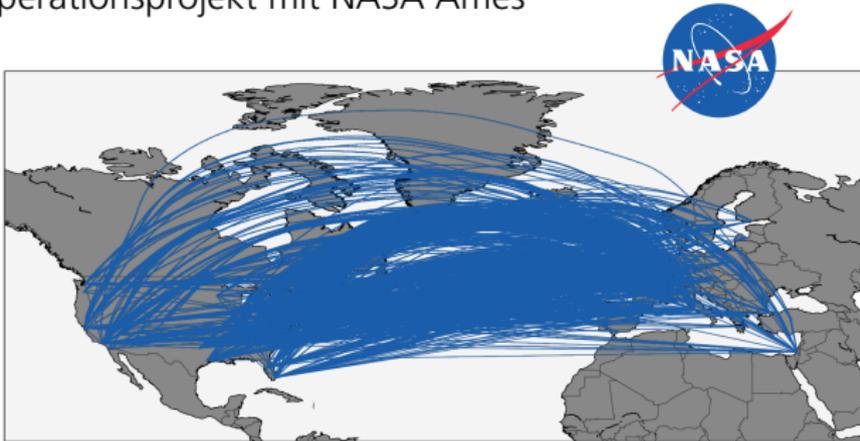
Satellitenmissionsplanung – Status

- 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



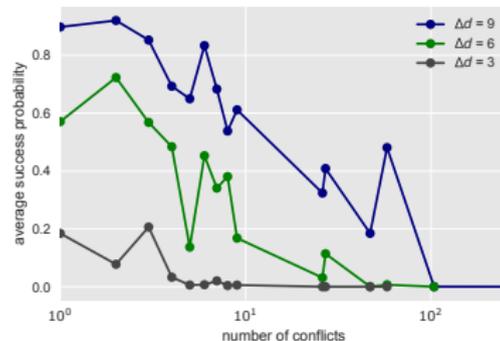
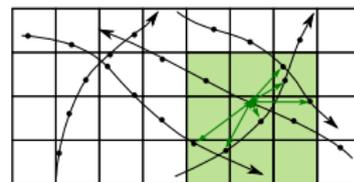
Luftverkehrsmanagement

- 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/
- [3] *Quantum Computing: A Short Course from Theory to Experiment*, J. Stolze, D. Suter, 2008
- [4] de.wikipedia.org/wiki/Stickstoffkreislauf
- [5] www.uni-saarland.de/nc/aktuelles/artikel/nr/16403.html
- [6] www.weltderphysik.de/gebiet/technik/quanten-technik/quantencomputer
- [7] www.uibk.ac.at/ipoint/news/2011/mit-14-quantenbits-rechnen.html.de
- [8] 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/
- [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/
- [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



Wissen für Morgen

