

Zentrum für Quantentechnologien und Anwendungen

Ein IBM Quanten-Innovationszentrum

Stefan Kühn

Security Forum zum Thema "Quanten, QBits
und Security" (TH Brandenburg), 19.01.2023

Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY

Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY

- > Forschungszentrum der Helmholtz-Gemeinschaft
- > Standorte: Hamburg und Zeuthen (Brandenburg)
- > Grundlagenforschung zur Entschlüsselung der Struktur der Materie

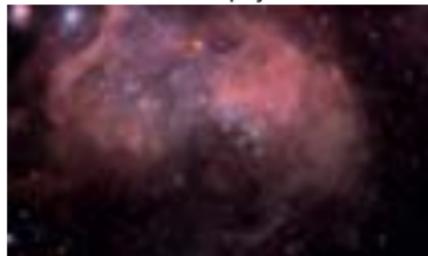
Beschleuniger



Forschung mit Photonen



Teilchenphysik



Astroteilchenphysik



Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY

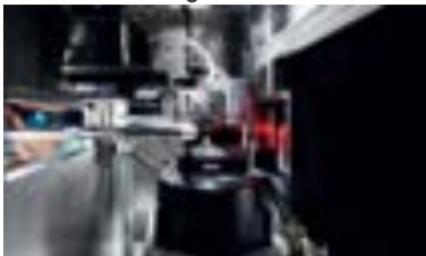
Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY

- > Forschungszentrum der Helmholtz-Gemeinschaft
- > Standorte: Hamburg und Zeuthen (Brandenburg)
- > Grundlagenforschung zur Entschlüsselung der Struktur der Materie

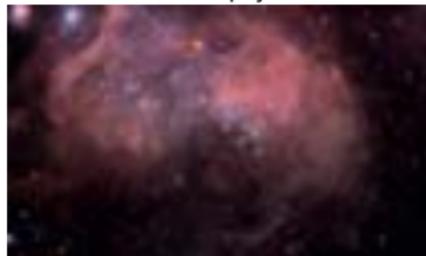
Beschleuniger



Forschung mit Photonen



Teilchenphysik



Astroteilchenphysik



- > Zentrum für Quantentechnologien und Anwendungen



Überblick

Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY

Zentrum und Schwerpunktaktivitäten

Ein Anwendungsbeispiel: optimale Flugzuordnung zu Gates

Zusammenfassung & Ausblick

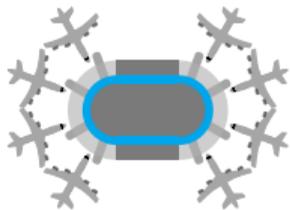
Zentrum und Schwerpunktaktivitäten

Quantencomputer haben das Potential Innovationen voranzutreiben

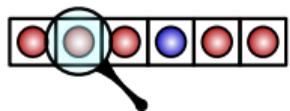
> Faktorisieren von Zahlen

$$70747 = 263 \times 269$$

> Optimierungsprobleme

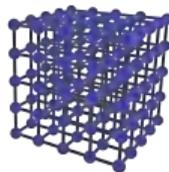


> Suche in Datenbanken

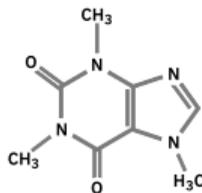


> Quantensimulation

- Gitterfeldtheorie



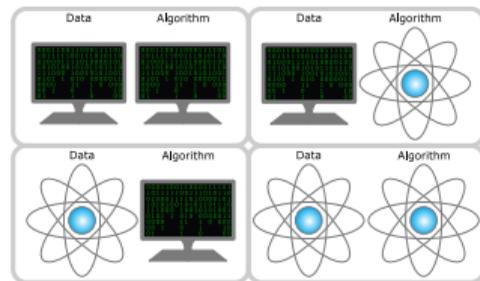
- Quantenchemie



- Materialwissenschaft

- ...

> Maschinelles Lernen



> Kryptographie



> ...

Zentrum und Schwerpunktaktivitäten

Die “zweite Quantenrevolution”

- > Quantencomputer mit $\mathcal{O}(100)$ Quantenbits existieren bereits heute
- > Rauschen limitiert aktuelle Maschinen noch erheblich, gegenwärtig keine Fehlerkorrektur möglich



J. Preskill, Quantum 2, 79 (2018)

Zentrum und Schwerpunktaktivitäten

Die “zweite Quantenrevolution”

- > Quantencomputer mit $\mathcal{O}(100)$ Quantenbits existieren bereits heute
- > Rauschen limitiert aktuelle Maschinen noch erheblich, gegenwärtig keine Fehlerkorrektur möglich
- > Quantencomputer haben bereits die Leistung klassischer Computer übertroffen



J. Preskill, Quantum 2, 79 (2018)
F. Arute et al., Nature 574, 5050 (2019)

Zentrum und Schwerpunktaktivitäten

Die “zweite Quantenrevolution”

- > Quantencomputer mit $\mathcal{O}(100)$ Quantenbits existieren bereits heute
- > Rauschen limitiert aktuelle Maschinen noch erheblich, gegenwärtig keine Fehlerkorrektur möglich
- > Quantencomputer haben bereits die Leistung klassischer Computer übertroffen



F. Arute et al., Nature 574, 5050 (2019)
H.-S. Zhong et al., Science 370, 1460 (2020)

Zentrum und Schwerpunktaktivitäten

Die “zweite Quantenrevolution”

- > Quantencomputer mit $\mathcal{O}(100)$ Quantenbits existieren bereits heute
- > Rauschen limitiert aktuelle Maschinen noch erheblich, gegenwärtig keine Fehlerkorrektur möglich
- > Quantencomputer haben bereits die Leistung klassischer Computer übertroffen



F. Arute et al., Nature 574, 5050 (2019)
H. S. Zhong et al., Science 370, 1460 (2020)

Zentrum und Schwerpunktaktivitäten

Die “zweite Quantenrevolution”

- > Quantencomputer mit $\mathcal{O}(100)$ Quantenbits existieren bereits heute
- > Rauschen limitiert aktuelle Maschinen noch erheblich, gegenwärtig keine Fehlerkorrektur möglich
- > Quantencomputer haben bereits die Leistung klassischer Computer übertroffen



Y. Wu et al., PRL **127**, 180501 (2021), Han-Sen Zhong et al., PRL **127**, 180502 (2021), L. S. Madsen et al., Nature **606**, 75 (2022)
F. Arute et al., Nature **574**, 5050 (2019)
H. S. Zhong et al., Science **370**, 1460 (2020)

Zentrum und Schwerpunktaktivitäten

Die “zweite Quantenrevolution”

- > Quantencomputer mit $\mathcal{O}(100)$ Quantenbits existieren bereits heute
- > Rauschen limitiert aktuelle Maschinen noch erheblich, gegenwärtig keine Fehlerkorrektur möglich
- > Quantencomputer haben bereits die Leistung klassischer Computer übertroffen
- > Große Quantencomputer in naher Zukunft
 - IBM: 1000 Quantenbits Ende 2023
 - Google: 10^6 Quantenbits und Fehlerkorrektur 2029



Y. Wu et al., PRL **127**, 180501 (2021), Han-Sen Zhong et al., PRL **127**, 180502 (2021), L. S. Madsen et al., Nature **606**, 75 (2022)
<https://research.ibm.com/blog/ibm-quantum-roadmap>, <https://blog.google/technology/ai/unveiling-our-new-quantum-ai-campus/>

Zentrum und Schwerpunktaktivitäten



- > Zentrum befindet sich am Standort Zeuthen
- > Finanzierung durch den Zukunftsinvestitionsfonds des Landes Brandenburg

Zentrum und Schwerpunktaktivitäten



- > Zentrum befindet sich am Standort Zeuthen
- > Finanzierung durch den Zukunftsinvestitionsfonds des Landes Brandenburg
- > DESY ist ein IBM Quanten-Innovationszentrum



Zentrum und Schwerpunktaktivitäten



- > Zentrum befindet sich am Standort Zeuthen
- > Finanzierung durch den Zukunftsinvestitionsfonds des Landes Brandenburg
- > DESY ist ein IBM Quanten-Innovationszentrum



DESY ist gerüstet für die “zweite Quantenrevolution”!

Folie aus Scott Crowders Vortrag auf dem IBM Quantum Summit

Zentrum für Quantentechnologien und Anwendungen



Schwerpunktaktivitäten des Zentrums

- > Ermöglichen von Zugriff auf Quantencomputer

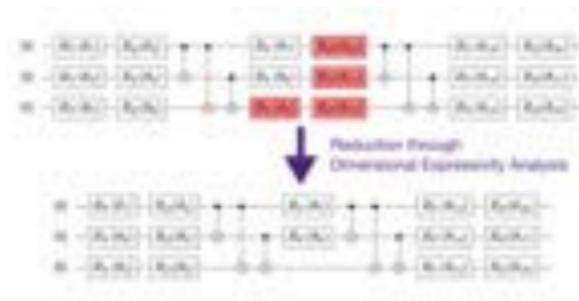


Zentrum für Quantentechnologien und Anwendungen



Schwerpunktaktivitäten des Zentrums

- > Ermöglichen von Zugriff auf Quantencomputer
- > Entwicklung von Algorithmen und Methoden

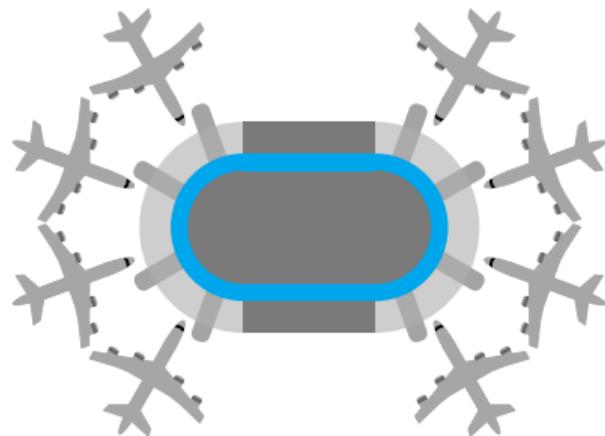


Zentrum für Quantentechnologien und Anwendungen



Schwerpunktaktivitäten des Zentrums

- > Ermöglichen von Zugriff auf Quantencomputer
- > Entwicklung von Algorithmen und Methoden
- > Entwicklung von Anwendungsbeispielen und Applikationen für Industrie und Wissenschaft

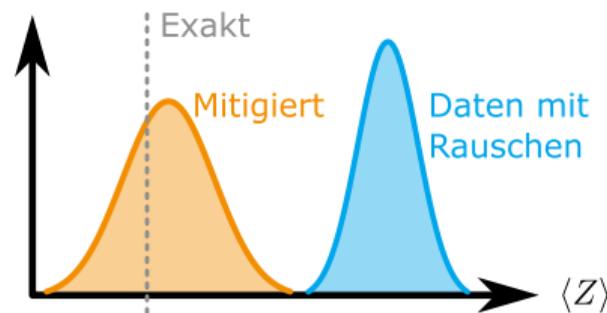


Zentrum für Quantentechnologien und Anwendungen



Schwerpunktaktivitäten des Zentrums

- > Ermöglichen von Zugriff auf Quantencomputer
- > Entwicklung von Algorithmen und Methoden
- > Entwicklung von Anwendungsbeispielen und Applikationen für Industrie und Wissenschaft
- > Benchmarks, Tests und Verifikation von neuen Quantencomputern



Zentrum für Quantentechnologien und Anwendungen



Schwerpunktaktivitäten des Zentrums

- > Ermöglichen von Zugriff auf Quantencomputer
- > Entwicklung von Algorithmen und Methoden
- > Entwicklung von Anwendungsbeispielen und Applikationen für Industrie und Wissenschaft
- > Benchmarks, Tests und Verifikation von neuen Quantencomputern
- > Anbieten von Schulungen im Bereich Quantencomputing

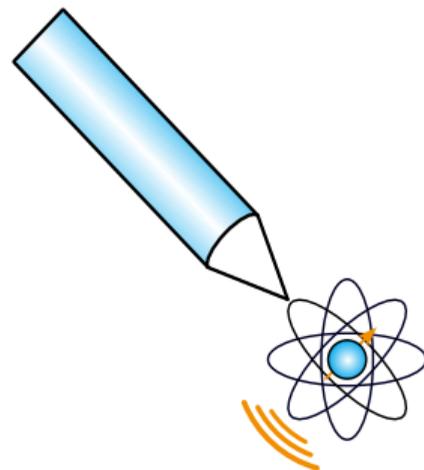


Zentrum für Quantentechnologien und Anwendungen



Schwerpunktaktivitäten des Zentrums

- > Ermöglichen von Zugriff auf Quantencomputer
- > Entwicklung von Algorithmen und Methoden
- > Entwicklung von Anwendungsbeispielen und Applikationen für Industrie und Wissenschaft
- > Benchmarks, Tests und Verifikation von neuen Quantencomputern
- > Anbieten von Schulungen im Bereich Quantencomputing
- > Einbinden von Quantensensorik

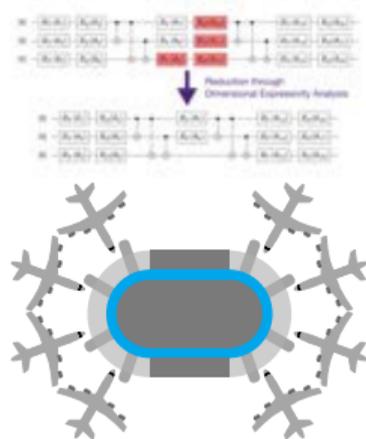


Zentrum für Quantentechnologien und Anwendungen



Schwerpunktaktivitäten des Zentrums

- > Ermöglichen von Zugriff auf Quantencomputer
- > Entwicklung von Algorithmen und Methoden
- > **Entwicklung von Anwendungsbeispielen und Applikationen für Industrie und Wissenschaft**
- > Benchmarks, Tests und Verifikation von neuen Quantencomputern
- > Anbieten von Schulungen im Bereich Quantencomputing
- > Einbinden von Quantensensorik



3.

Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY

Zentrum und Schwerpunktaktivitäten

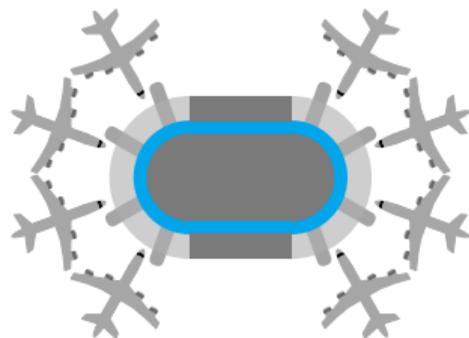
Ein Anwendungsbeispiel: optimale Flugzuordnung zu Gates

Zusammenfassung & Ausblick

Optimale Flugzuordnung zu Gates

Das Problem

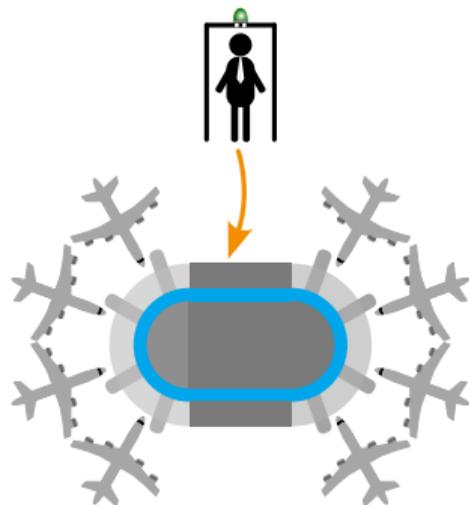
- > Gesucht: Zuordnung von Flügen zu Gates, die die Aufenthaltszeit der Passagiere im Flughafen minimiert



Optimale Flugzuordnung zu Gates

Das Problem

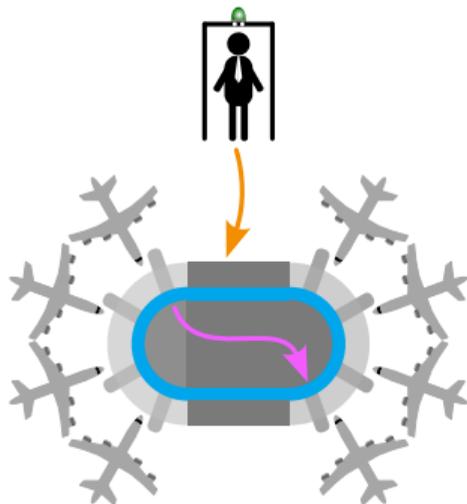
- > Gesucht: Zuordnung von Flügen zu Gates, die die Aufenthaltszeit der Passagiere im Flughafen minimiert
- > Arten von Passagieren:
 - Abfliegende Passagiere



Optimale Flugzuordnung zu Gates

Das Problem

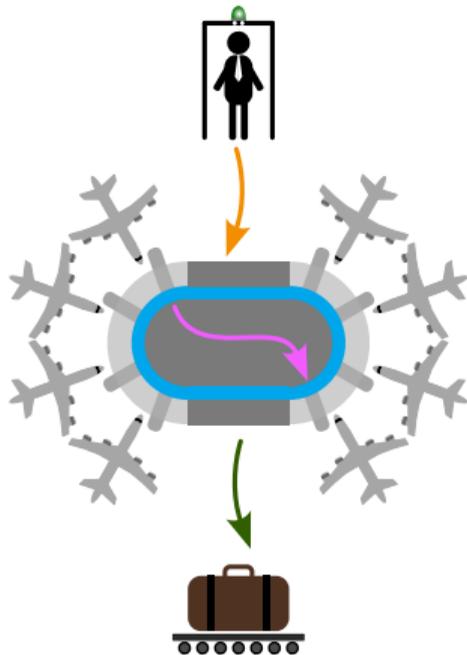
- > Gesucht: Zuordnung von Flügen zu Gates, die die Aufenthaltszeit der Passagiere im Flughafen minimiert
- > Arten von Passagieren:
 - Abfliegende Passagiere
 - Transitpassagiere



Optimale Flugzuordnung zu Gates

Das Problem

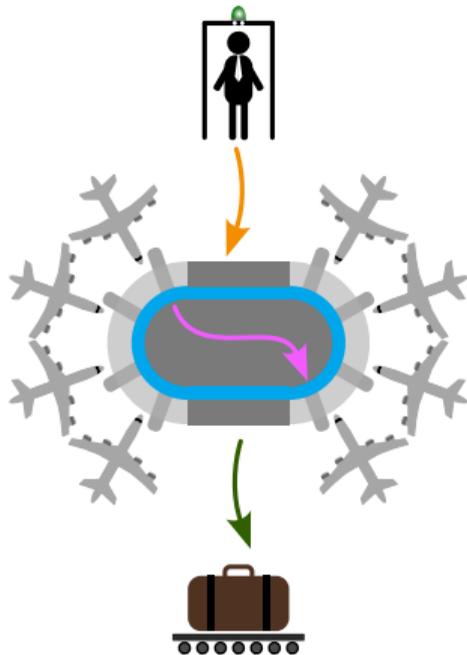
- > Gesucht: Zuordnung von Flügen zu Gates, die die Aufenthaltszeit der Passagiere im Flughafen minimiert
- > Arten von Passagieren:
 - Abfliegende Passagiere
 - Transitpassagiere
 - Ankommende Passagiere



Optimale Flugzuordnung zu Gates

Das Problem

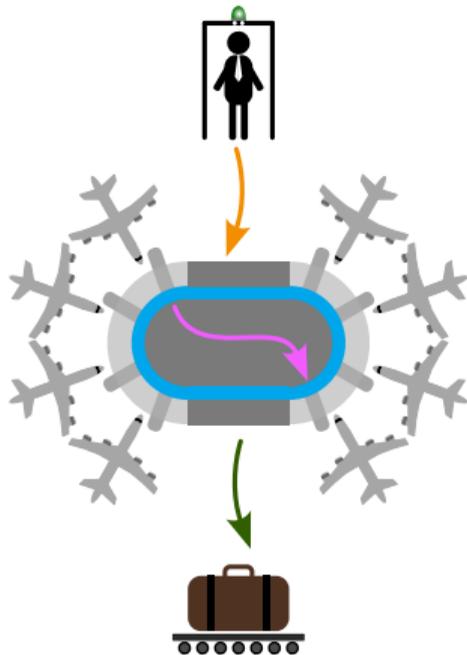
- > Gesucht: Zuordnung von Flügen zu Gates, die die Aufenthaltszeit der Passagiere im Flughafen minimiert
- > Arten von Passagieren:
 - Abfliegende Passagiere
 - Transitpassagiere
 - Ankommende Passagiere
- > Nebenbedingungen:
 - Jeder Flug kann nur einem Gate zugewiesen werden
 - Maximal ein Flug pro Gate



Optimale Flugzuordnung zu Gates

Das Problem

- > Gesucht: Zuordnung von Flügen zu Gates, die die Aufenthaltszeit der Passagiere im Flughafen minimiert
 - > Arten von Passagieren:
 - Abfliegende Passagiere
 - Transitpassagiere
 - Ankommende Passagiere
 - > Nebenbedingungen:
 - Jeder Flug kann nur einem Gate zugewiesen werden
 - Maximal ein Flug pro Gate
- ⇒ Klassisches Optimierungsproblem mit Nebenbedingungen



Optimale Flugzuordnung zu Gates

Das Problem

- > Kodierung der Zuordnung von Flügen zu Gates

$$x_{i\alpha} = \begin{cases} 1 & \text{falls Flug } i \text{ Gate } \alpha \text{ zugeordnet ist,} \\ 0 & \text{sonst.} \end{cases}$$

- > Kostenfunktion: Zeit für eine gegebene Zuordnung von Flügen zu Gates

$$T(x) = T^{\text{dep}}(x) + T^{\text{trans}}(x) + T^{\text{arr}}(x)$$

Optimale Flugzuordnung zu Gates

Das Problem

- > Kodierung der Zuordnung von Flügen zu Gates

$$x_{i\alpha} = \begin{cases} 1 & \text{falls Flug } i \text{ Gate } \alpha \text{ zugeordnet ist,} \\ 0 & \text{sonst.} \end{cases}$$

- > Kostenfunktion: Zeit für eine gegebene Zuordnung von Flügen zu Gates

$$T(x) = T^{\text{dep}}(x) + T^{\text{trans}}(x) + T^{\text{arr}}(x)$$

- > $x_{i\alpha}$ kann in eine Spinvariable überführt werden $x_{i\alpha} \rightarrow z_{i\alpha} = 2x_{i\alpha} - 1 \in \{-1, 1\}$
- > Kostenfunktion kann als Hamiltonoperator ausgedrückt werden

$$H = \sum_p h_p Z_p + \sum_{p,q} J_{pq} Z_p Z_q$$

- > Minimierung von $T(x) \Leftrightarrow$ Bestimmen des Grundzustandes von H

Optimale Flugzuordnung zu Gates

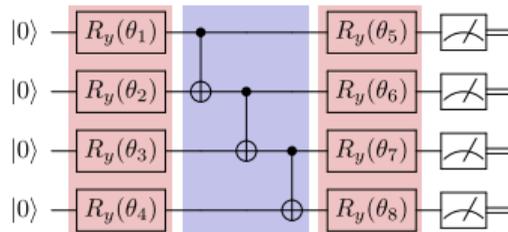
Lösung des Problems

- > Hybrider Zugang mittels klassischer und Quantenhardware
- > Kostenfunktion $\mathcal{C}(\vec{\theta}) = \langle \psi(\vec{\theta}) | H | \psi(\vec{\theta}) \rangle$

Optimale Flugzuordnung zu Gates

Lösung des Problems

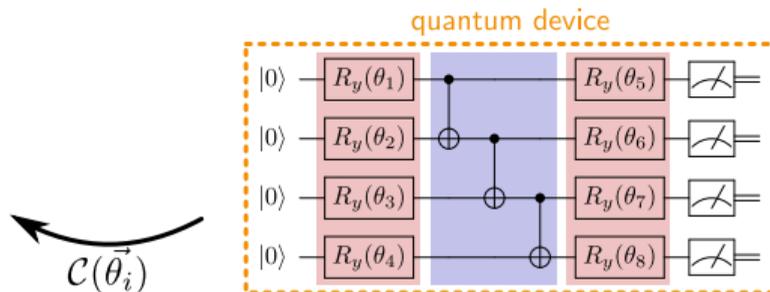
- > Hybrider Zugang mittels klassischer und Quantenhardware
- > Kostenfunktion $\mathcal{C}(\vec{\theta}) = \langle \psi(\vec{\theta}) | H | \psi(\vec{\theta}) \rangle$
- > Quantencomputer realisiert den parametrischen Ansatz $|\psi(\vec{\theta})\rangle$



Optimale Flugzuordnung zu Gates

Lösung des Problems

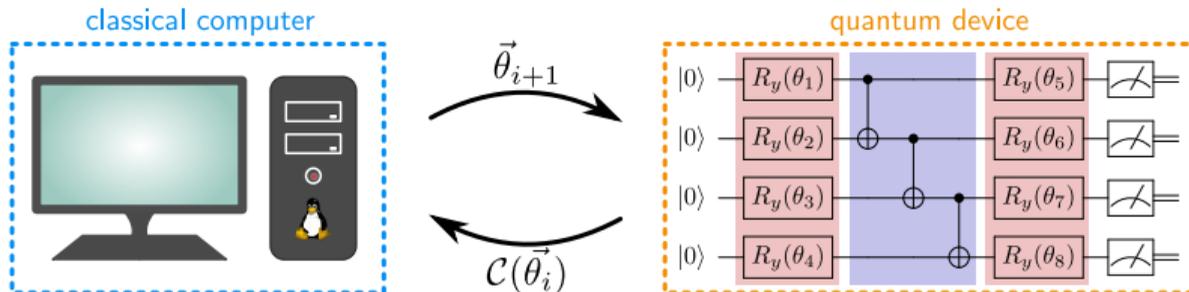
- > Hybrider Zugang mittels klassischer und Quantenhardware
- > Kostenfunktion $\mathcal{C}(\vec{\theta}) = \langle \psi(\vec{\theta}) | H | \psi(\vec{\theta}) \rangle$
- > Quantencomputer realisiert den parametrischen Ansatz $|\psi(\vec{\theta})\rangle$
- > Die Kostenfunktion kann effizient auf der Quantenhardware evaluiert werden



Optimale Flugzuordnung zu Gates

Lösung des Problems

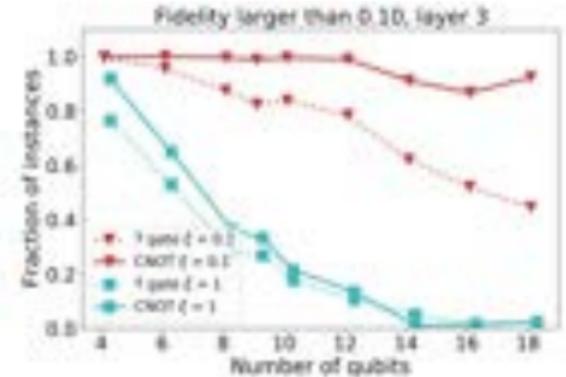
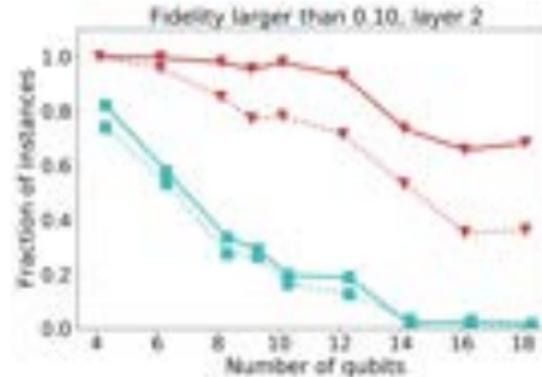
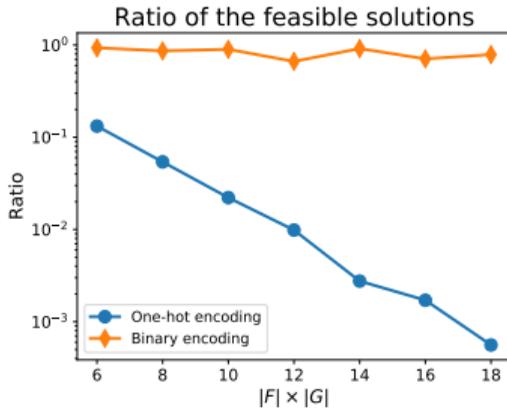
- > Hybrider Zugang mittels klassischer und Quantenhardware
- > Kostenfunktion $\mathcal{C}(\vec{\theta}) = \langle \psi(\vec{\theta}) | H | \psi(\vec{\theta}) \rangle$
- > Quantencomputer realisiert den parametrischen Ansatz $|\psi(\vec{\theta})\rangle$
- > Die Kostenfunktion kann effizient auf der Quantenhardware evaluiert werden
- > Klassische Optimierung der Parameter um $\mathcal{C}(\vec{\theta})$ zu minimieren



Optimale Flugzuordnung zu Gates

Lösung des Problems

- > Verbesserungen des ursprünglichen Zugangs
 - Verbesserte binäre Kodierung
 - Verwenden des Conditional Value at Risk (CVar) als Kostenfunktion
- > Resultate

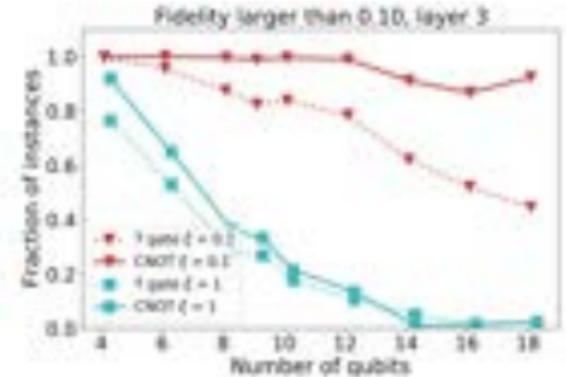
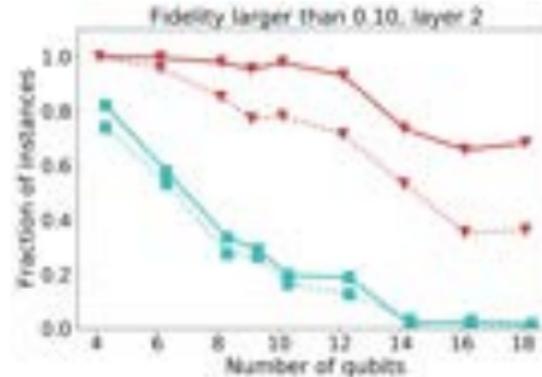
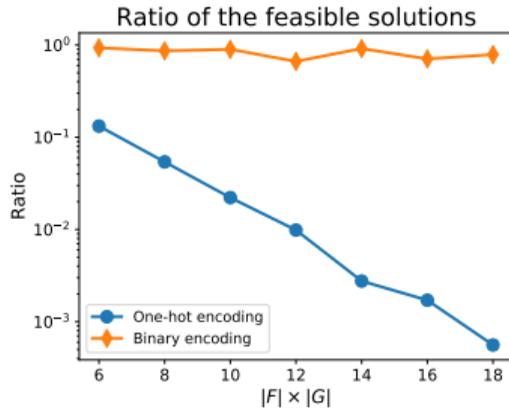


Y. Chai, L. Funcke, T. Hartung, K. Jansen, SK, P. Stornati, T. Stollenwerk, in Vorbereitung

Optimale Flugzuordnung zu Gates

Lösung des Problems

- > Verbesserungen des ursprünglichen Zugangs
 - Verbesserte binäre Kodierung
 - Verwenden des Conditional Value at Risk (CVar) als Kostenfunktion
- > Resultate



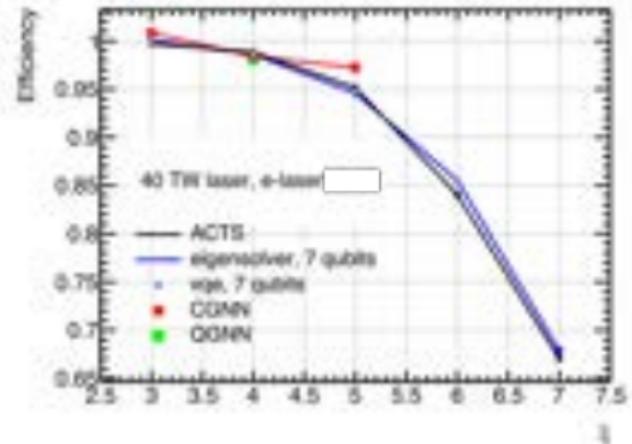
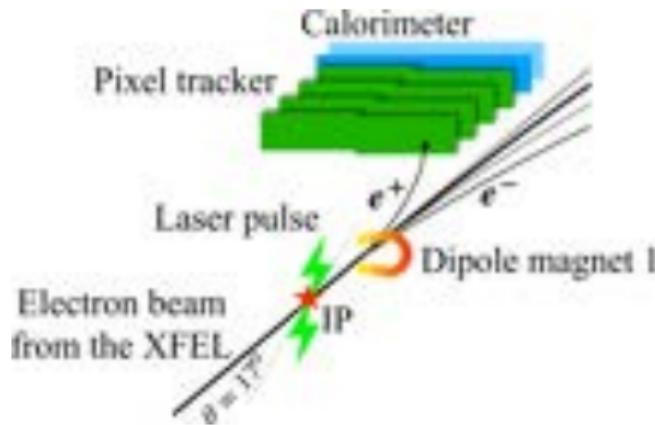
- > Ähnliche Optimierungsprobleme in **Finanzwesen, Logistik, Wissenschaft, etc.**

Y. Chai, L. Funcke, T. Hartung, K. Jansen, SK, P. Stornati, T. Stollenwerk, in Vorbereitung

Rekonstruktion von Teilchenspuren beim LUXE Experiment

Das Problem

- > Rekonstruktion von Spuren geladener Teilchen lässt sich mit Hilfe der gleichen mathematischen Struktur formulieren



- ⇒ Erreichbare Effizienz ist bereits für kleine Quantencomputer vergleichbar mit klassischen Methoden

A. Crippa, L. Funcke, T. Hartung, B. Heinemann, K. Jansen, A. Kropf, S. Kühn, F. Meloni, D. Spataro, C. Tüysüz, Y. C. Yap, in Vorbereitung

4.

Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY

Zentrum und Schwerpunktaktivitäten

Ein Anwendungsbeispiel: optimale Flugzuordnung zu Gates

Zusammenfassung & Ausblick

Zusammenfassung & Ausblick

Zusammenfassung

- > Quantencomputer bieten die Möglichkeit bestimmte Probleme effizient zu lösen, die mit klassischen Computern nur sehr schwer oder gar nicht zu bewältigen sind
- > Zentrum für Quantentechnologien und Anwendungen rüstet DESY für die Zukunft
- > Als Quanten-Innovationszentrum kann DESY Hardwarezugang gewähren
- > Forschung und Kooperation mit Industriepartnern im Bereich Algorithmen, Methoden

Zusammenfassung & Ausblick

Zusammenfassung

- > Quantencomputer bieten die Möglichkeit bestimmte Probleme effizient zu lösen, die mit klassischen Computern nur sehr schwer oder gar nicht zu bewältigen sind
- > Zentrum für Quantentechnologien und Anwendungen rüstet DESY für die Zukunft
- > Als Quanten-Innovationszentrum kann DESY Hardwarezugang gewähren
- > Forschung und Kooperation mit Industriepartnern im Bereich Algorithmen, Methoden

Ausblick

- > Integration von Quantensensorik in das Zentrum
- > Neue Kollaborationen mit Industriepartnern
- > Zugang zu anderer Quantenhardware

Vielen Dank!



Karl Jansen



Takis Angelides



Yahui Chai



Arianna Crippa



Maria Demidik



Hala Elhag



Mourad Hala



Stefan Kühn



Tim Schwägerl



Vasundhara Shaw



Cenk Tüysüz

Kontakt

Deutsches Elektronen-
Synchrotron DESY

<https://quantum-zeuthen.desy.de>

Stefan Kühn

 0000-0001-7693-350X

Center for Quantum Technology Applications

stefan.kuehn@desy.de