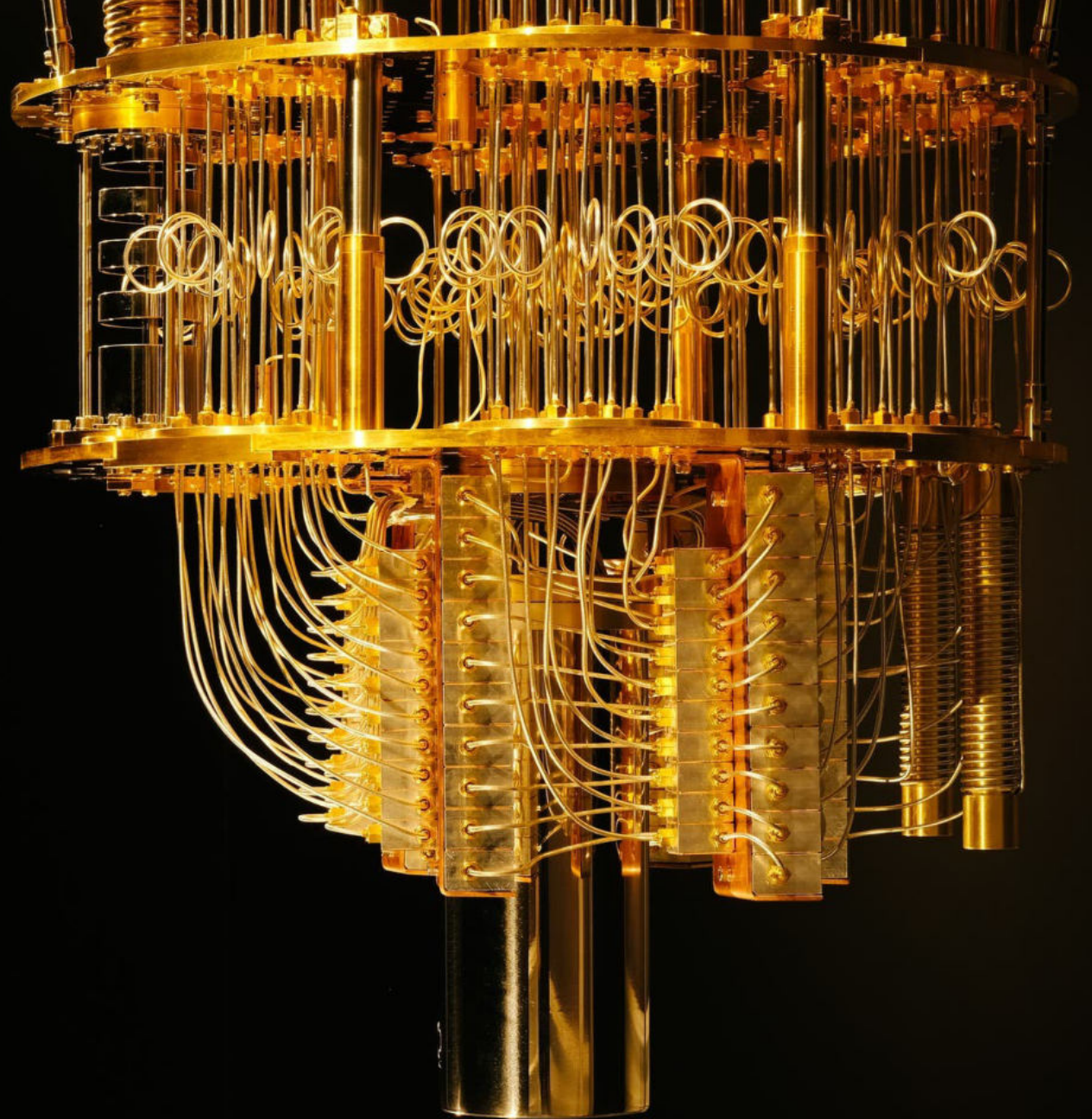


QUANTEN COMPUTING ... HYPE ODER MYTHOS?

Ingolf Wittmann
Geschäftsfeld Quantensysteme
Fraunhofer IAF



Agenda

- Warum Quanten Computing?
- Technischen Grundlagen für Quanten Computing
- Architektur eines Quantenrechner basierend auf Transmon Qubits -> das Fraunhofer Ehningen
- Hybride Architekturen mit Quantenrechnern und klassischen HPC Systemen
- Vorstellung der Programmierung mit Quantengate Operationen
- Anwendungsgebiete von Quantenrechnern: Industrie Use Cases
- Das Fraunhofer Kompetenznetzwerk für Quanten Computing
- Q&A

Limitationen des klassischen Computings

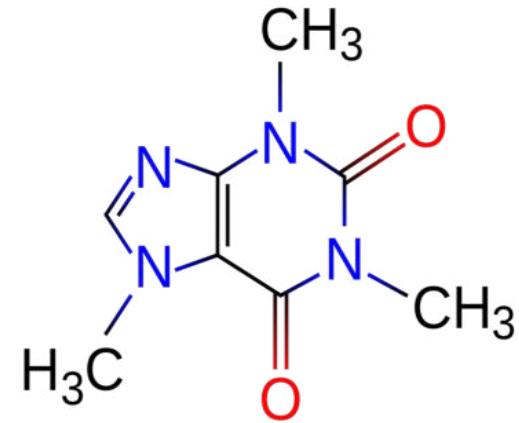


Reprinted from JOURNAL OF THE OPERATIONS RESEARCH SOCIETY OF AMERICA
Vol. 2, No. 4, November, 1954
Printed in U.S.A.

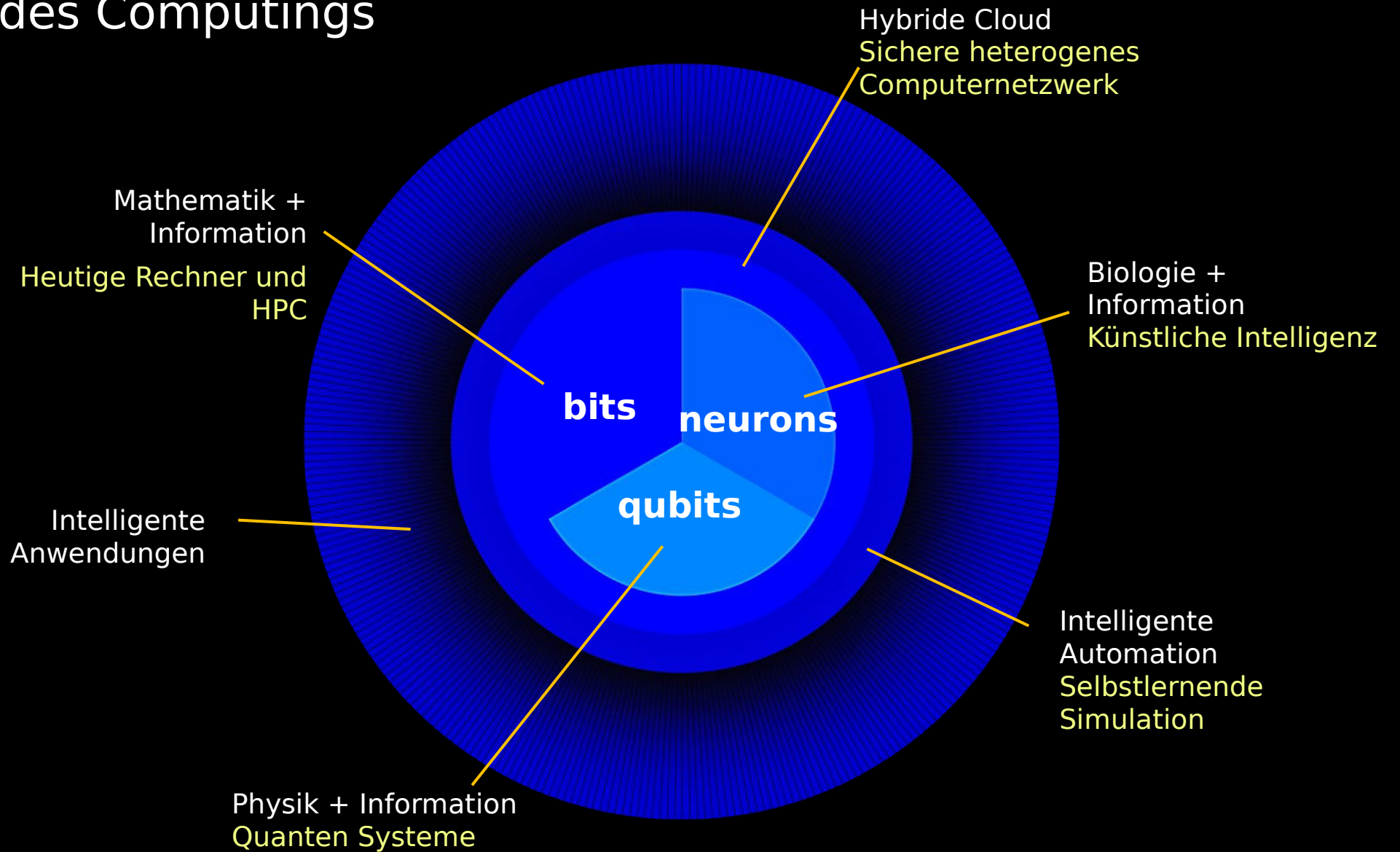
SOLUTION OF A LARGE-SCALE TRAVELING-SALESMAN PROBLEM*

G. DANTZIG, R. FULKERSON, AND S. JOHNSON
The Rand Corporation, Santa Monica, California
(Received August 9, 1954)

It is shown that a certain tour of 49 cities, one in each of the 48 states and Washington, D. C., has the shortest road distance.



Die Zukunft des Computings



Das WW größte HPC System aus "Bits, Qubits + Neu



Oak Ridge National Laboratory Summit Daten

- 200,000** Petaflops
- 9216** IBM Power 9 Prozessoren
- 27,648** NVIDIA GPUs
- 250 PB** Dateisystem
- Red Hat Enterprise Linux**



Der Anfang einer Idee...

Physics of Computation Conference 1981

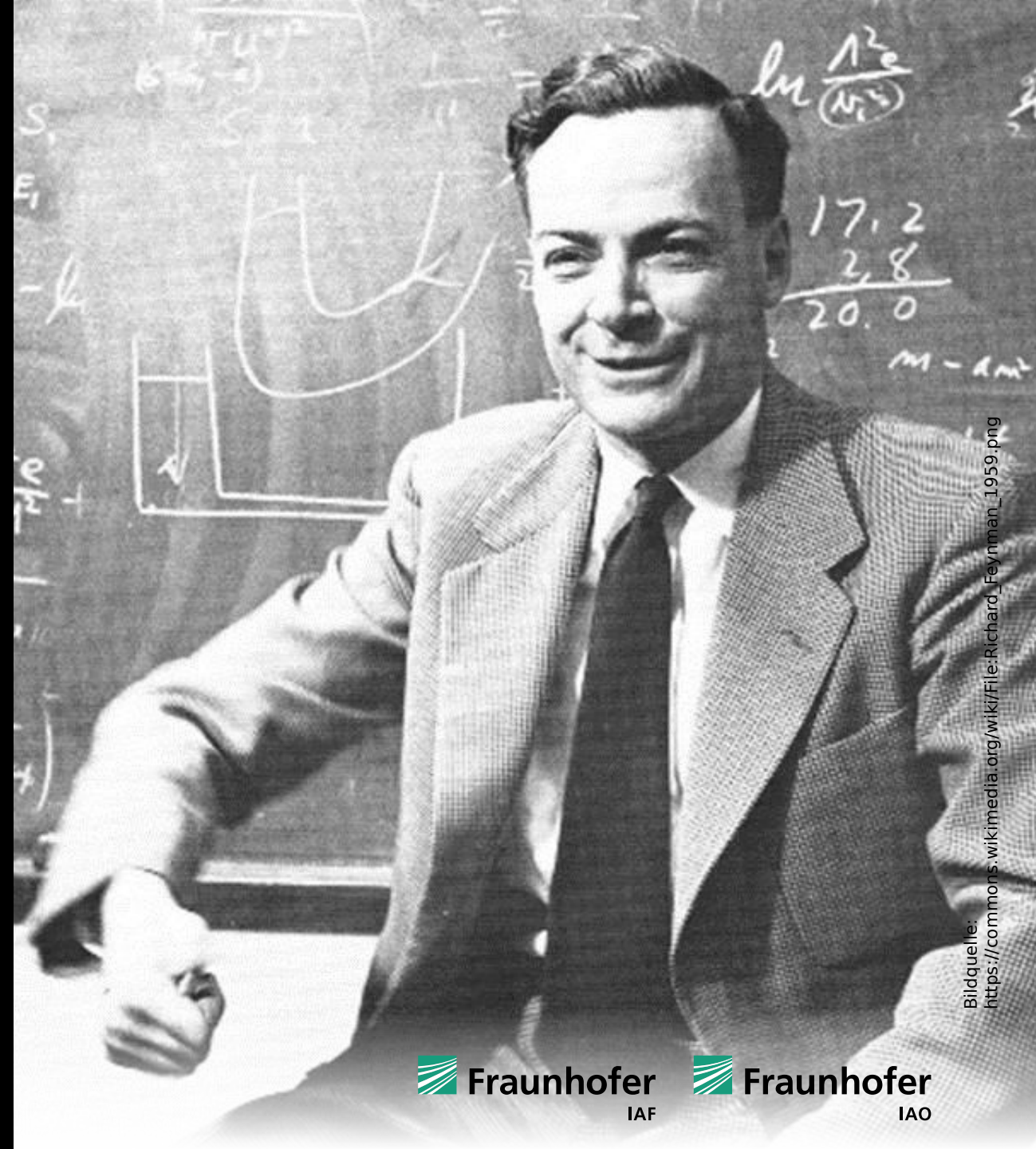


Welche Idee steckt hinter Quantencomputing?

»Nature isn't classical, dammit, and if you want to make a simulation of nature, you'd better make it quantum mechanical, and by golly it's a wonderful problem, because it doesn't look so easy.«

Richard P. Feynman

Simulating physics with computers. *Int J Theor Phys* 21, 467-488 (1982)



Bildquelle:
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Richard_Feynman_1959.png

Hamiltonoperator

$$H_{eff} = \sum_i (\omega_i b_i^\dagger b_i + \frac{\delta_i}{2} b_i^\dagger b_i b_i^\dagger b_i) + \sum_{i,j} J_{ij} (b_i^\dagger b_j + b_i b_j^\dagger)$$

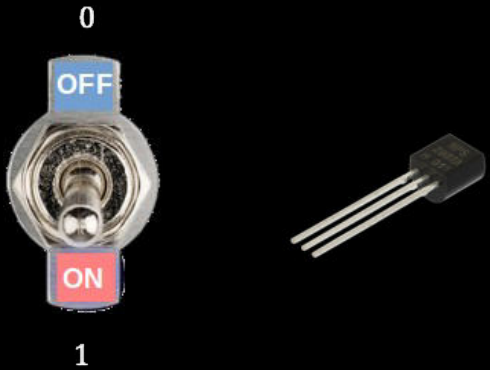
»[...] I think I can safely say that nobody understands quantum mechanics.«

Richard P. Feynman
The Character of Physical Law (1964)

Bits versus Qubits

Bit 2 Zustände 0 oder 1

Multi-bit Effekte: keine



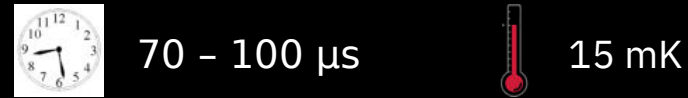
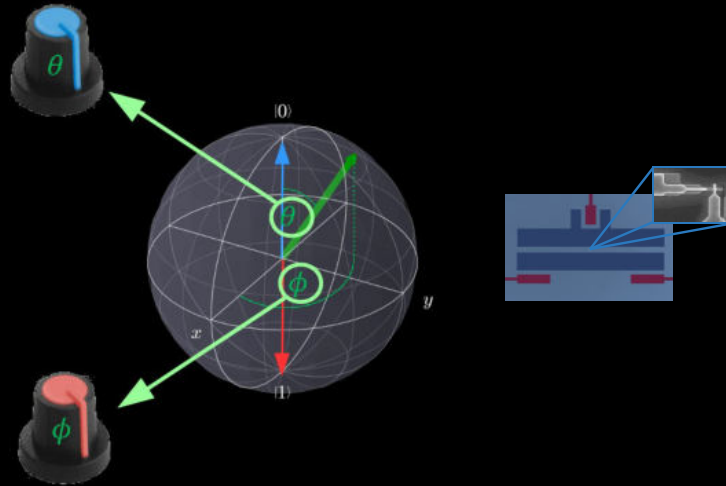
Silicon Struktur
< 20 nm



Klassisch

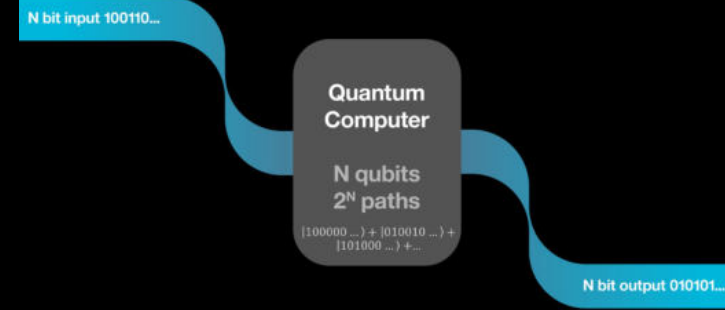
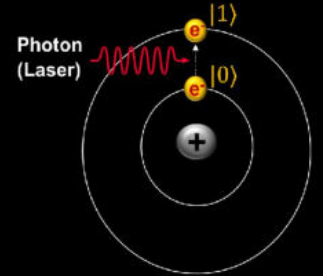
Qubit beliebige Zustände zwischen 0 und 1, zur selben Zeit
(= Superposition) repräsentiert als Punkt auf der Bloch-Kugel

Multi-qubit Effekte: Entanglement



Quantum

Atome
Elektronen
Photonen



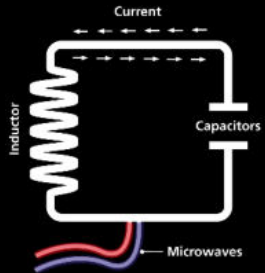
Technologien um Qubits zu bauen

Silicon quantum dots



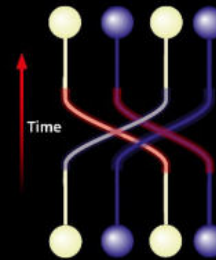
Diese „künstlichen Atome“ werden durch Hinzufügen eines Elektrons in ein kleines Stück reines Silizium hergestellt. Mikrowellen steuern den Quantenzustand des Elektrons.

Superconducting loops



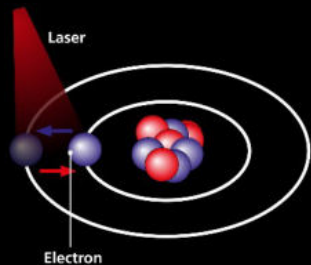
Ein widerstandsfreier Strom schwingt um eine Schaltungsschleife hin und her. Ein injiziertes Mikrowellensignal regt den Strom in Überlagerungszustände an. In dem Schwingkreis stellen Elektronenwolken ein künstliches Atom dar, welches als Qubit verwendet wird. Die Qubits werden in universellen und adiabatischen Quantenrechnern eingesetzt und sind aktuell die Technologie auf welche die Industrie setzt.

Topological qubits



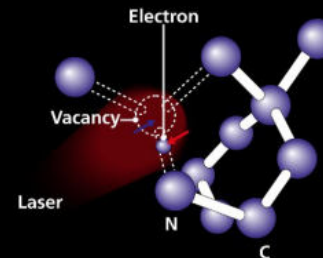
Quasi-Partikel sogenannte Majorana-Fermionen, welche nur in bestimmten Materialien vorkommen, können als Qubits verwendet werden. Des Weiteren sollen diese gegen magnetische und elektrische Störungen unempfindlich sein, dadurch dass sich die Quanteneigenschaften von mehreren Elektronen auf einer Ebene stabilisieren.

Trapped ions



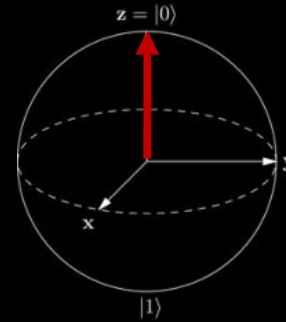
Elektrisch geladene Atome oder Ionen können sich wie Qubits verhalten. Die Qubits werden in stabilen elektronischen Zuständen z.B. in einzelnen Ionen gespeichert. Es werden Laser verwendet, um eine Kopplung zwischen den Qubit-Zuständen für Einzel-Qubit-Operationen oder eine Kopplung zwischen den internen Qubit-Zuständen und den externen Bewegungszuständen z.B. für die Verschränkung herzustellen.

Diamantfehlstellen

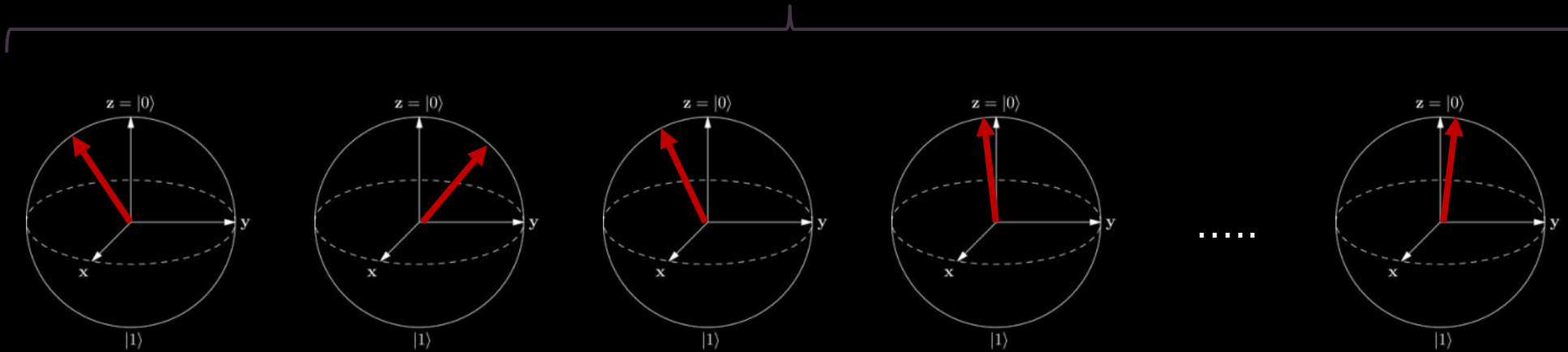


In einem künstlichen Diamanten werden zwei C13 Atome herausgelöst und ein Stickstoffatom eingefügt. In die zweite Leerstelle wird ein Stickstoffelektron bewegt, dessen Spin als hochempfindlicher Atomsensor oder als Qubit für arithmetische Operationen verwendet werden kann. Die Manipulation erfolgt über Photoelektronen durch optische Anregung und das Auslesen über die Messung des elektrischen Widerstands.

Logische Qubits



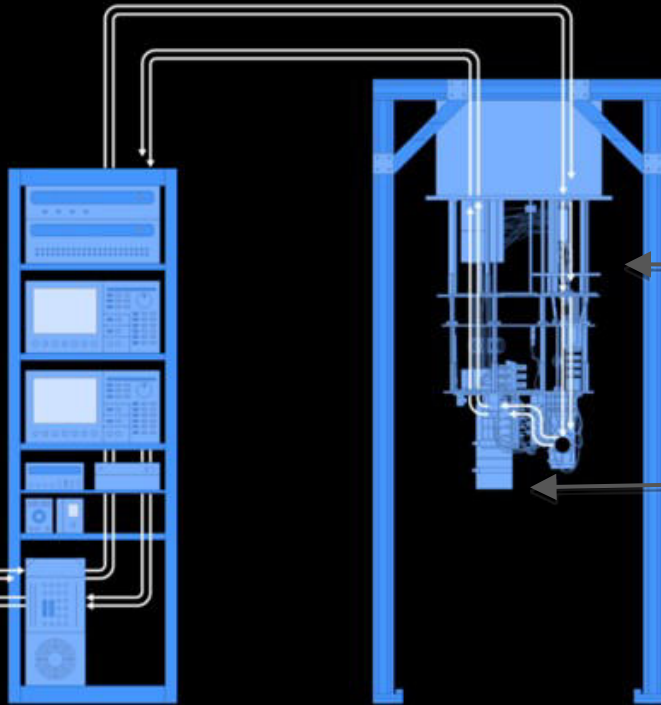
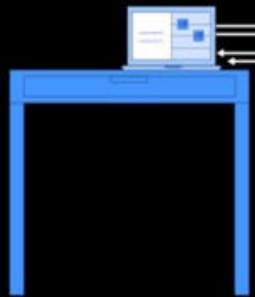
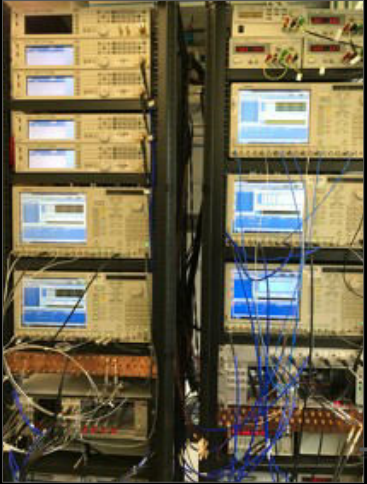
Logisches
Qubit



Physische
Qubits

Aufbau eines IBM Quantum Computing Systems

Mikrowellenelektronik



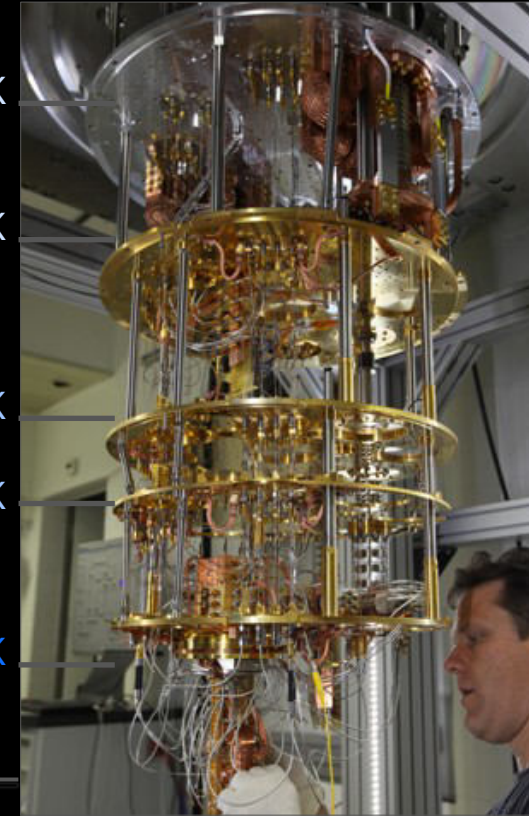
0.015K

0.1K

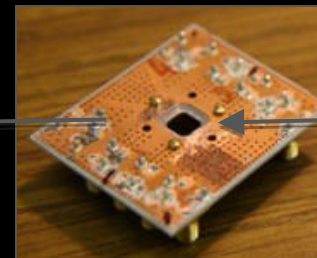
0.9K

3K

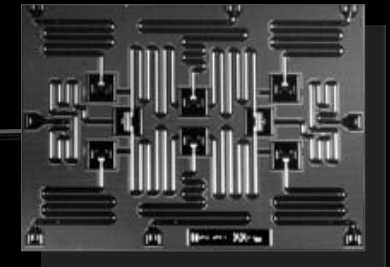
40K



Kryograph um die Qubits auf 10 - 15 mK mit den Isotopen von ^3He und ^4He



Leiterplatte mit dem Qubitprozessor bei 15 mK geschützt von der Außenwelt mit mehreren Abschirmungen



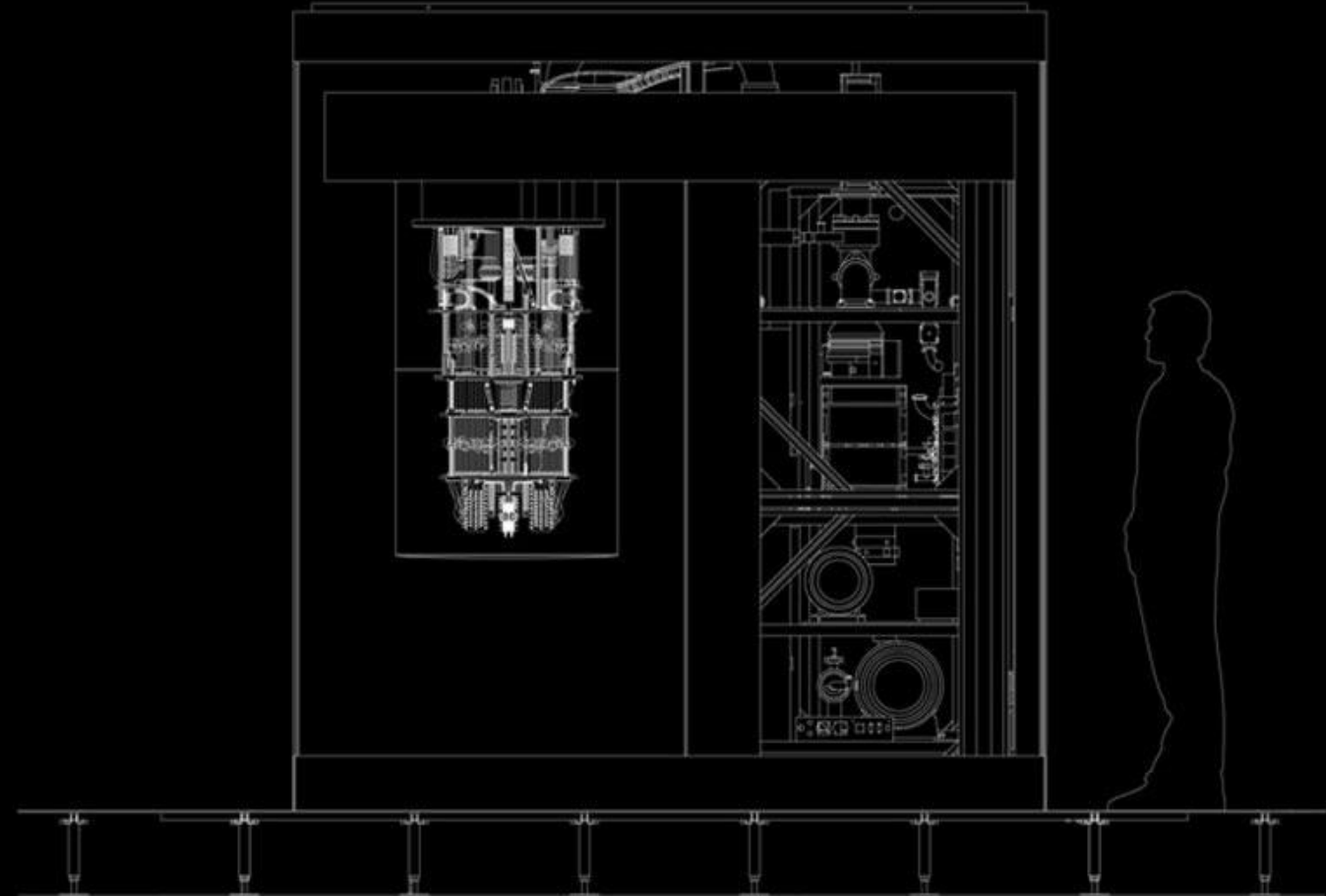
Prozessor mit Superconducting Qubits und Resonators

IBM Q System One als kommerzielles System



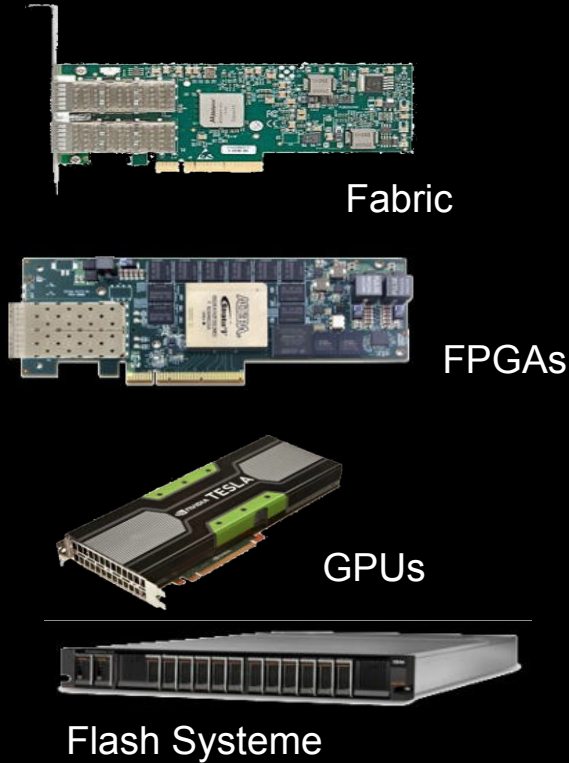
IBM Q
System One

Quelle: IBM



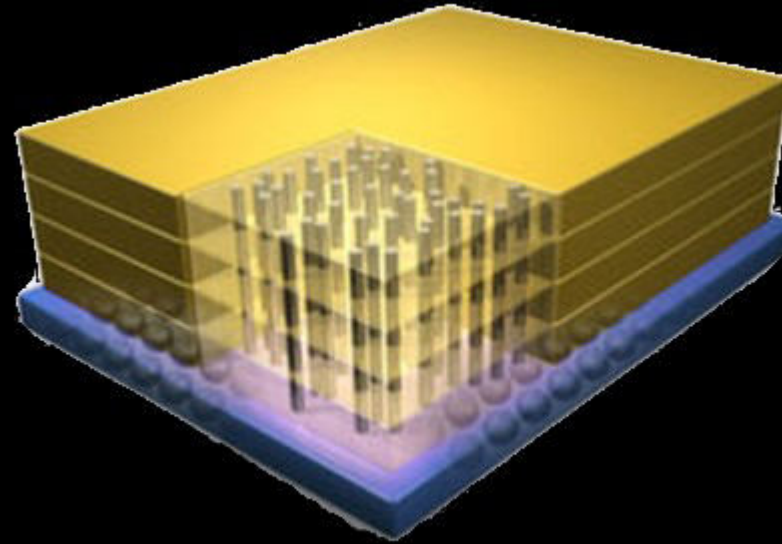
Zukünftige hybride IT Infrastruktur

Heute



Fokus auf Data, Analytics, Cognitive, und HPC für Workflow Leistung heterogene Verarbeitung

Prozessoren / Systeme

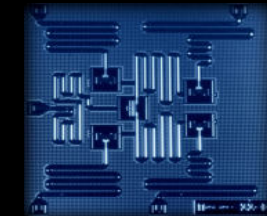


Neues Chipdesign für verdichtete, niedrigeren Stromverbrauch und beschleunigte Systeme

Jenseits von Neumann



Neuromorphic Design

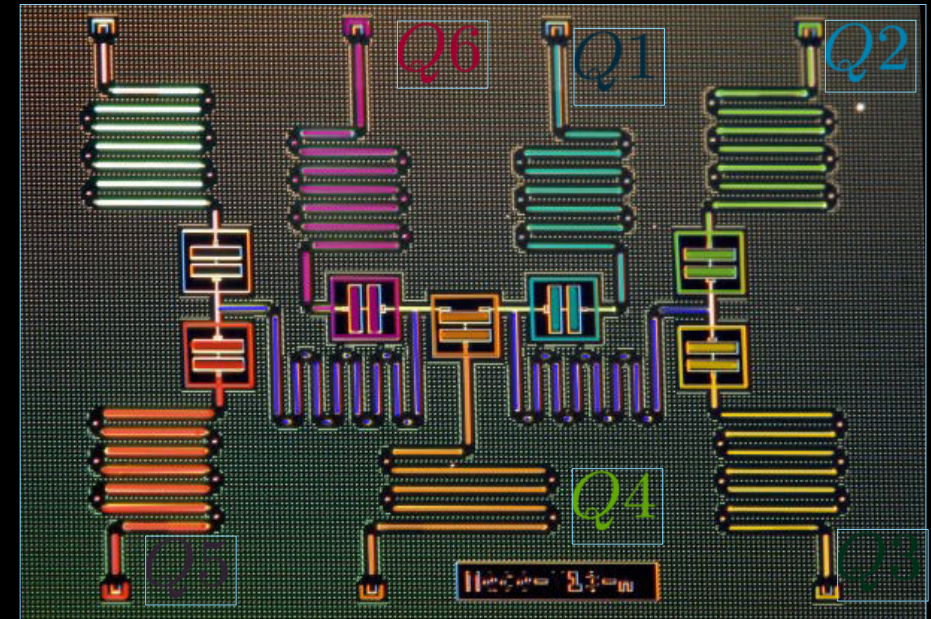
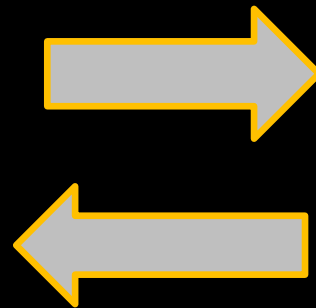


Quantum Technologie

Verbesserte cognitive Fähigkeiten, Integration von neuen Technologien: (z.B. SyNAPSE, Quantum), nahtlose Aktivierung von heterogener IT on-premises und in der Cloud

Hybride Algorithmen mit Quantum- und HPC-Systemen

Der Quantum-Classical Ansatz: **V**ariational **Q**uantum **E**igen solver



Ein kleines Quantensystem kombiniert mit einem klassischen Computer können gemeinsam Probleme lösen.

Quantensystemsimulation mit HPC Systemen

Quantensysteme

Echte Quantensysteme sind erforderlich, um hardwarespezifische Techniken zu erlernen, anzuwenden und zu optimieren



- Bewertung der Algorithmen mit echtem Quantenrauschen
- Optimierung der Anwendungsfälle auf Hardwareeigenschaften
- Jenseits der Simulationsgrenzen

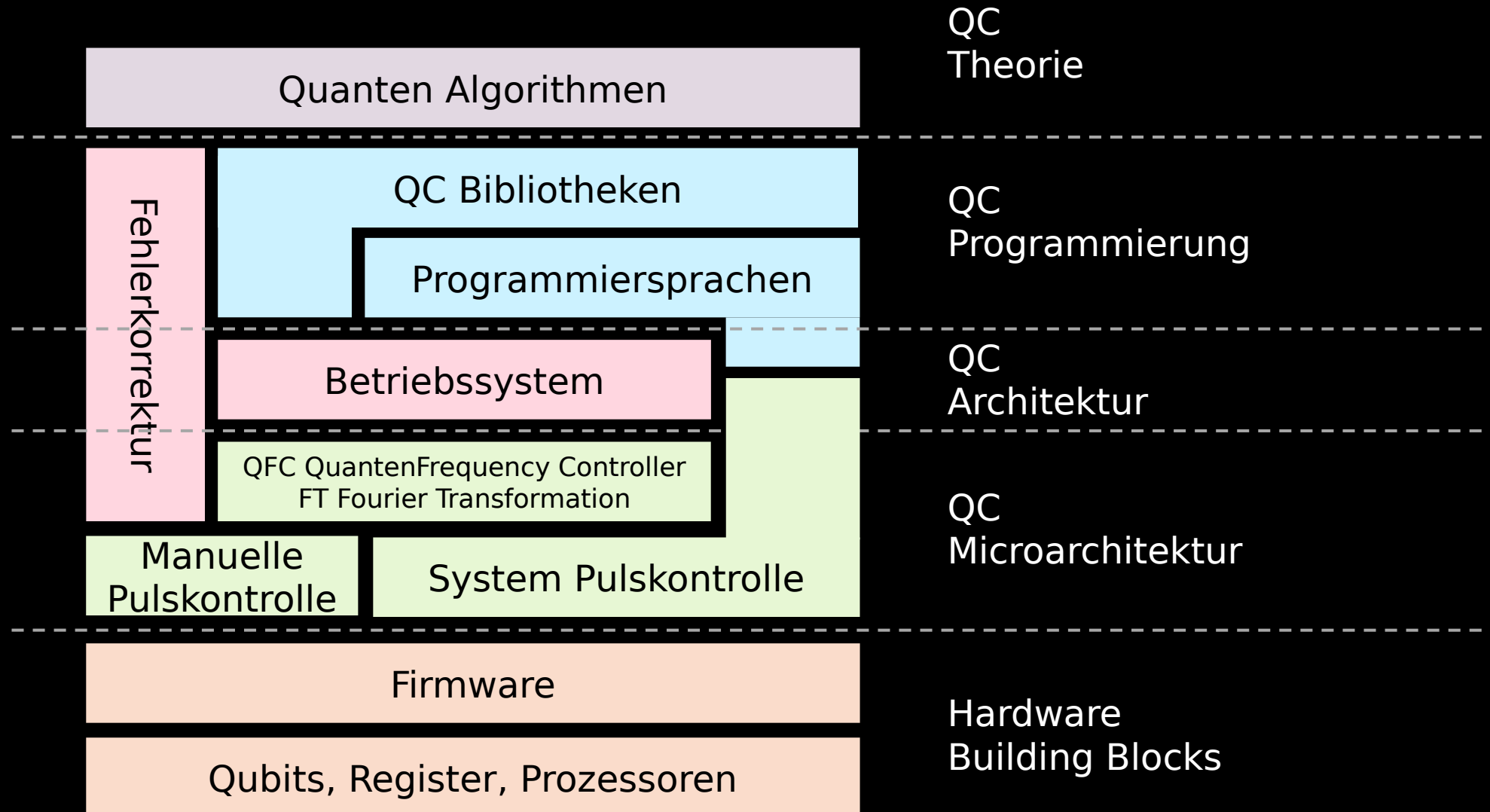
HPC Systeme

Simulatoren sind erforderlich, um die Entwicklung zu beschleunigen und das theoretische Verhalten des Quantenzustands zu verstehen



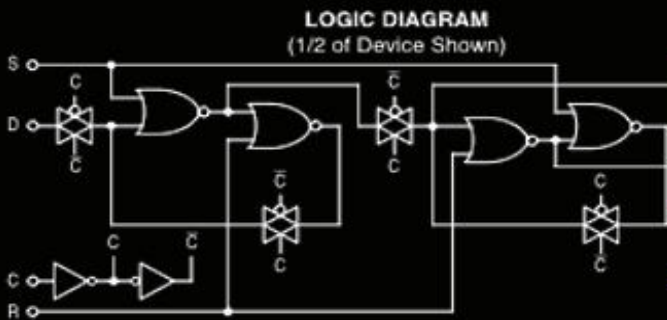
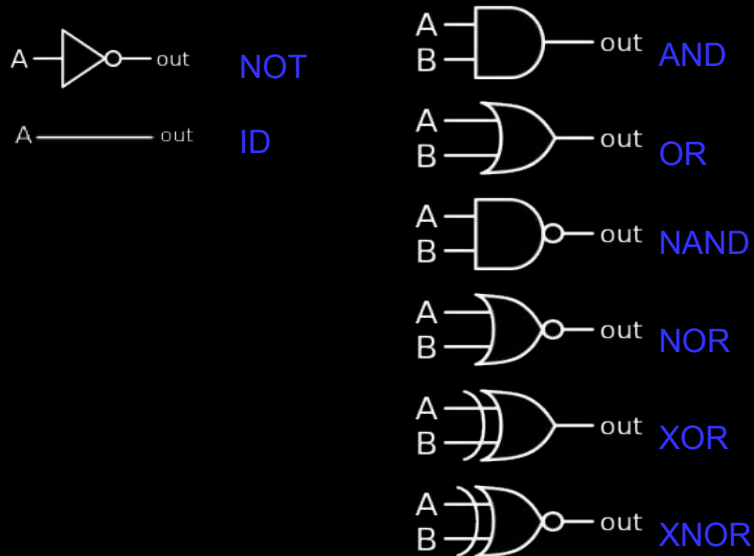
- Arbeiten mit proprietären Daten
- Bewerten von tieferen Schaltkreise
- Lernzyklen beschleunigen
- Bewertung des Fehlerverhaltens

Aufbau Quantumsoftwarestack und Abstractionlayer

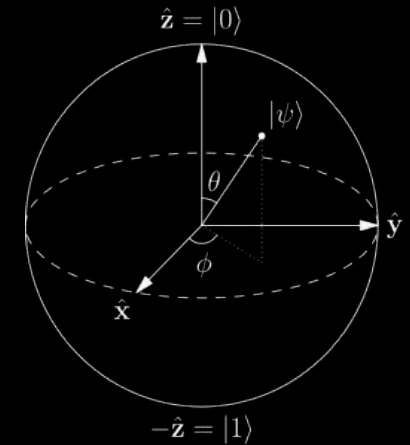


Quantum Logik ... wie man Quantencomputer programmiert

Bit

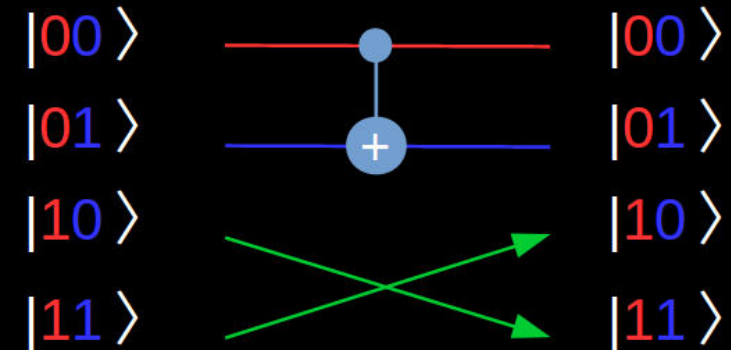


Qubit



1-qubit Gate
 → Rotation of Bloch-Sphere
 → Adding to length and latitudee

2-qubit Gate: CNOT
 → Controlled NOT
 → Exchange of $|10\rangle$ and $|11\rangle$



Unäre Quantengatter

X-Gatter (Nicht-Gatter)

$$\boxed{X} \quad \sigma_x = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$$

Bit-Flip:

$$\sigma_x |0\rangle = |1\rangle$$

$$\sigma_x |1\rangle = |0\rangle$$

Z-Gatter

$$\boxed{Z} \quad \sigma_z = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$$

Phasen-Flip:

$$\sigma_z |0\rangle = |0\rangle$$

$$\sigma_z |1\rangle = -|1\rangle$$

Y-Gatter

$$\boxed{Y} \quad \sigma_y = \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix}$$

Bit-Flip und Phasen-Flip:

$$\sigma_y |0\rangle = i |1\rangle$$

$$\sigma_y |1\rangle = -i |0\rangle$$

Unäre Quantengatter

Hadamard-Gatter

$$\mathbf{H} \quad H = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix}$$

Superposition:

$$H |0\rangle = |+\rangle$$

$$H |1\rangle = |-\rangle$$

S-Gatter

$$\mathbf{S} \quad S = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\frac{\pi}{2}} \end{pmatrix}$$

Phasendrehung + 90°:

$$S |0\rangle = |0\rangle$$

$$S |1\rangle = e^{i\frac{\pi}{2}} |1\rangle$$

T-Gatter

$$\mathbf{T} \quad T = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\frac{\pi}{4}} \end{pmatrix}$$

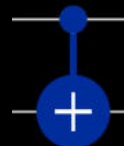
Phasendrehung + 45°:

$$T |0\rangle = |0\rangle$$

$$T |1\rangle = e^{i\frac{\pi}{4}} |1\rangle$$

Binäre Quantengatter

Kontrolliertes-Nicht-Gatter (CNOT)


$$\text{CNOT} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

Quantenverschränkung:


$$\text{CNOT} |00\rangle = |00\rangle$$

$$\text{CNOT} |01\rangle = |01\rangle$$

$$\text{CNOT} |10\rangle = |11\rangle$$

$$\text{CNOT} |11\rangle = |10\rangle$$

SWAP-Gatter


$$\text{SWAP} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Vertauschen von Qubit-Zuständen:

$$\text{SWAP} |00\rangle = |00\rangle$$

$$\text{SWAP} |01\rangle = |10\rangle$$

$$\text{SWAP} |10\rangle = |01\rangle$$

$$\text{SWAP} |11\rangle = |11\rangle$$

Quantum Software Development Kits (QSDKs) und Quantenprogrammiersprachen

QDK

t|ket>

Ocean



Wofür Quantencomputing?

Erfolgversprechende Anwendungsfelder

Simulationen	Entwicklung von Arzneimitteln, Fahrzeugbatterien...
Optimierungsprobleme	Optimierung von Routenplanung, Risikoanalysen...
Künstliche Intelligenz	Verbesserung von Betrugserkennung...
IT-Sicherheit	Schützen von Kommunikationsverbindungen...
Netzwerke	Errichtung eines Quanteninternets...

Quantensystem ermöglichen neue Finanzweltberechnungen

Handelssimulationen wie
Derivatpreise und deren die
Finanzinstrumente
verbessern

Quantensysteme ermöglichen neue chemische Innovationen

Molekulare Modellierung,
ermöglicht die Entwicklung
von effizienteren
Lithiumbatterien

Quantensysteme optimieren neue Wege für Produktion und Transport



Routing-Optimierung zur Schaffung neuer Produkte in der Automobilindustrie, z. B. Mobility as a Service

Quantensysteme können physikalische Prozesse der Natur modellieren

Simulationsschätzungen verwenden eine molekulardynamische Näherung, die Fehler akkumuliert

Quantensysteme können komplexe Szenariosimulationen durchführen, indem Modelle mit weniger, aber viel höherwertigen Stichproben erstellt werden

Die Anzahl der Simulationen wird heute reduziert, was sich auf die Annahmen und die Schätzgenauigkeit auswirkt

Quantensysteme finden eine bessere Annäherungen an eine optimale Lösung, durch Erkundung großer Lösungsräume

Die Laufzeit für eine genaue Lösung dauert zu lange. Unternehmen akzeptieren auch ungenaue Berechnungen

Durch den Einsatz von Quantensysteme können bessere Muster in AI / ML-Prozessen gefunden werden, welche die Daten für Training und Verwendung höheren Dimensionen zuordnen

Daten können schwer zu identifizierende Strukturen aufweisen, was die Klassifizierungsgenauigkeit verringert



Post-Quanten-Kryptographie (PQK) auf klassischen Computern, die sowohl sicher gegenüber Angriffen mit Quantencomputern als auch gegenüber klassischen Angriffen ist.

Fraunhofer-Kompetenznetzwerk Quantencomputing

Eine Forschungsplattform für das deutsche
Wissenschafts- und Innovationssystem

- Universitäre Forschungsgruppen
- KMU, Startups und Großindustrie
- Prominente Forschungsinstitutionen

Proliferation der Technologie

- Niedriger Schwellwert für den Einstieg
- Aufbau von Fachkompetenz
- Absicherung von IP
- Beurteilung für zukünftigen Invest

Fraunhofer-Kompetenznetzwerk Quantencomputing

Fraunhofer FOKUS
platforms, certification, security

Fraunhofer IIS-EAS, IAIS-EST, IOSB-AST, IWU
optimization, simulation

Fraunhofer IMS
semiconductor electronics and sensors

Fraunhofer ILT
hardware engineering and optimization

Fraunhofer SCAI, IAIS
Quantum machine learning, Quantum KI

Fraunhofer IGD, SIT
safety, security, cryptography

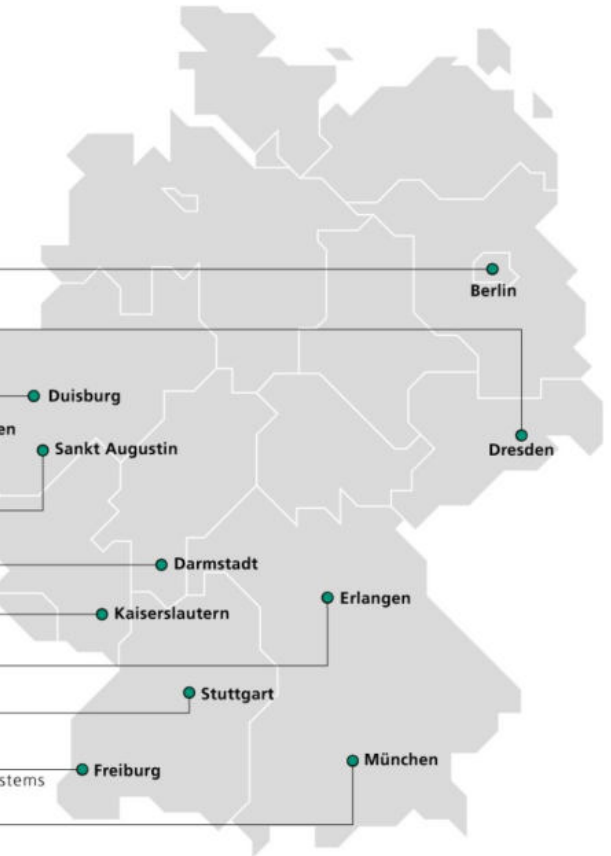
Fraunhofer ITWM
Quantum HPC, algorithms

Fraunhofer IIS
security, robustness, optimization

Fraunhofer IAO
optimization

Fraunhofer IAF
Quantum Hardware, Hybride Computing Systems

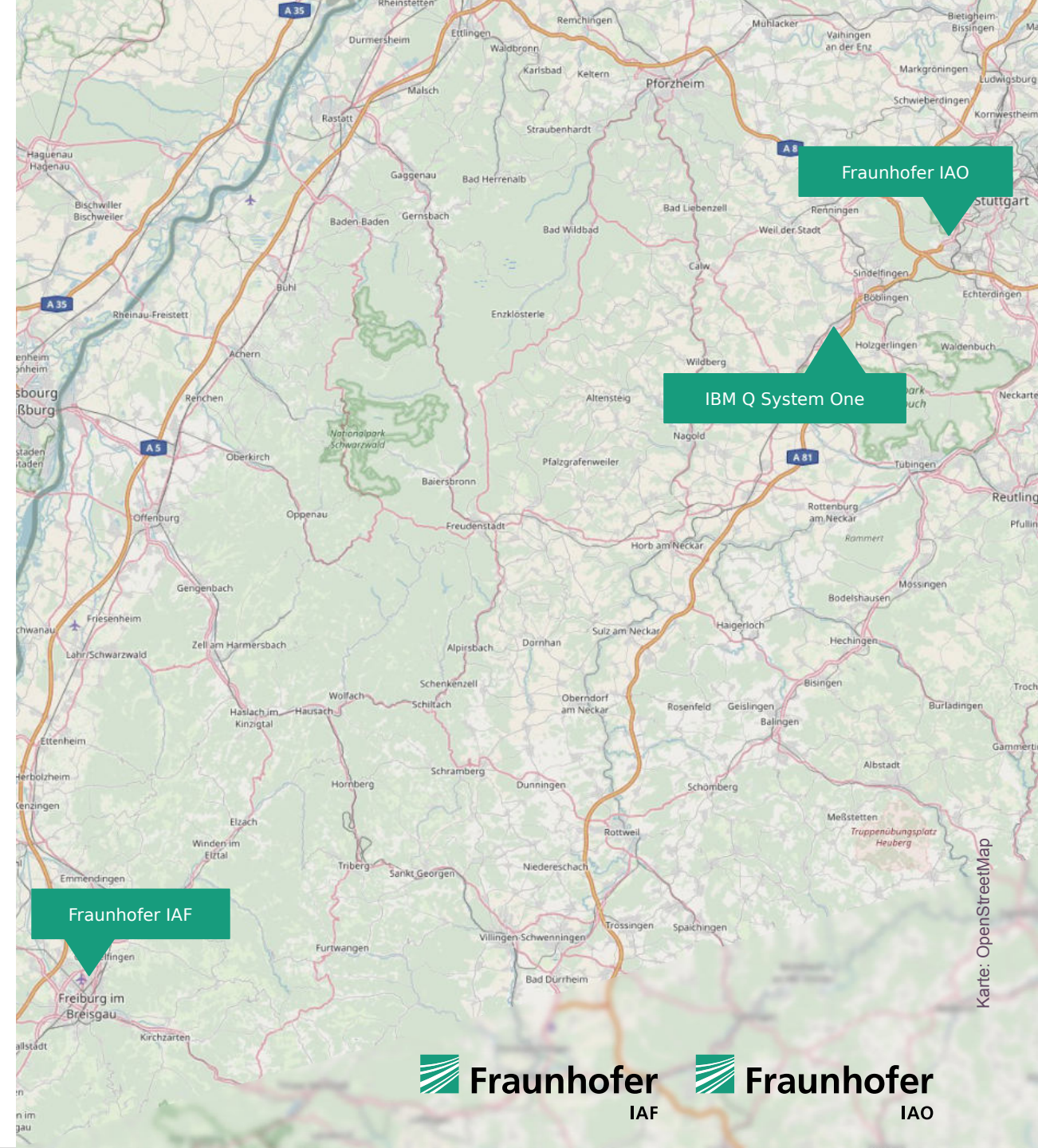
Fraunhofer AISEC, IKS
security, robustness, optimization



Kompetenzzentrum »Quantencomputing Baden-Württemberg«

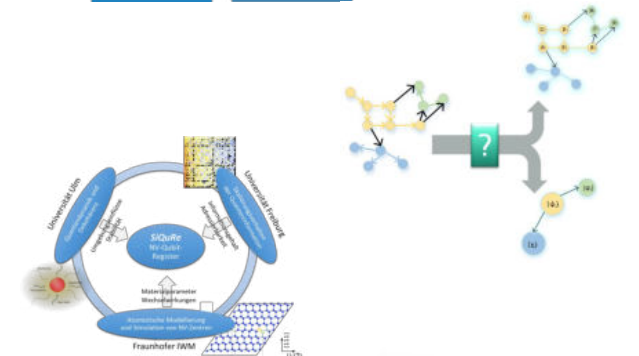
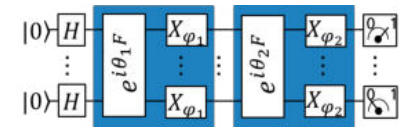


- Zugang zum IBM-Quantencomputer
 - State-of-the-Art System mit > 27 Qubits
 - Ab 2021 Standort in Deutschland, d.h. unter deutscher Gesetzgebung (Datenschutz, IP-Sicherheit)
- Anwendungsorientierte Forschungsprojekte
 - Quantencomputing für das Design neuartiger Materialien und quantenchemischer Reaktionen
 - Quantencomputer und Quantenalgorithmen zur Optimierung komplexer Zustandssysteme
 - Entwicklung und Demonstration leistungsfähiger Quantenspeicher und Quantenprozessoren
- Schulungsangebot
 - Präsenz- und Onlineformate für verschiedene Zielgruppen und Wissensstände ab 2021



Aktuelle KomZenQC Baden-Württemberg Projekte

- Materialdesign für elektrochemische Energiespeicher und -wandler mit innovativen Simulationstechniken – QuEST**
DLR-Institut für Technische Thermodynamik: Im Projekt QuEST wird der IBM-Quantencomputer zu Materialsimulationen für elektrochemische Energiesysteme eingesetzt und erprobt.
- Software-Engineering industrieller, hybrider Quantenanwendungen und -algorithmen – SEQUOIA**
Fraunhofer IAO: Im Projekt werden neue Methoden, Werkzeuge und Vorgehensweisen für Quantencomputing erforscht, entwickelt und erprobt, um zukünftig die industrielle Nutzung zu ermöglichen.
- Quantenoptimierung mit resilienten Algorithmen – QUORA**
Fraunhofer IAF: Im Projekt werden Optimierungs-Algorithmen für z.B. die Finanzbranche um große und komplexe Portfolios zu verwalten, entwickelt und in der Praxis erprobt.
- Stabilitätsanalyse und Fehlerkorrekturprotokolle für kritische Infrastrukturnetze – EFFEKTIF**
Fraunhofer EMI: Durch Abbildung typischer Wasser- oder Stromnetzwerkstrukturen auf Quantennetzwerke soll das Potential quantenmechanischer Interferenzeffekte für die Effizienzsteigerung in Simulationen ausgelotet.
- Modellierung und Simulation von Qubit-Registern aus Ketten von NV-Zentren auf Versetzungen in Diamant – SiCuRe**
Fraunhofer IWM: Das Forschungsvorhaben behandelt inwieweit sich Qubits, basierend auf Stickstoff-Vakanzen-Zentren (NV-Zentren) im Diamantkristall, als Qubit-Register periodisch anordnen lassen.
- Entwicklung und Benchmarking eines Diamant-basierten, spintronischen Quantenregisters für einen aufskalierbaren Quantenprozessor – QC4BW**
Fraunhofer IAF: Ziel ist die Entwicklung eines Diamant-basierten, spintronischen Quantenregisters für einen skalierbaren Quantenprozessor, um quantenchemische Prozesse zu evaluieren. Dafür wird ein 10-Qubit-Quantenregister entwickelt werden.



Ingolf Wittmann

Fraunhofer IAF

Geschäftsfeld Quantensysteme

Tullastrasse 72

D-79108 Freiburg

Mobile: +49-171-8464027

eMail: ingolf.wittmann@iaf-extern.fraunhofer.de

ingolf.wittmann@ijwittmann.de

