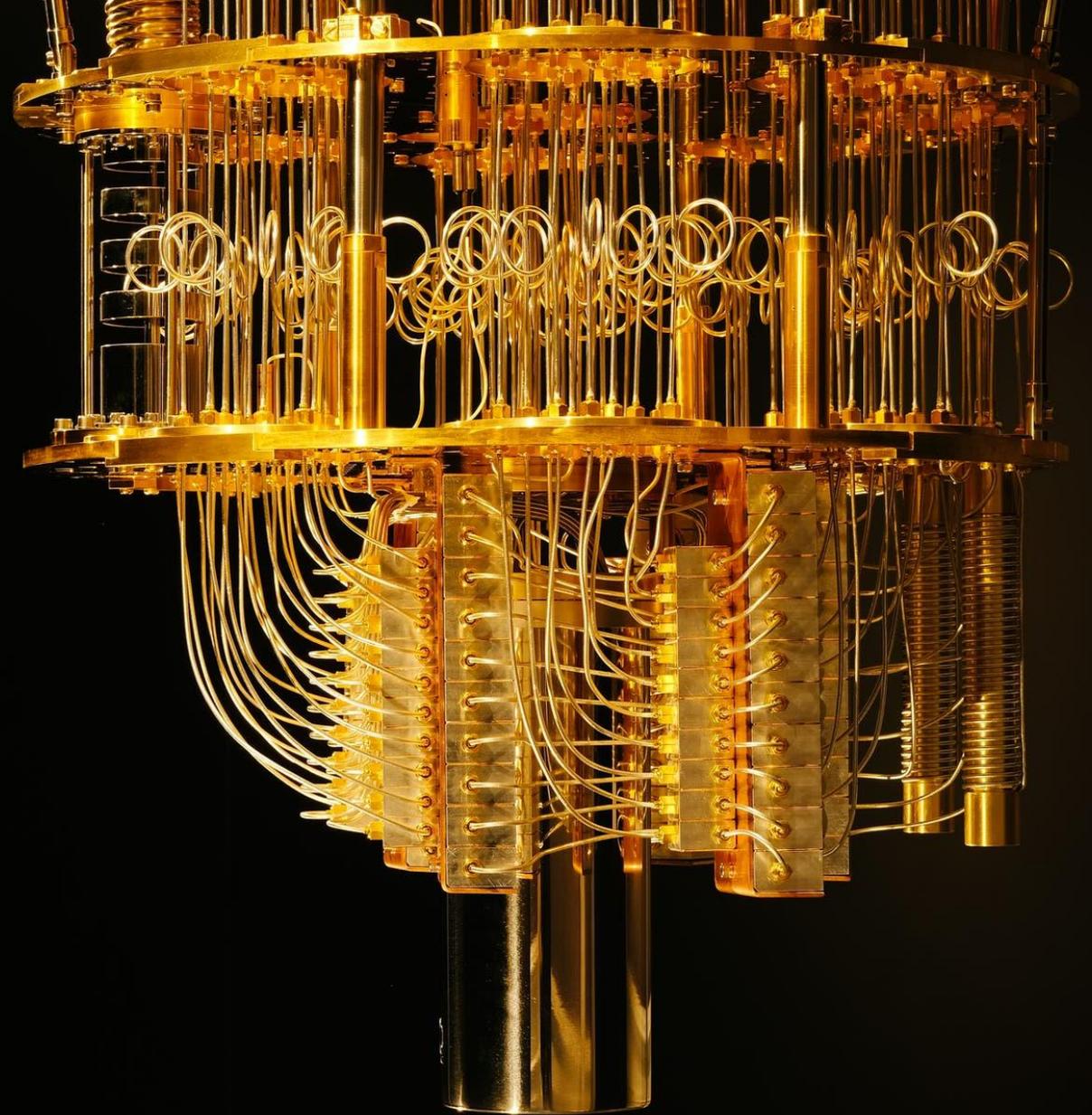


EINFÜHRUNG IN DAS QUANTENCOMPUTING

Ingolf Wittmann
Geschäftsfeldleiter Quantensysteme
Fraunhofer IAF

Mark Mattingley-Scott
IBM Quantum Ambassador Leader EMEA/AP
IBM Deutschland GmbH



Agenda

- Warum Quanten Computing?
- Technischen Grundlagen für Quanten Computing
- Definition des Quantenvolumens
- 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 IBM Q Network
- Das Fraunhofer Kompetenznetzwerk für Quanten Computing
- Q&A

Limitationen des klassischen Computings

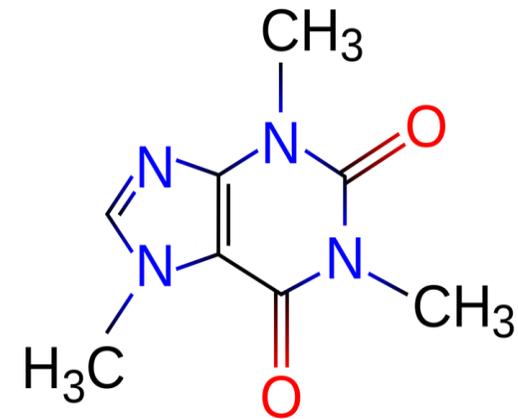


Reprinted from JOURNAL OF THE OPERATIONS RESEARCH SOCIETY OF AMERICA
Vol. 2, No. 4, November, 1954
Printed in U.S.A.

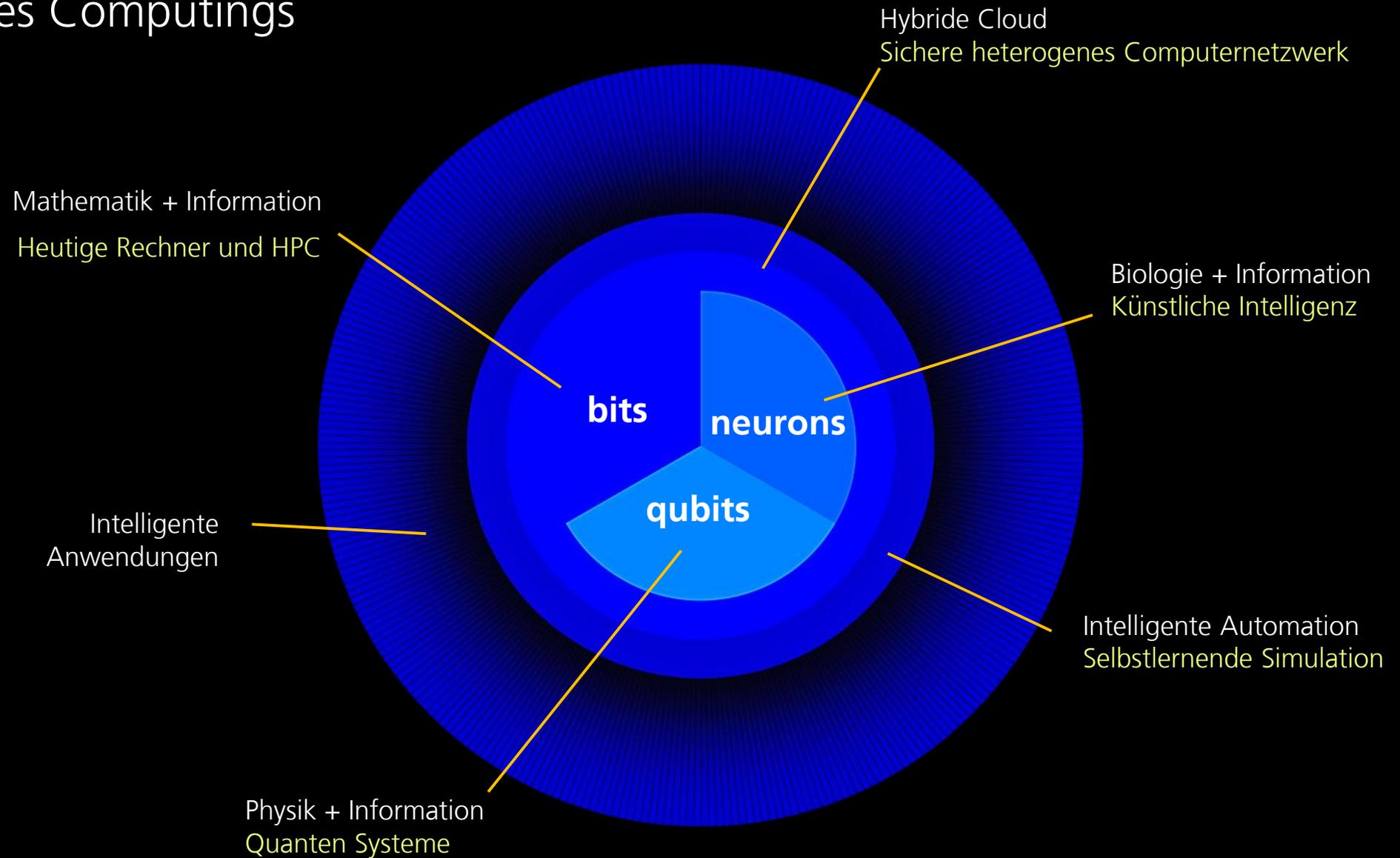
SOLUTION OF A LARGE-SCALE TRAVELING-SALESMAN PROBLEM*

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 + Neurons"



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

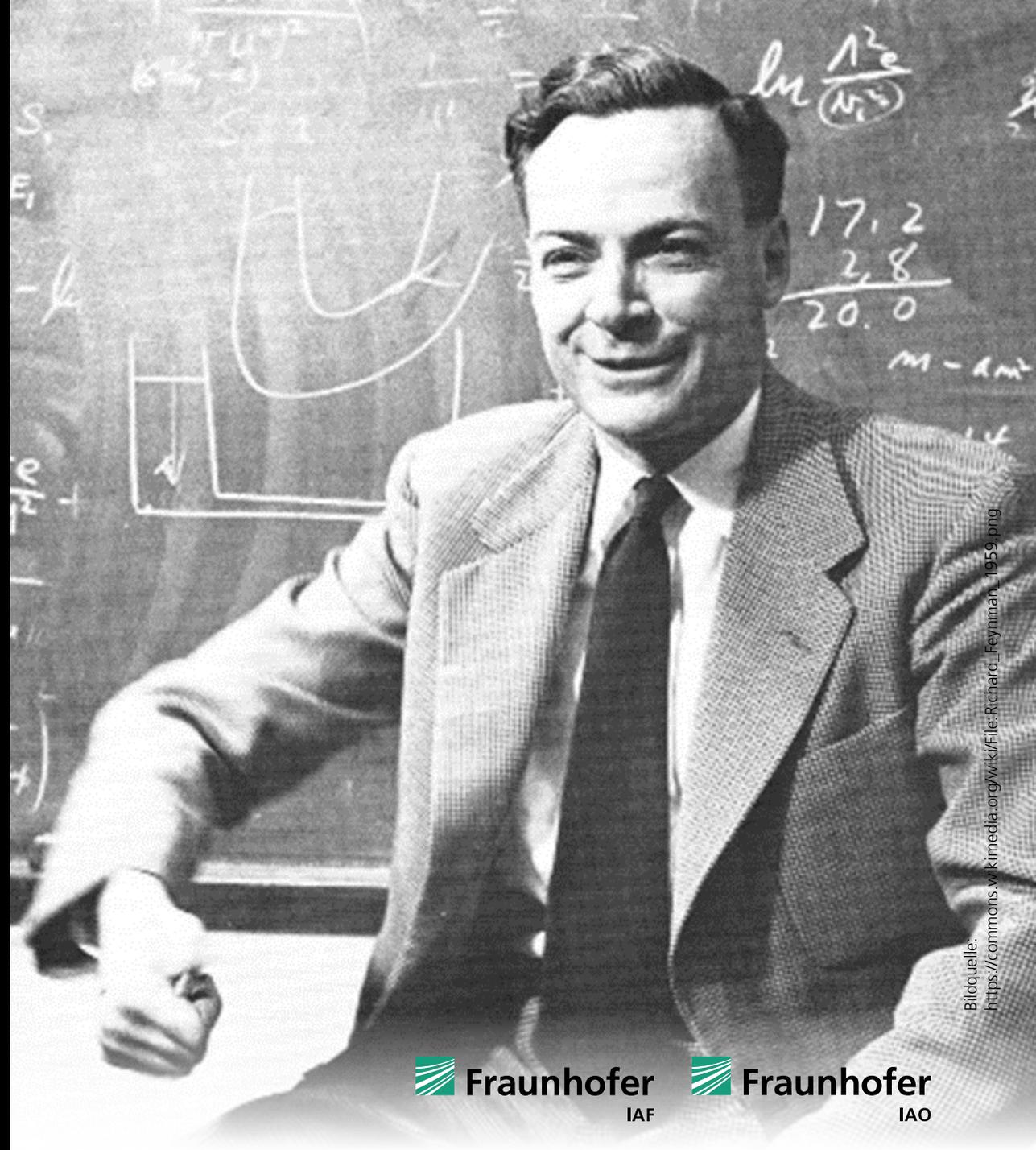


Welche Idee steckt hinter Quantencomputing?

»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



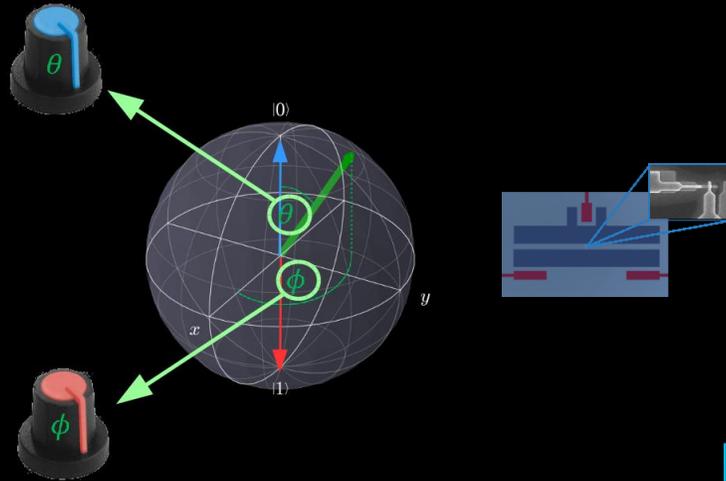
Silicon Struktur
< 20 nm



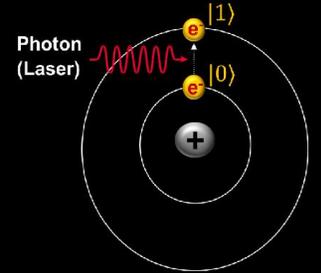
Klassisch

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

Multi-qubit Effekte: Entanglement



Atome
Elektronen
Photonen



N bit input 100110...

Quantum Computer

N qubits
 2^N paths

$|100000 \dots\rangle + |010010 \dots\rangle + |1101000 \dots\rangle + \dots$

N bit output 010101...

Quantum

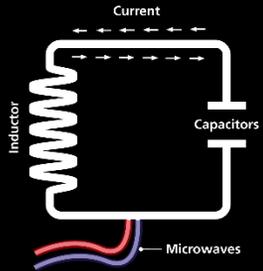
Technologien um Qubits zu bauen

Silicon quantum dots



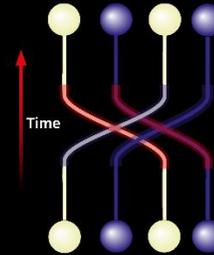
Diese „künstlichen Atome“ werden durch Hinzufügen eines Elektrons in ein kleines Stück reines Silizium hergestellt. Mikrowellen steuern den Quantenzustand des Elektrons.

Superconducting loops



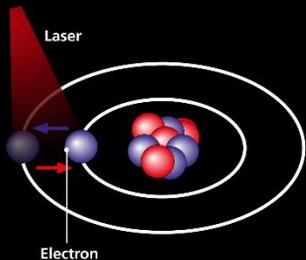
Ein widerstandsfreier Strom schwingt um eine Schaltungsschleife hin und her. Ein injiziertes Mikrowellensignal regt den Strom in Überlagerungszustände an. In dem Schwingkreis stellen Elektronenwolken ein künstliches Atom dar, welches als Qubit verwendet wird. Die Qubits werden in universellen und adiabatischen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

Topological qubits



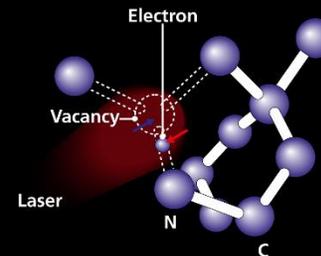
Quasi-Partikel sogenannte Majorana-Fermionen, welche nur in bestimmten Materialien vorkommen, können als Qubits verwendet werden. Des Weiteren sollen diese gegen magnetische und elektrische Störungen unempfindlich sein, dadurch dass sich die Quanteneigenschaften von mehreren Elektronen auf einer Ebene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

Trapped ions



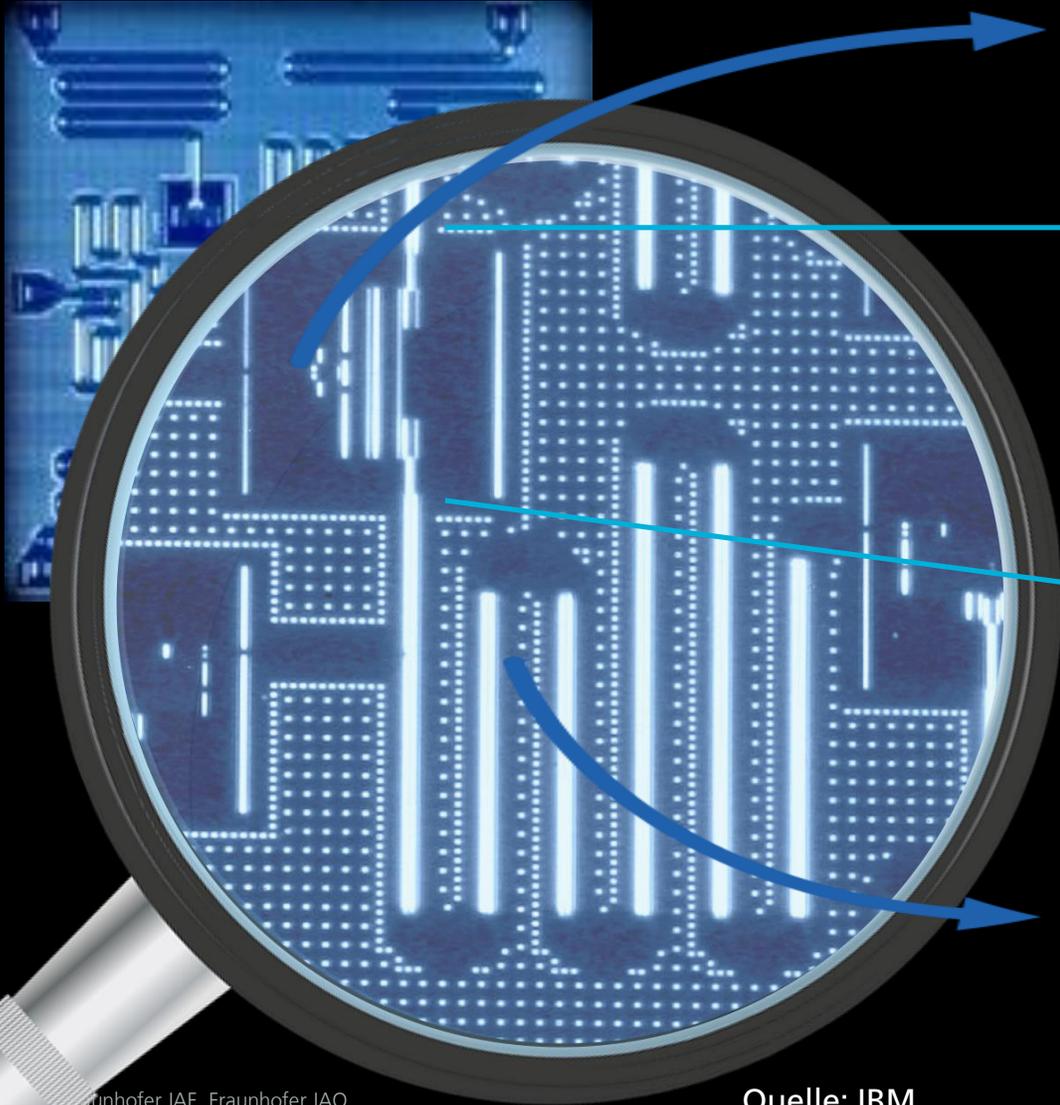
Elektrisch geladene Atome oder Ionen können sich wie Qubits verhalten. Die Qubits werden in stabilen elektronischen Zuständen z.B. in einzelnen Ionen gespeichert. Es werden Laser verwendet, um eine Kopplung zwischen den Qubit-Zuständen für Einzel-Qubit-Operationen oder eine Kopplung zwischen den internen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

Diamantfehlstellen



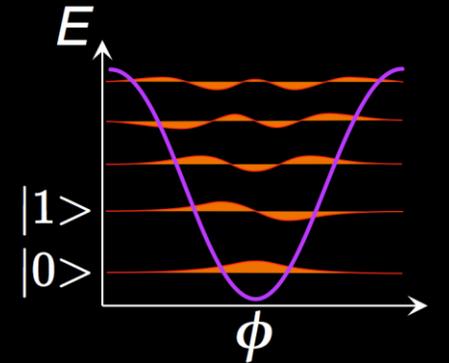
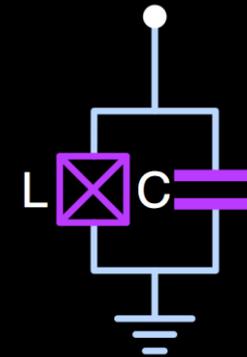
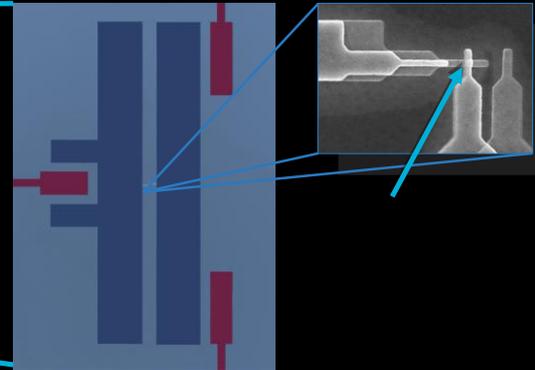
In einem künstlichen Diamanten werden zwei C13 Atome herausgelöst und ein Stickstoffatom eingefügt. In die zweite Leerstelle wird ein Stickstoffelektron bewegt, dessen Spin als hochempfindlicher Atomsensor oder als Qubit für arithmetische Operationen verwendet werden kann. Die Manipulation erfolgt über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

Anatomie eines supraleitenden Quantumprozessors



Supraleitendes Qubit:

- Josephson Junction als eine nicht lineare Spule



$$E_{01} \approx 5 \text{ GHz} \approx 240 \text{ mK}$$

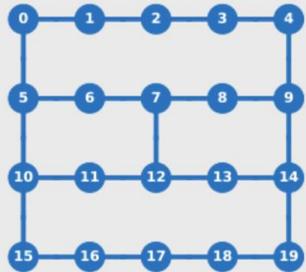
Supraleitender

Mikrowellenschwingkreis:

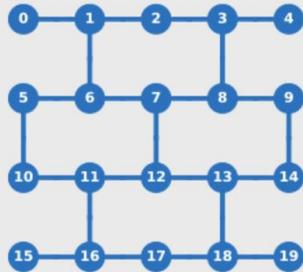
- Auslesen der Qubits
- Verbindung von Qubits
- Rauschfilter

Topologie von IBM Quantumprozessoren

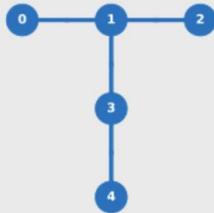
IBM Quantum Prozessoren



Johannesburg
Poughkeepsie



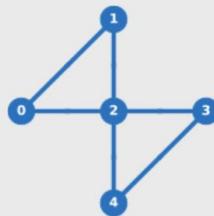
Almaden
Boeblingen
Singapore



Ourense
Valencia
Vigo

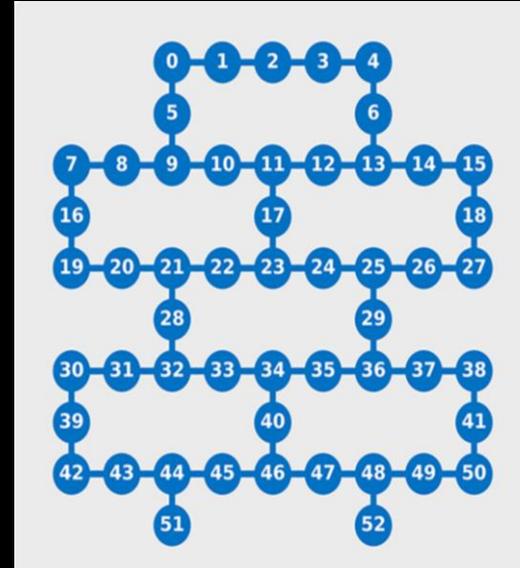


Melbourne

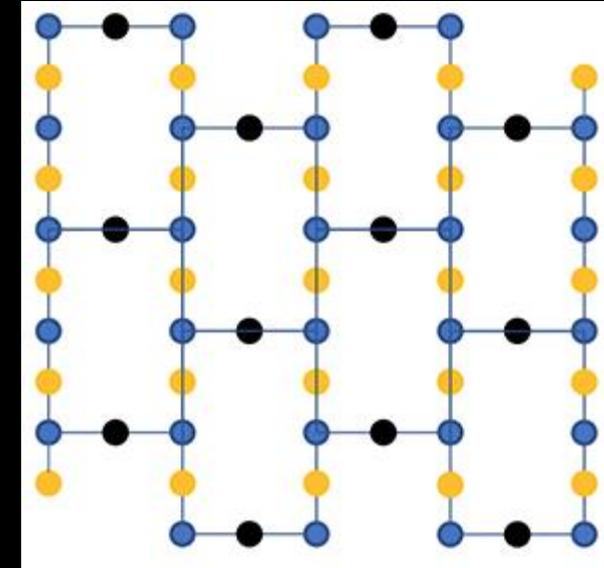


Yorktown

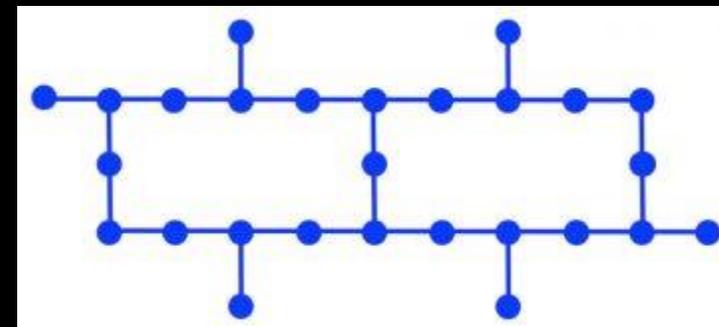
53 Qubit Prozessor [Rochester]



65 Qubit Prozessor [Hummingbird]

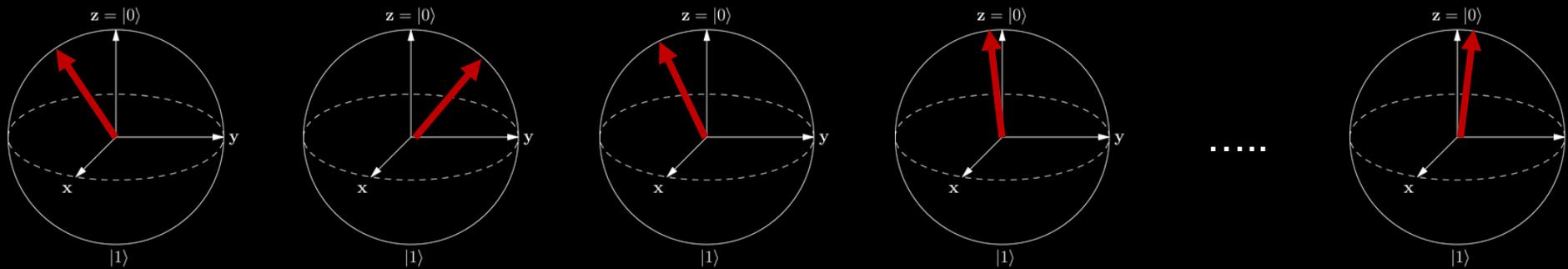
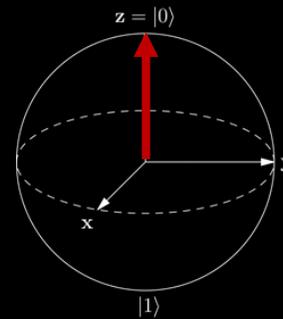


27 Qubit Prozessor [Falcon]



Logische Qubits

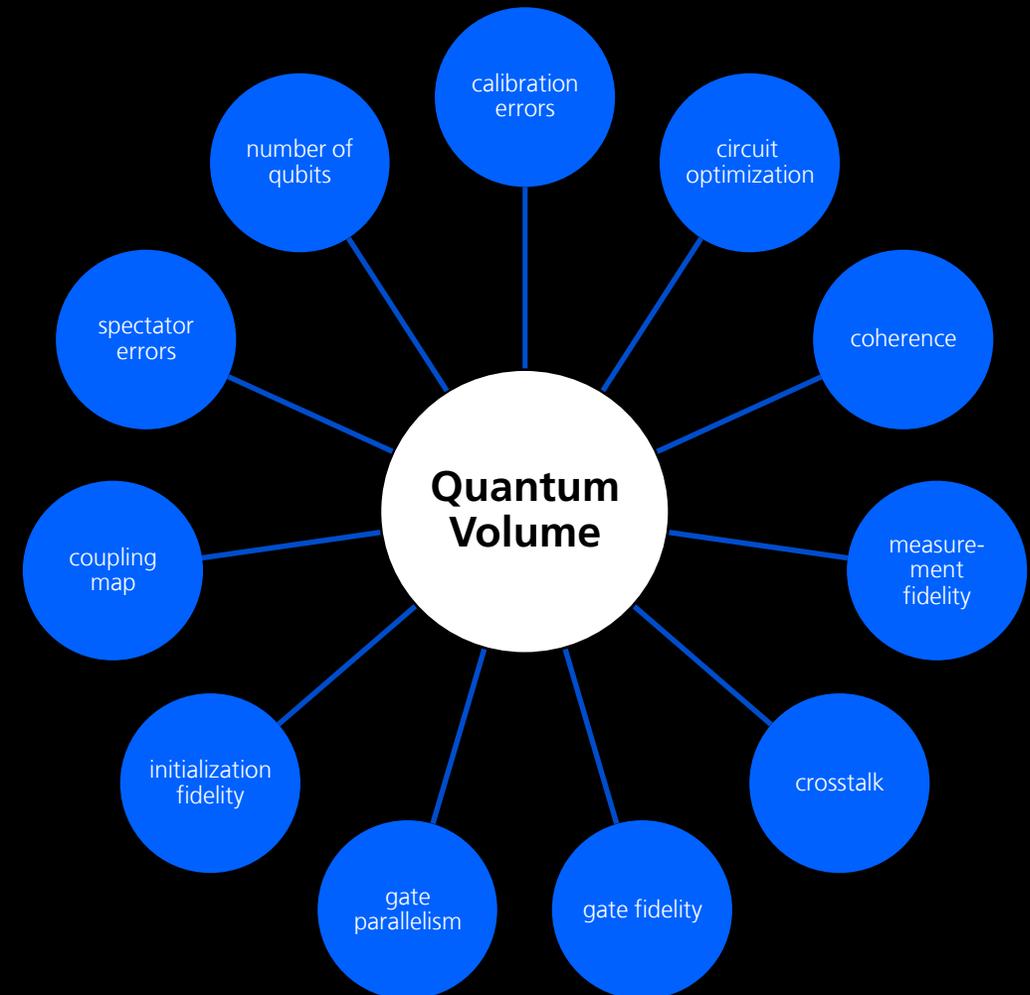
Logisches Qubit



Physische Qubits

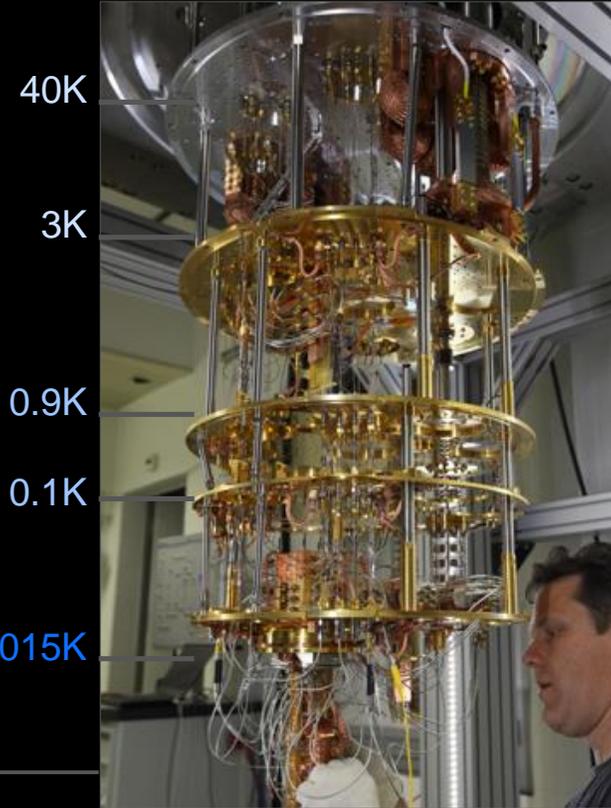
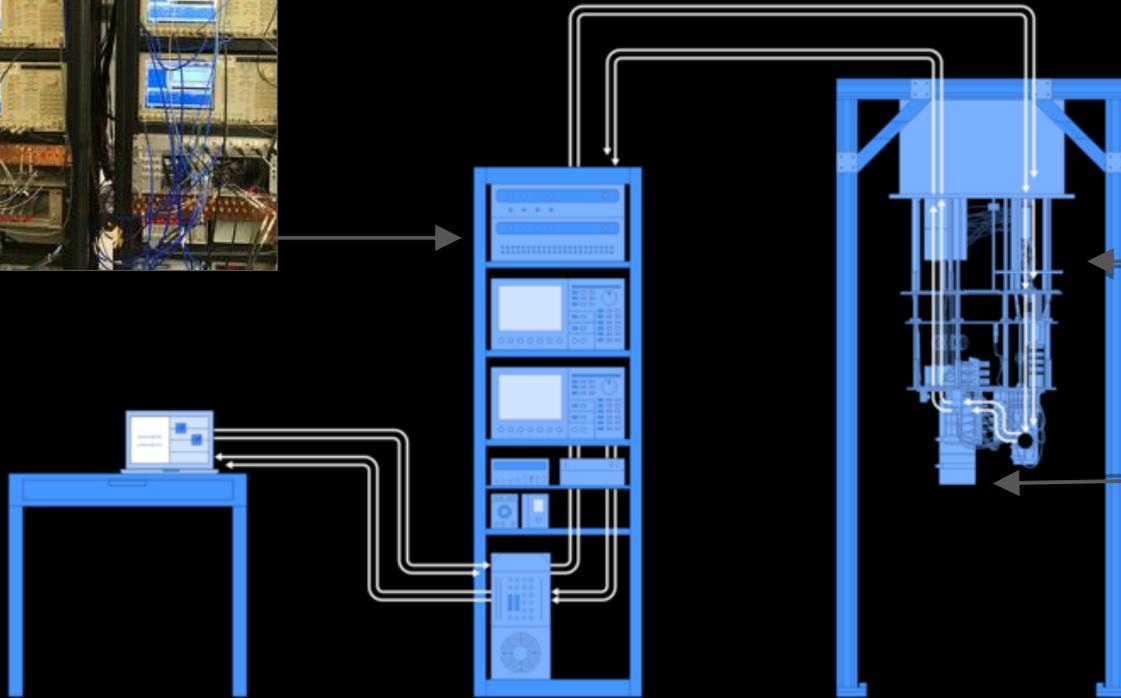
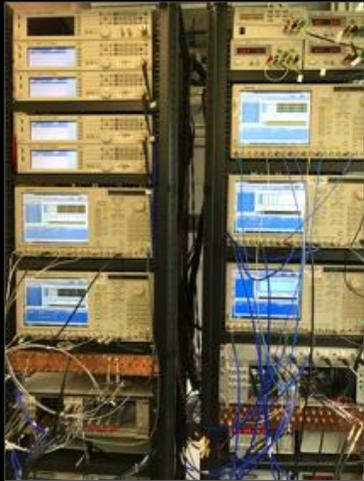
Das Quantenvolumen als Maß der Leistungsfähigkeit von Quantencomputern

- ... kann theoretisch max. $V_Q = 2^n$ für ein System mit n Qubits betragen.
- ... wird durch Messung *auf* dem Quantencomputer ermittelt, nicht durch Berechnung aus Daten *über* den Quantencomputer.
- ... beruht auf der Annahme, dass Schaltkreise mit bestimmten Eigenschaften für nützliche Anwendungen notwendig sind.
- ... wird von vielfältigen Faktoren beeinflusst.

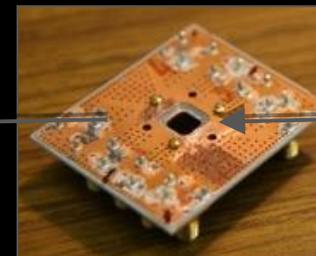


Aufbau eines IBM Quantum Computing Systems

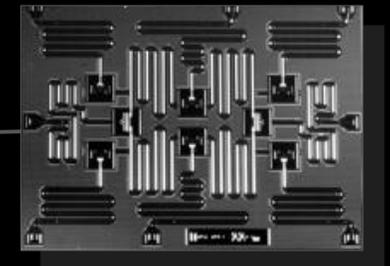
Mikrowellenelektronik



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

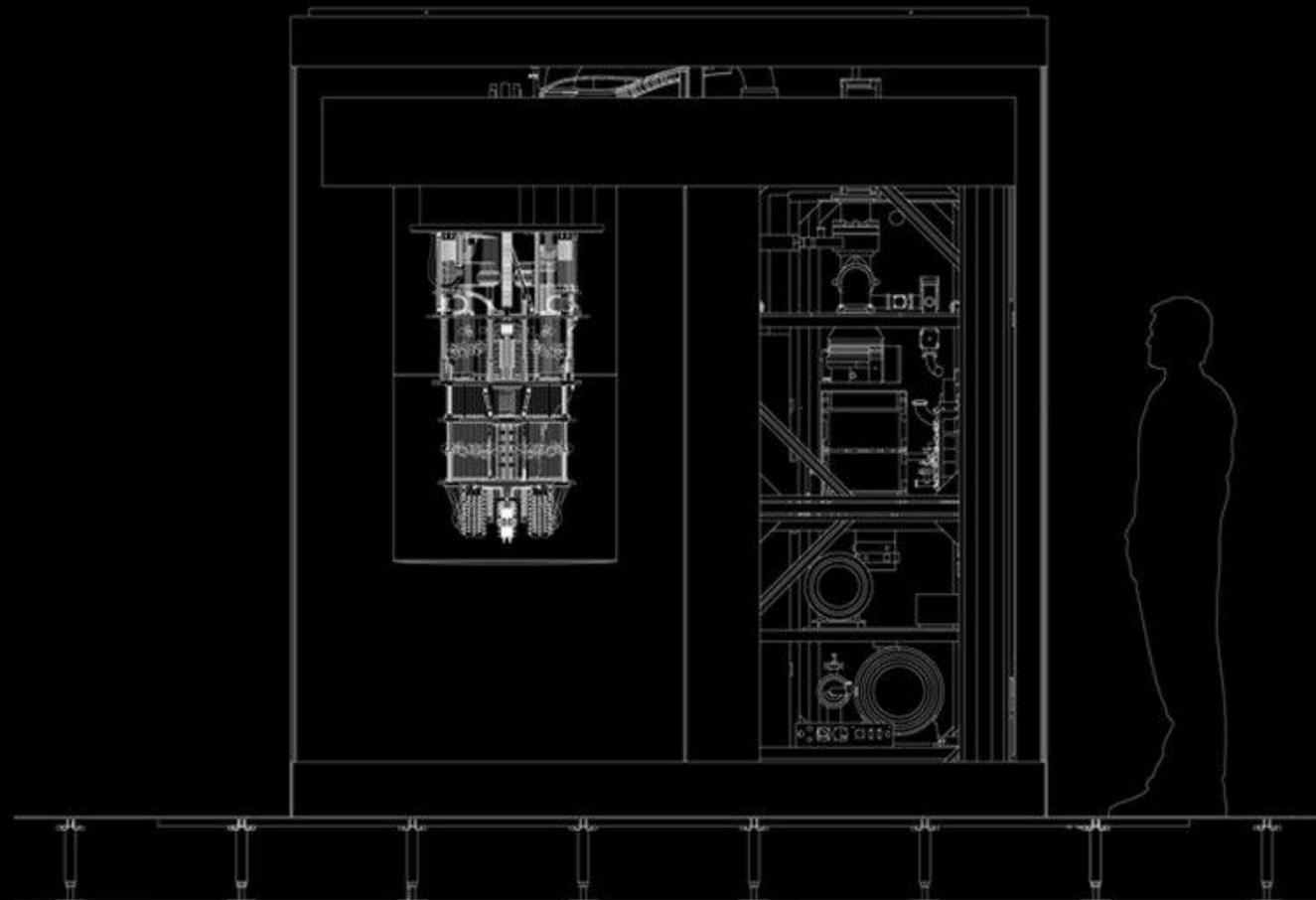


Leiterplatte mit dem Qubitprozessor bei 15 mK geschützt von der Außenwelt mit mehreren Abschirmungen



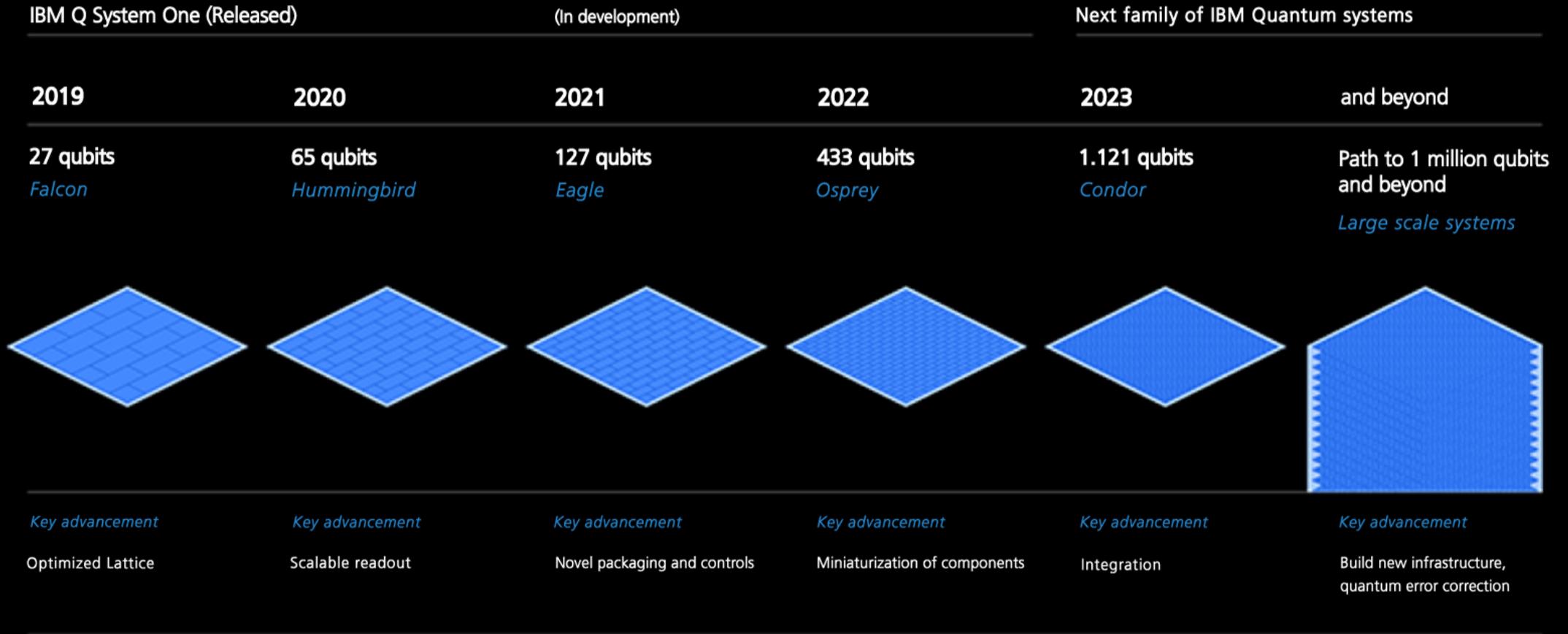
Prozessor mit Superconducting Qubits und Resonators

IBM Q System One als kommerzielles System



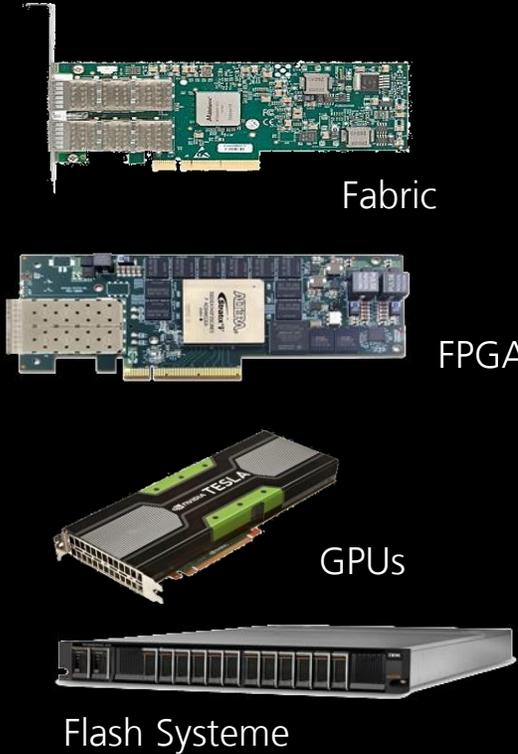
Quelle: IBM

Scaling IBM Quantum technology



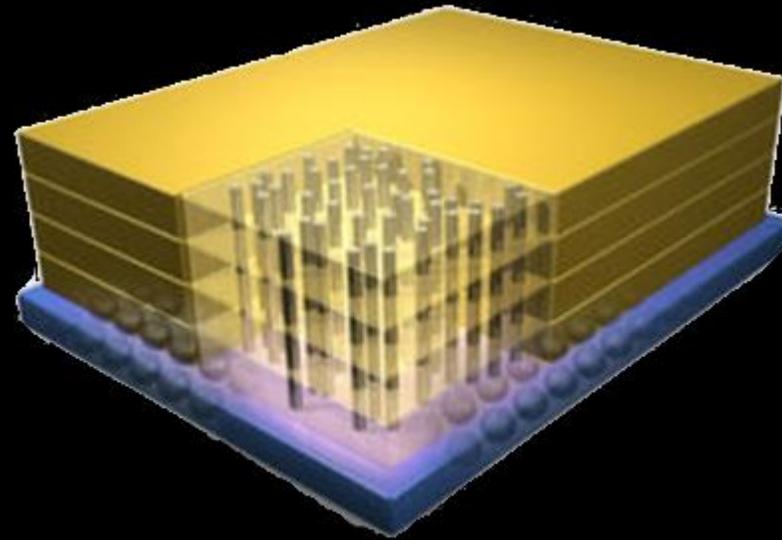
Zukünftige hybride IT Infrastruktur

Heute



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

Prozessoren / Systeme



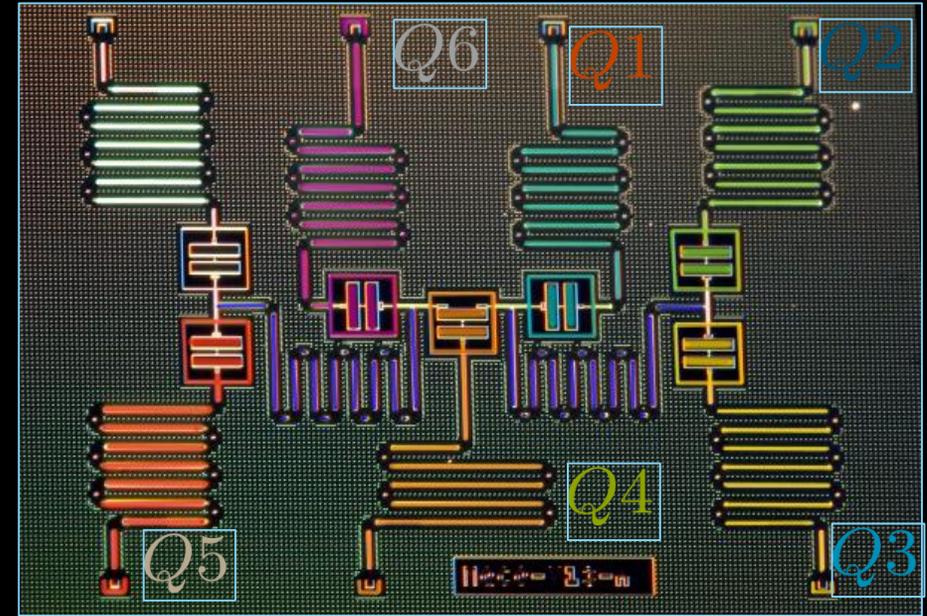
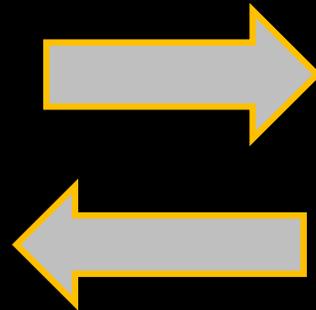
Neues Chipdesign für verdichtete, niedrigeren Stromverbrauch und beschleunigte Systeme

Jenseits von Neumann



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

Der Quantum-Classical Ansatz: Variational Quantum Eigensolver



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

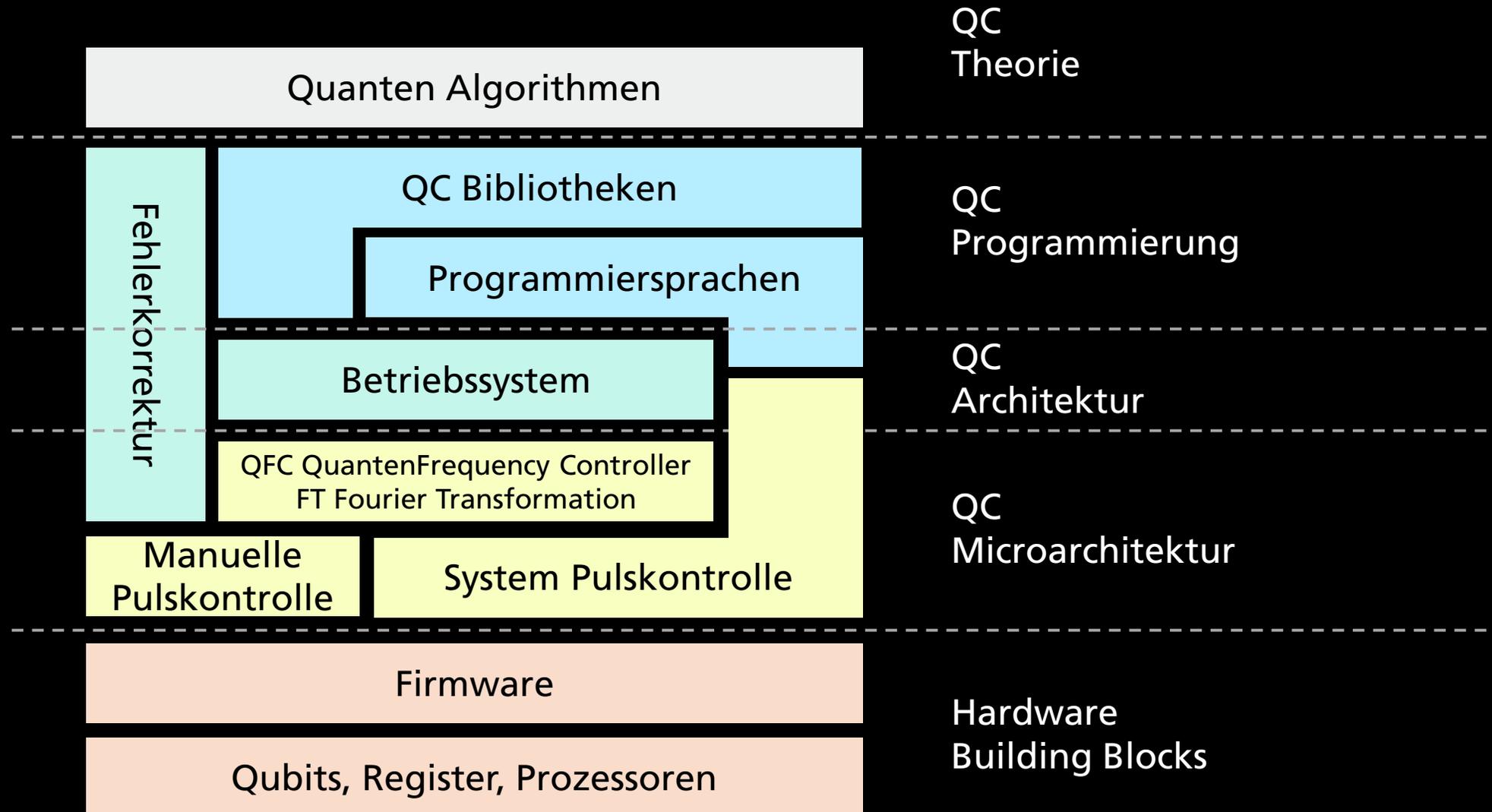
HPC Systeme

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

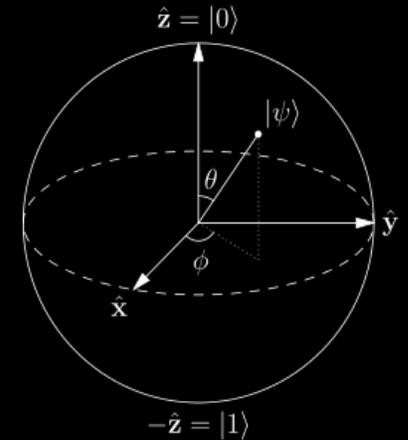
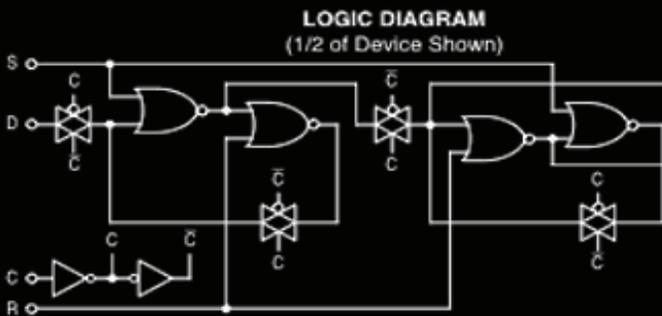
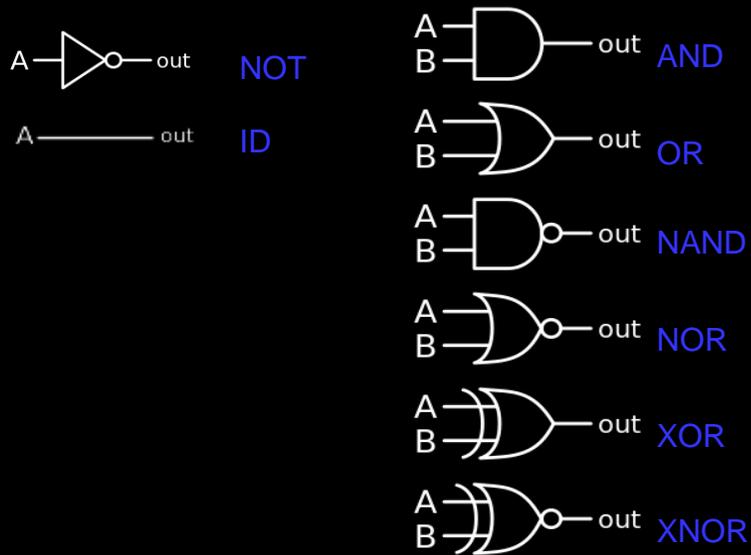


- Arbeiten mit proprietären Daten
- Bewerten von tieferen Schaltkreise
- Lernzyklen beschleunigen
- Bewertung des Fehlerverhaltens

Aufbau Quantumsoftwarestack und Abstractionlayer

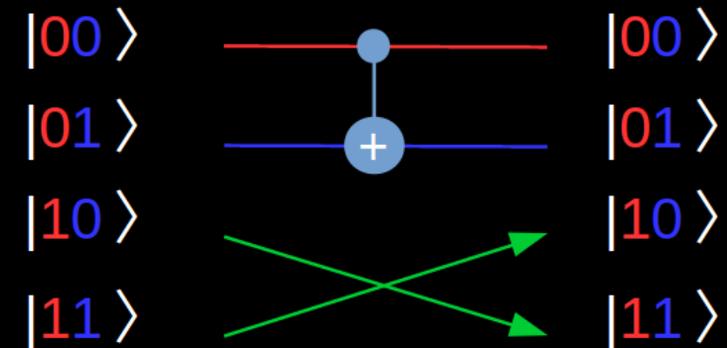


Quantum Logik ... wie man Quantencomputer programmiert



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

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

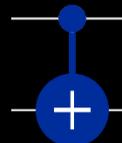
Phasendrehung + 45°:

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

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

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:

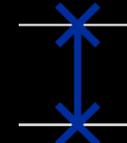
$$\text{CNOT } |00\rangle = |00\rangle$$

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

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

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

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

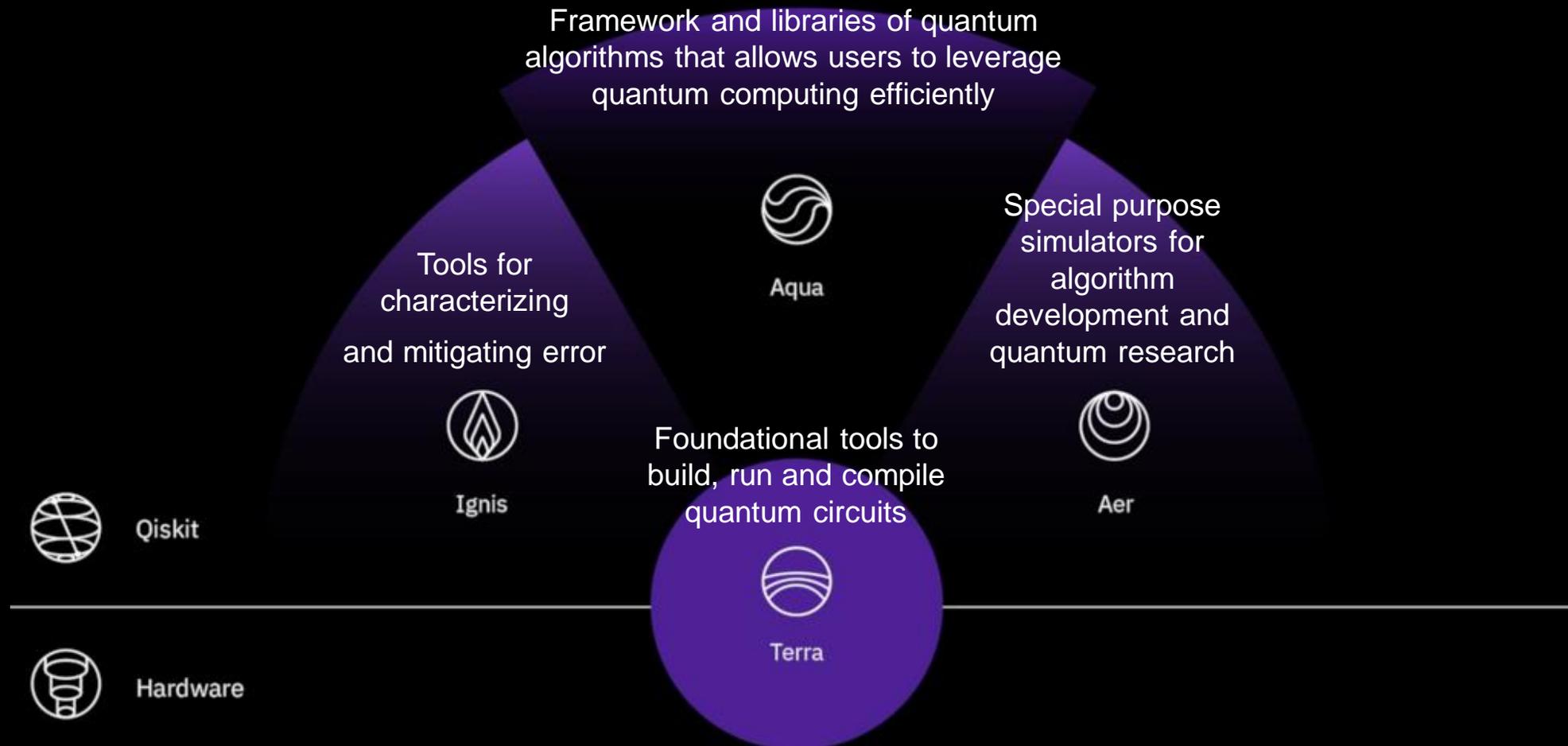
QDK

$t|ket\rangle$

Ocean



Qiskit Softwarestack



Bildquelle:
https://qiskit.org/documentation/the_elements.html

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.

IBM Q Network und Offerings

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

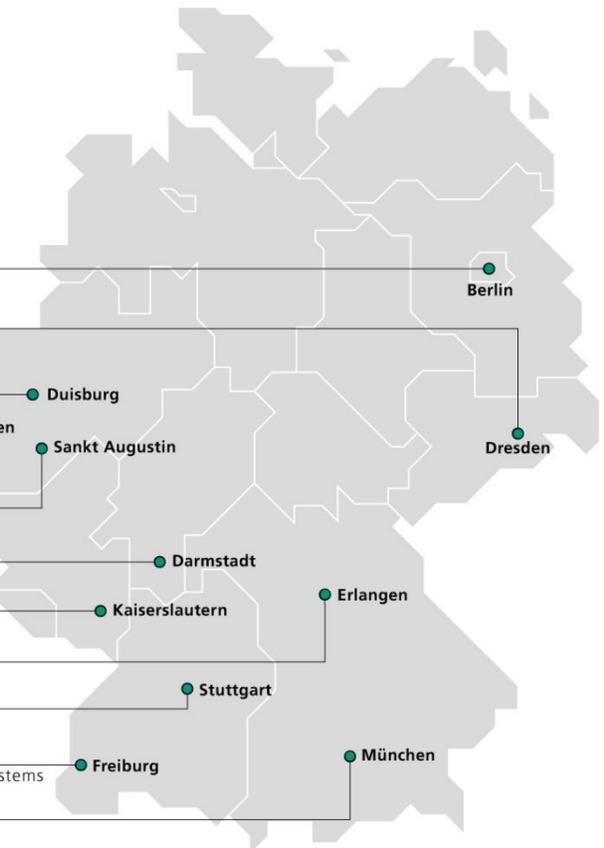
Fraunhofer ITWM
Quantum HPC, algorithms

Fraunhofer IIS
security, robustness, optimization

Fraunhofer IAO
optimization

Fraunhofer IAF
Quantum Hardware, Hybride Computing Systems

Fraunhofer AISEC, IKS
security, robustness, optimization



Ingolf Wittmann

Fraunhofer IAF
Geschäftsfeldleiter Quantensysteme
Tullastrasse 72
D-79108 Freiburg
Mobile: +49-171-8464027
eMail: ingolf.wittmann@iaf.fraunhofer.de

