

Quanteninformation und Quantencomputing

Eine Einführung

Tim Heine

DLR - Institut für Quantentechnologien, Ulm

CODE Jahrestagung, 10.07.2024

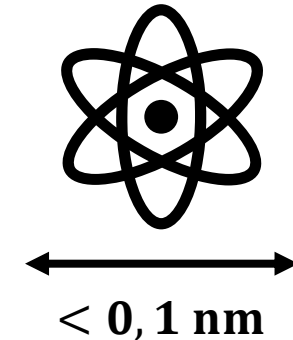
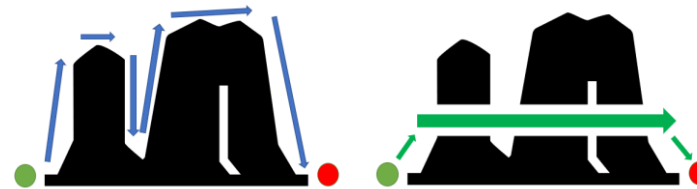
Workshop 1 | Quantentechnologien

Die Grenzen des klassischen Rechnens



löst **nicht alle** Probleme

- aktuell: 10.000.000.000 Transistoren pro Chip
- bei Transistorgröße $< 5 \text{ nm}$: \rightarrow **Tunneleffekt**



- **Physikalische Grenze:**
 - Transistorgröße: *nicht stetig reduzierbar*
- **Bit Grenze:**
 - **Bits:** voneinander unabhängig, *nicht verschränkt*
 - *sequenzielle* Operationen

● 0

● 1

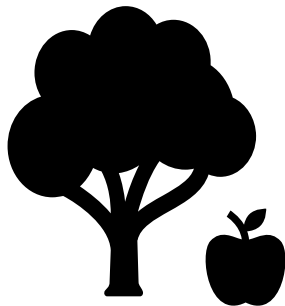
Klassische Physik vs. Quantenmechanik



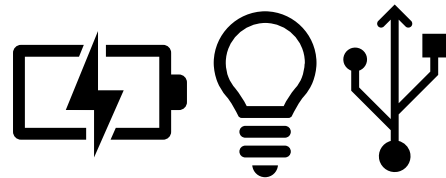
klassische Physik

deterministisch

Mechanik:



Elektrizität:



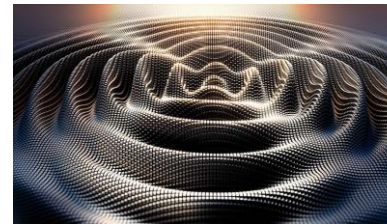
Messung verändert nicht die Messgröße

Quantenphysik

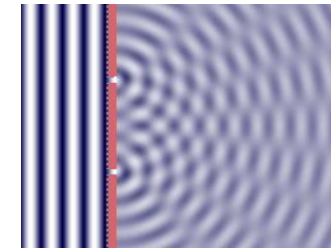
probabilistisch

- Quantenmechanik:

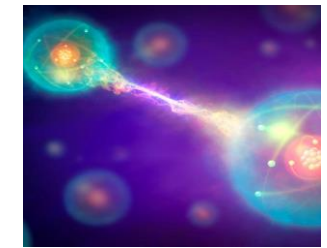
$$H |\psi\rangle = E |\psi\rangle$$



Superposition

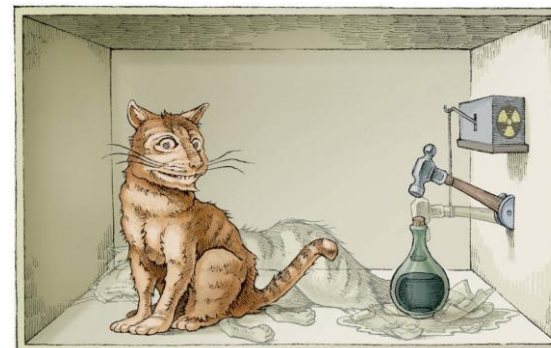


Interferenz



Verschränkung

Messung in der Quantenmechanik:



Messvorgang **wechselwirkt** mit Messgröße

Qubits: Rotationen von 0 und 1

Bits: klassisch

● 0

● 1

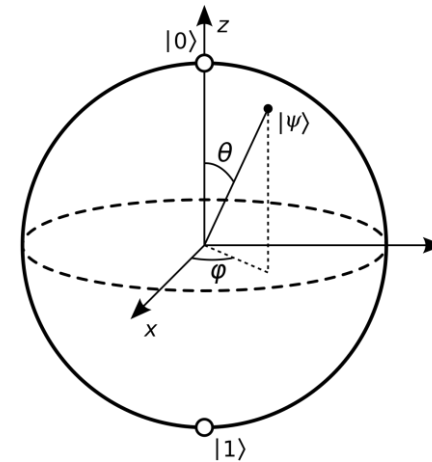
+	0	1
0	0	1
1	1	0

Schrödinger Gleichung
→

QuBits: quantenmechanisch

● $|0\rangle$

● $|1\rangle$



$$|0\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad |1\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$|\psi\rangle = a|0\rangle + b|1\rangle = \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix}$$

$$|a|^2 + |b|^2 = 1, \quad a, b \in \mathbb{C}$$

$$|+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|0\rangle + |1\rangle)$$

$$|-\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|0\rangle - |1\rangle)$$

Rechenoperationen sind Drehungen

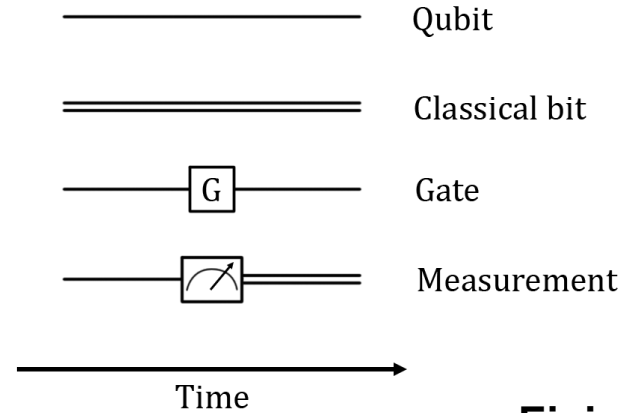
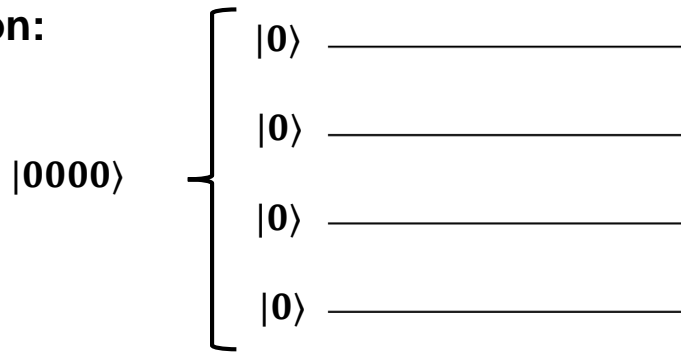


Quantenalgorithmen

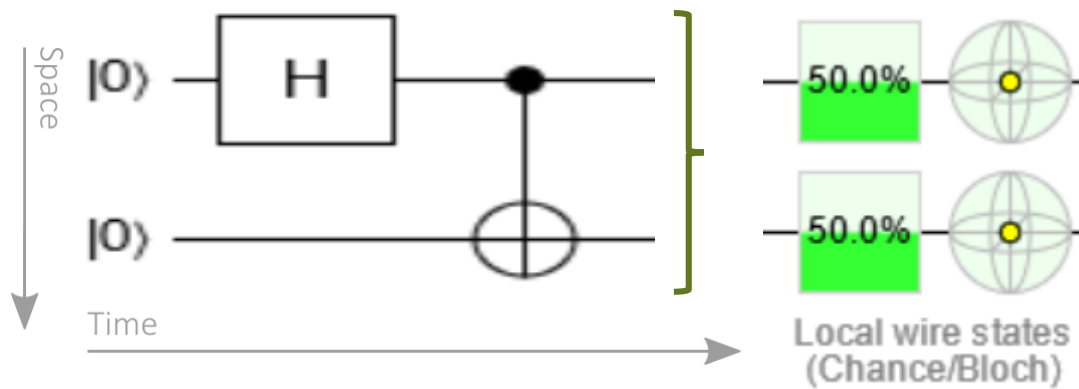
Gatter und Schaltkreise



Konvention:



Beispiel: Verschränkung



Quelle: Q-Computation based image representation, Iliaysu et al. (2014)

Quelle: Microsoft Community, Q-Computing Crash Course

Quelle: Microsoft Azure, learn key concepts of quantum computing

Einige Gatter:

Gate	Notation	Matrix
NOT (Pauli-X)		$\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$
Pauli-Z		$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$
Hadamard		$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}$
CNOT (Controlled NOT)		$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$

Quelle: Nielsen, Chuang „Quantum Computation and Quantum Information“ (2001)

Quelle: Quirk, the quantum circuit simulator

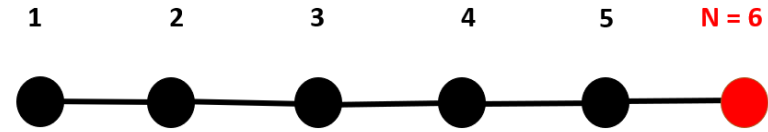
Quantenvorteil

Beispiele

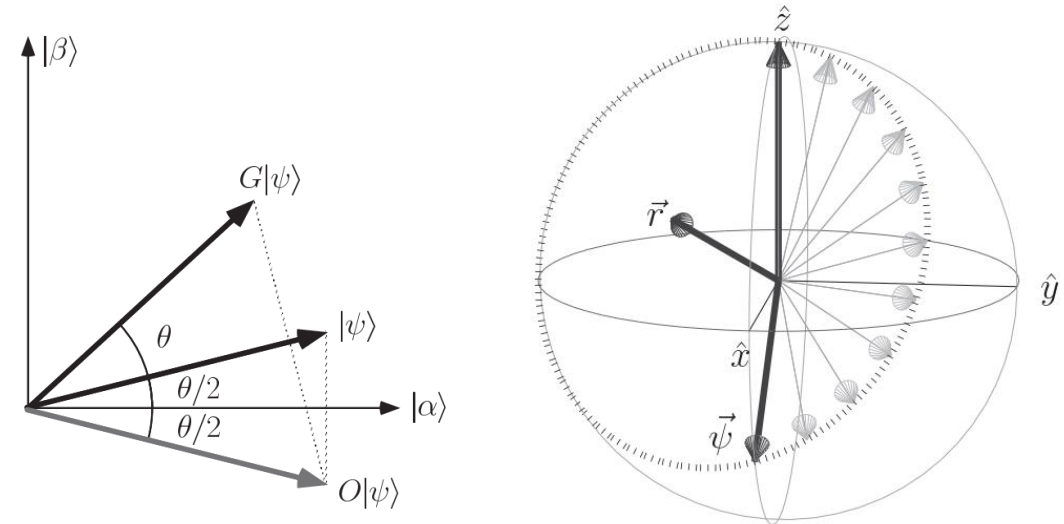
klassisch: $O(N)$

- **Grover Algorithmus**
(Suche)
 - Datenbank mit N Datenpunkten
 $O(\sqrt{N})$
- **Shor Algorithmus**
(Primfaktorzerlegung)
 - *exponentiell* schneller

**Vorteil oft empirisch;
nicht immer beweisbar**



Grover visuell:



Suche: Nadel im Heuhaufen

$|\alpha\rangle$ Heu

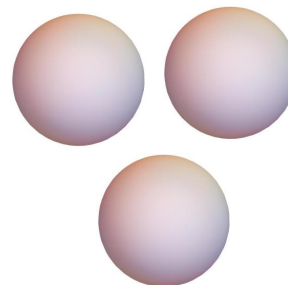
$|\beta\rangle$ Nadel

$$|\psi\rangle = a \cdot |\alpha\rangle + b \cdot |\beta\rangle$$

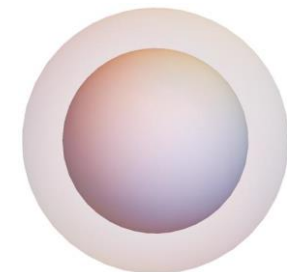
$$\sqrt{|a|^2 + |b|^2} = 1$$

Technische Herausforderungen physikalische und logische Qubits

- Q-Systeme unterliegen **Störgrößen** (Rauschen)
 - Quantenoperation beinhaltet **Fehlerrate**
 - Skalierung erschwert sich
- Ansatz: Quanten**fehlerkorrektur**
- pro **logischem** Qubit: *mehrere* **physikalische** Qubits



reiner Zustand
Blochkugel

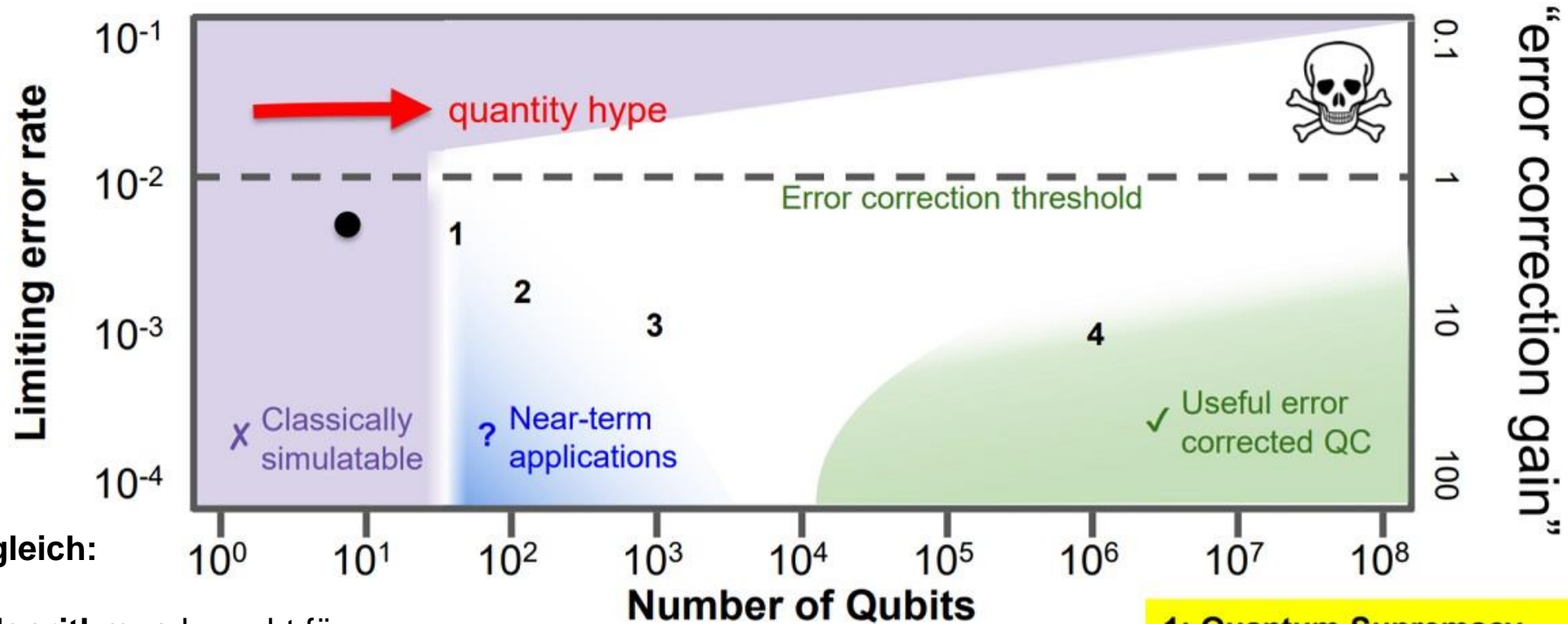


gemischter Zustand
die Blochkugel *schrumpft*

Anzahl der Qubits vs. Fehlerrate



Need Both Quality and Quantity



zum Vergleich:

Shor's Algorithmus braucht für
2048-bit RSA Schlüssel: ca. 4100 logische
Qubits

- 1: Quantum Supremacy
- 2: Look for near-term apps
- 3: Error correction
- 4: Full QC

Google strategy

Quelle: arXiv:1905.09749

Quantencomputer

Quantum Hardware



Supraleiter

*u.a. IBM Quantum (2024, ~130 #pq)**

Ionenfallen

*u.a. IonQ (2024, ~35 #pq)**

Neutrale Atome

*u.a. Planqc (2024, ~1.000 #pq)**

Quantum Annealing

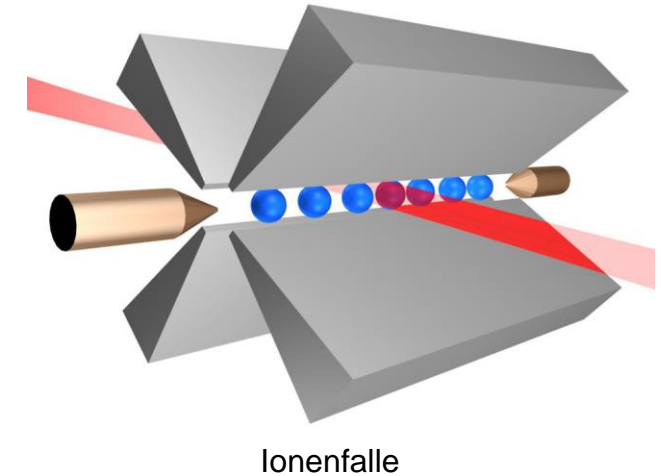
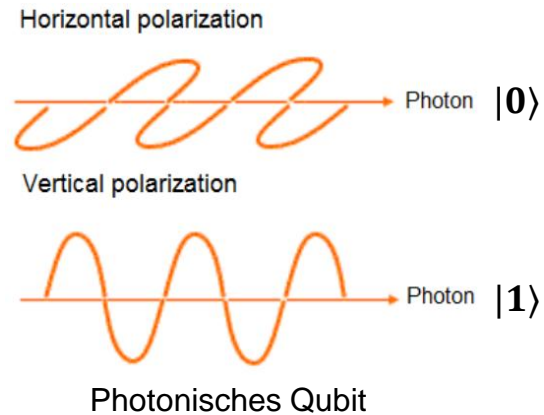
*u.a. D-Wave Systems (2024, ~5.000+ #pq)**

Messbasierte (one-way) QC

*u.a. PsiQuantum (angekündigt ~10⁶ #pq)**



IBM Quantum System One



Ionenfalle

***ohne Gewähr! (#pq = #physikalischer Qubits)**

Quelle: Rydberg-atom simulator and q-many body scars, Wu et al. (2020)

Quelle: Medium.com, photonic qubit implementation (2020)

Quelle: sciqubits documentation, Transmon Qubit, Koch et al. (2019)

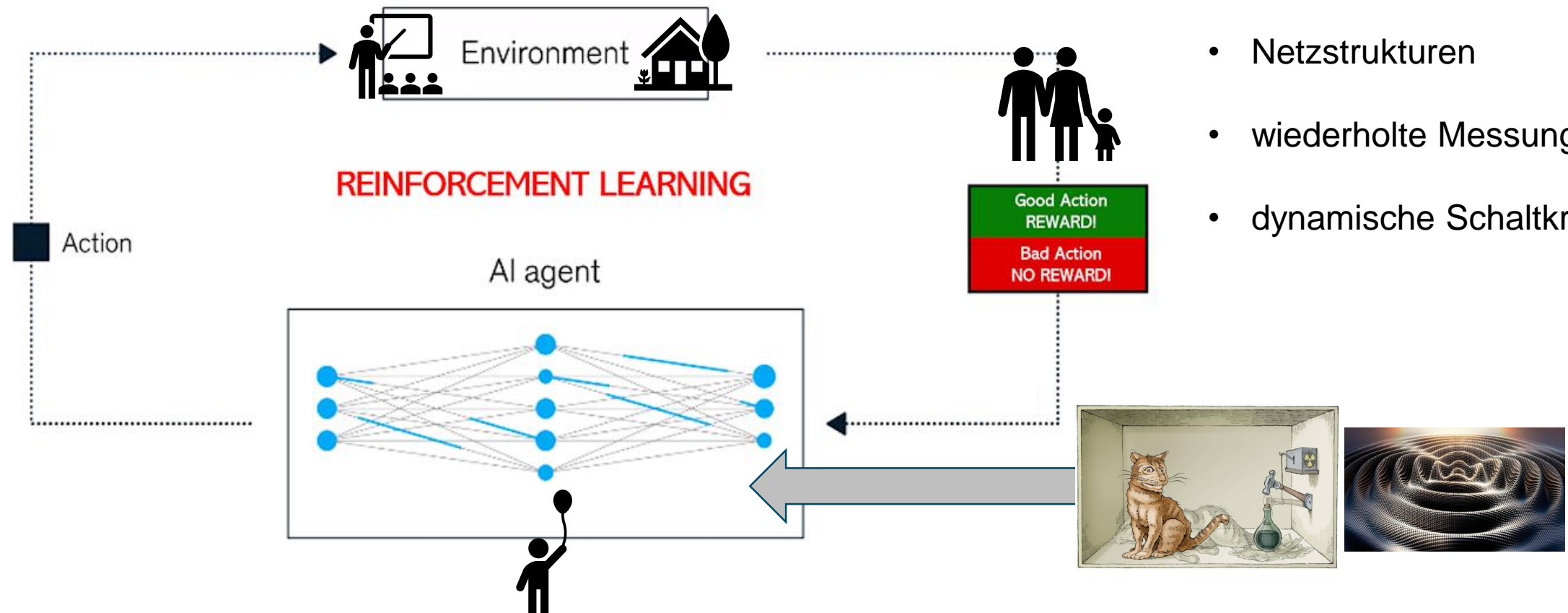
Quelle: Universität Innsbruck, Quantum Optics Theory Group (2019)

Quelle: IBM Quantum System One, „Deutschlands erster Quantencomputer“, (Spiegel, 2021)

Quantencomputing und KI

Reinforcement Learning

QRL mit *parametrisiertem* Schaltkreis



Unsere Forschung:

- Netzstrukturen
- wiederholte Messungen
- dynamische Schaltkreise

Quantencomputing in (naher) Zukunft



Trends (NISQ)

- **Hybride Architekturen**
 - **klassisches** und **quantenmechanisches** Rechnen
- **Verschaltung mehrerer QPUs:**
„distributed quantum computing“
- **Anwendung: Suchalgorithmen, Optimierungsprobleme, Simulation**
- **Industrien:**
 - Pharmazie, Energiesektor, Logistik, Ingenieurwissenschaften, Finanzdienstleistung,
 - uvm ...

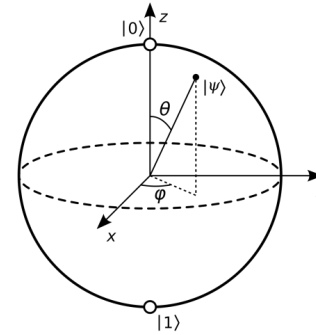
Fragen und Hürden

- **Welche Q-Hardware dominiert?**
- **Wie verbessert sich die Quantenfehlerkorrektur?**
- **Wie verbessert sich die Skalierung der Rechenleistung?**

Take Home

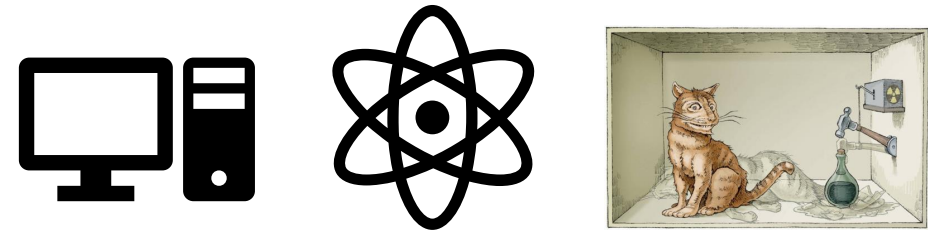
- **Quanteninformation**

wie mittels **Quantenmechanik**
Informationstechnologie erweitert wird



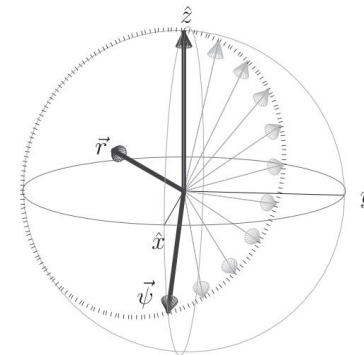
- **Quantencomputer**

Qubits, **Q-Gates** und Messungen



- **Quantenvorteil**

kann entstehen, wenn Probleme intrinsisch
auf die Eigenschaften der **Quantenmechanik**
zugeordnet werden



Vielen Dank.

Kontakt:

M.Sc. **Tim Heine** | Doktorand

E-Mail: tim.heine@dlr.de

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)

Institut für Quantentechnologien | Quanteninformation und -kommunikation

Wilhelm-Runge-Straße 10 | 89081 Ulm

www.DLR.de/QT

Referenzen (1)



Schrödingers Katze

<https://www.faz.net/aktuell/wissen/physik-mehr/die-seltsame-welt-der-atome-schroedingers-katze-erhell-t-das-quantenreich-12529251.html>

FAZ Artikel, 17.08.2013 - "Schrödingers Katze erhellt das Quantenreich" von Rainer Scharf

Lizenz: Dean Tweed, www.49society.com

Q-Circuit – Beispiel 1

https://www.researchgate.net/figure/Quantum-circuit-example_fig8_263928386

M. Elhoushi, „Modelling a Quantum Computer“, 12/2011

"How to factor 2048 RSA integers in 8 hours using 20 million noisy qubits",

C. Gidney und M. Ekerä, 2019

<https://arxiv.org/abs/1905.09749#>

Superposition Darstellung, Welt der Physik

<https://www.weltderphysik.de/gebiet/teilchen/quanteneffekte/>

weltderphysik.de/quanteneffekte/,

Lizenz: peterschreiber.media/iStock

Michael A. Nielsen and Isaac L. Chuang

"Quantum Computation and Quantum Information"

Cambridge University Press, 2001

Quirk: quantum circuit simulator

<https://algassert.com/quirk>

Referenzen (2)



Q-Circuit: Beispiel 2

<https://learn.microsoft.com/en-us/azure/quantum/concepts-circuits>

Microsoft Azure, q-circuit conventions

Ion Trap QC explained shortly

<https://www.ecosia.org/images?q=trapped+ion+quantum+computer#id=512D8105A9A0D767306DACA27FEF913847712985>

YT-Illustration, Ionen-Fallen QC

Reinforcement Learning Grafik

https://www.researchgate.net/figure/Reinforcement-Learning-Agent-and-Environment_fig2_323867253

“a ML approach for power allocation ...”, Amiri et al., 2018

Interferenz Darstellung, ITP der Leibniz Universität Hannover

https://www.itp.uni-hannover.de/fileadmin/itp/emeritus/zawischa/static_html/vielstrahl.html

D. Zawischa, „Vielstrahlinterferenz, Schiller-und Strukturfarben“

Verschränkung, Darstellung:

<https://www.welt.de/wissenschaft/plus185437084/Quanteninternet-Durchbruch-fuer-die-abhoersichere-Kommunikation.html>

Welt.de, Durchbruch für abhörsichere Kommunikation

Lizenz: AFP/Getty Images

Q-Gates Darstellung 1

<https://techcommunity.microsoft.com/t5/educator-developer-blog/quantum-gates-and-circuits-the-crash-course/ba-p/380463>

Q-Gates, Microsoft Community, Q-Computing Crash Course

A. Ramanan, 2019

Blochkugel Darstellung

https://en.wikipedia.org/wiki/Bloch_sphere

wikipedia.org/Bloch_sphere

Referenzen (3)



Enterra Solutions, Reinforcement Learning

<https://enterrasolutions.com/is-reinforcement-learning-the-future-of-artificial-intelligence/>

Is reinforcement learning the future of AI?

Qubits Implementation and Quantum Hardware 102

<https://medium.com/@quantumcomputingindia/qubits-implementation-quantum-hardware-102-ec55e645f9eb>

Medium.com, 27.08.2020

Universität Innsbruck, trapped ions

<https://www.uibk.ac.at/exphys/qo/research/trappedions.html.en>

Universität Innsbruck, Q-Optics-Theory Group, 2019

Transmon Qubit

https://scqubits.readthedocs.io/en/v3.1_a/guide/qubits/transmon.html

Transmon Qubit, scqubits documentation, Koch et al., 2022

IBM Quantum Computer – der Spiegel

<https://www.spiegel.de/netzwelt/netzpolitik/ibm-quantum-system-one-deutschlands-erster-quantencomputer-kostet-11-621-euro-monatsmiete-a-eb402a65-d78a-41f7-9411-047bc99db079>

Spiegel Artikel vom 15.06.2021

Rydberg atom simulator and quantum many body scars, Stanford.edu courses

<http://large.stanford.edu/courses/2020/ph470/wu/>

Michelle Wu, 27.06.2020

Referenzen (4)



Tunneleffekt, Transistorgröße

<https://www.science.org/doi/10.1126/science.aah4698>

Desai et al., MOS2 transistors with 1-nm gate lengths, Science 2016

Quantum-Computation-based image representation, Processing operations and their applications

Iliyasu et al. 2014, 16(10):5290-5338

<https://www.mdpi.com/1099-4300/16/10/5290>

Quantum Hardware: Angaben zur Anzahl der Qubits:

IBM Quantum: "Roadmap to advance useful quantum computing" ("Eagle" and "Heron" Processor)

<https://www.ibm.com/quantum/technology>

IBM Quantum, 2023/ 2024

IonQ: „How we achieved our 2024 performance target of #aq 35“

<https://ionq.com/posts/how-we-achieved-our-2024-performance-target-of-aq-35>

IonQ Staff Report, 25.01.2024

Planqc: Quantum Computing Made in Germany

<https://security-storage-und-channel-germany.de/planqc-quantum-computing-made-in-germany/>

Jakob Jung, 08.07.2024

D-Wave Systems' "The Advantage" Performance Report

<https://www.dwavesys.com/solutions-and-products/systems/>

D-Wave Systems, 2023

PsiQuantum's Path to 1 Million Qubits

<https://www.hpcwire.com/2022/04/21/psiquantums-path-to-1-million-qubits-by-the-middle-of-the-decade/>

HPC Wire, John Russell, 21.04.2022