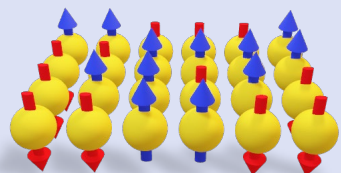




Quantenbits in Aktion

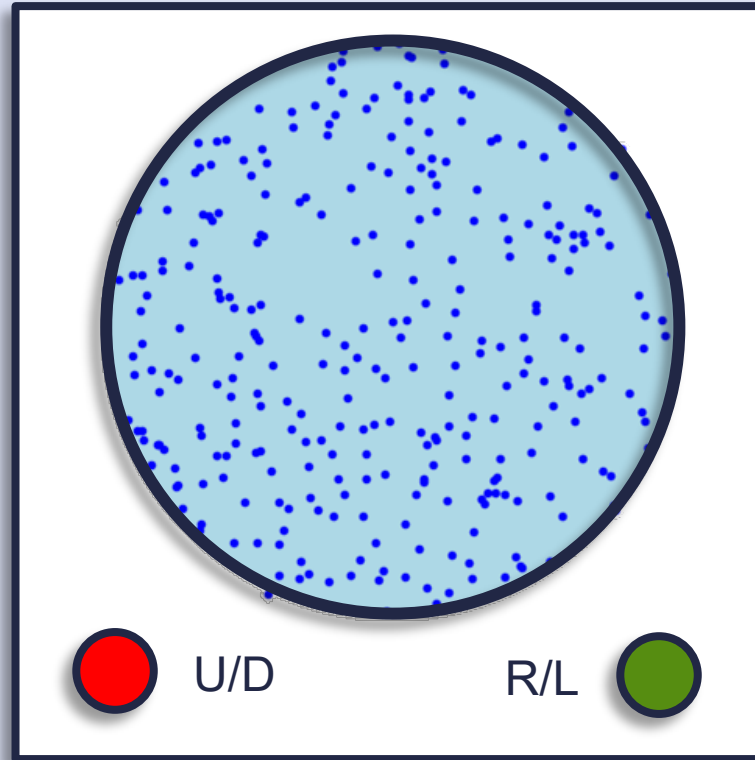
Physik und Anwendungen des Quantenrechnens

Dieter Jaksch, Universität Hamburg

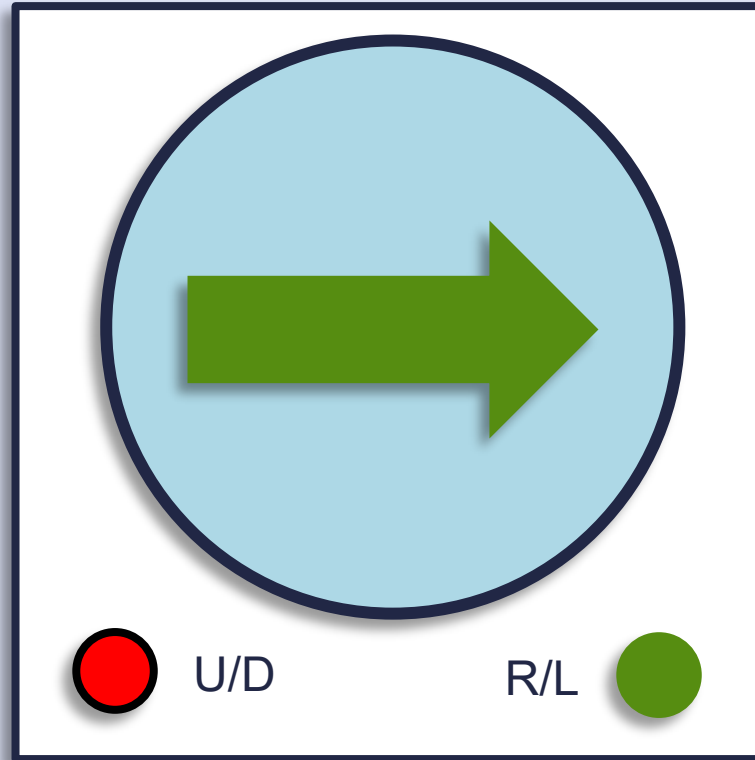


Hamburg, 29. October 2024

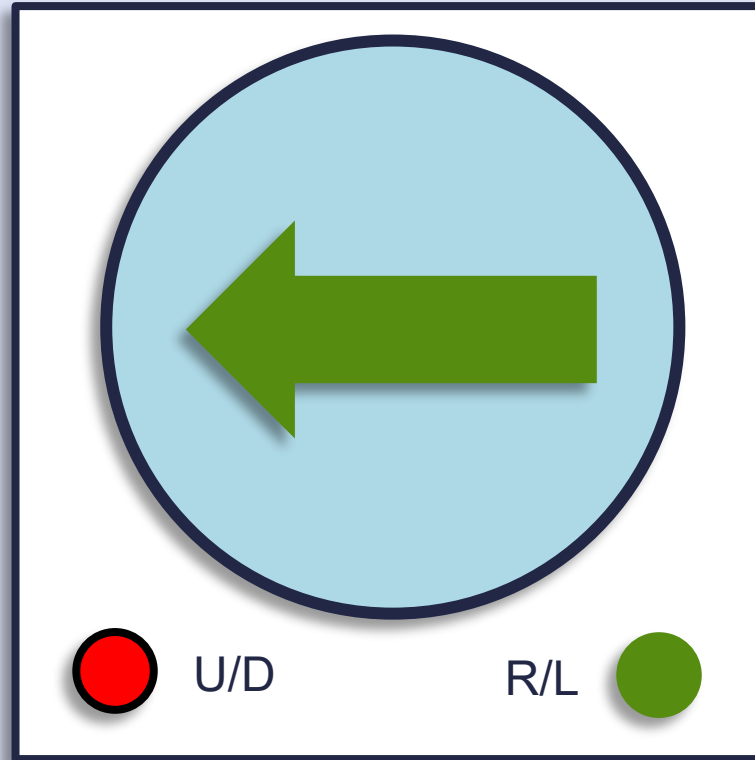
Ein Quantenbit – vor einer Messung



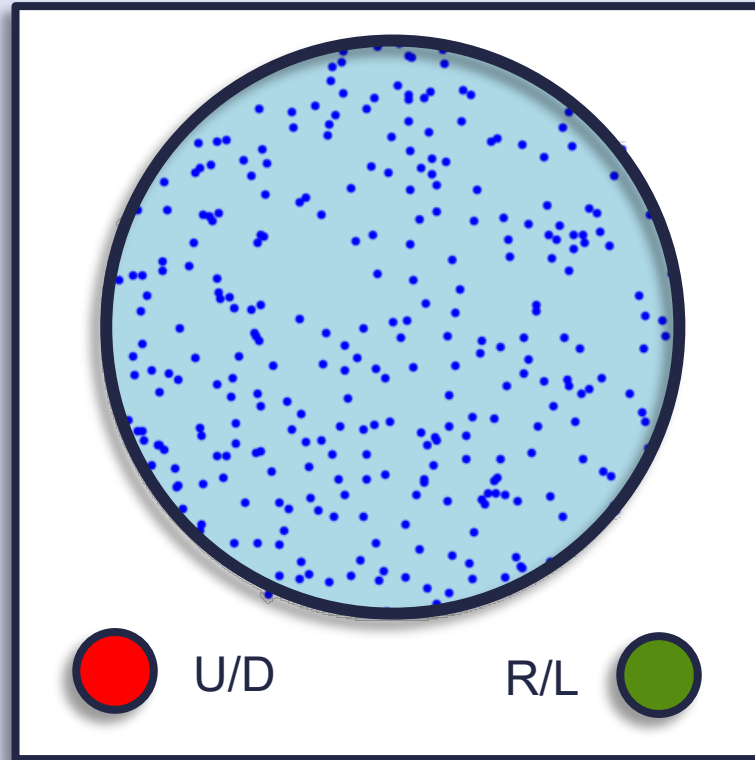
Entweder ...



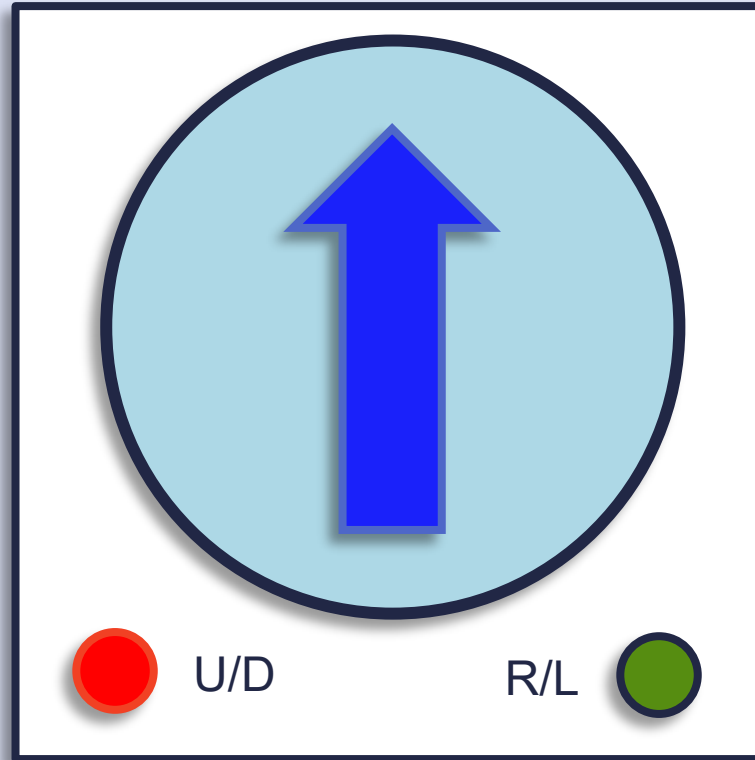
oder ...



Ein Quantenbit – vor der Messung



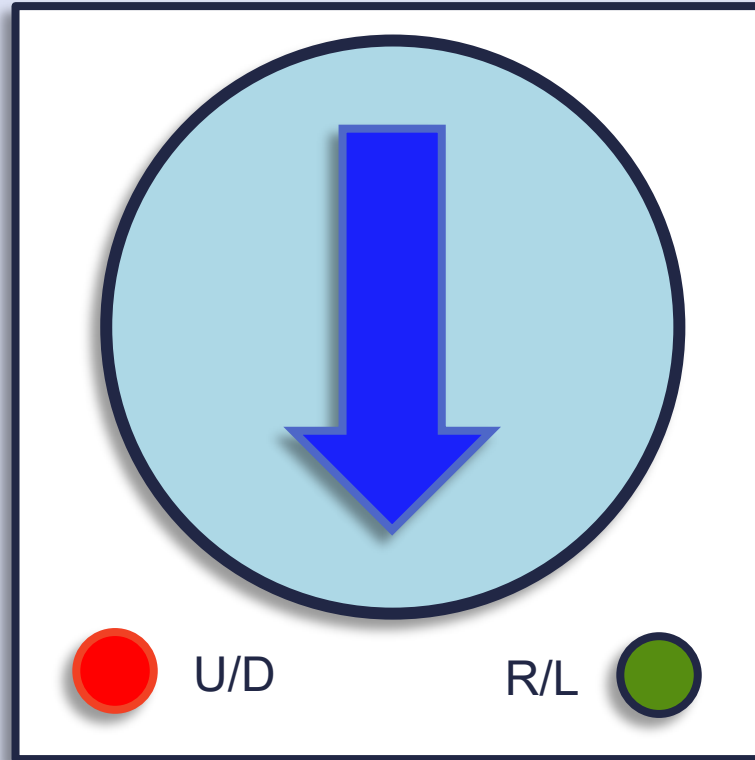
Entweder ...



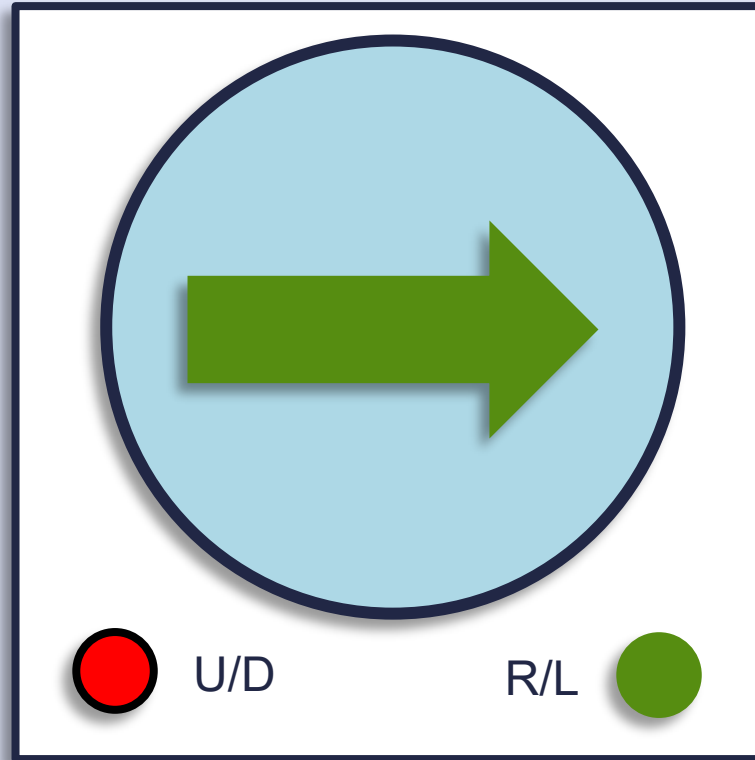
Ein Quantenbit – nach U/D Messung: Pfeil nach oben



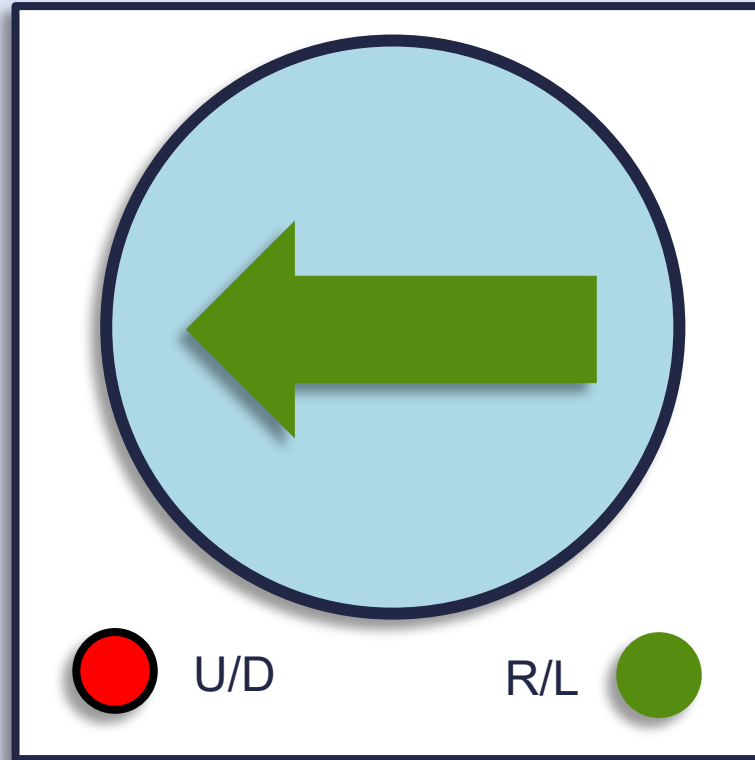
oder ...

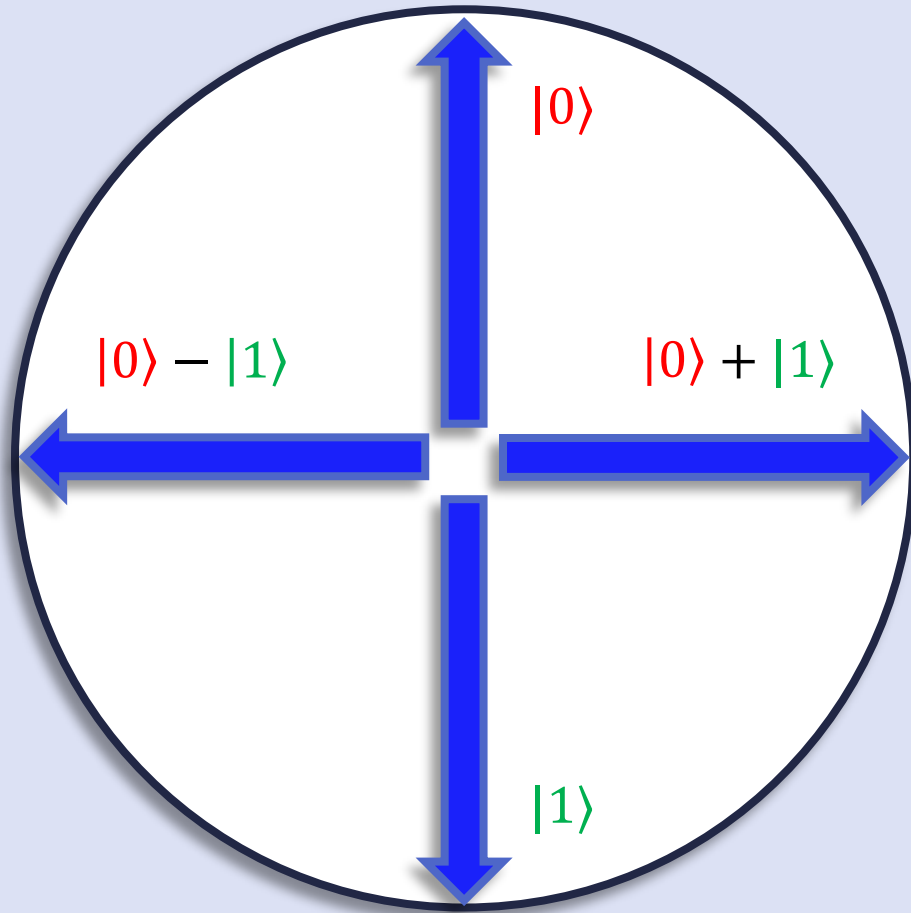


Entweder ...

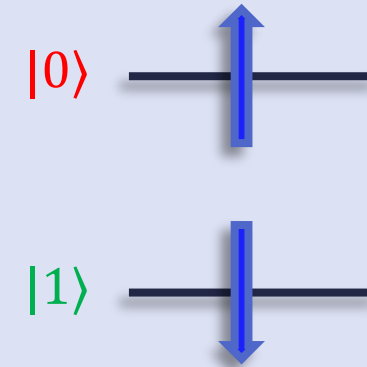


oder ...





- Ein Qubit ist ein Zweiniveausystem



- Der Zustand eines Qubits ist eine **Superposition** von zwei Basiszuständen $|0\rangle$ und $|1\rangle$

$$|\psi\rangle = c_0|0\rangle + c_1|1\rangle$$

- Die komplexen Zahlen c_0 and c_1 beschreiben einen allgemeinen reinen Zustand

- Ein klassisches Bit als Zweiniveausystem



- Ein klassisches Bit kann einen von zwei Werten annehmen
 - “aus” oder logisch 0 entspricht 0
 - “an” oder logisch 1 entspricht 1

- Ein Qubit ist ein Zweiniveausystem



- Der Zustand eines Qubits ist eine Superposition von zwei Basiszuständen $|0\rangle$ und $|1\rangle$

$$|\psi\rangle = c_0|0\rangle + c_1|1\rangle$$

- Die komplexen Zahlen c_0 and c_1 beschreiben einen allgemeinen reinen Zustand

$|0\rangle$ 

$|1\rangle$ 



$|0\rangle$ 

$|1\rangle$ 

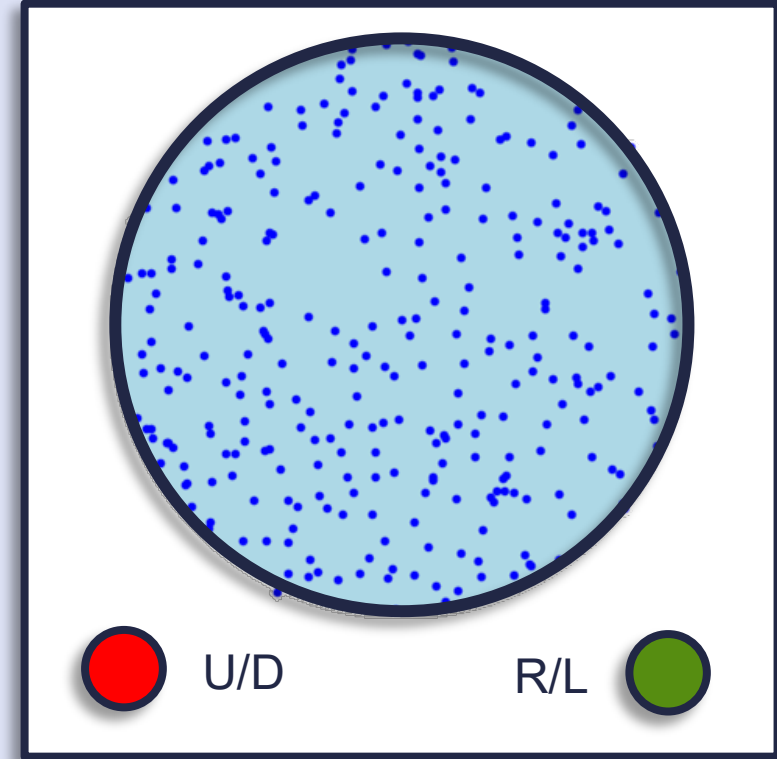
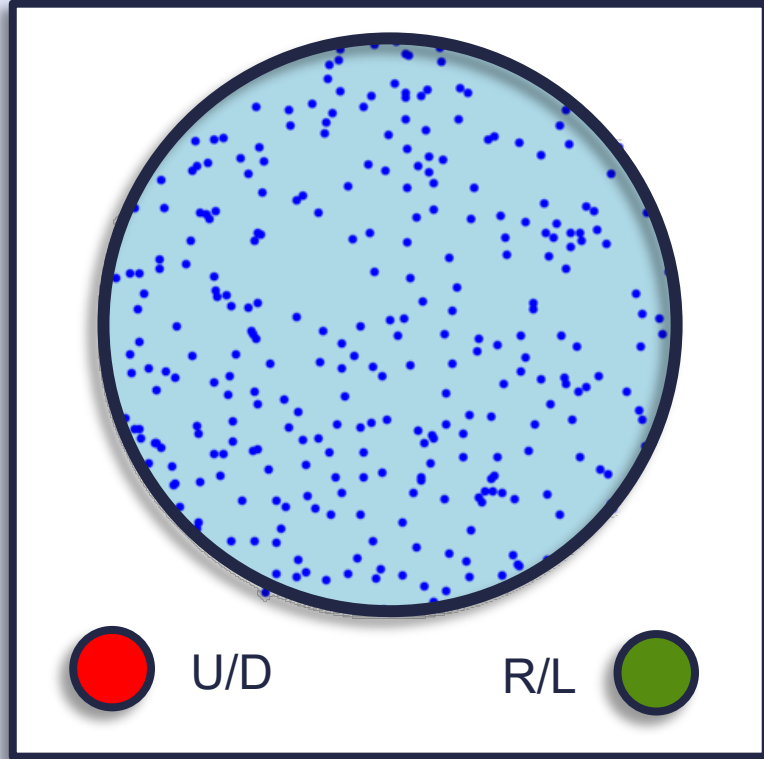
$$|\psi\rangle_1 = c_0|0\rangle + c_1|1\rangle$$

$$|\psi\rangle_2 = d_0|0\rangle + d_1|1\rangle$$

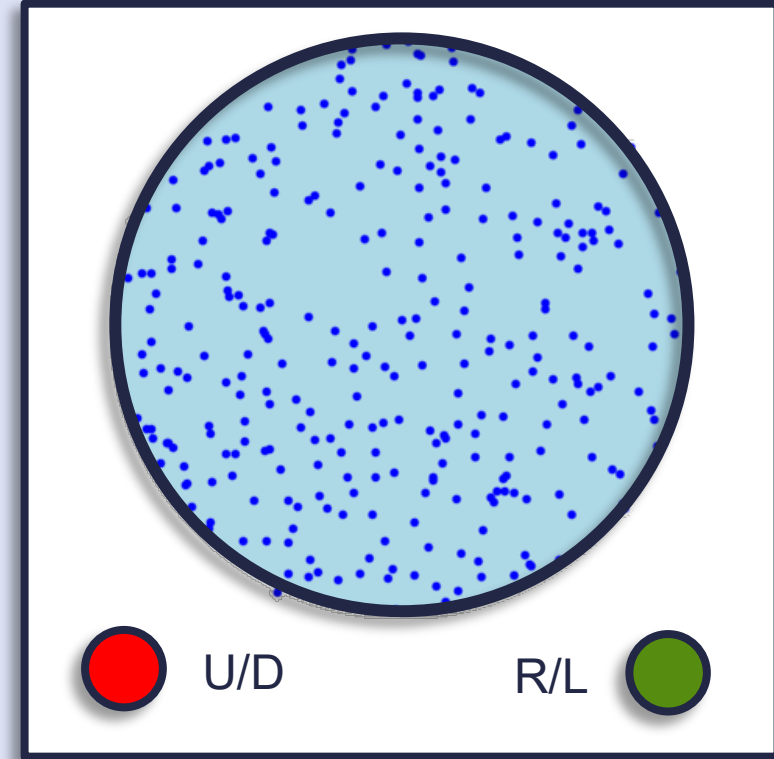
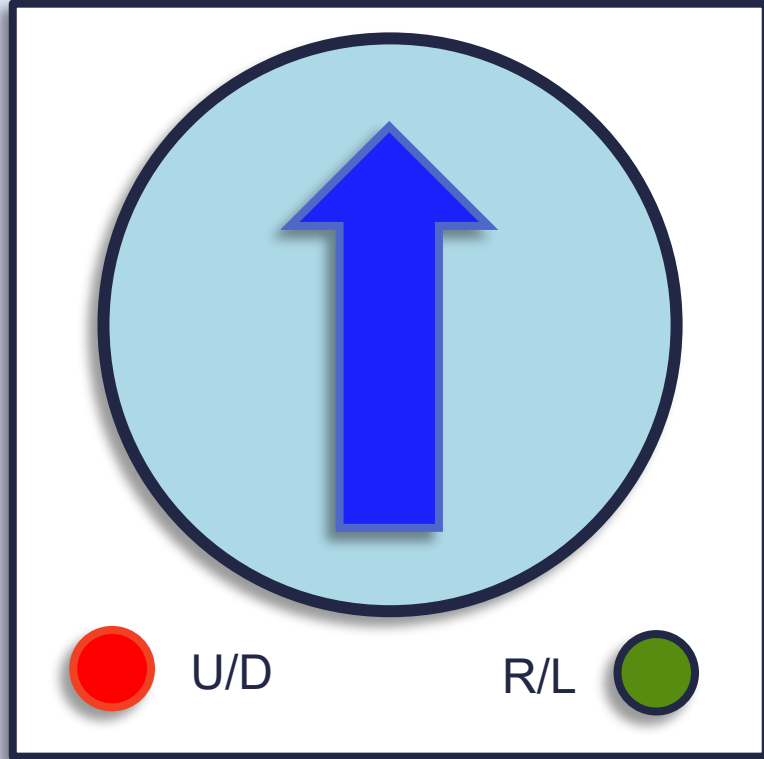
- Zwei unabhängige Quantenbit werden durch Zustände $|\psi\rangle_1$ und $|\psi\rangle_2$ beschrieben

$$\begin{aligned} |\psi\rangle_{12} &= |\psi\rangle_1 \otimes |\psi\rangle_2 = (c_0|0\rangle + c_1|1\rangle) \otimes (d_0|0\rangle + d_1|1\rangle) \\ &= c_0d_0|0\rangle \otimes |0\rangle + c_0d_1|0\rangle \otimes |1\rangle + c_1d_0|1\rangle \otimes |0\rangle + c_1d_1|1\rangle \otimes |1\rangle \end{aligned}$$

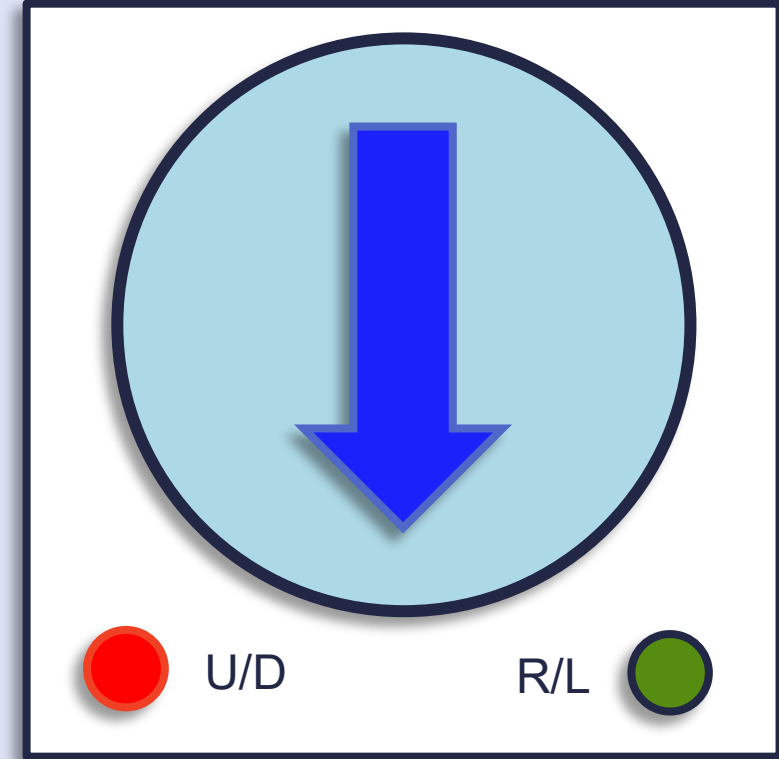
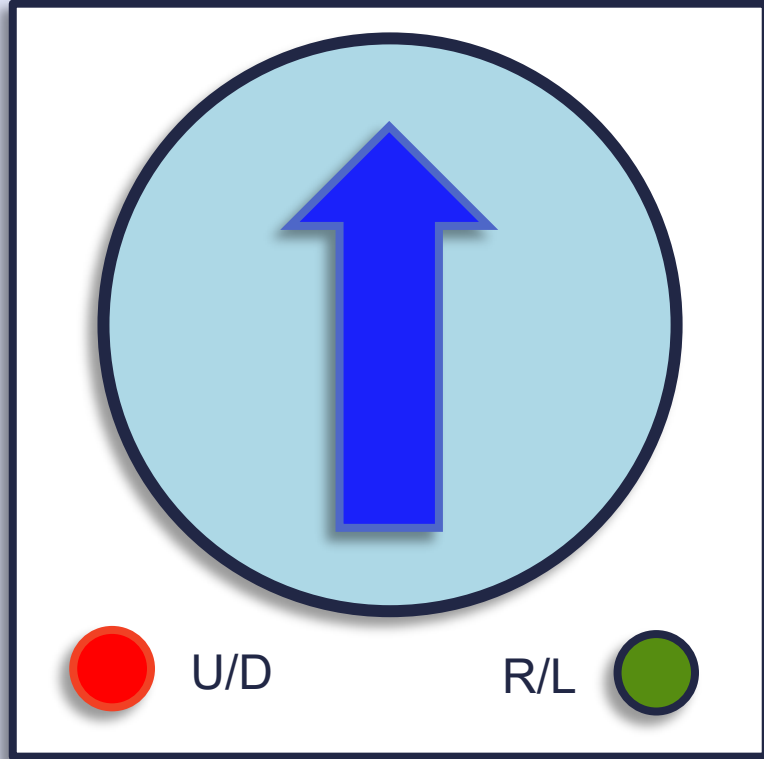
Zwei verschränkte Quantenbits



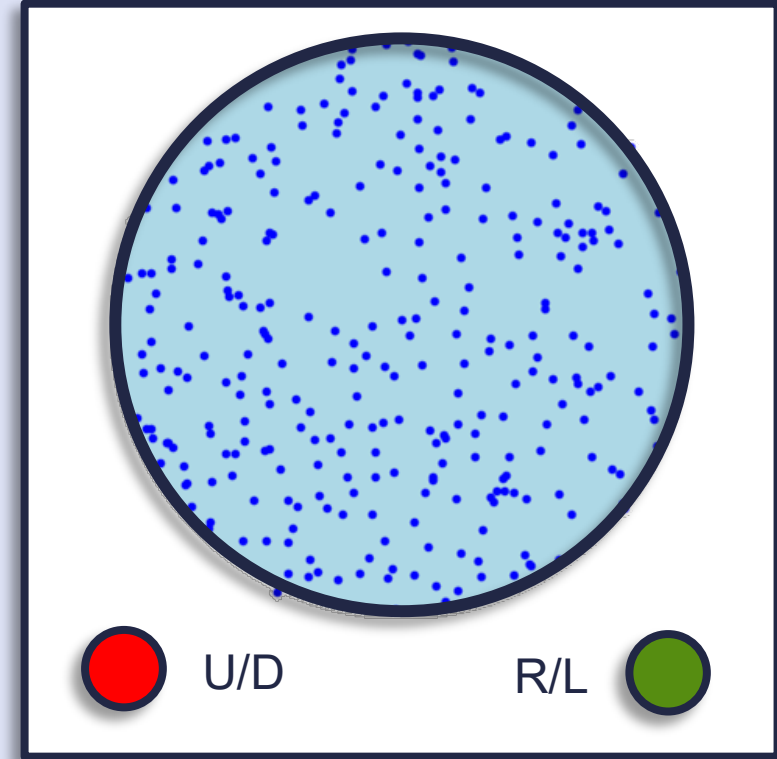
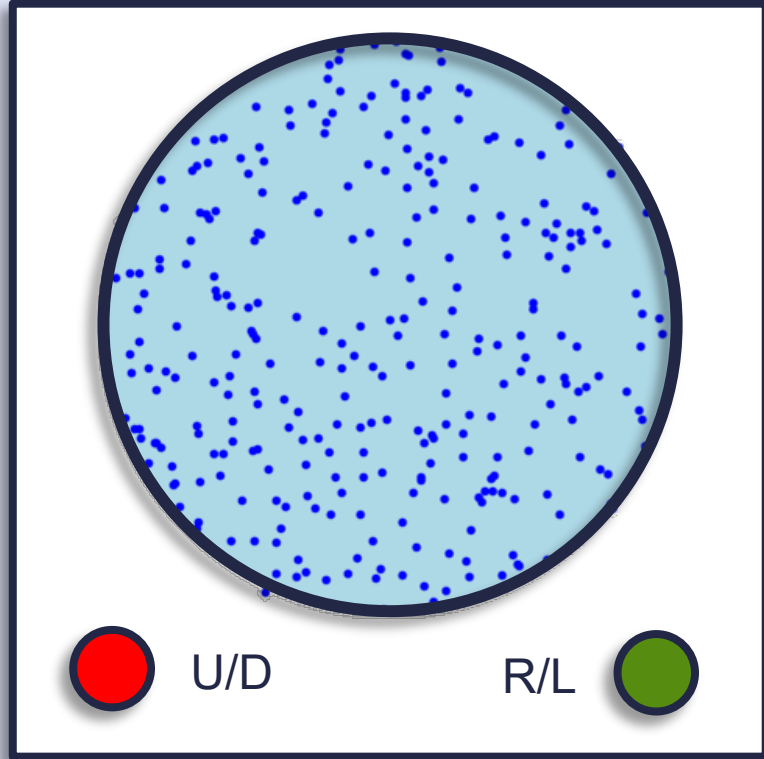
Zwei verschränkte Quantenbits



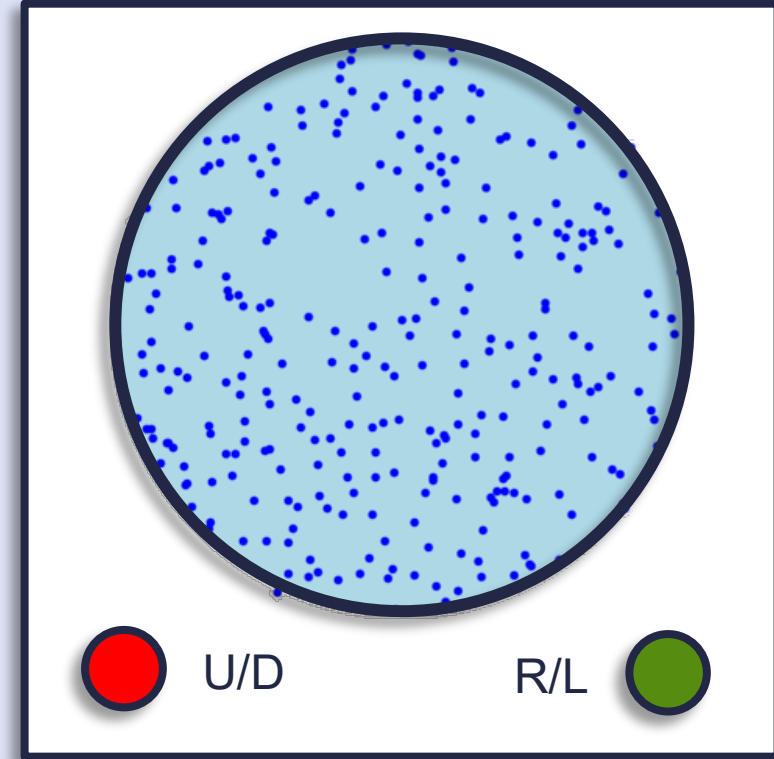
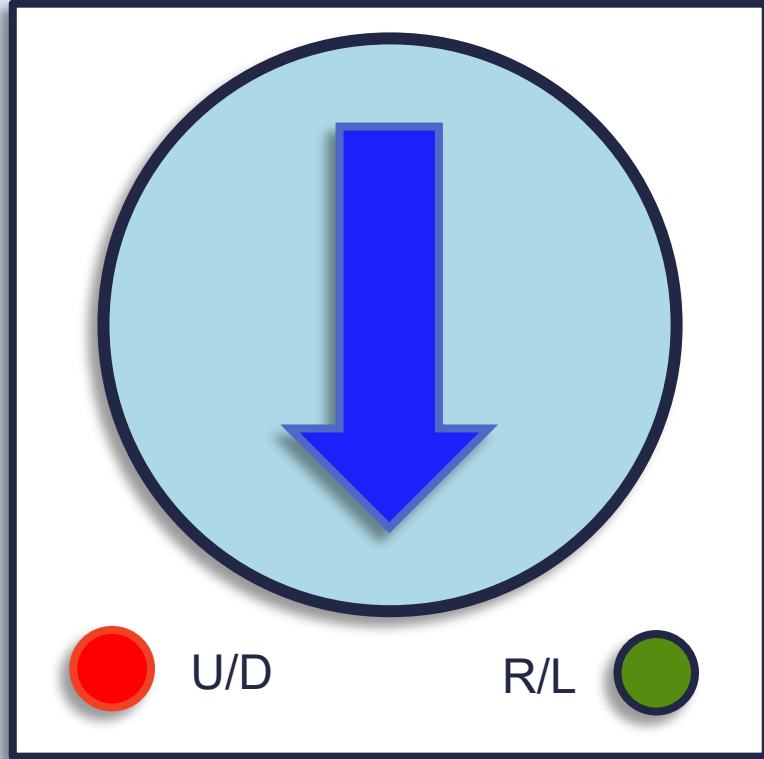
Zwei verschränkte Quantenbits



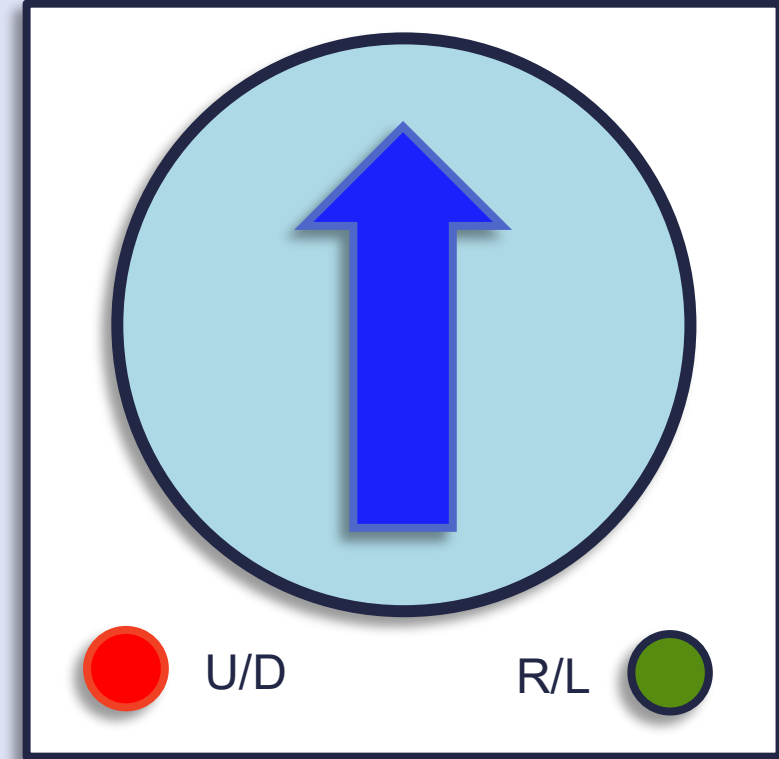
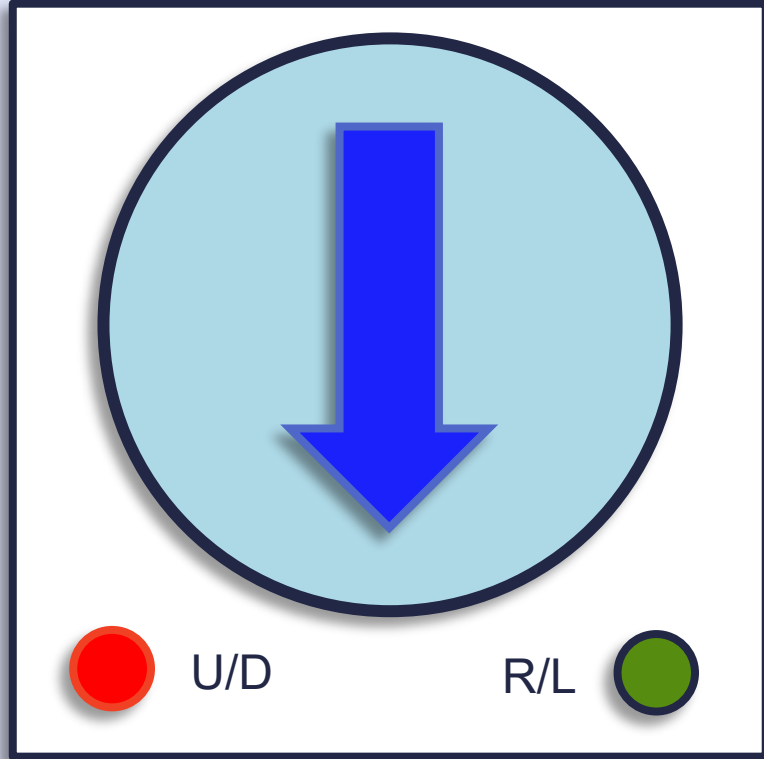
Zwei verschränkte Quantenbits



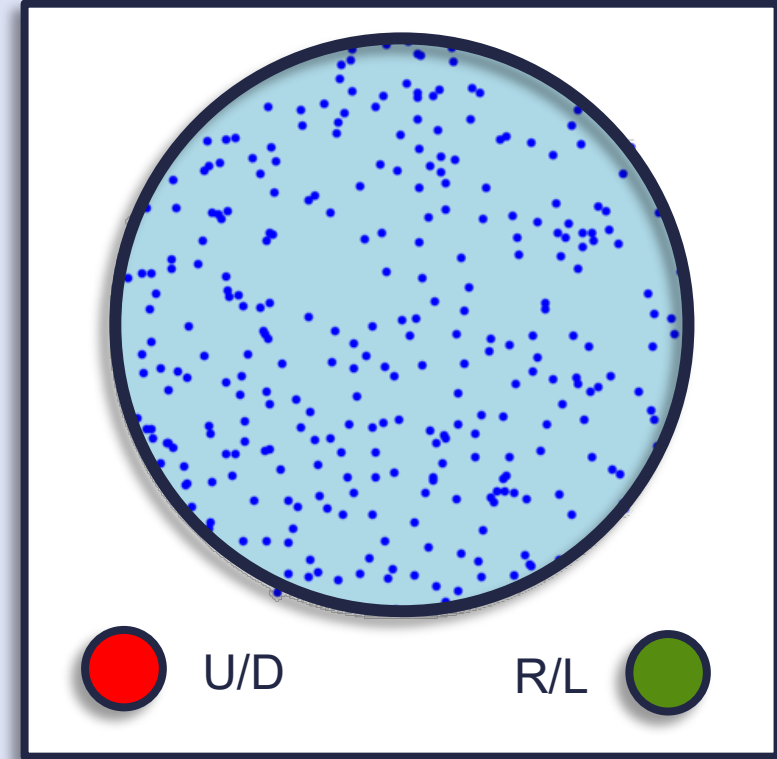
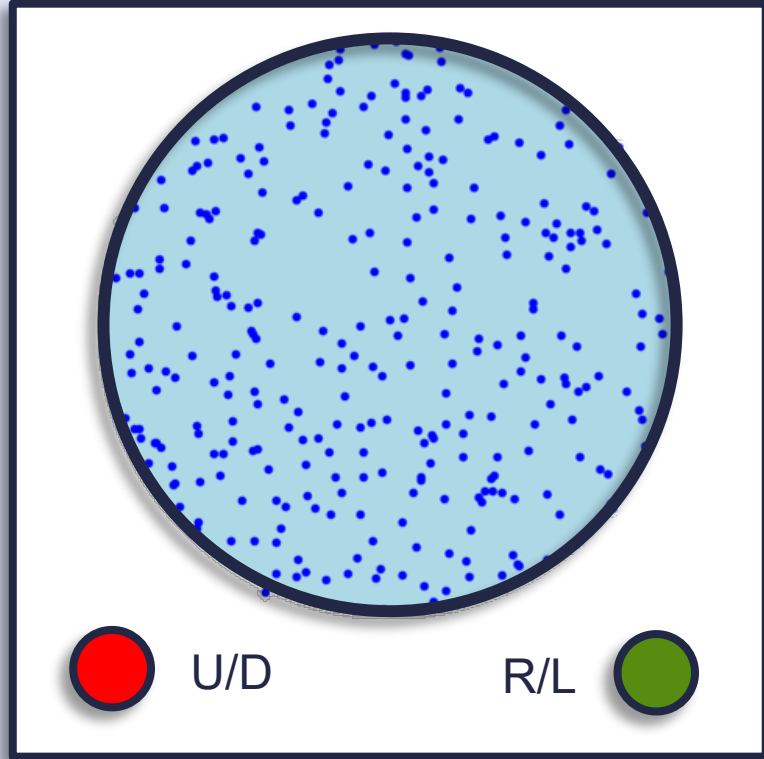
Zwei **verschränkte** Quantenbits – Messung eines Qubits



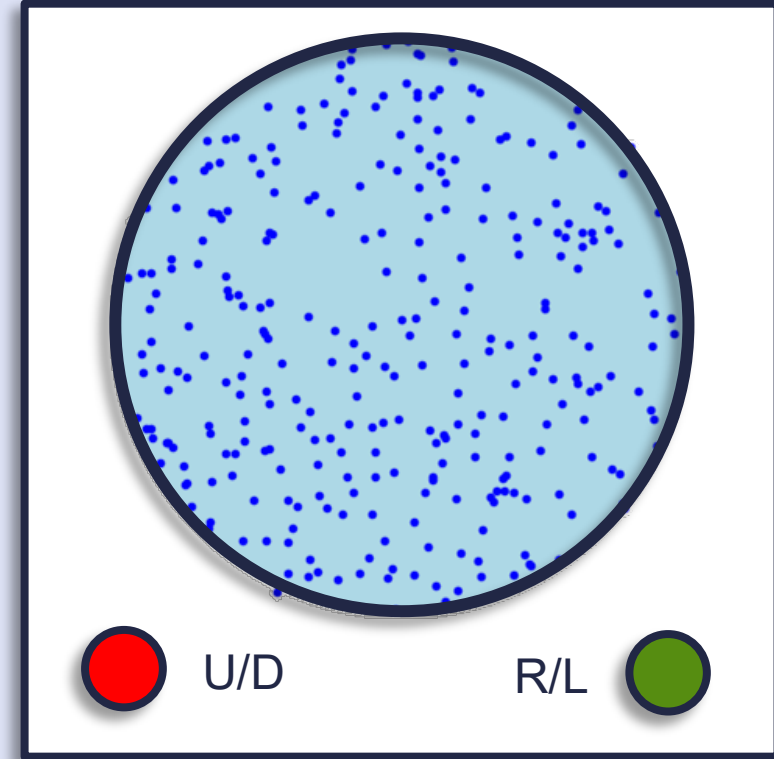
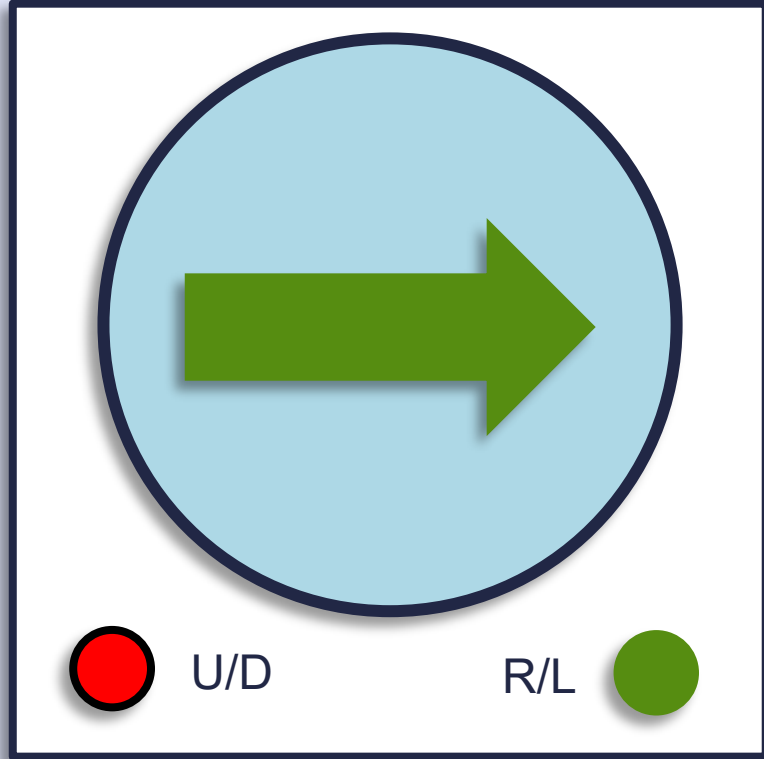
Zwei **verschränkte** Quantenbits – Messung beider Qubits



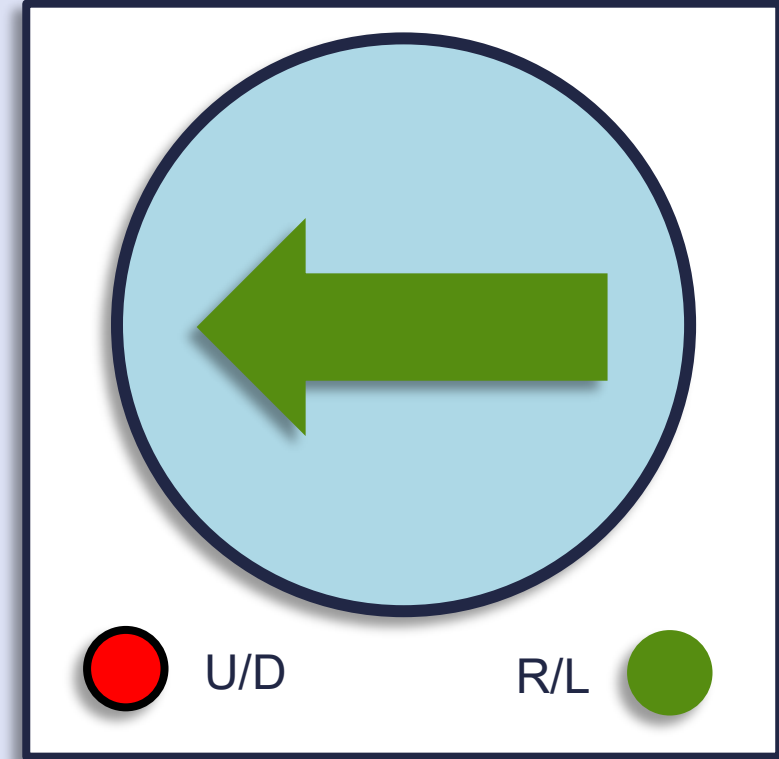
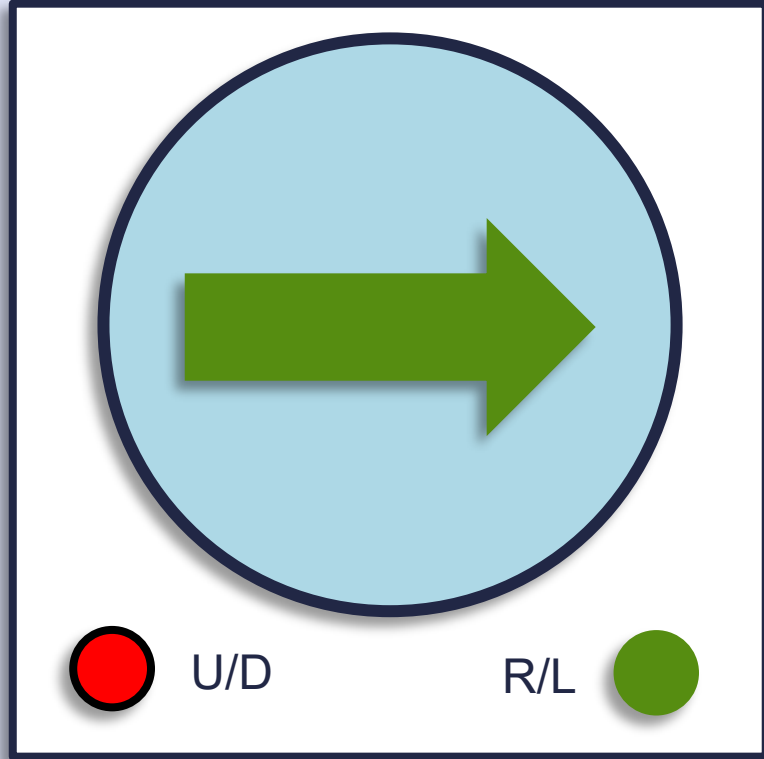
Zwei verschränkte Quantenbits



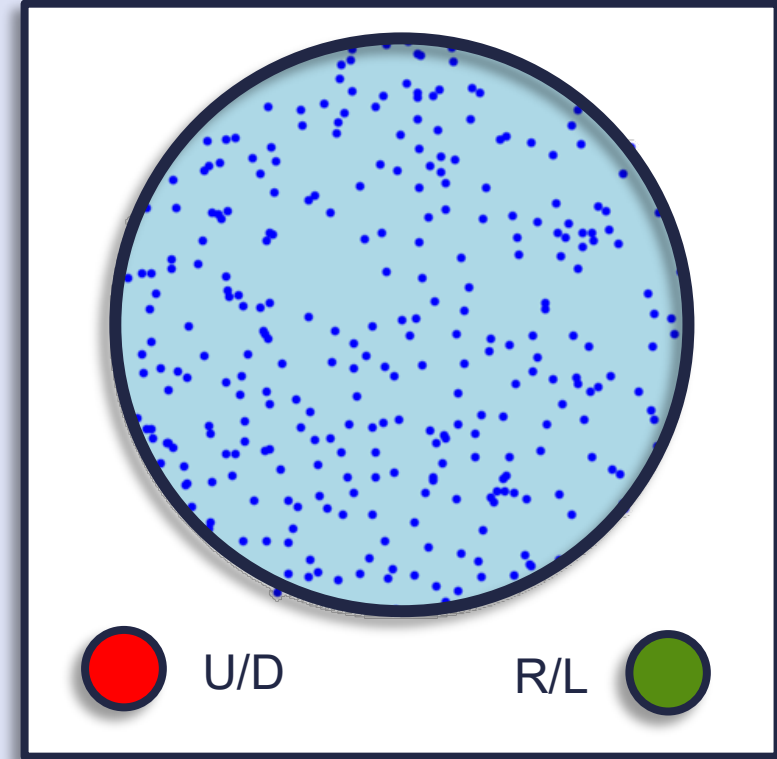
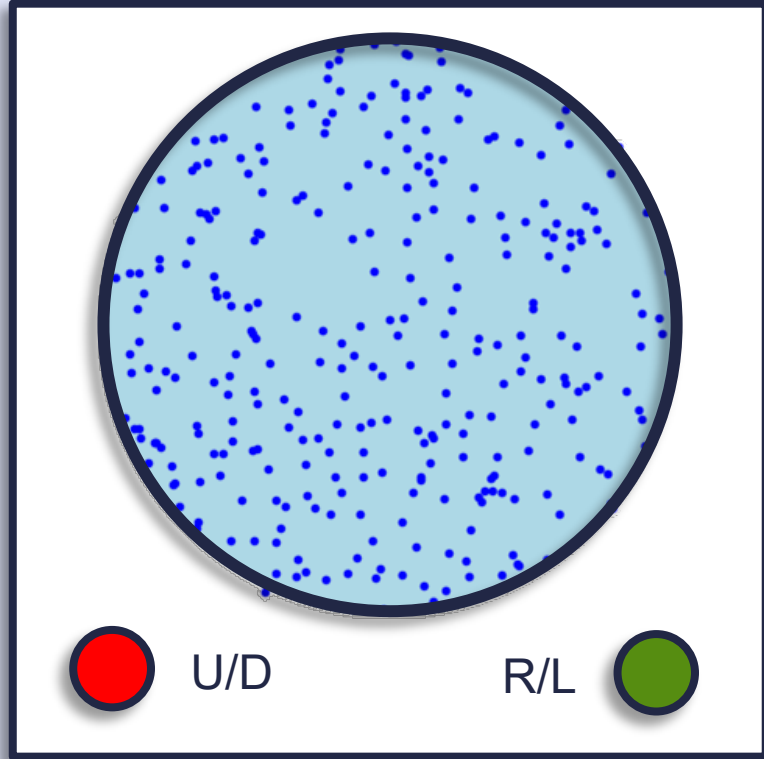
Zwei **verschränkte** Quantenbits – Messung eines Qubits

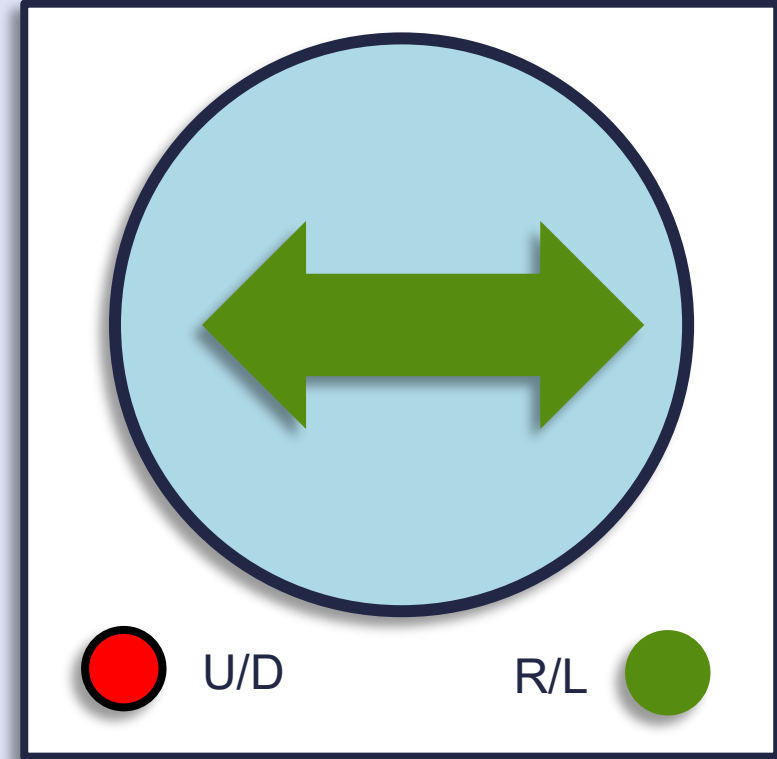
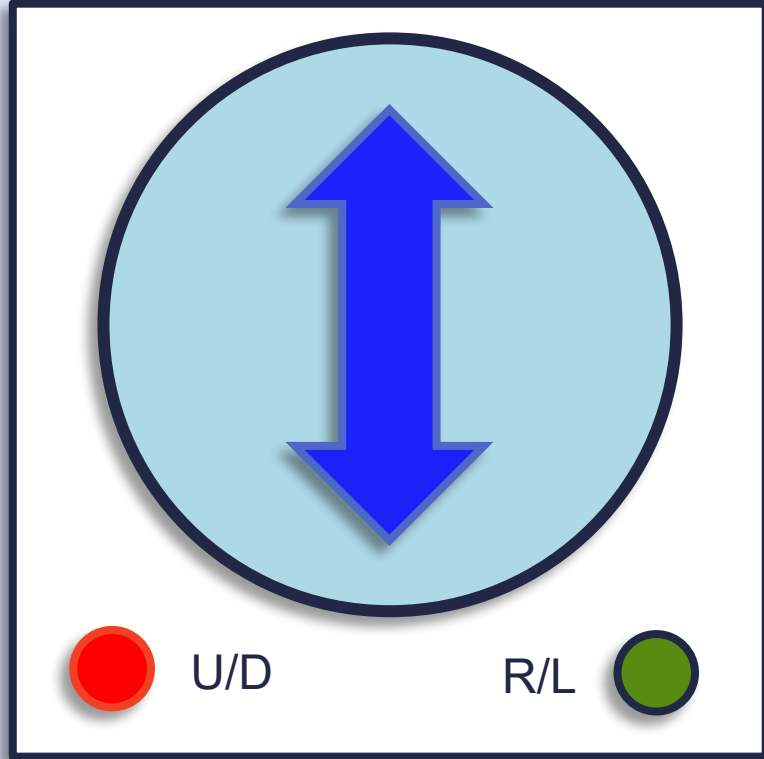


Zwei **verschränkte** Quantenbits – Messung beider Qubits



Zwei verschränkte Quantenbits





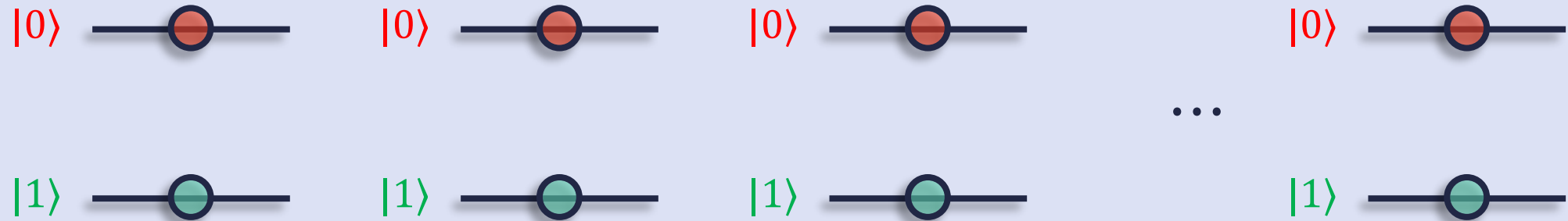


$$|\psi^-\rangle = c_{01}|0\rangle \otimes |1\rangle + c_{10}|1\rangle \otimes |0\rangle \neq |\psi\rangle_1 \otimes |\psi\rangle_2$$

- Ein allgemeiner verschränkter Zustand

$$|\psi\rangle_{12} = c_{00}|00\rangle + c_{01}|01\rangle + c_{10}|10\rangle + c_{11}|11\rangle = \sum_{j=0}^3 c_j |j\rangle$$

00	→	0
01	→	1
10	→	2
11	→	3

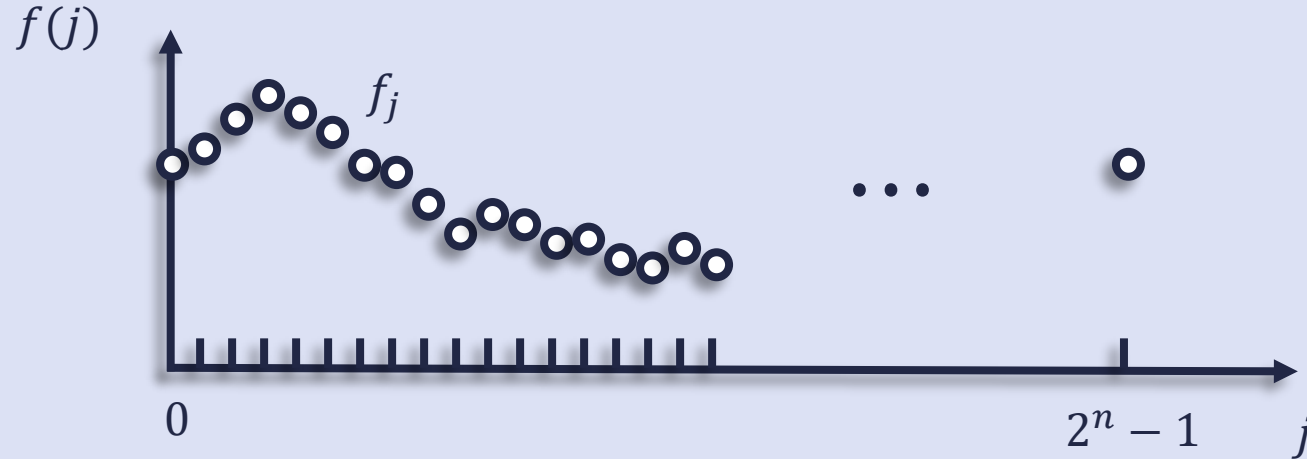


$$|\psi\rangle = c_{000\dots 0}|000\dots 0\rangle + c_{000\dots 1}|000\dots 1\rangle + \dots + c_{111\dots 1}|111\dots 1\rangle = \sum_{j=0}^{2^n-1} \vec{c}_j |j\rangle$$

- $\vec{c}$ ist ein Vektor mit Länge 2^n d.h. die Zahl der Elemente wächst exponentiell mit der Zahl der Quantenbits n

50 Quantenbits speichern $2^{50} \approx 10^{15}$ Elemente
dafür benötigt ein klassischer Computer ≈ 64 Petabyte

Amplitudencodierung diskreter Funktionen



Diskrete Funktion in einer räumlichen Dimension

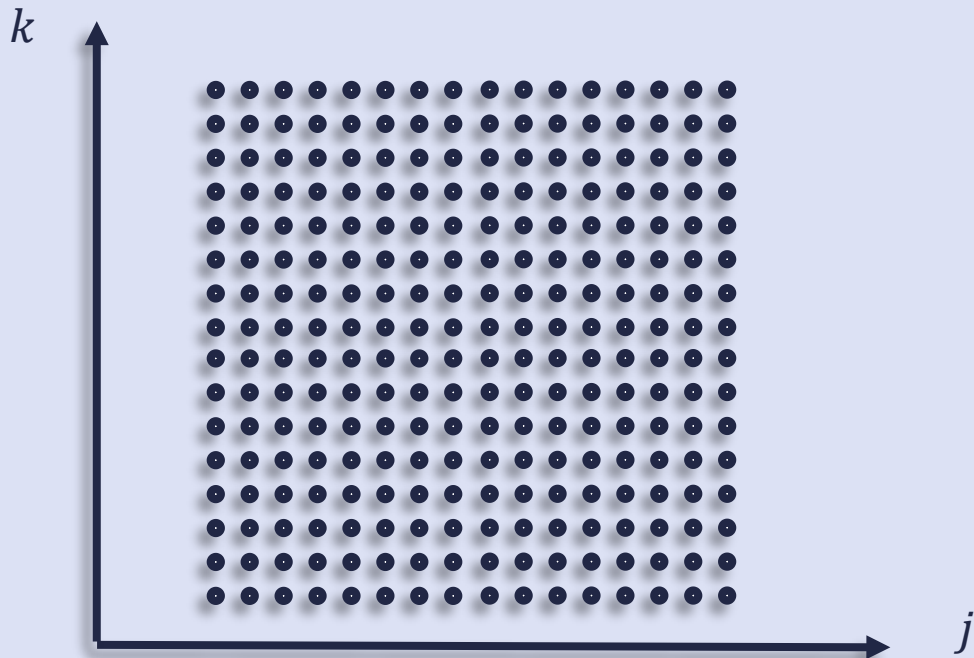
$$|\psi\rangle = \sum_j \vec{f}_j |j\rangle$$

Für Funktionen in zwei Dimensionen schreiben wir

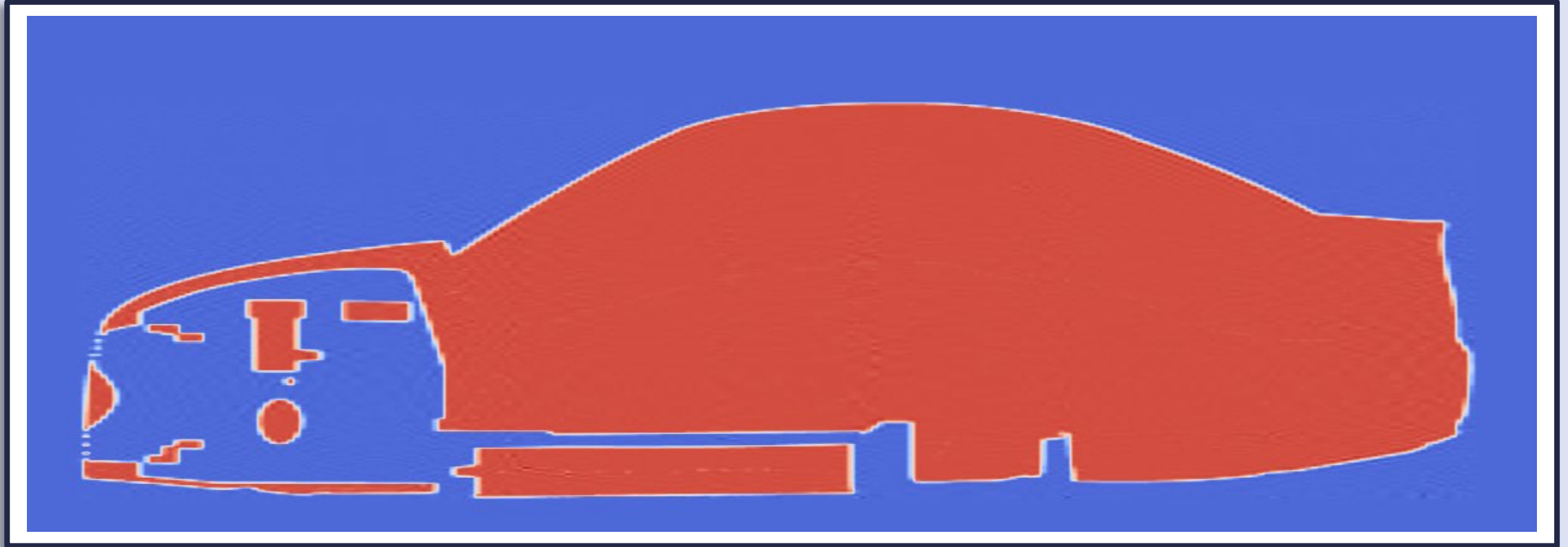
$$|\psi\rangle = \sum_{j,k} \vec{f}_{j,k} |j, k\rangle$$

Eine zweite Dimension benötigt daher nur doppelt so viele Quantenbits als eine.

Für d Dimensionen brauchen wir nd Qubits



Die detaillierte Darstellung eines Autos benötigt 16 Qubits

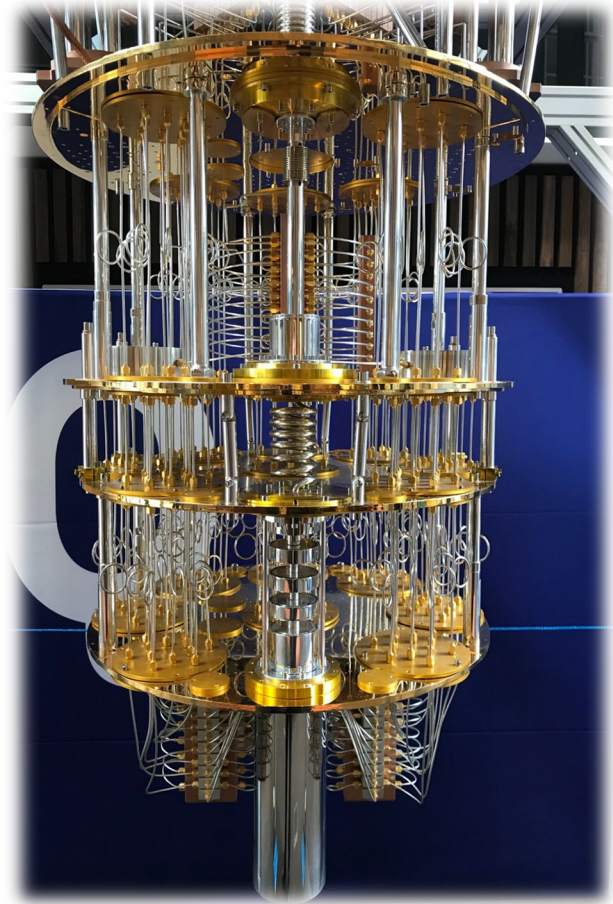


© Engys

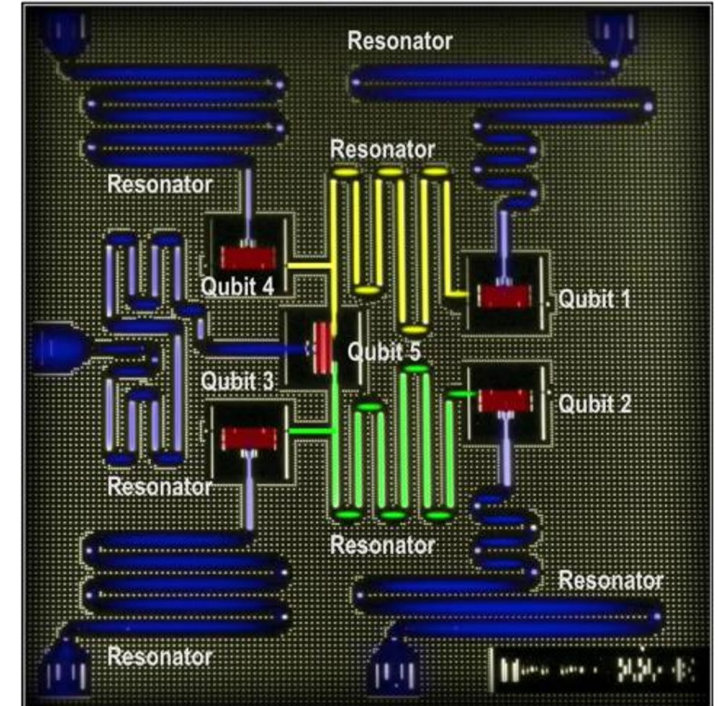
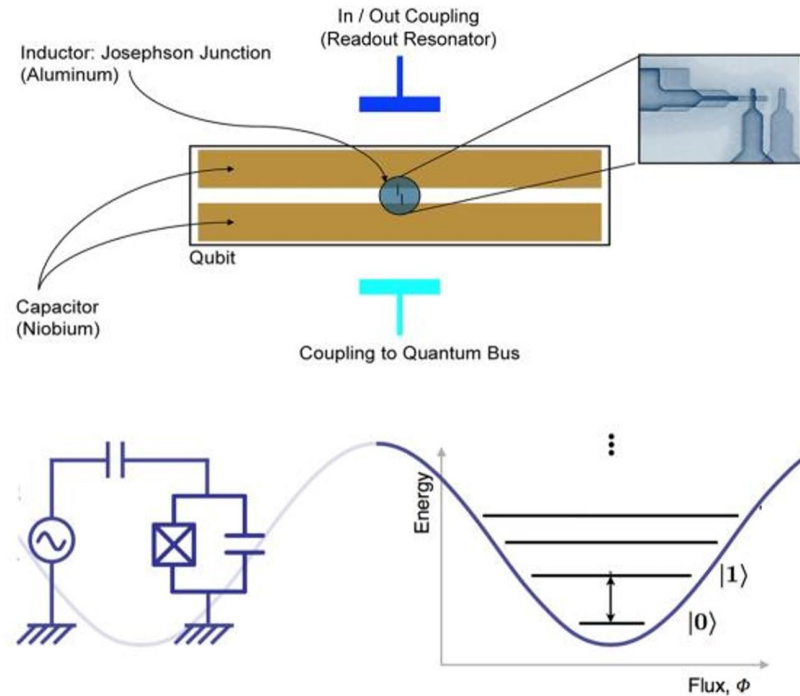
Wie baut man Quantenbits? – supraleitende Ströme



5 Quantenbit Computer

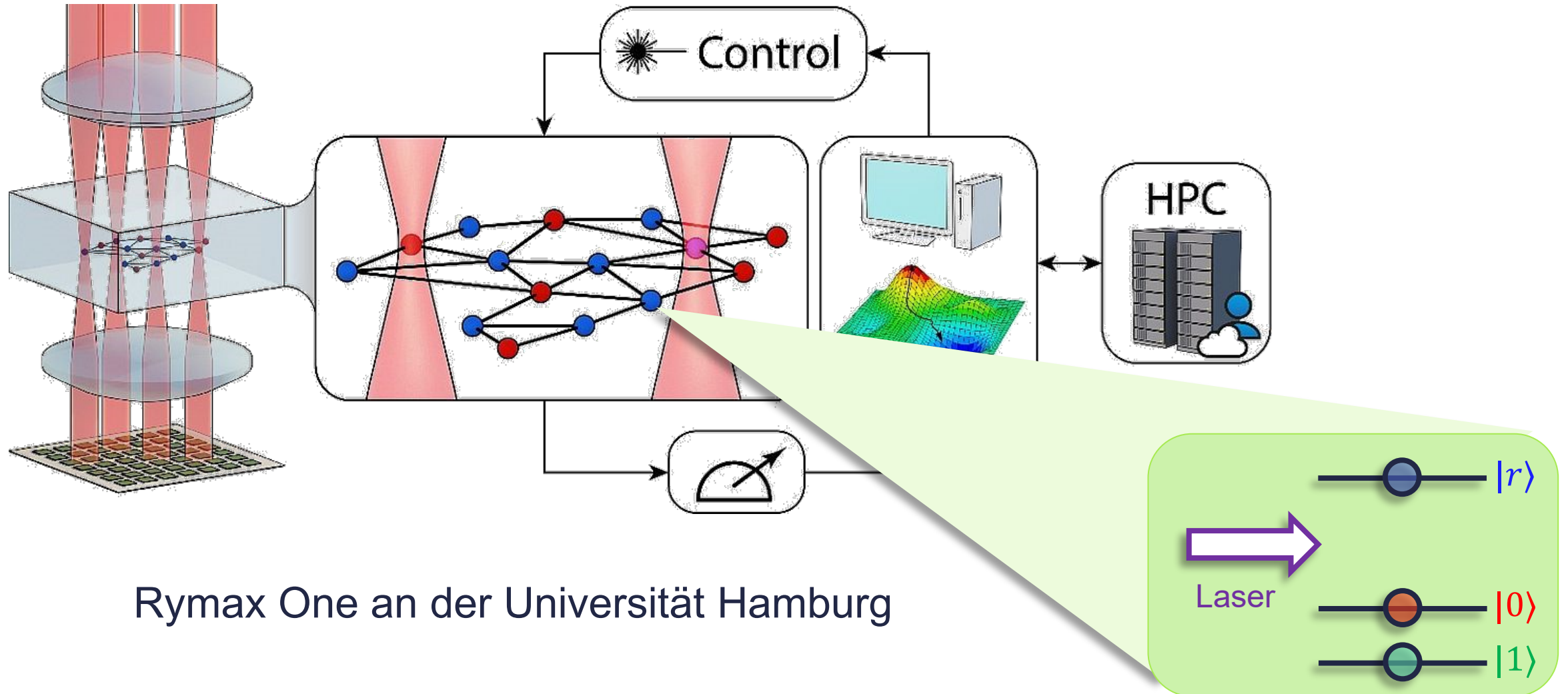


IBM setup

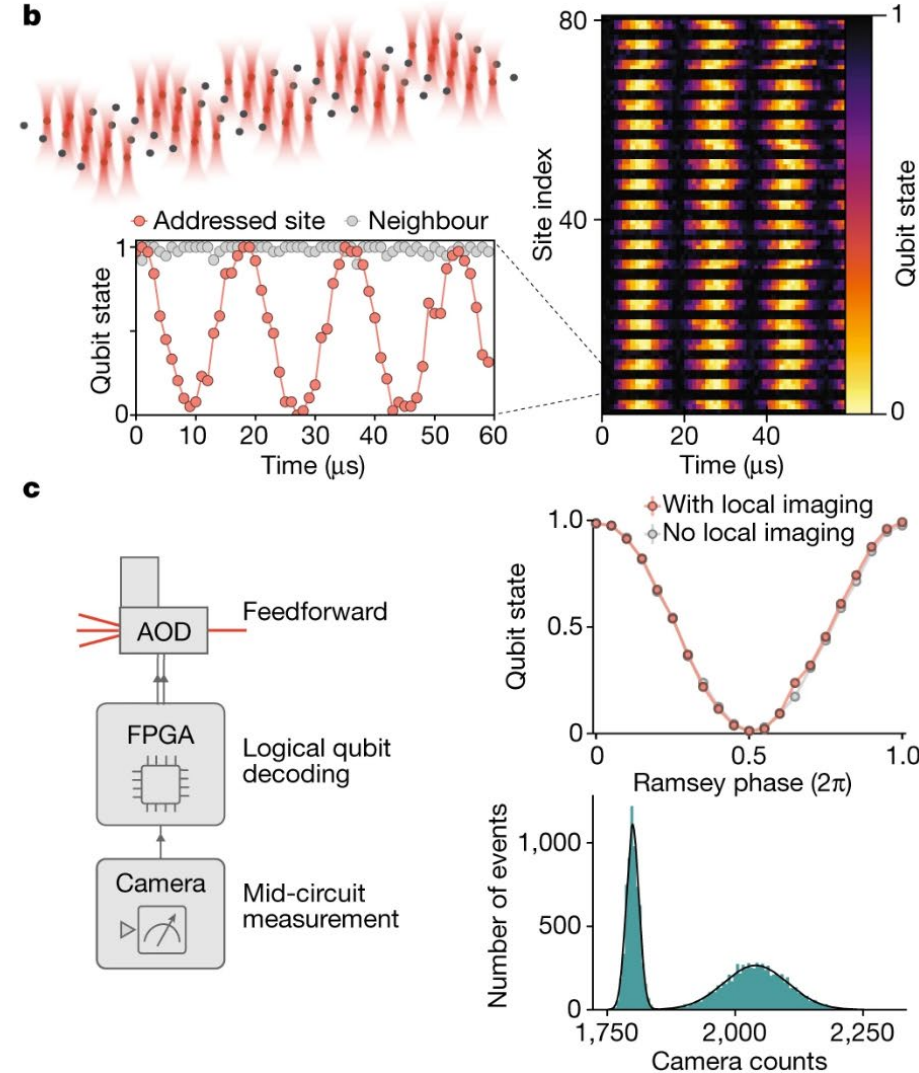
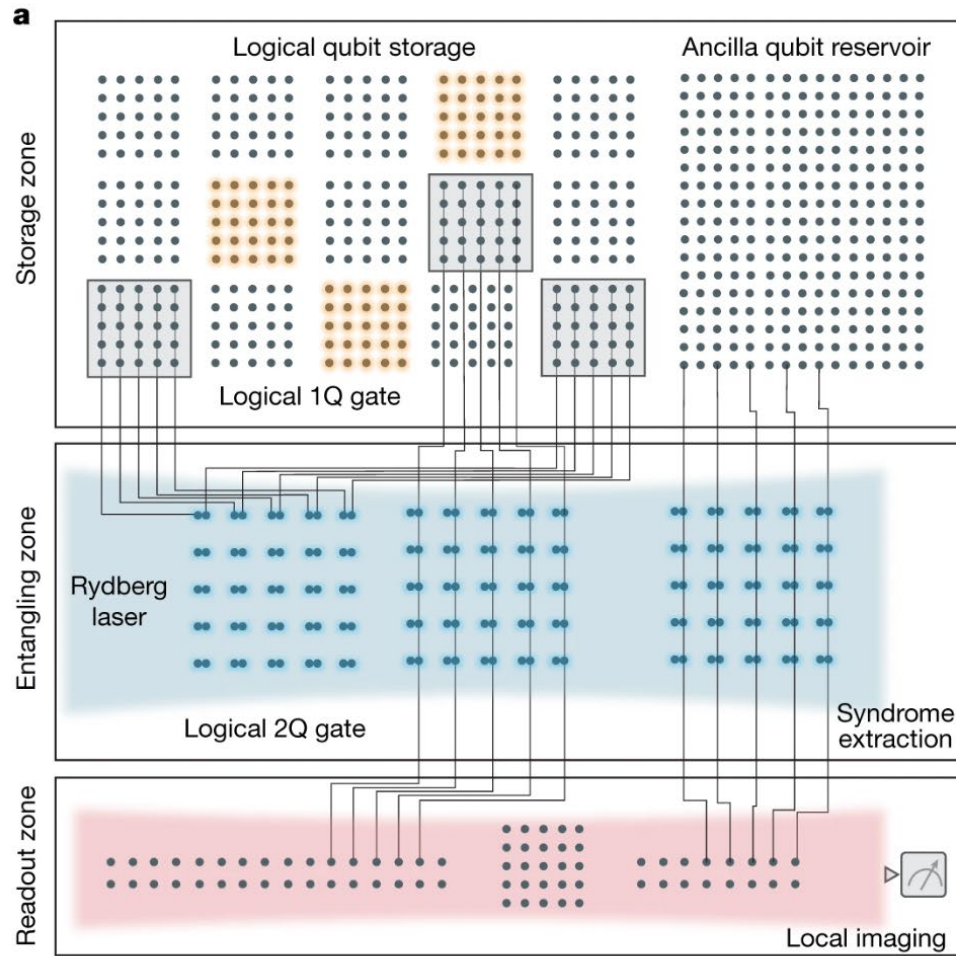


[Industry Insights on www.PGS.com](http://www.PGS.com)

Wie baut man Quantenbits? – Rydberg Atome

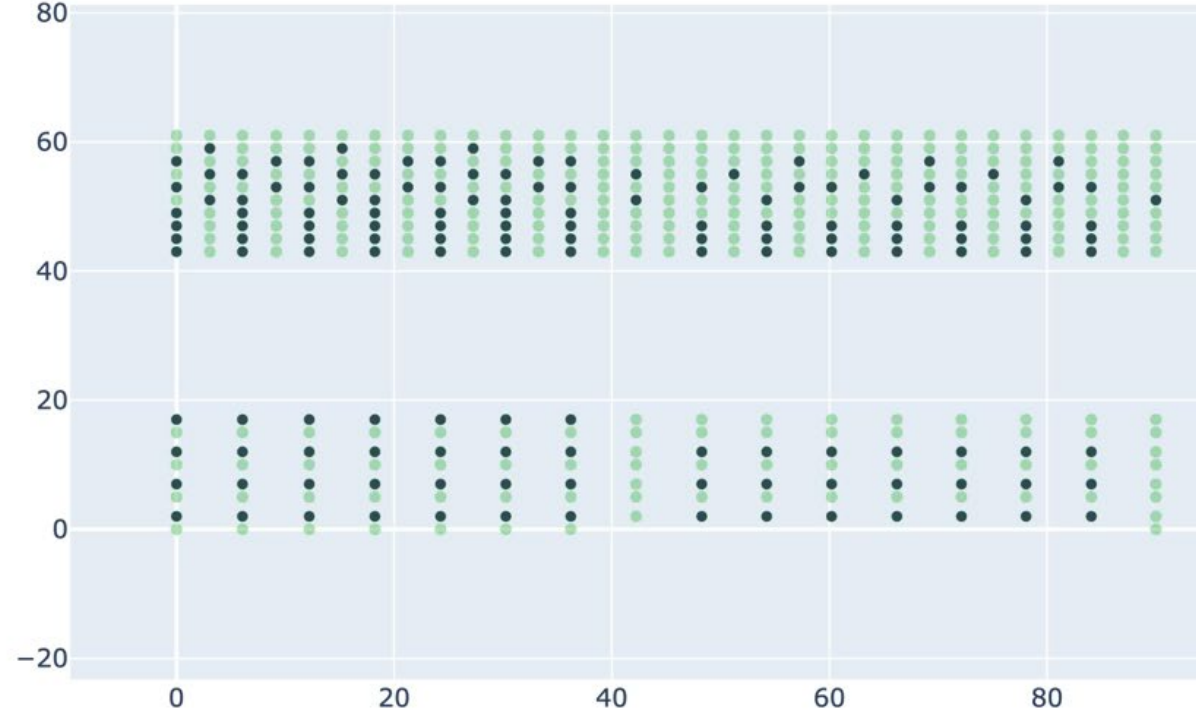


Rymax One an der Universität Hamburg

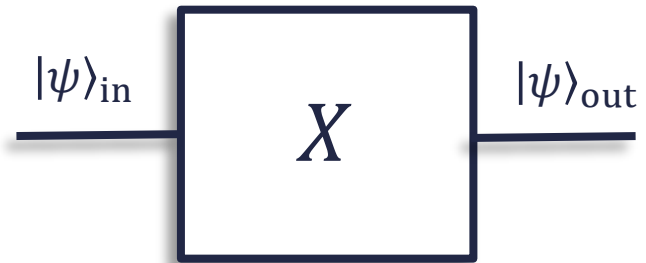
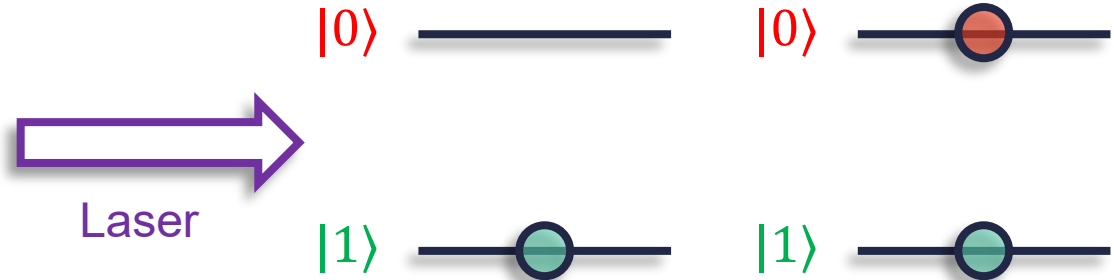
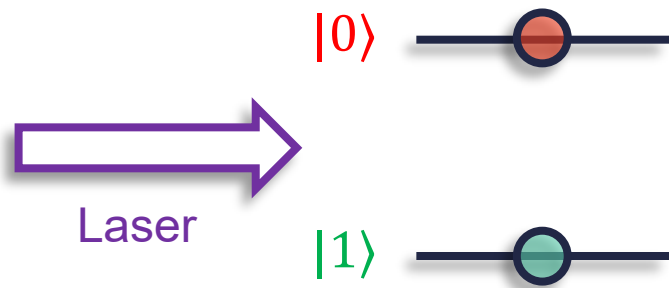


Logical quantum processor based on
reconfigurable atom arrays,
Nature **626**, 58 (2024)

The static light green circles show the positions of SLM traps, the light red circles the moveable tweezers and the dark-green circles are the individual atoms.



Logical quantum processor based on
reconfigurable atom arrays,
Nature **626**, 58 (2024)



$$\vec{c}_{\text{out}} = X \vec{c}_{\text{in}} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \vec{c}_{\text{in}}$$

Gatteroperationen als Matrix-Vektor Multiplikation



$|0\rangle$



$|1\rangle$



Laser

$|0\rangle$



$|0\rangle$



$|1\rangle$



$|1\rangle$



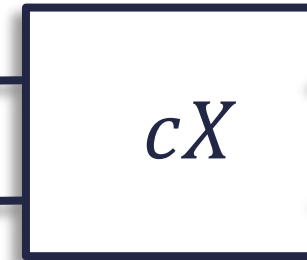
$|\psi\rangle_{\text{in}}$



$|\psi\rangle_{\text{out}}$

$$\vec{c}_{\text{out}} = X \vec{c}_{\text{in}} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \vec{c}_{\text{in}}$$

$|\psi\rangle_{\text{in}}$



$|\psi\rangle_{\text{out}}$

$$\vec{c}_{\text{out}} = X \vec{c}_{\text{in}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \vec{c}_{\text{in}}$$

Anwendungsproblem

Quantenalgorithmus

Quantencompiler

Quantenschaltkreise

Emulatoren

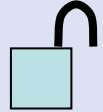
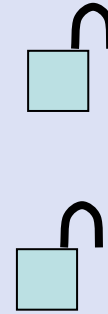
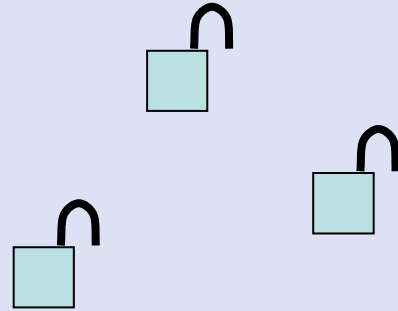
Laserpulse & Messungen

Digital Twin

Quantenrechnung

klassische Rechnung

Der Shor Algorithmus – die Faktorisierung von Zahlen



Schlüssel:

- Primzahlen p und q (Alice privat)
- daraus berechnetes d (Alice privat) mit

$$(m^e)^d = m \bmod M$$

- wobei $e = 65537$ (typisch) öffentlich ist,
- und $M = pq$ mit typisch 2048 Stellen öffentlich ist

Ver- und Entschlüsselung:

- Verschlüsselung von Nachricht $m \rightarrow c$ durch Bob mit öffentlichen e und M

$$c = m^e \bmod M$$

- Entschlüsselung durch Alice $c \rightarrow m$ mit privaten Schlüssel d und M

$$m = c^d \bmod M$$

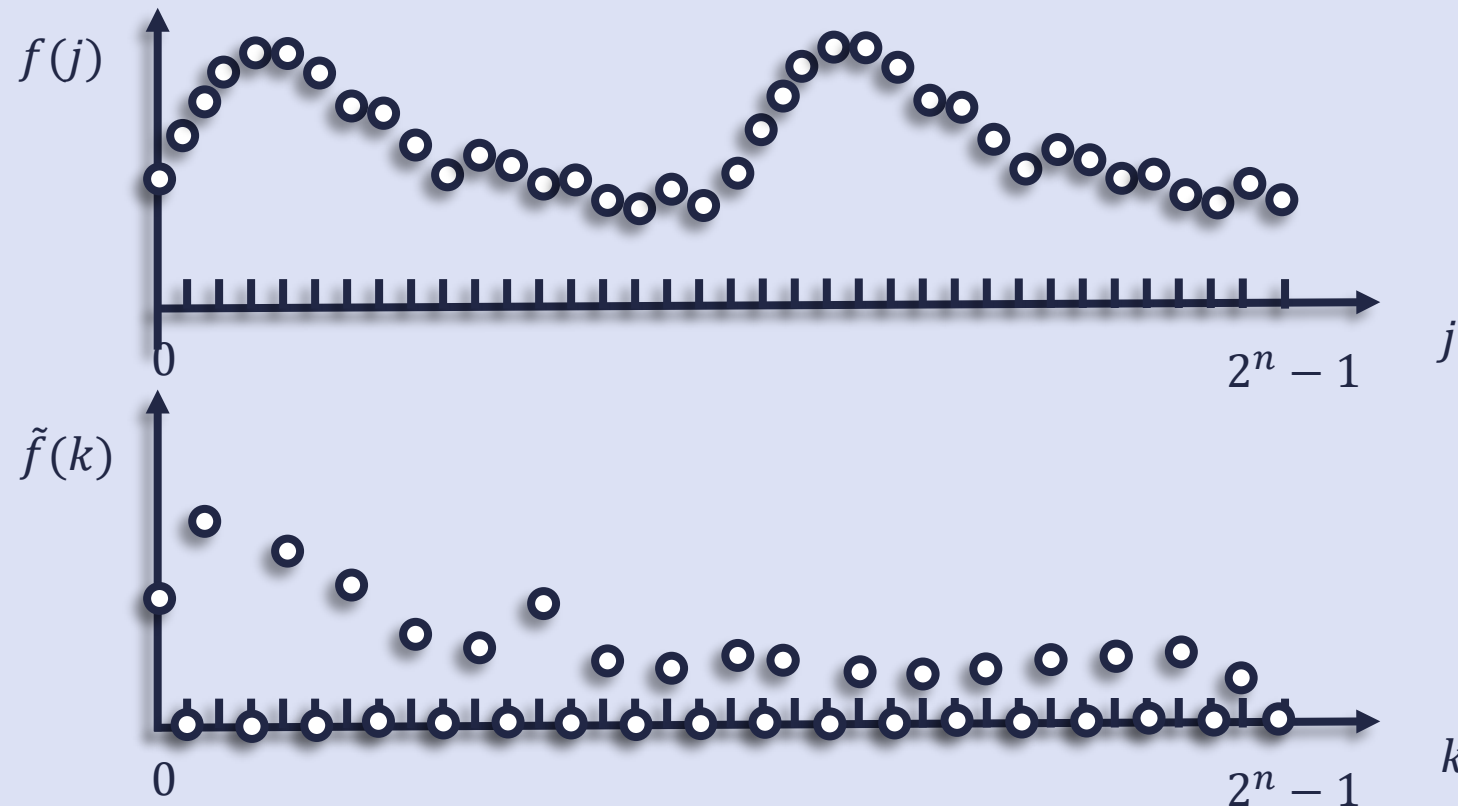
Faktorisierung der Zahl M



- Wenn man eine gerade Periode r kleiner als M kennt kann man (fast immer) einen Teiler von M finden.

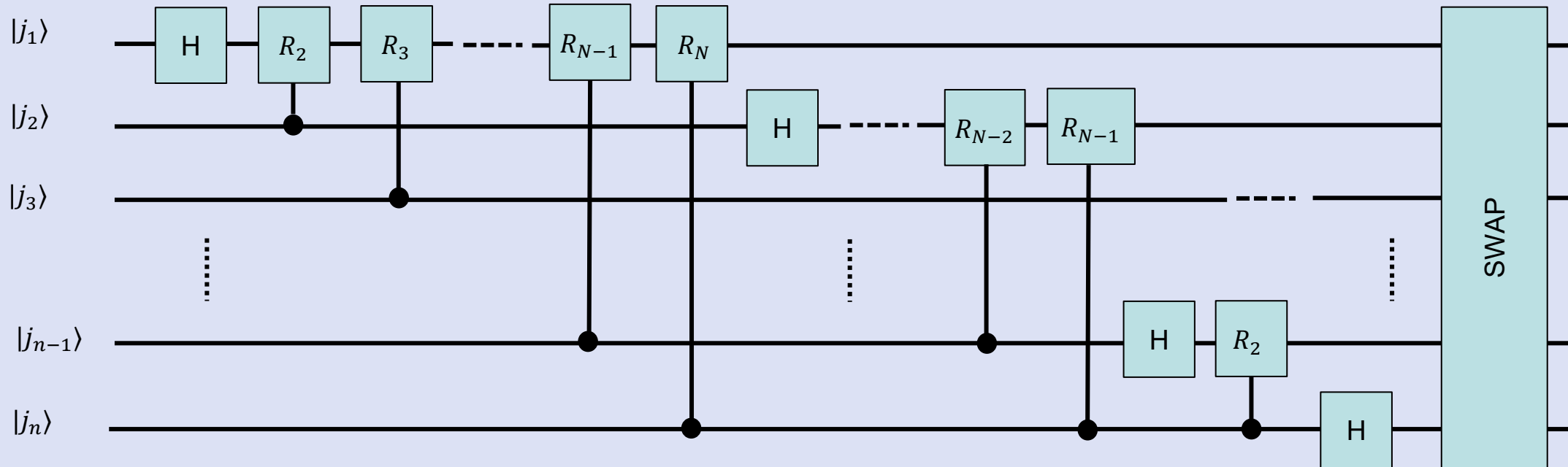
$$f(l) = x^l \bmod M$$

- Allerdings: das finden einer Periode ist klassisch ein exponentiell schwieriges Problem.

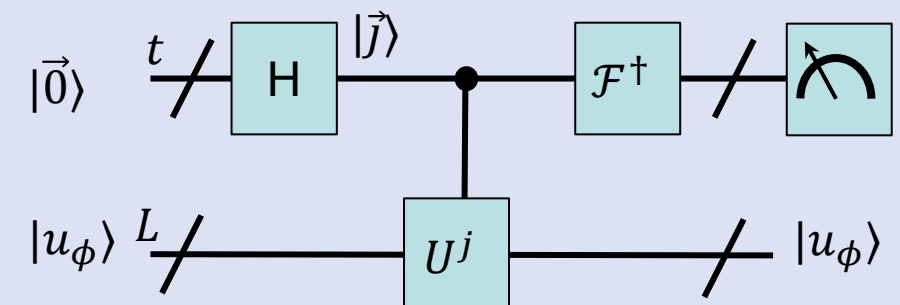


- Auf einem klassischen Computer steigt der Rechenaufwand für die Fouriertransformation mit M
- Auf einem Quantencomputer kann dies mit Aufwand $\log M$ berechnet werden

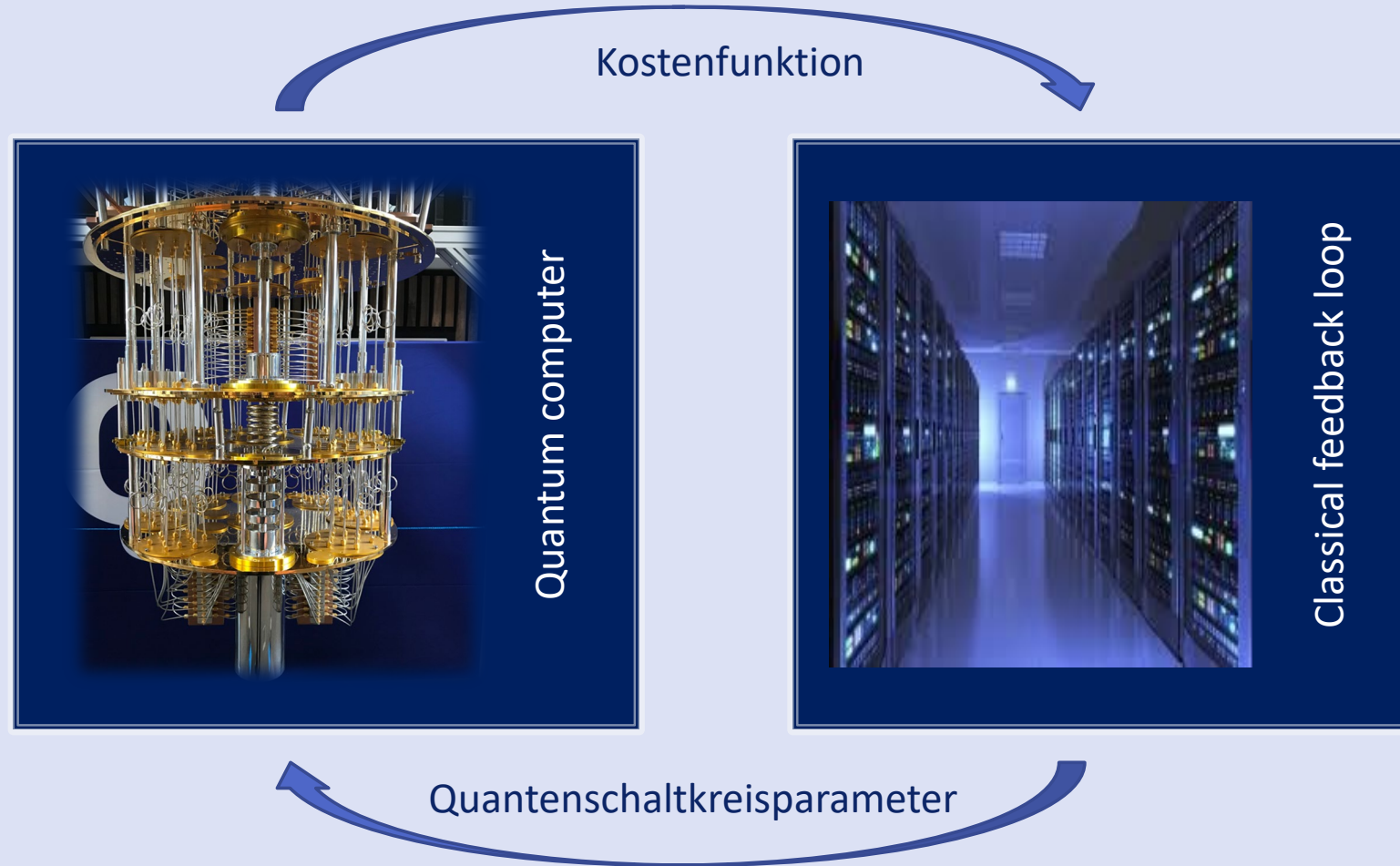
Quanten-Fouriertransformation



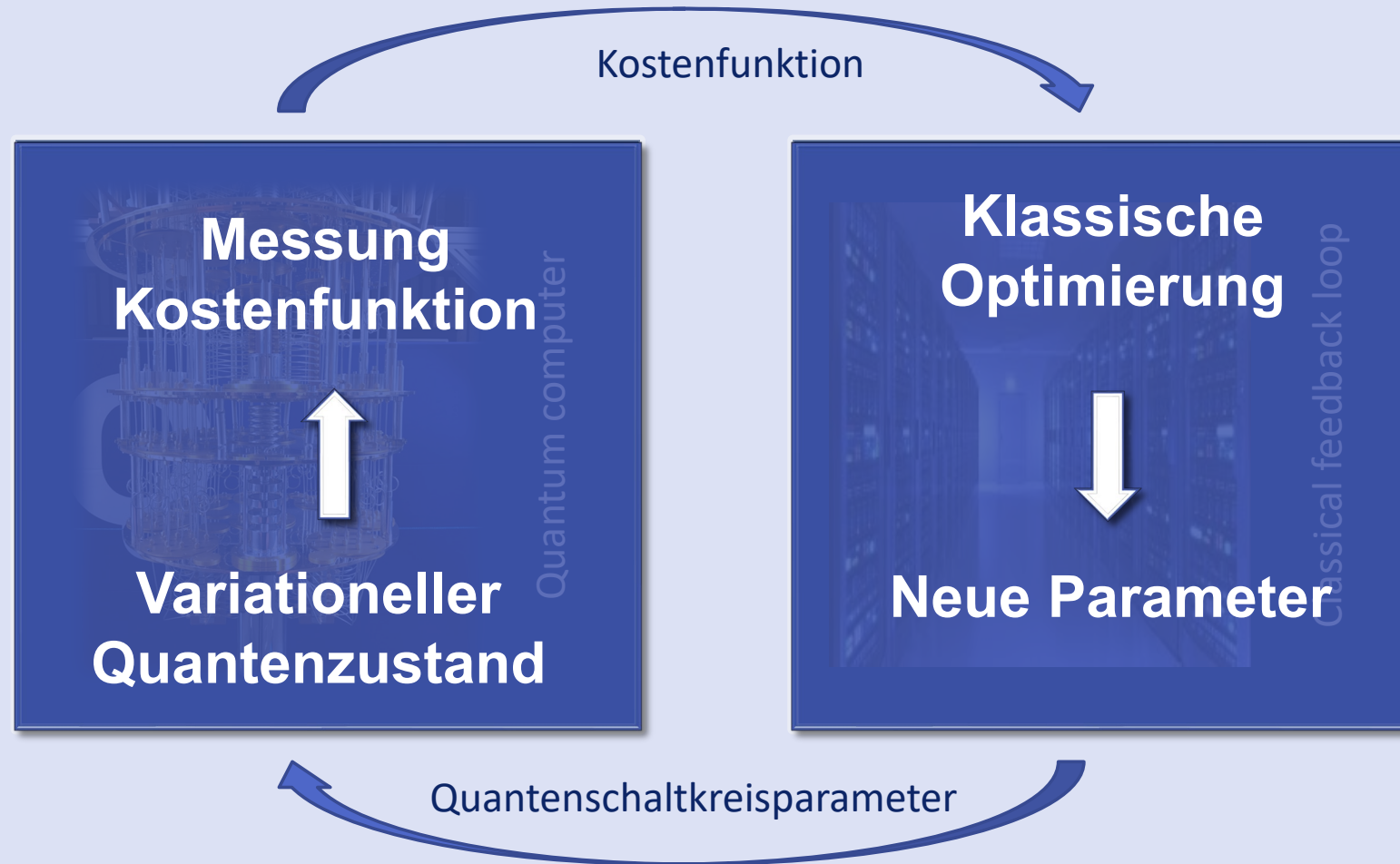
Eine Fouriertransformation benötigt nur $\propto n = \log M$ Quantengatter und ist damit exponentiell schneller als die besten klassischen Algorithmen



Variationelle Quantenalgorithmen - Optimierungsprobleme

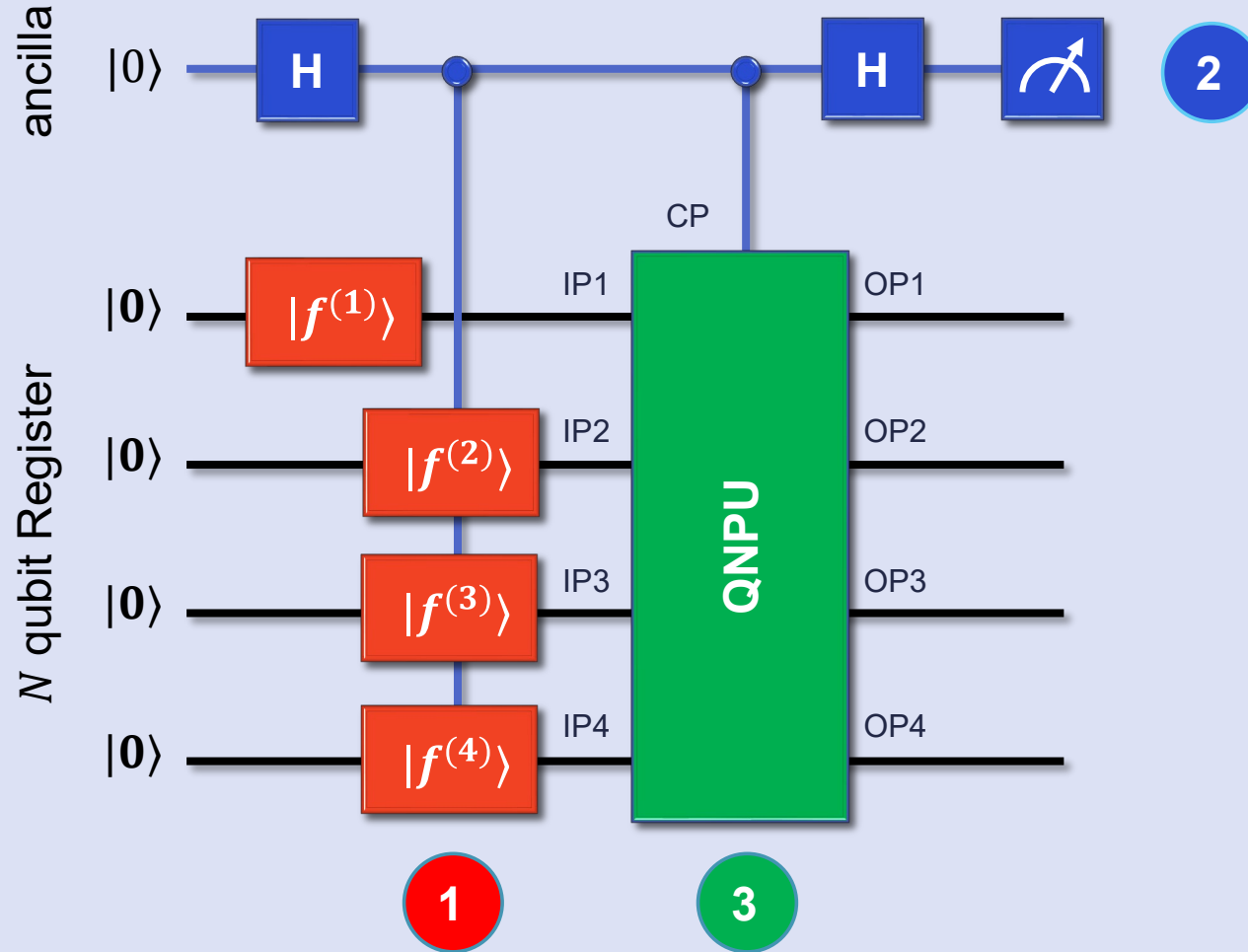


A variational eigenvalue solver on a photonic quantum processor, A. Peruzzo, et al., Nat. Commun. **5**, 4213 (2014).
Variational quantum algorithms for nonlinear problems, M. Lubasch, et al., Phys. Rev. A **101**, 010301(R) (2020).



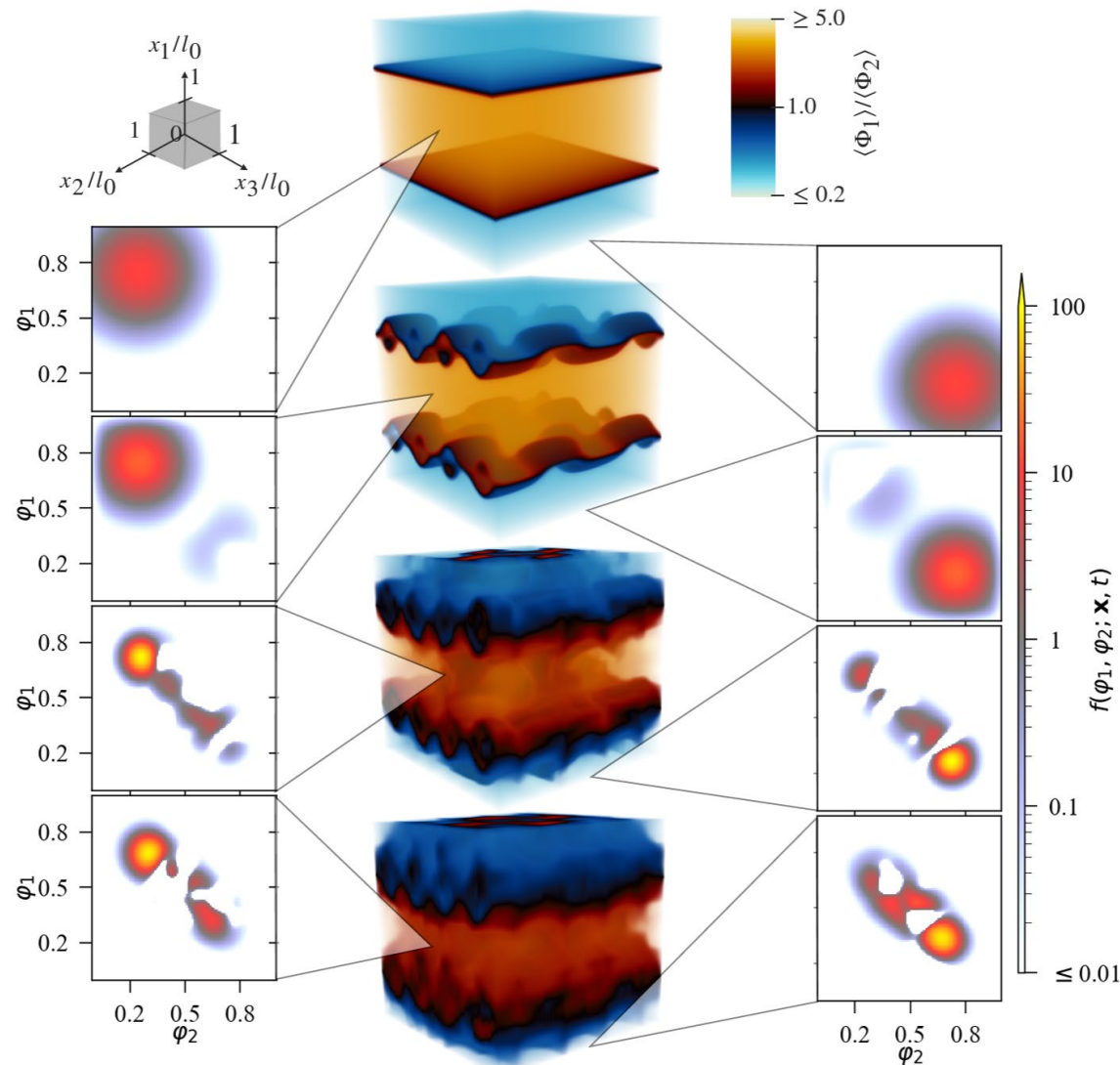
*A variational eigenvalue solver on a photonic quantum processor, A. Peruzzo, et al., Nat. Commun. **5**, 4213 (2014).
Variational quantum algorithms for nonlinear problems, M. Lubasch, et al., Phys. Rev. A **101**, 010301(R) (2020).*

QNPU Schaltkreis zur Berechnung der Kostenfunktion $\mathcal{C}$



$$\mathcal{C} = f^{(1)*} \prod_{j=1}^r (o_j f^{(j)})$$

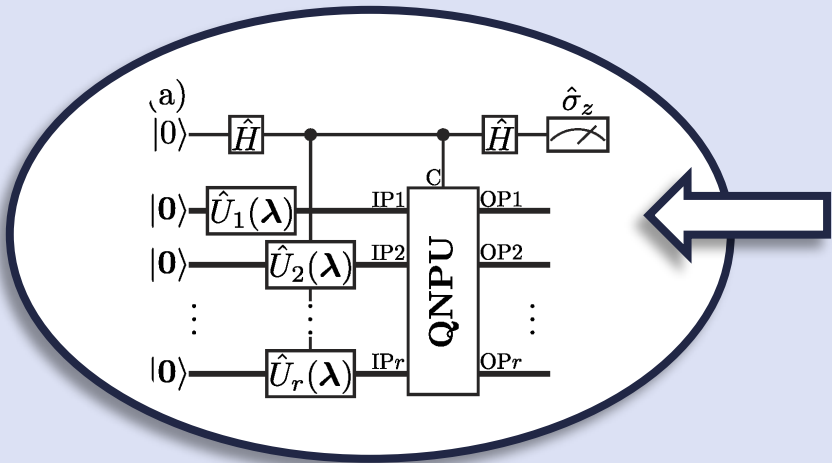
- 1 Erzeugung variationeller Zustand ($\propto n$)
- 2 Messung Kostenfunktion via ancilla Qubit
- 3 QNPU – Berechnung Kostenfunktion ($\propto n$)



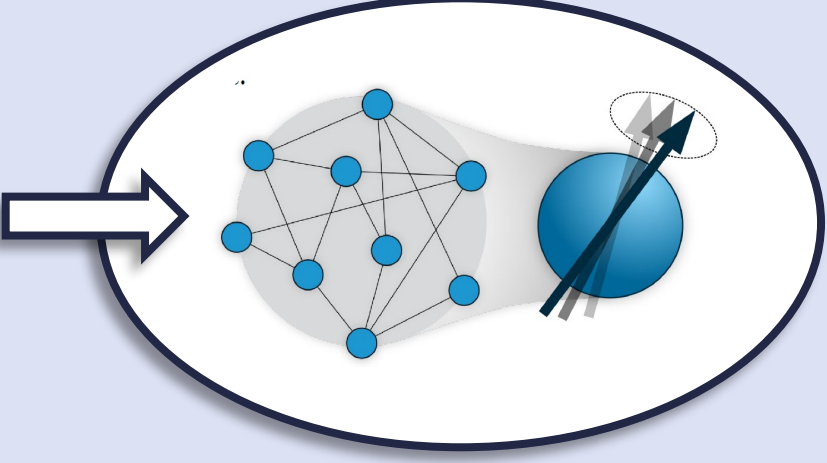
- LES-FDF Simulation



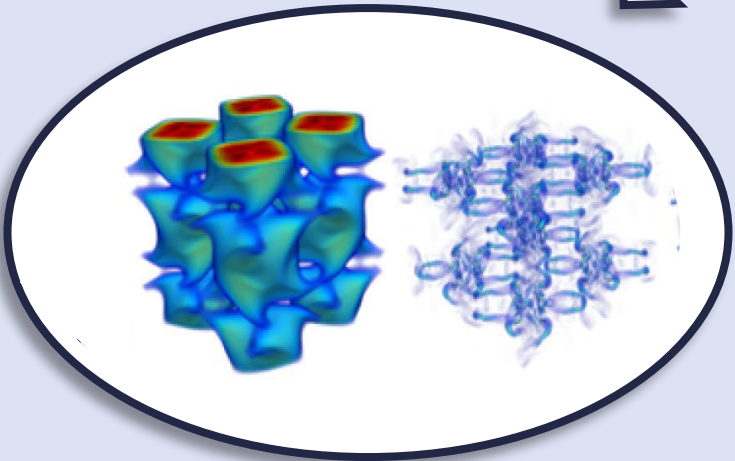
- Gittergröße: 128^5
- Dynamische Evolution der joint PDF zweier Reaktanten als Funktion des Ortes zu verschiedenen Zeitpunkten.
- *Tensor networks enable the calculation of turbulence probability distributions, Nikita Gourianov, Peyman Givi, Dieter Jaksch, and Stephen B. Pope, arXiv:2407.09169 (2024)*



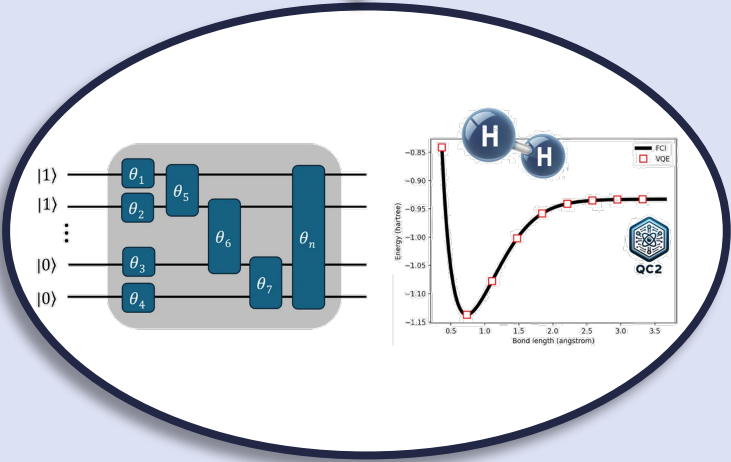
Nichtlineare Optimierung



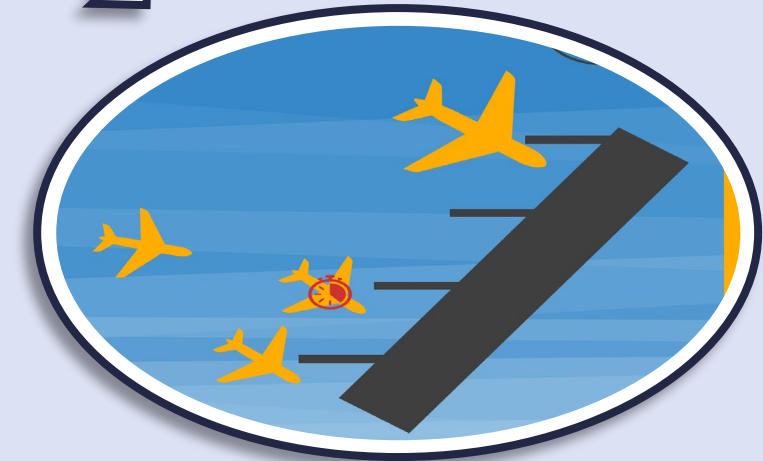
Graphentheorie



Numerische Strömungsmechanik



Quantenchemie



Prozessoptimierungen

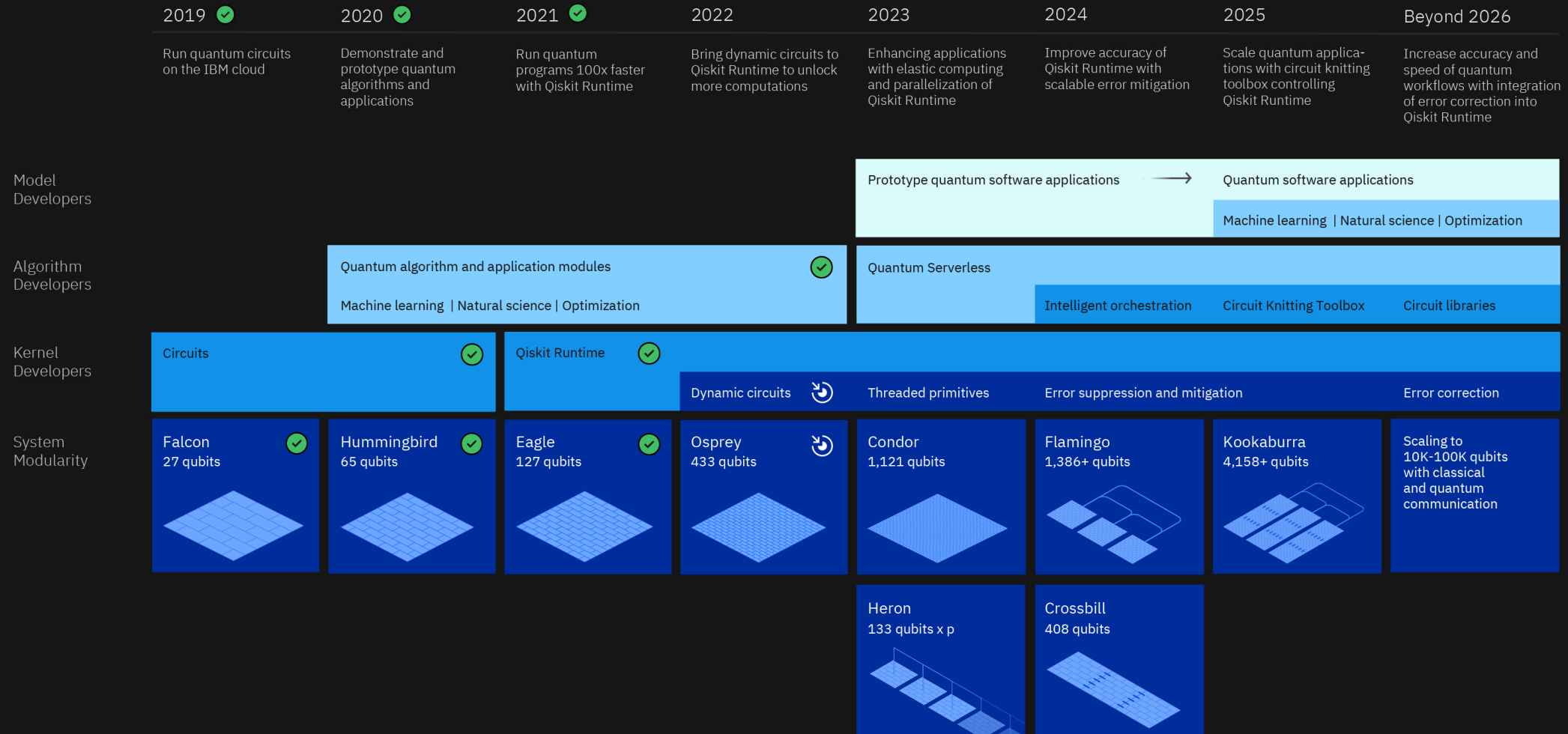
Wann werden wir einen Quantenrechner haben?



Development Roadmap

Executed by IBM ✓
On target 🕒

IBM Quantum



2022 war geplant, dass 2024/25 bereits tausende Quantenbits angeboten werden können

Wann werden wir einen Quantenrechner haben?



IBM Technology Atlas

Quantum roadmap

The future of computing is quantum-centric.

Updated May 2024

- ✔ completed
- 🕒 pushed to next year
- 🕒 on target

	2023	2024	2025	2027	2029	2030+
Quantum journey	✔ <i>Introduce parallelization of quantum computations.</i>	🕒 <i>Expand the utility of quantum computing.</i>	<i>Demonstrate quantum-centric supercomputing.</i>	<i>Scale quantum computing.</i>	<i>Deliver a fully error-corrected system.</i>	<i>Deliver quantum-centric supercomputers with 1,000's of logical qubits.</i>
Strategy overview	✔ 2023 is all about pushing speed in quantum workflows by introducing parallelization in the Qiskit Primitives.	🕒 We will improve the quality and speed of quantum circuits to allow running 5,000 gates with parametric circuits.	In 2025, we will enhance the quality of quantum circuits to allow running 7,500 gates and bring together modular processors, middleware, and quantum communication to demonstrate the first quantum-centric supercomputer.	We will scale qubits, electronics, infrastructure, and software to reduce footprint, cost, and energy usage. The quality of quantum circuits will improve to allow running 10,000 gates.	We will bring users a quantum system with 200 qubits capable of running 100 million gates.	Beyond 2033, quantum-centric supercomputers will include thousands of qubits capable of running 1 billion gates, unlocking the full power of quantum computing.
Why this matters to our clients and the world	✔ Today, our systems are capacity limited and user jobs can take multiple days. Efficient parallelization between QPUs and parallelization of quantum and classical resources will enable efficient near-term algorithms.	🕒 Qiskit Primitives with error mitigation will provide the foundation platform where algorithm and application developers can focus on the workflows and get the best quality out of the quantum hardware.	Abstraction will move from quantum circuits to quantum functions leveraging the Qiskit patterns. This will make quantum computing more usable and will be the start of domain libraries.	Scaled quantum systems will allow users to run larger computations. Multiple computing resources will be seamlessly combined to optimally handle workflows and extend the computational reach of quantum systems.	Users will be able to run large-scale problems using high-rate quantum error correction.	Quantum computers running algorithms using thousands of logical qubits are expected to enable general applications in security, chemistry, machine learning, and optimization.
The technology or innovations that will make this possible	✔ Middleware will automatically distribute tasks. ✔ Serverless tools will allow users to focus on code and not the infrastructure. ✔ Expanded classical resources in Qiskit Runtime will speed up compilation and maximize the utilization of the QPUs.	🕒 Built-in error mitigation will automatically determine the best method to reduce the effect of noise. 🕒 Transpiler services will optimally rewrite circuits for hardware, taking advantage of AI. Watson Code Assistant will help users write Qiskit code to program quantum systems.	A quantum node will be part of a network incorporating classical and quantum communication. Resource management will handle quantum and classical workflows. Qiskit will provide libraries of quantum functions and higher-level APIs for faster algorithm and application development.	Intelligent orchestration will analyze workflows to identify the optimal resource allocation (QPUs, communication, and classical resources) for the task. Qiskit will orchestrate approaches to handle errors to provide noise-free outputs to the users.	A novel and efficient error correction code will extend the computational reach of quantum resources. The system will have low-level dedicated classical hardware and a compiler for quantum-centric supercomputing.	Efficient logical decoding will enable 2,000 qubits working in a distributed 100,000-qubit machine. The middleware will include distributed software tools to manage noise-free quantum computations working seamlessly with classical computations. Qiskit will include general purpose quantum computing libraries to simplify the work of developers.
How these advancements will be delivered to IBM clients and partners	✔ Multiple 100+ qubit Eagle processors will be connected using classical communication. Ahead-of-time compilation will increase utilization of the QPUs.	🕒 Multiple higher-quality 100+ qubit Heron processors will be connected using classical communication.	Pre-built Qiskit functions and optimized libraries will be available. A 1,000+ qubit Flamingo system will be demonstrated, made from multiple processors, with each processor made from multiple chips.	The performance of our Flamingo systems will improve to allow users to run circuits with up to 10,000 gates and 1,000+ qubits.	The Starling system will be available to clients. It will be a modular, error-corrected quantum-centric supercomputer with 200 qubits capable of running a total of 100 million gates.	Our 100,000-qubit Blue Jay system will define 2,000 qubits capable of running a total of 1 billion gates. The middleware will integrate this system into ever more powerful quantum-centric supercomputers.

2024 Plan mit weniger Quantenbits und Fokus auf Verbesserung der Qualität, Skalierung ab 2030

Danke an meine Forschergruppe und Kollegen



Dieter Jaksch@UHH

Thomas Rung@TUHH

Felix Motzoi@Juelich

Barbara Kraus@TUM

Dimitris Angelakis@TUC

Paolo Geremia@ENGYS

Martin Kiffner@PlanQC



The QCfD project is funded under the EU's Horizon Programme (HORIZON-CL4-2021-DIGITAL-EMERGING-02-10), Grant Agreement 101080085.

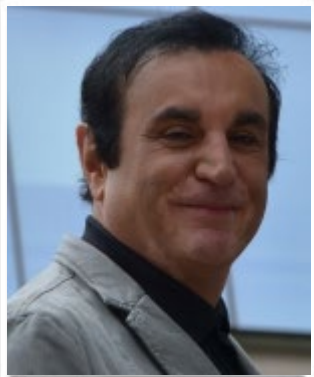
[QCfD \(qcfd-h2020.eu\)](https://qcfd-h2020.eu)



AFOSR
AIR FORCE OFFICE OF SCIENTIFIC RESEARCH



Advanced Imaging of Matter



Peyman@PIT



Jason@IBM



Andrew@OXF



Joseph@LHIND



Stephen@Cornell

Datum und Ort:

29.10.2024 um 17:15 Uhr im Otto Stern-Hörsaal (Hörsaal II), Jungiusstraße

Titel: Quantenbits in Aktion: Physik und Anwendungen des Quantenrechnens“

Abstract:

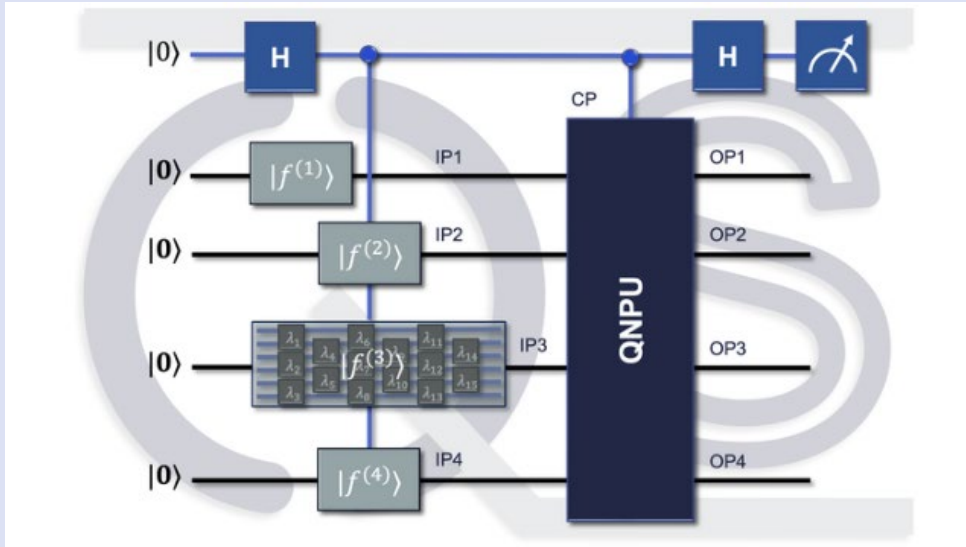
Quantenrechner haben das Potenzial unsere Art der Informationsverarbeitung radikal zu verändern. Im Zentrum dieser Technologie stehen die sogenannten Quantenbits, die winzigen Einheiten, deren Funktion auf den Prinzipien der Quantenmechanik basiert. In diesem Vortrag werde ich auf möglichst verständliche Weise die grundlegenden physikalischen Eigenschaften von Quantenbits und ihre Bedeutung für das Quantenrechnen erklären.

Dabei nehmen die Eigenschaften Superposition und Quantenverschränkung eine besondere Rolle ein, da sie es erlauben mittels Quantenparallelismus eine große Zahl von Rechnungen in einem Schritt durchzuführen. Gleichzeitig sind dies aber auch jene Eigenschaften, die experimentell besonders schwer zu kontrollieren sind. Ich werde erklären wie für verschiedene physikalische Plattformen Methoden entwickelt werden um diese Kontrolle zu erreichen, und ich werde den momentanen Stand der Technik beschreiben.

Ich werde außerdem einige spannende Anwendungsbeispiele des Quantenrechnens betrachten und darstellen, wie Wissenschaftler versuchen mit Hilfe von Quantenrechnern Probleme zu lösen, die sich mit herkömmlichen numerischen Methoden nicht mehr lösen lassen.

Homepage Link:

[Theory of many-body quantum optical systems : Institute for Quantum Physics : Universität Hamburg \(uni-hamburg.de\)](https://www.uni-hamburg.de/institut-fuer-quantenphysik/)



Schematische Darstellung eines
Quantenschaltkreises zur Lösung von
nichtlinearen Optimierungsproblemen.

