

Bayerische
Akademie der Wissenschaften



Technische Universität München

Quantencomputing (mit supraleitenden Schaltkreisen)

25. September 2019



<http://wmi.badw.de>



quantum@wmi.badw.de



[@quantumWMI](https://twitter.com/quantumWMI)

Frank Deppe

Walther-Meissner-Institut
Technische Universität München
Munich Center for QST (MCQST)



MUNICH QUANTUM CENTER

DFG



QST

ExQM
Exploring Quantum Matter

QMiCS

MCQST



Von der Quantenmechanik zum Quantencomputer

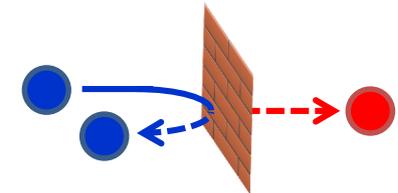
Quantenmechanik

Quantencomputer

Sehr kleine Dinge (z.B. Atome) verhalten sich ganz anders als unsere Alltagswelt.

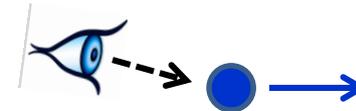
Tunneleffekt

Ein Quantenball prallt nicht immer von einer Wand zurück.



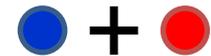
Unschärfe

Eine Ortsmessung verändert die Geschwindigkeit und umgekehrt.



Überlagerung

Solange man nicht nachsieht, können Quantenteilchen in mehreren Zuständen gleichzeitig sein.



Verschränkung

Der Gesamtzustand von zwei Quantenteilchen kann bekannt sein, ohne dass man die Teilzustände eindeutig kennt.



Erwin Schrödinger (1887 – 1961)

- Mathematischer Formalismus → komplex, unanschaulich
- Für qualitatives Verständnis nicht notwendig!



Licht (Welle) kann im Experiment auch Teilcheneigenschaften zeigen

- Historisch: Photoelektrische Effekt
- Modern: „Antibunching“ am Strahlteiler

Elektronen (Teilchen) können im Experiment auch Welleneigenschaften zeigen

- Interferenzbild bei der Elektronenstreuung
- DeBroglie Materiewellen (Theorie)

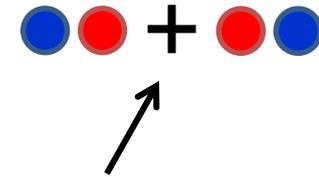
Quantenmechanik erlaubt diese Koexistenz!

Mathematische Beschreibung von „Zuständen“ durch Wellenfunktion $|\psi(x, y, z)\rangle$

- $|\psi\rangle = \sum_i c_i |b_i\rangle \rightarrow$ **Superposition** aus Basiszuständen $\{|b_i\rangle\}$
- $c_i \in \mathbb{C} \rightarrow$ keine klassischen Wahrscheinlichkeiten!
- $\sum_i c_i^2 = 1 \rightarrow$ Normiert
- Messung \rightarrow Projektion auf Basiszustand $|b_i\rangle$ mit Wahrscheinlichkeit c_i^2

Der Gesamtzustand von zwei Quantenteilchen kann bekannt sein, ohne dass man die Teilzustände eindeutig kennt → Korrelationen!

Mathematisch überträgt die Verschränkung das Superpositionsprinzip auf verschiedenen Hilberträume



(Bild unzulässig vereinfacht, erlaubt Deutung mit versteckten Variablen – „Bertlmann’s socks“)

Realismus – Messungen lesen Eigenschaften nur ab. Das Ergebnis jeder denkbaren Messung steht schon vor der Messung fest (z. B. durch den Einfluss verborgener Parameter).

Lokalität – Messungen haben nur unmittelbare Auswirkungen auf ihre direkte räumliche Umgebung. Eine instantane Fernwirkung ist nicht möglich.

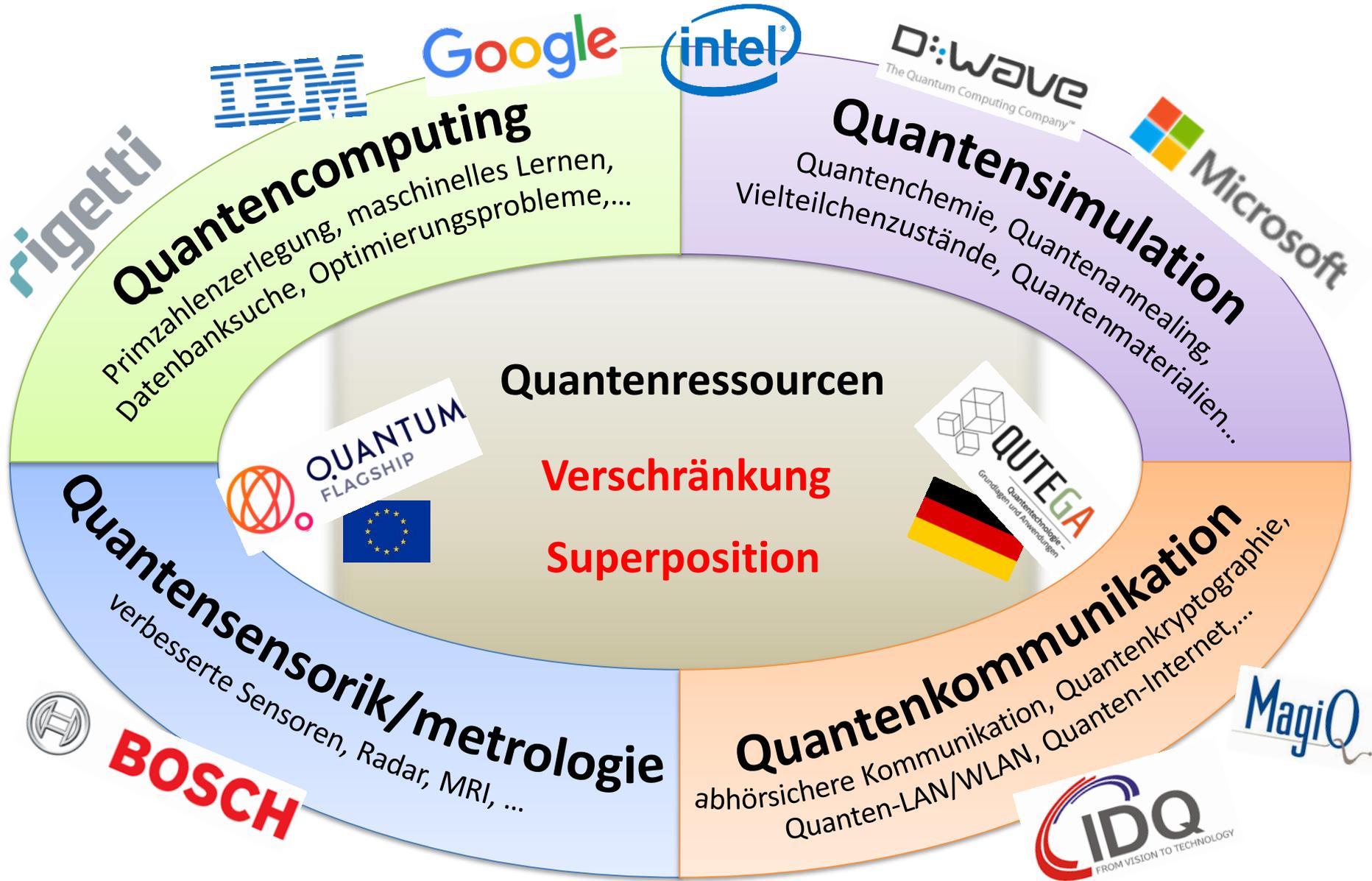
Kopenhagener Deutung

→ Quantenmechanik ist weder real noch lokal

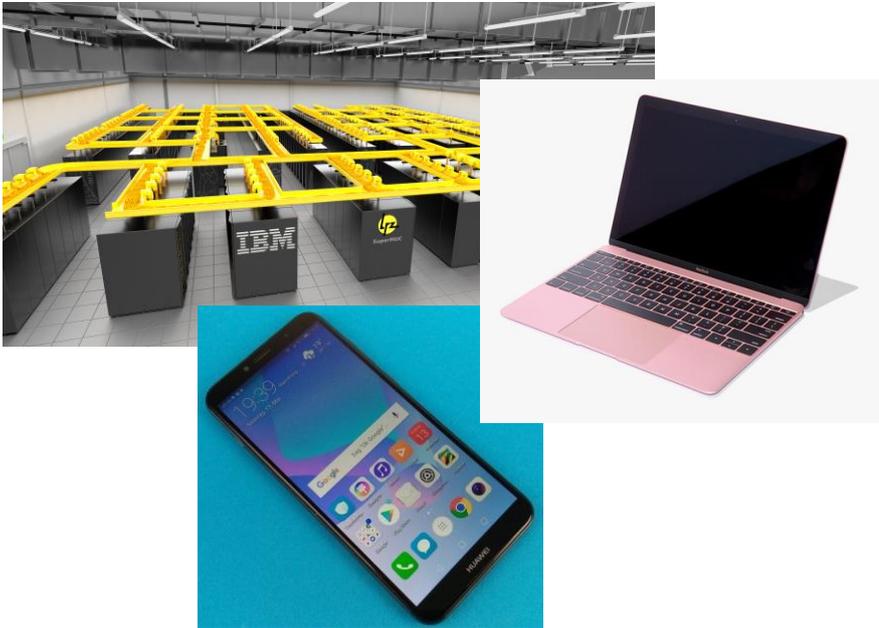
→ Messung präpariert den Zustand, der nach der Messung vorliegt

→ Wellenfunktion $|\psi(x, y, z)\rangle$ beschreibt Zustand für alle Orte im Raum gleichzeitig

→ Quantenmechanik experimentell bestätigt



Computing



- **Verarbeitung von Informationen**
- Siliziumbasierte Computer enorm schnell und erfolgreich
- Treibende Kraft technischer Entwicklung

- Vollkommen klassisch (nicht QM-basiert)
- Ungeahnte Miniaturisierung
- Omnipräsent in Gesellschaft, Wirtschaft & Alltag

Kommunikation

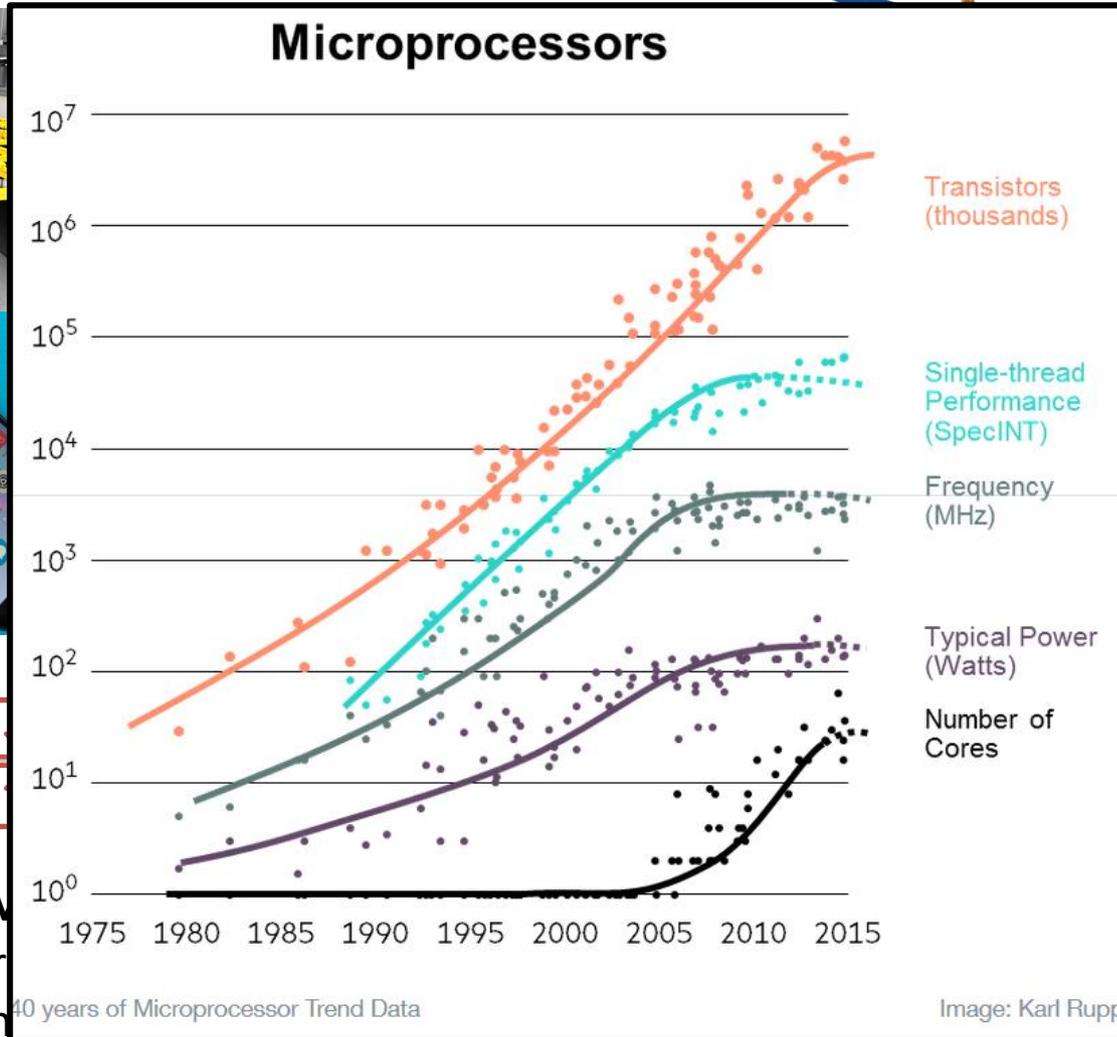


- **Austausch von Informationen**
- Menschliches Grundbedürfnis
- Kommunikation technischer Geräte ist Basis für technologischen Fortschritt

Computing



Kommunikation



Problem

- Mehr Leistung → M
- Wärmeabfuhr begr
- QM Effekte werden
- Manche Probleme prinzipiell ungeeignet

sehbar

ät
rsicherheit

Computer sollen komplexe Aufgaben lösen

Komplexität erkennt man an der Anzahl der Elemente N einer Aufgabe

- N bestimmt die zur Lösung benötigten Ressourcen R (z.B. Ausführungszeit, Speicher)
- Komplexität ist bestimmt durch die Abhängigkeit $R(N)$

Klassische Computer können gut

- Addieren, subtrahieren, multiplizieren, dividieren
- Schach & Go spielen

$$R(N) \propto \{\log N, N, N^2, N^3, \dots, N^m\}$$

Klassische Computer können nicht so gut

- Primfaktoren bestimmen
- Optimierungsprobleme lösen
- Künstliche Intelligenzen trainieren

$$R(N) \propto e^N$$

Für große N ist e^N immer sehr viel größer als N^m !

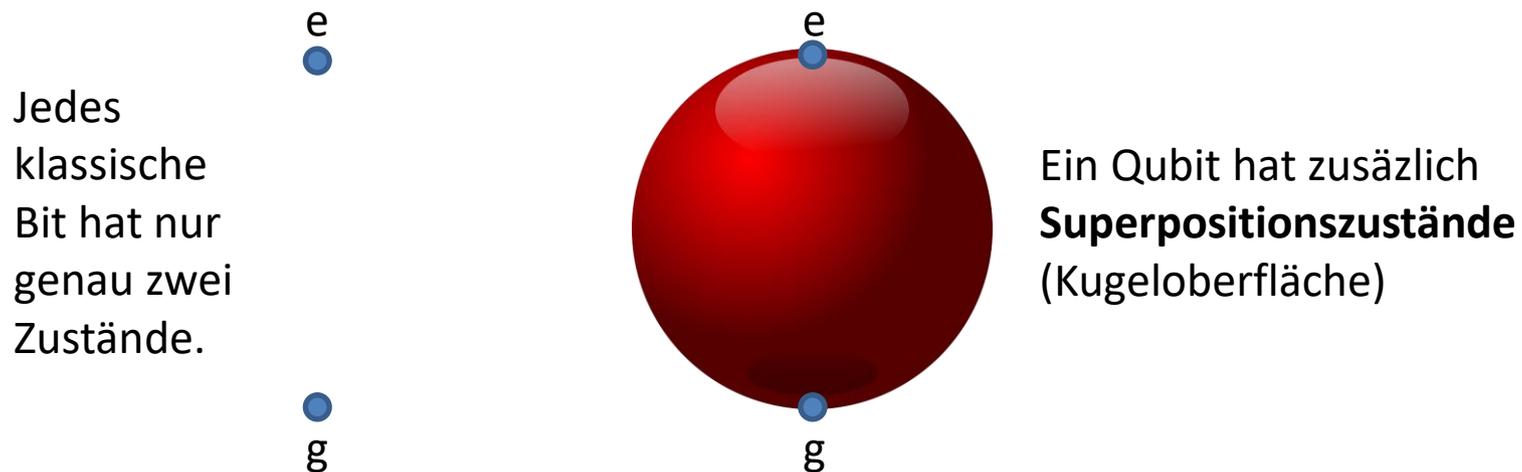
Beispiel $m = 3 \rightarrow e^N > N^3$ schon für $N \geq 5$

Hier kann uns die Quantenmechanik helfen!

Klassische Computer lösen Aufgaben, für die Menschen Jahre bräuchten, in sinnvoller Zeit.
Quantencomputer lösen Aufgaben, für die klassische Computer Jahre bräuchten, in sinnvoller Zeit.

Warum ist ein Quantencomputer manchmal schneller als ein klassischer Computer?

Im Quantencomputer ersetzt man die kleinsten Informationseinheit Bit durch das **Quantenbit (Qubit)**.



Durch **Verschränkung** wird dieser Vorteil auf Operationen zwischen zwei Qubits übertragen.

Für manche Aufgaben (Addieren, Multiplizieren) ist kein vorteilhafter Quantenalgorithmus bekannt → Macht nichts, dafür gibt es klassische Computer!

Classical bit → Deterministic, either in ground state “g” or in excited state “e”

Quantum bit (qubit) → **Superposition** of two computational basis states

$$|\Psi(t)\rangle = a(t)|g\rangle + b(t)|e\rangle$$

$$a(t), b(t) \in \mathbb{C} \text{ with } |a(t)|^2 + |b(t)|^2 = 1$$

→ All states can be visualized on the surface of a sphere

Global phase unobservable

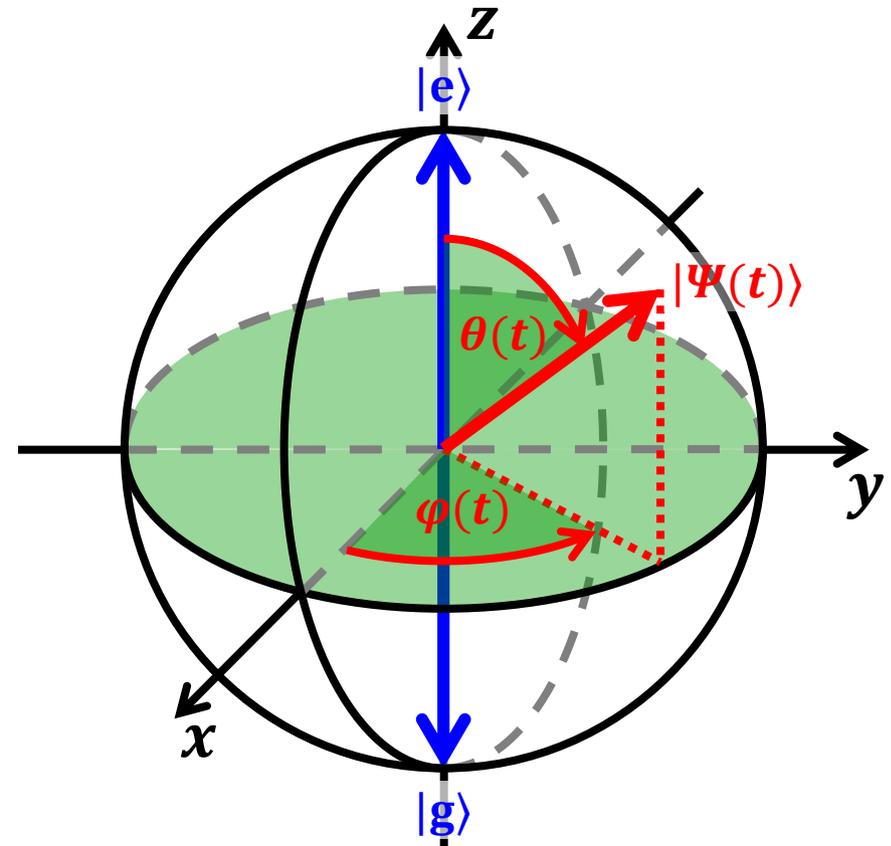
→ **Bloch sphere** representation

$$|\Psi(t)\rangle = \cos\left(\frac{\theta(t)}{2}\right)|e\rangle + e^{i\varphi(t)}\sin\left(\frac{\theta(t)}{2}\right)|g\rangle$$

Bloch angles

$\theta(t)$ → Amplitude → Energy, population

$\varphi(t)$ → Phase → Coherence



Pseudo spin

→ $|\Psi\rangle$ equivalent to spin wavefunction in external magnetic field

Unitary operations

→ Gates & evolution expressed via unitary operations \hat{U}

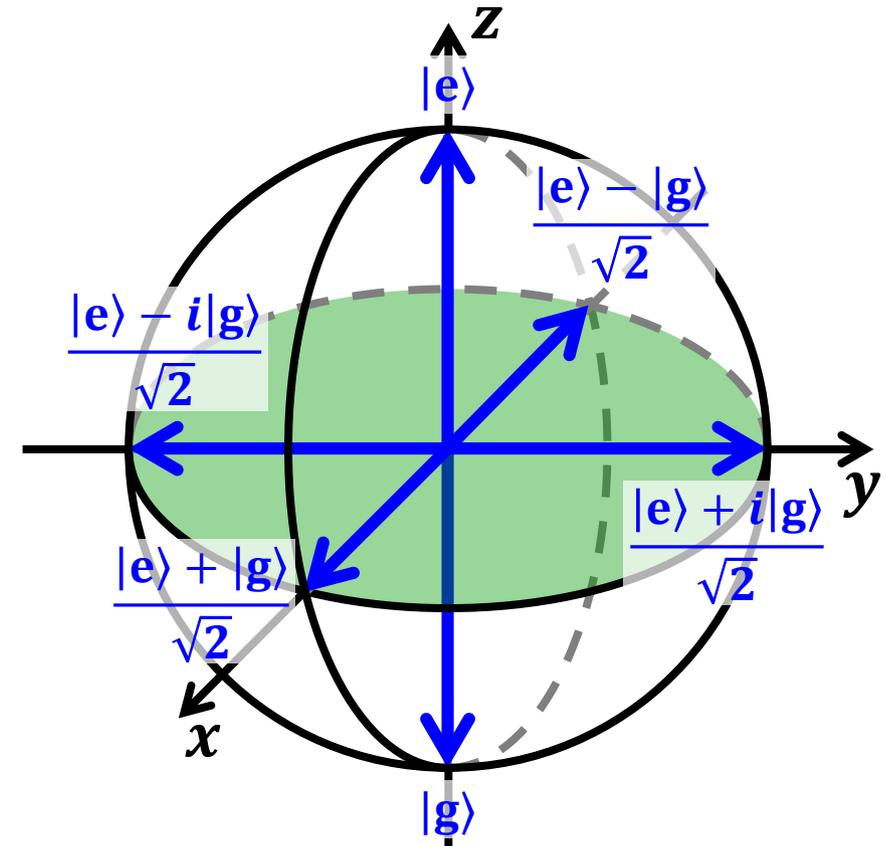
→ $\hat{U}|\Psi\rangle$ expressed via the Hermitian Pauli spin matrices $\hat{1}, \hat{\sigma}_x, \hat{\sigma}_y, \hat{\sigma}_z$

$$\hat{1} \equiv \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \hat{\sigma}_x \equiv \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\hat{\sigma}_y \equiv \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix} \quad \hat{\sigma}_z \equiv \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$$

$|g\rangle$ and $|e\rangle$ are the eigenvectors of $\hat{\sigma}_z$

Important states on the Bloch sphere



$$|\Psi(t)\rangle = \cos\left(\frac{\theta(t)}{2}\right) |e\rangle + e^{i\varphi(t)} \sin\left(\frac{\theta(t)}{2}\right) |g\rangle$$

Projection operators project the qubit state onto a certain basis state

→ Example: $(|g\rangle\langle g|)|\psi\rangle$ selects all terms of $|\psi\rangle$ with $|g\rangle$

→ Reason: $\{|g\rangle, |e\rangle\}$ is orthonormal basis → $\langle g|g\rangle = 1$, $\langle g|e\rangle = 0$

$$\hat{1} \equiv \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \hat{\sigma}_x \equiv \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \quad \hat{\sigma}_y \equiv \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix} \quad \hat{\sigma}_z \equiv \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$$

→ The Pauli matrices can be expressed in terms of projection operators

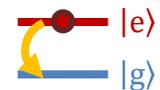
$$\hat{\sigma}_+ = |e\rangle\langle g|$$

→ **Puts an excitation** into the qubit



$$\hat{\sigma}_- = |g\rangle\langle e|$$

→ **Removes an excitation** from the qubit



$$\hat{\sigma}_x = \hat{\sigma}_- + \hat{\sigma}_+$$

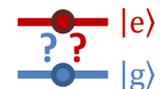
→ Induce **transitions** between $|g\rangle$ and $|e\rangle$



$$\hat{\sigma}_y = i(\hat{\sigma}_- - \hat{\sigma}_+)$$

$$\hat{\sigma}_z = |e\rangle\langle e| - |g\rangle\langle g|$$

→ $\langle \hat{\sigma}_z \rangle$ gives the **qubit population**



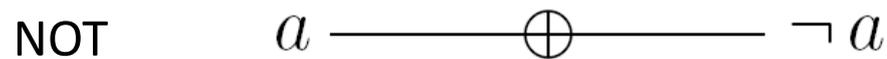
$$\hat{1} = |g\rangle\langle g| + |e\rangle\langle e|$$

→ Reflects normalization

Examples for 1-qubit gates

| | | | | | |
|-----------|---|---|------------------------|------------|--|
| Identität | 1 | $\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$ | $\sqrt{\text{NOT}}$ | \sqrt{X} | $\frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1+i & 1-i \\ 1-i & 1+i \end{pmatrix}$ |
| NOT | X | $\begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$ | Hadamard | H | $\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix}$ |
| Pauli-Y | Y | $\begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix}$ | Phase (\sqrt{Z}) | S | $\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & i \end{pmatrix}$ |
| Pauli-Z | Z | $\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$ | $\pi/8$ (\sqrt{S}) | T | $\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\pi/4} \end{pmatrix}$ |

Graphical representation example



Hadamard gate \hat{H} is of particular importance in many quantum algorithms

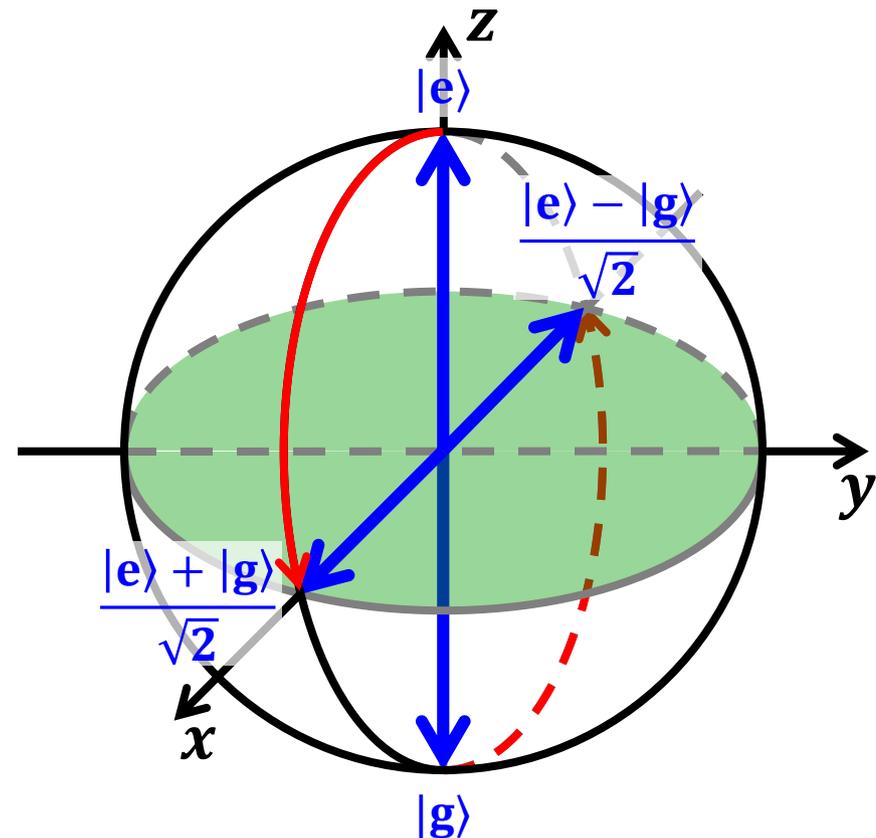
→ Applied to one of the basis states $|g\rangle$ or $|e\rangle$, it results in a **superposition state** of the basis states

$$\hat{H} \equiv \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} (\hat{\sigma}_x + \hat{\sigma}_z)$$

$$\rightarrow \hat{H} = \frac{1}{\sqrt{2}} (|e\rangle\langle e| - |g\rangle\langle g| + |e\rangle\langle g| + |g\rangle\langle e|)$$

$$\hat{H}|g\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|e\rangle - |g\rangle)$$

$$\hat{H}|e\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|e\rangle + |g\rangle)$$



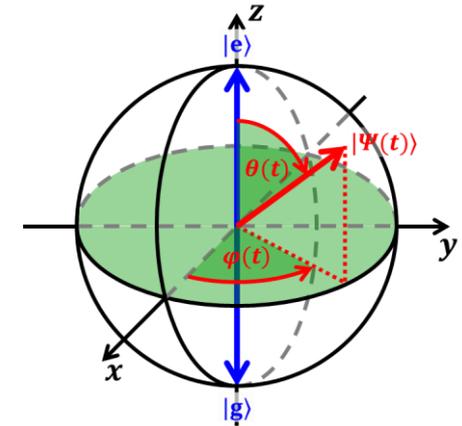
In practice, ideal unitary evolution is lost after some time due to uncontrolled interaction with environment

→ Loss of quantum coherence („decoherence“)

$$|\Psi(t)\rangle = \cos\left(\frac{\theta(t)}{2}\right) |e\rangle + e^{i\varphi(t)} \sin\left(\frac{\theta(t)}{2}\right) |g\rangle$$

$\theta(t)$ → Amplitude → Energy, population

$\varphi(t)$ → Phase → Coherence



Population

→ Energy relaxation time T_1 or T_r

→ $k_B T \ll \hbar \omega_{ge}$ → decay from $|e\rangle$ to $|g\rangle$

→ Nonadiabatic (irreversible) processes

→ Induced by high-frequency fluctuations ($\omega \approx \omega_{ge}$)

Phase

→ Pure dephasing time T_φ

→ Adiabatic (reversible) processes

→ Induced by low-frequency fluctuations ($\omega \rightarrow 0$)

→ Often encountered: 1/f-noise

→ Measurements always contain T_1 -effects

$$T_2^{-1} = (2T_1)^{-1} + T_\varphi^{-1}$$

Nomenclature not always consistent in literature! Often „decoherence“ comprises both effects

Singe qubit state

$$\rightarrow |\Psi\rangle = c_1|g\rangle + c_2|e\rangle$$

Two qubit state

→ 2 qubits A and B

$$\rightarrow |\Psi\rangle = c_1|gg\rangle + c_2|eg\rangle + c_3|ge\rangle + c_4|ee\rangle$$

→ $\{|gg\rangle, |eg\rangle, |ge\rangle, |ee\rangle\}$ is orthonormal two-qubit basis

→ $|gg\rangle$ shorthand for tensor product $|g\rangle_A \otimes |g\rangle_B$

Two qubit operators

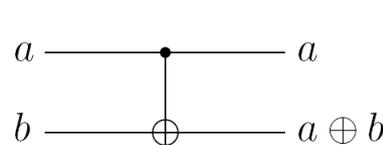
→ Tensor product of single qubit operators

$$\text{Example: } \hat{\sigma}_x^A \otimes \hat{\sigma}_x^B$$

→ Matrix notation: Tensor product is blockwise product

$$A \otimes B = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{pmatrix} \otimes \begin{pmatrix} B_{11} & B_{12} \\ B_{21} & B_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{11} \begin{pmatrix} B_{11} & B_{12} \\ B_{21} & B_{22} \end{pmatrix} & A_{12} \begin{pmatrix} B_{11} & B_{12} \\ B_{21} & B_{22} \end{pmatrix} \\ A_{21} \begin{pmatrix} B_{11} & B_{12} \\ B_{21} & B_{22} \end{pmatrix} & A_{22} \begin{pmatrix} B_{11} & B_{12} \\ B_{21} & B_{22} \end{pmatrix} \end{pmatrix}$$

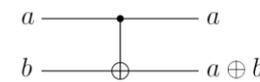
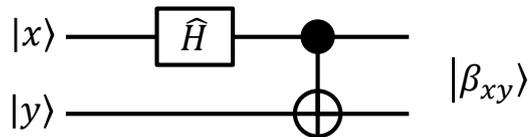
Controlled NOT gate (CNOT)



$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

| a | b | a' | b' |
|-----|-----|------|------|
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 0 | 1 |
| 1 | 0 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 0 |

- The Bell states are of particular importance in many QIP protocols
- Created via a Hadamard and a CNOT gate



| a | b | a' | b' |
|-----|-----|------|------|
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 0 | 1 |
| 1 | 0 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 0 |

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\hat{H} \equiv \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned} |00\rangle & \quad |\beta_{00}\rangle \equiv \frac{1}{\sqrt{2}} (|00\rangle + |11\rangle) \\ |01\rangle & \quad |\beta_{01}\rangle \equiv \frac{1}{\sqrt{2}} (|01\rangle + |10\rangle) \\ |10\rangle & \quad |\beta_{10}\rangle \equiv \frac{1}{\sqrt{2}} (|00\rangle - |11\rangle) \\ |11\rangle & \quad |\beta_{11}\rangle \equiv \frac{1}{\sqrt{2}} (|01\rangle - |10\rangle) \end{aligned}$$

Nomenklatur: $|0\rangle \leftrightarrow |g\rangle$, $|1\rangle \leftrightarrow |e\rangle$



Quantum vs. classical computing



Classical bits can be copied easily: $C \rightarrow CC$

Quantum bits (quantum states) cannot be copied

→ No-cloning theorem

→ Proof: Assume that there is a unitary transformation \hat{U} producing copies of $|\alpha\rangle$ and $|\beta\rangle$

$$\hat{U}|\alpha 0\rangle = |\alpha\alpha\rangle \text{ and } \hat{U}|\beta 0\rangle = |\beta\beta\rangle$$

→ However, the quantum copying machine fails in copying state

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

$$\hat{U}|\gamma 0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\alpha\alpha\rangle + |\beta\beta\rangle) \neq |\gamma\gamma\rangle$$

→ Rescues the consistency between quantum mechanics and special relativity

→ No superluminal communication!

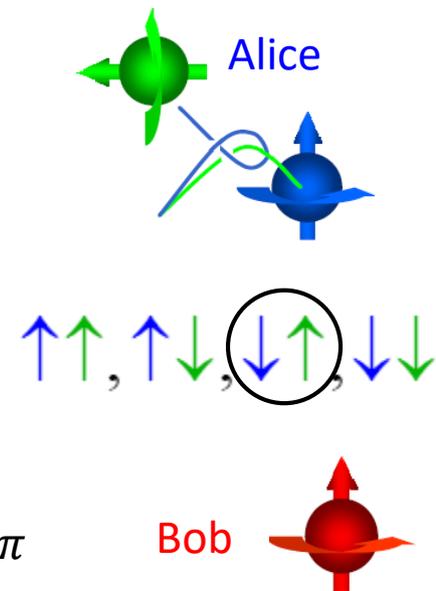
- No-cloning theorem forbids copying state $|\phi\rangle = a|\uparrow\rangle + b|\downarrow\rangle$
- However, vanishing at one place and reappearing at another is allowed

→ Teleportation

- Teleporting a quantum state (qubit) requires that Alice and Bob share an entangled state $|\Psi_{AB}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow\downarrow\rangle + |\downarrow\uparrow\rangle)$ (“EPR pair”)

Teleportation protocol

1. Alice entangles her spin $|\uparrow\rangle$ with the **unknown** state $|\phi\rangle$
2. Alice measures what state her two spins are and tells Bob, which of the four possible results she has found
→ **Classical communication**
3. Bob carries out the appropriate rotation of his spin $|\uparrow\rangle$ by π
4. As a result, Bob ends up with his spin in the state $|\phi\rangle = a|\uparrow\rangle + b|\downarrow\rangle$



Rückgrat der heute üblichen RSA-Verschlüsselung

- Öffentlicher & privater Schlüssel basieren auf (demselben) Produkt zweier Primzahlen
- Verschlüsselung mit öffentlichem Schlüssel & Entschlüsselung mit privatem Schlüssel
- Kenntnis der Primzahlen erlaubt Rekonstruktion der Nachricht aus öffentlichem Schlüssel
- Schnellere Faktorisierungsalgorithmen strategisches Interesse vieler Staaten

Problemgröße → Stellenzahl $N = \log m$ der zu faktorierenden Zahl m

Klassischer Computer (Zahlkörpersieb)

→ Laufzeit $\propto e^{(cN^{1/3}(\log N)^{2/3})}$

→ $c = \left(\frac{32}{9}\right)^{1/3}, \left(\frac{64}{9}\right)^{1/3} \simeq 2$

(implementierungsabhängig)

→ Subexponentiell 

→ Leider trotzdem superpolynomiell 

Quantencomputer (Shor-Algorithmus)

→ Laufzeit $\propto N^3$

→ Polynomiell 



Peter W. Shor

Quantencomputer → exponentieller Geschwindigkeitsgewinn

Problemgröße \rightarrow Stellenzahl $N = \log m$ der zu faktorisierenden Zahl m

Lehmer-Powers continued fraction or via the Kraitchik polynomial

Laufzeit $\exp \left[\sqrt{2} N^{\frac{1}{2}} (\log N)^{\frac{1}{2}} \right]$

Pollard's method

\rightarrow Laufzeit $e \left(c N^{1/3} (\log N)^{\frac{2}{3}} \right)$

$\rightarrow c = \left(\frac{32}{9} \right)^{\frac{1}{3}}, \left(\frac{64}{9} \right)^{\frac{1}{3}} \simeq 2$

Shor's algorithm

Laufzeit N^3 Gatteroperationen

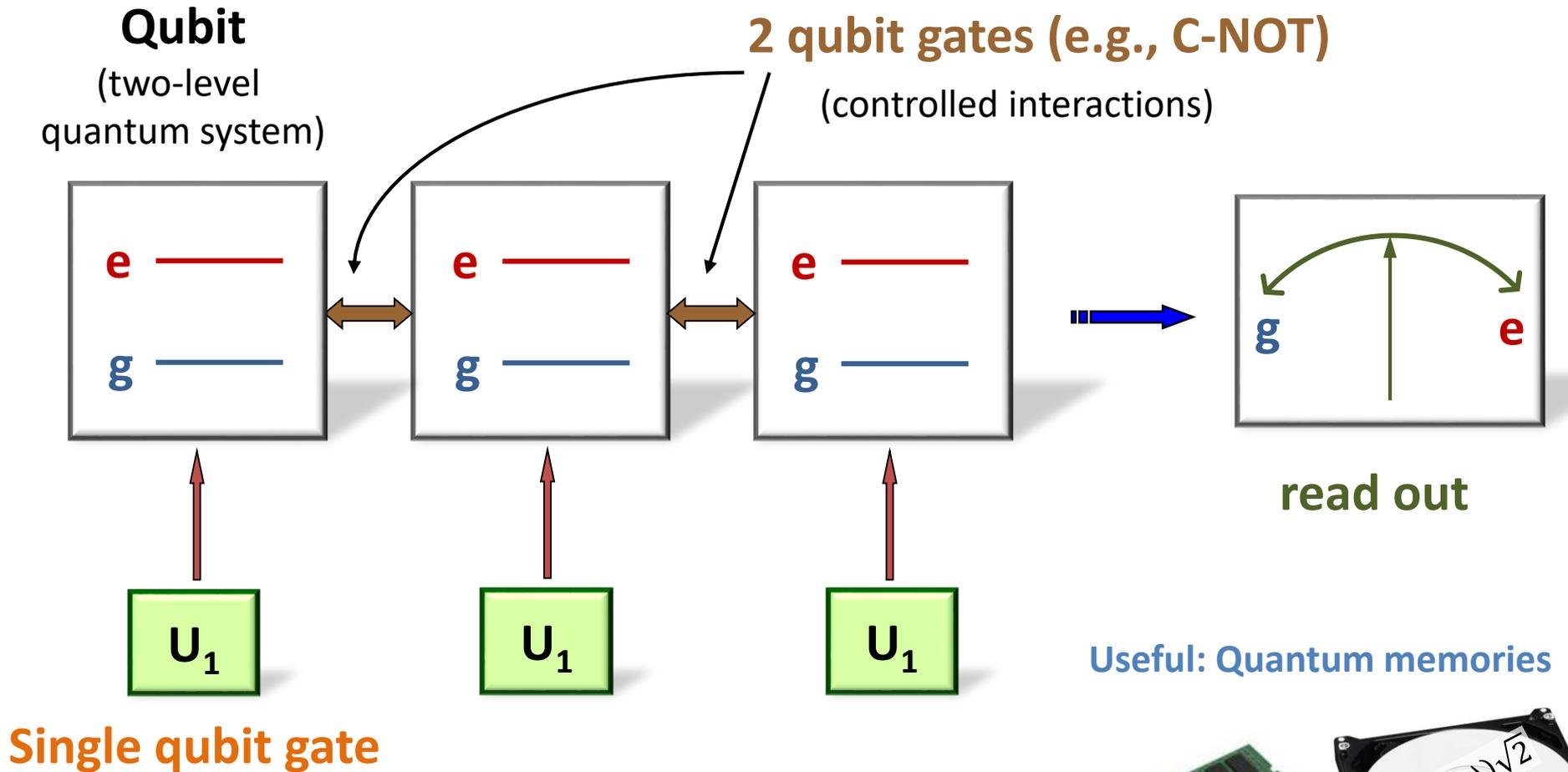
Reale Laufzeiten abhängig von Hardwareeigenschaften!

- \rightarrow Taktfrequenz, Zeit pro Gatteroperation, Parallelisierung etc.
- \rightarrow Für große Probleme ist der Quantenalgorithmus immer viel schneller
- \rightarrow Aber: Wenn die Quantenhardware zu schlecht ist, hilft der Quantenvorteil in der Praxis nicht

| Anwendung | Quantenalgorithmus | Quantenvorteil |
|--|---|--|
| Datenbanksuche | Grover-Algorithmus | $\propto \sqrt{N}$ anstatt $\propto N$ |
| Lin. Differentialgleichungen | HHL-Algorithmus | $\propto \log N$ anstatt $\propto N$ |
| Optimierungsprobleme <ul style="list-style-type: none">• Handlungsreisender• Warenströme• Verkehrsprobleme• Risikoanalyse | Quantenannealing | Polynomiell statt exponentiell |
| Quantenchemie <ul style="list-style-type: none">• Katalysatoren• Medizin• Materialforschung | Quantensimulation mit leicht kontrollierbarem Quantensystem | N statt 2^N Prozessor- oder Speicherelemente |

**Signifikantes Interesse aus der Industrie,
meistens als potenzieller Anwender**

Universal quantum processor: Required elements

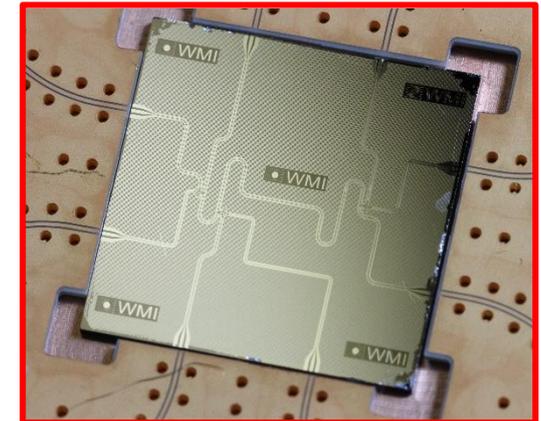


Quantenhardware – Herausforderungen

- Viel empfindlicher gegen kleinste Störungen als klassische Hardware
 - Komplizierte und weniger reproduzierbare Herstellung
 - Großer Fehlerkorrekturoverhead (Qubits \times 1000) beeinträchtigt Skalierbarkeit
 - Initialisierung, Kontrolle, und Auslese aufwendig
- Riesige Diskrepanz zwischen verfügbaren Quantensystemen (5-70 nicht fehlerkorrigierte Qubits) und algorithmischen Erfordernissen (Millionen fehlerkorrigierte Qubits)

Zahlreiche Realisierungsmöglichkeiten

- **Supraleitende Quantenschaltkreise**
- Ionenfallensysteme
- Quantencomputer auf Diamantbasis
- Quantencomputer auf Basis von Halbleiter-Quantenpunkten
- Marjorana-Systeme
- ...

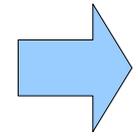
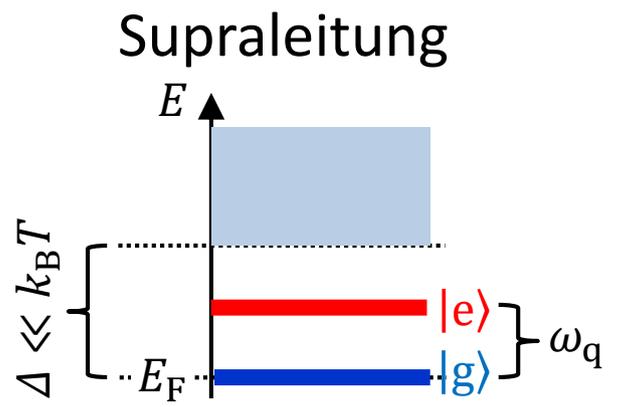


Derzeit vielversprechendste und fortgeschrittenste Plattform

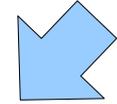
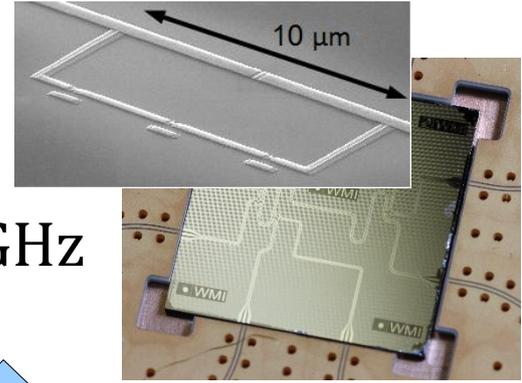


Quantencomputing mit supraleitenden Schaltkreisen

2019/2020
an der Universität Würzburg

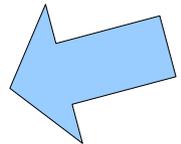
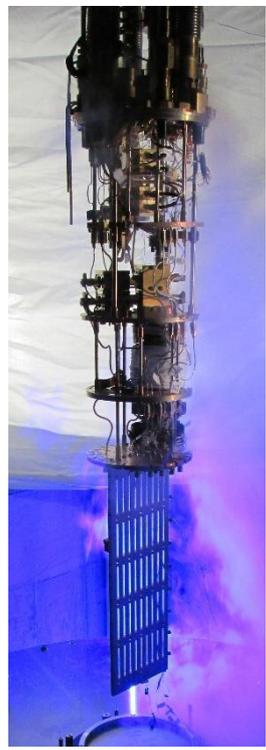


Aluminium
 $\Delta/h \approx 50 \text{ GHz}$



Quantenressourcen:
 Superposition & Verschränkung

$$| \frac{1}{2}e^- \rangle + | \frac{3}{2}e^- \rangle \quad | \text{clockwise } -I_p \rangle + | \text{counter-clockwise } +I_p \rangle$$

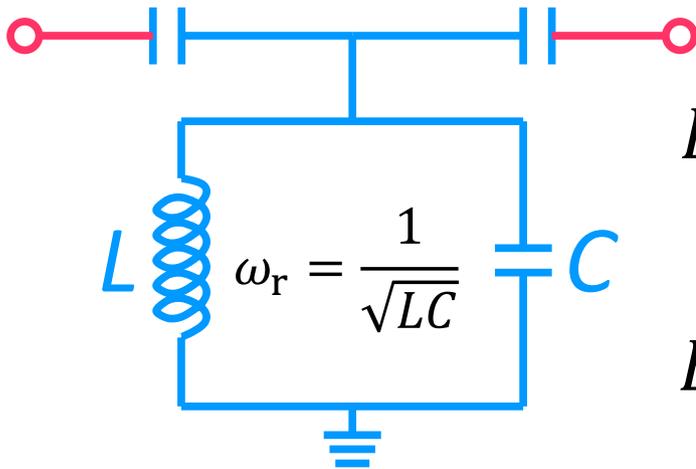


→ **Quantencomputing, Quantensimulation, Quantensensing**

Millikelvin-
 temperaturen
 $1 \text{ GHz} \Leftrightarrow 50 \text{ mK}$



LC-Resonator \rightarrow Box für Quantenmikrowellen

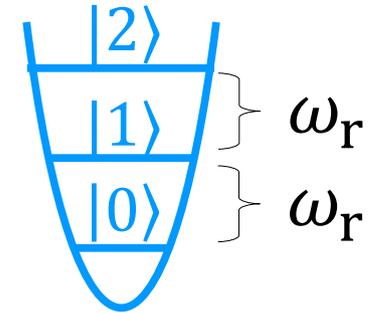


$$E_L = \frac{\Phi^2}{2L}$$

$$E_C = \frac{Q^2}{2C}$$

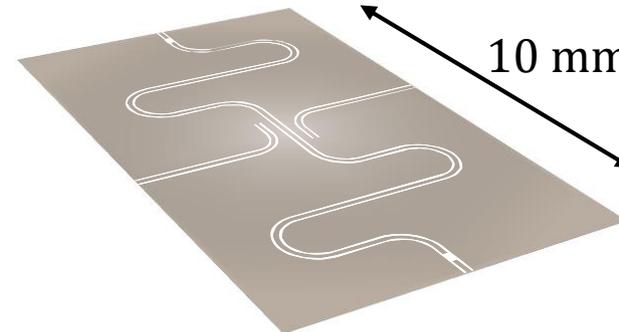
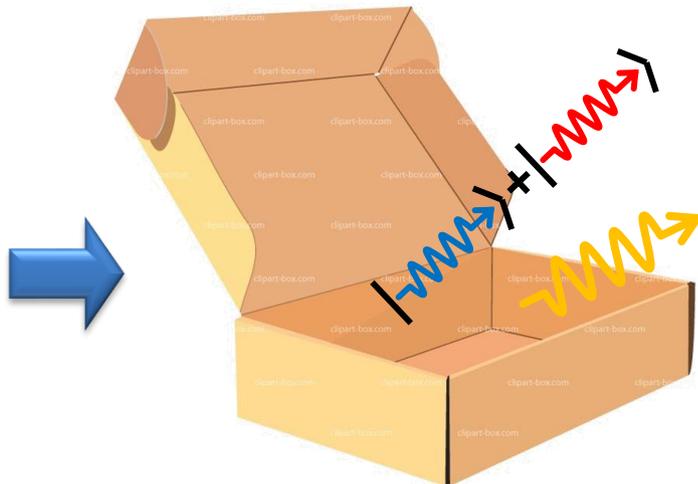


$$\hbar\omega_r > k_B T$$



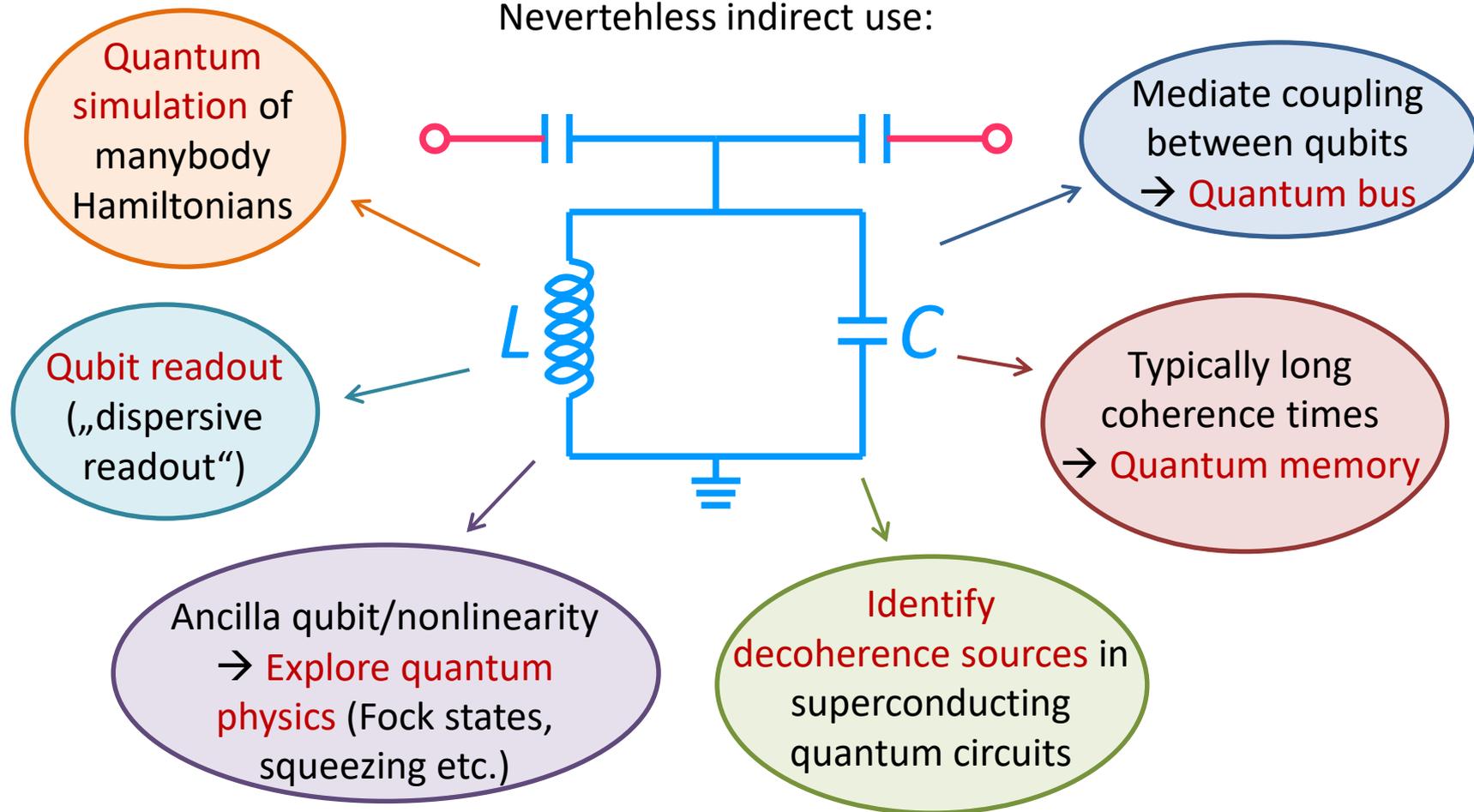
$$[\hat{\Phi}, \hat{Q}] = i\hbar$$

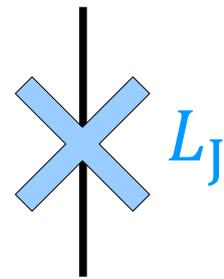
„Quantum 2.0“



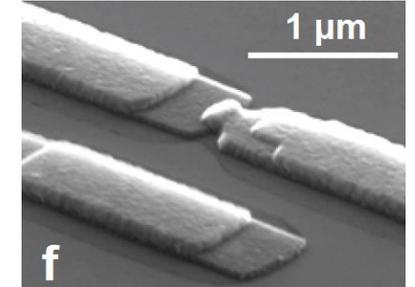
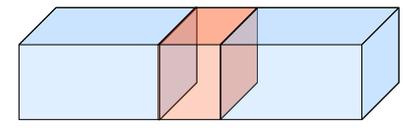
Quantum HO is linear \rightarrow Not a qubit \rightarrow Not directly useful for quantum computation!

Nevertheless indirect use:



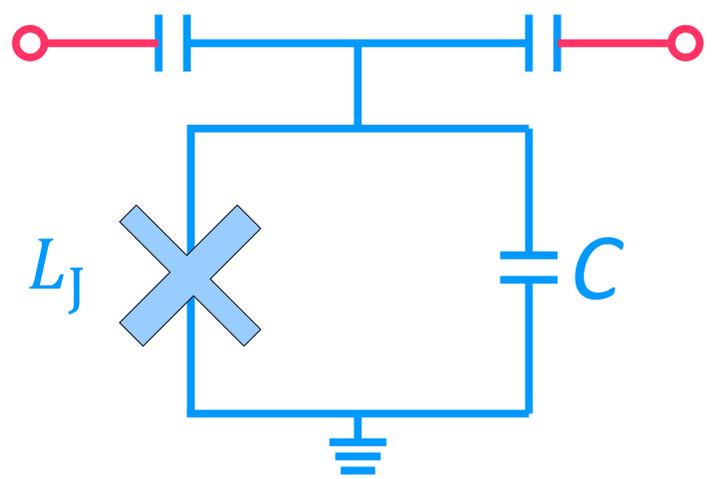


SIS Josephsonkontakt

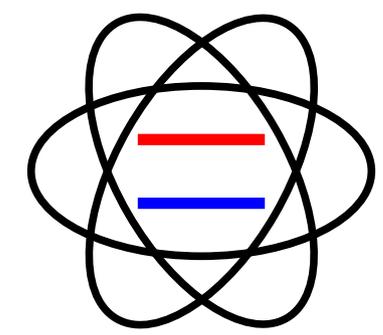
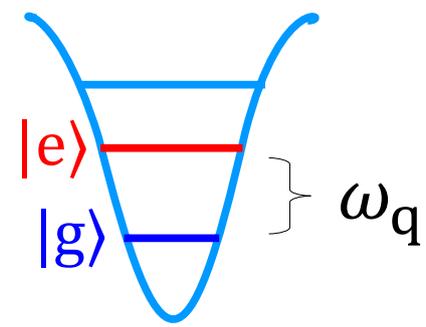


Josephsonindutivität L_J

Nichlinear, kann negativ sein, mit Magnetfeldern steuerbar

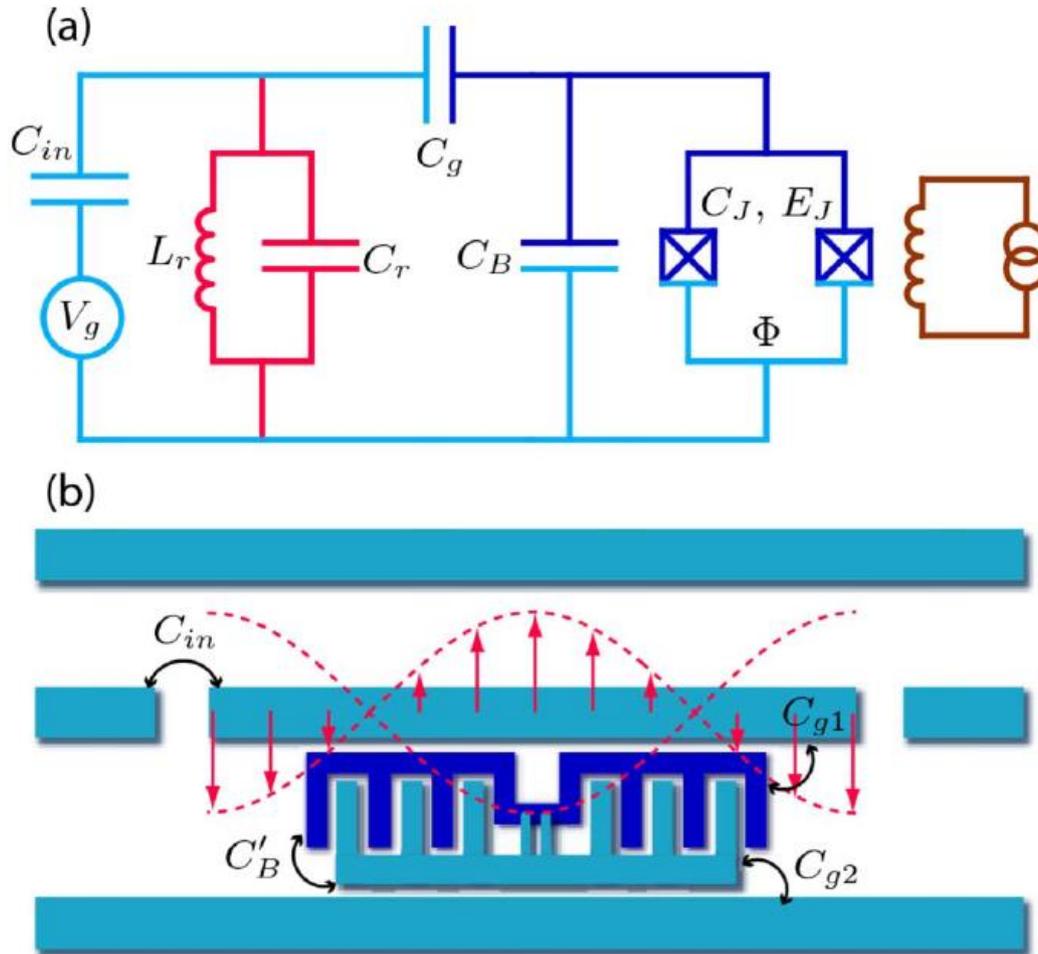


Supraleitendes Transmonqubit



Künstliches Zweiniveaunatom

J. Koch *et al.*, Phys. Rev. A **76**, 042319 (2007).



Embed into a resonator for
 → Readout
 → Filtering
 → Control

Currently most successful qubit
 with respect to coherence times

Coherence mostly limited by
 spurious TLS (defects) in substrate
 and metal-substrate interface

→ $T_1, T_2 \approx 50 - 150 \mu\text{s}$

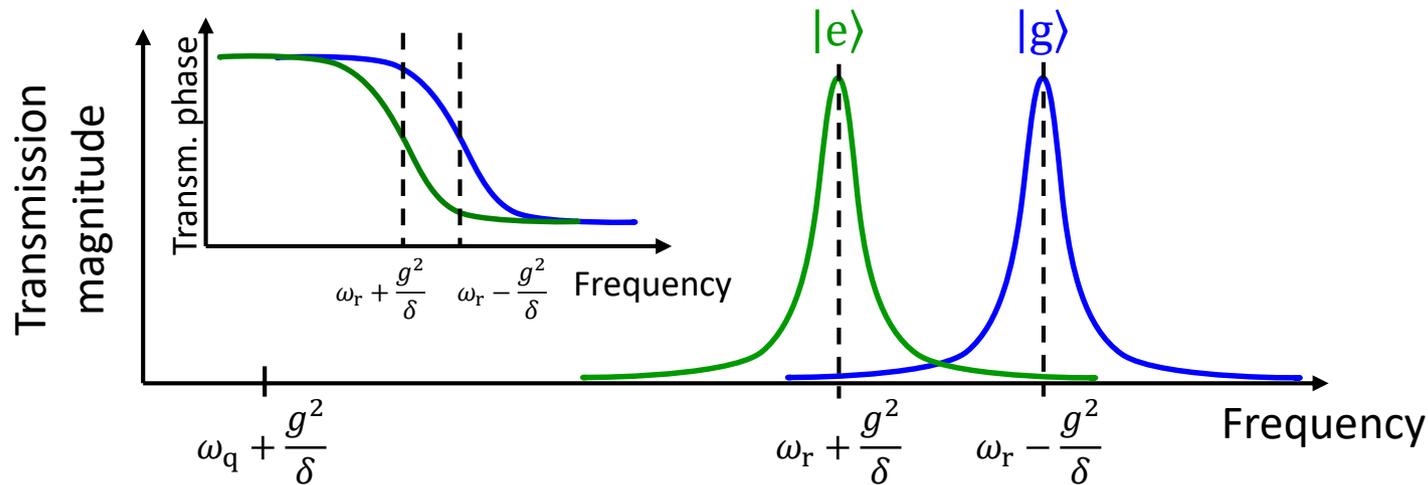
→ Workhorse of today's quantum computing efforts in
 superconducting circuits

→ Use resonator as readout device

→ Off resonance → Qubit resonator coupling induces qubit-state-dependent shift of the resonance frequency

$$\hat{H}_{JC}^{\text{int}} = \hbar \frac{g^2}{\delta} \hat{\sigma}_z \hat{a}^\dagger \hat{a} + \frac{\hbar g^2}{2\delta} \hat{\sigma}_z$$

$$\delta \equiv \omega_q - \omega_r$$



→ Two-tone spectroscopy

→ Send **probe tone** $\omega_{\text{rf}} = \omega_r + \frac{g^2}{\delta}$

→ Sweep **spectroscopy tone** ω_s

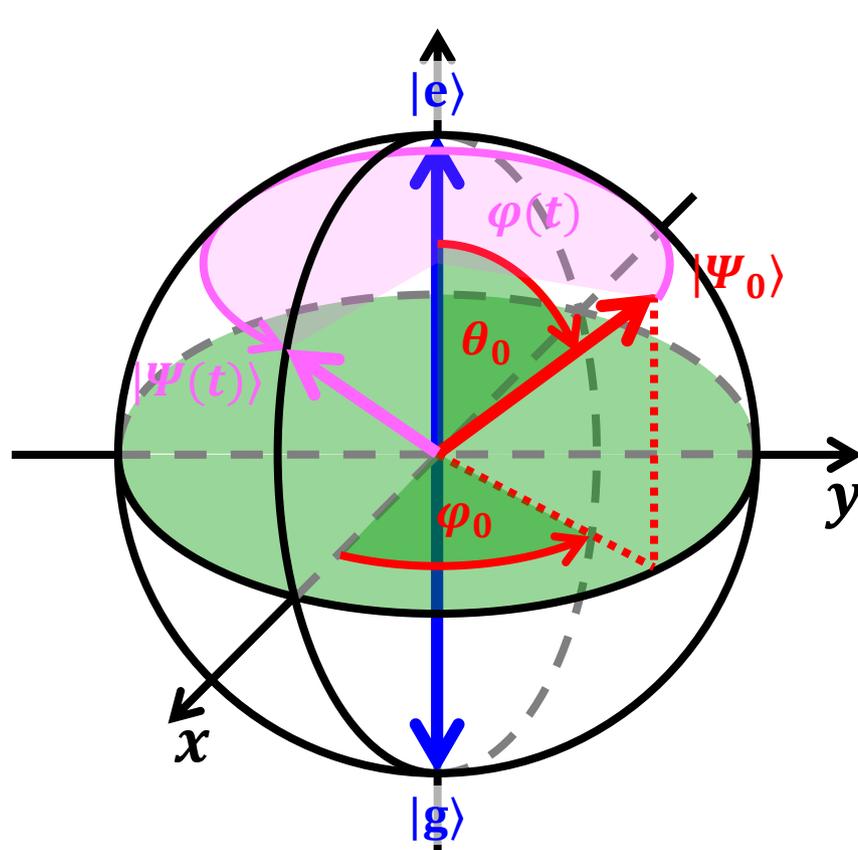
→ Qubit is in $|e\rangle$ → Transmission magnitude will drop drastically from blue to green curve

→ Mixed state → Reduced shift, but still ok

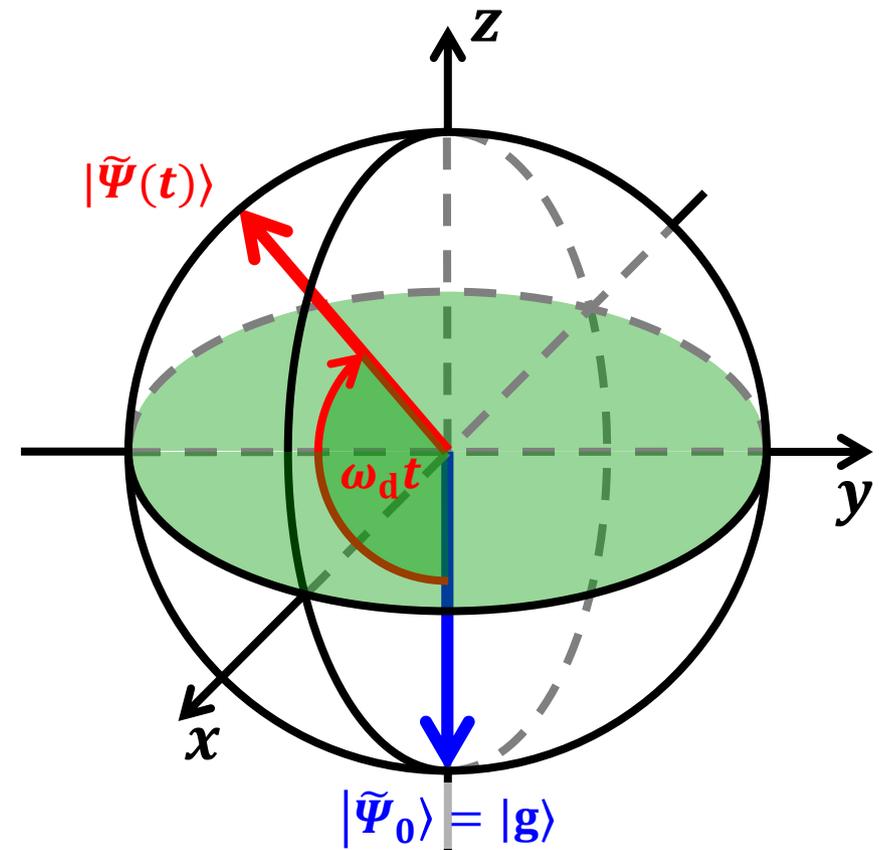
→ Transmission phase can also be used!

Qubit Hamiltonian equivalent to that of a spin in a static magnetic field

- Use NMR techniques to control qubit on Bloch sphere
- Rotating field in equatorial plane of the Bloch sphere → Population oscillations
- In practice, oscillating (microwave) fields are used



Phase control
→ Free (Larmor) precession



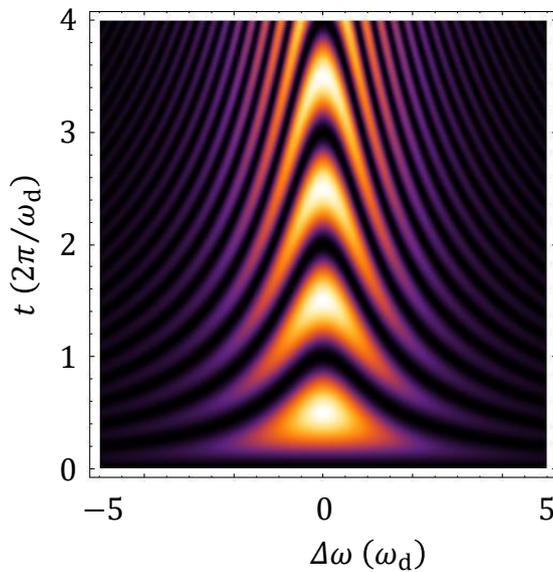
Population control
→ Equatorial microwave drive field

Drive qubit with microwave field

$$P_e = \frac{\omega_d^2}{\Delta\omega^2 + \omega_d^2} \sin^2 \left(\frac{t \sqrt{\Delta\omega^2 + \omega_d^2}}{2} \right)$$

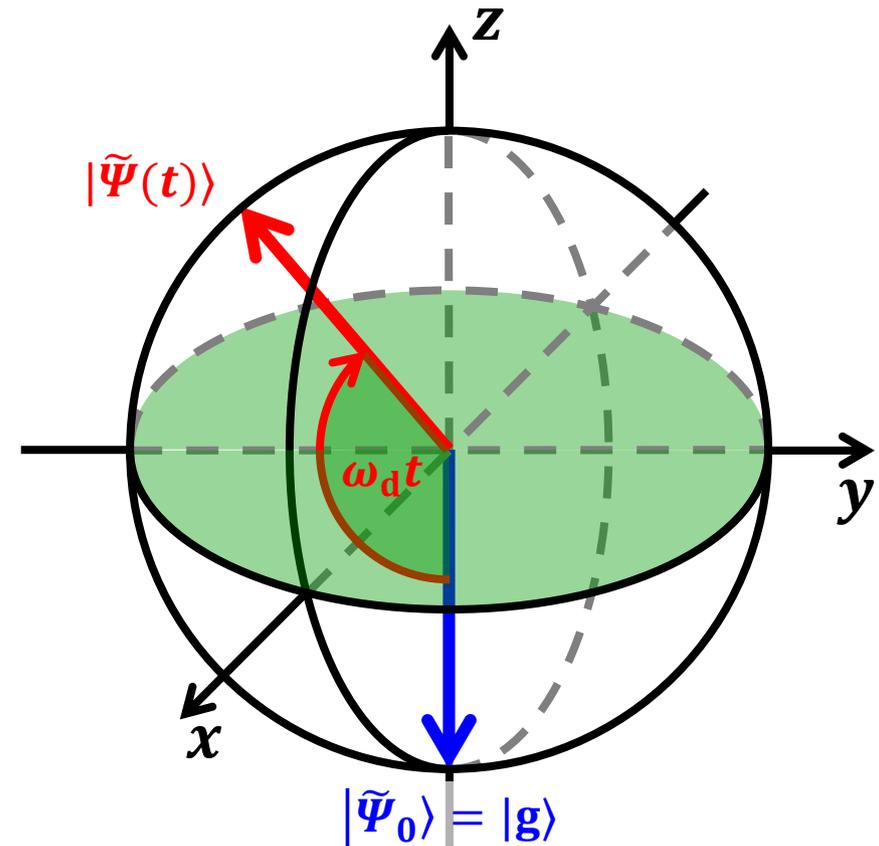
Finite detuning $|\Delta\omega| > 0$

- Additional precession at $\Delta\omega$
- Population oscillates faster
- Reduced oscillation amplitude

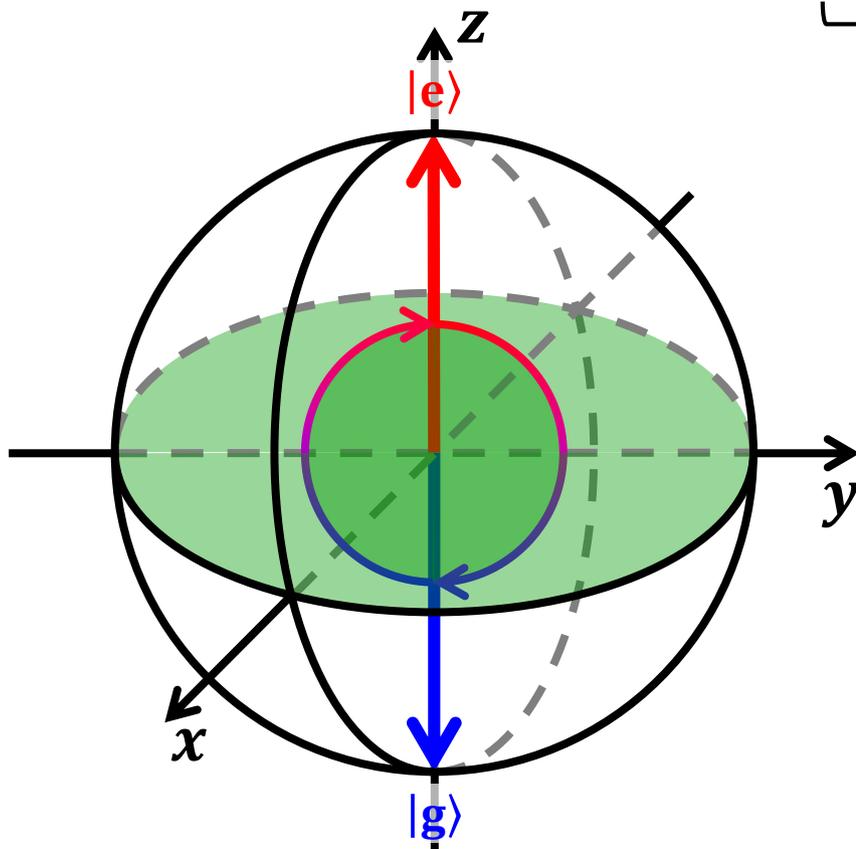
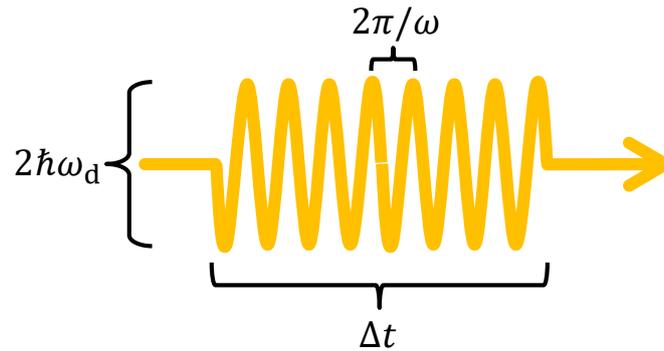


On resonance $\omega = \omega_q$

- Rotating frame cancels Larmor precession
- State vector $|\tilde{\Psi}(t)\rangle$ has no φ -evolution
- $|\tilde{\Psi}(t)\rangle = \cos \frac{\omega_d t}{2} |g\rangle + i \sin \frac{\omega_d t}{2} |e\rangle$
- Rotation about x -axis

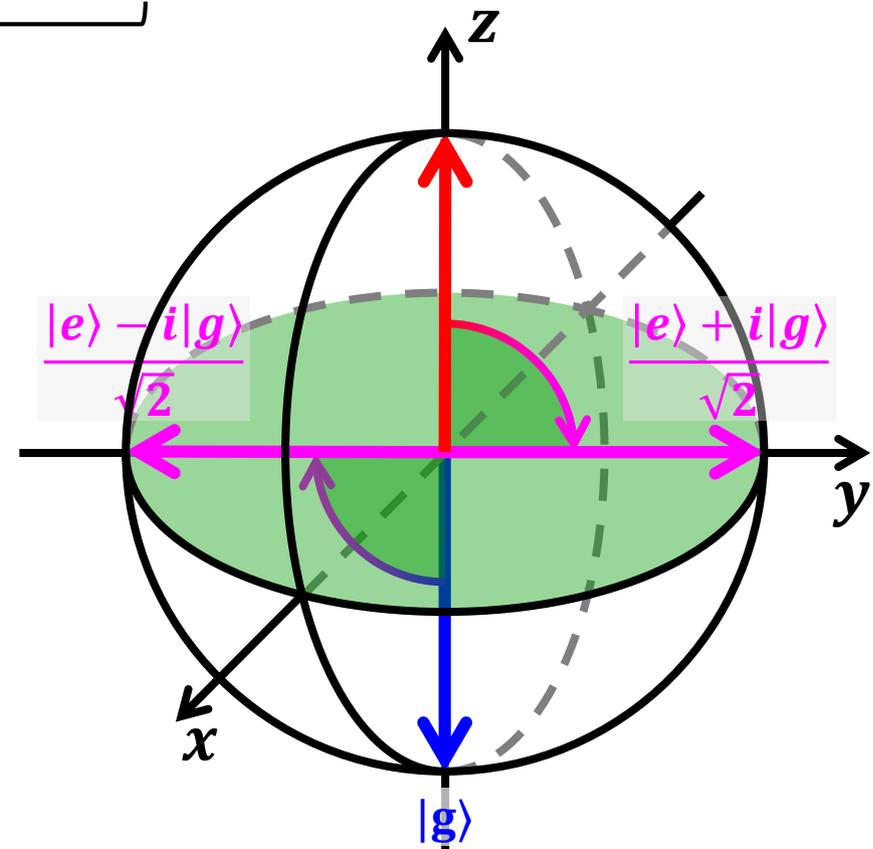


Important drive pulses on the Bloch sphere



π -pulse ($\omega_d \Delta t = \pi$)

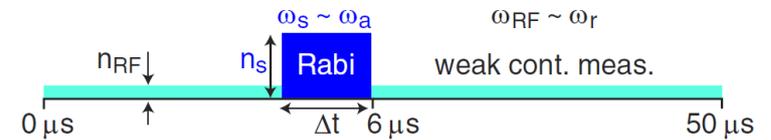
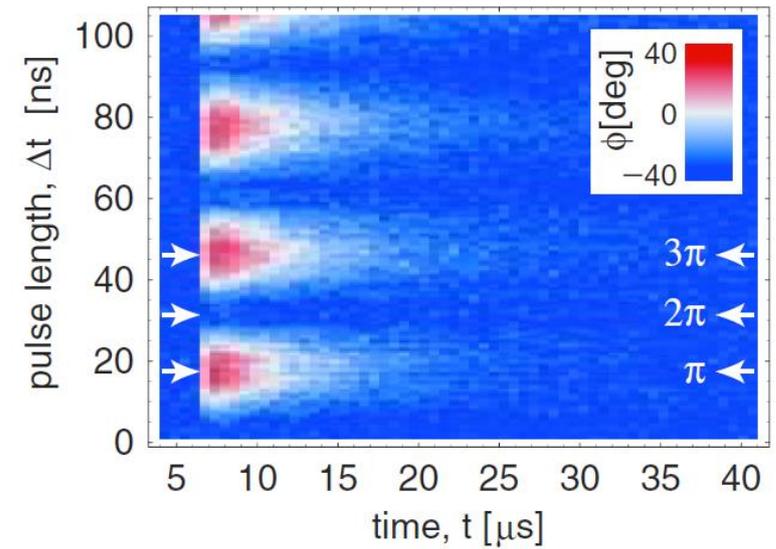
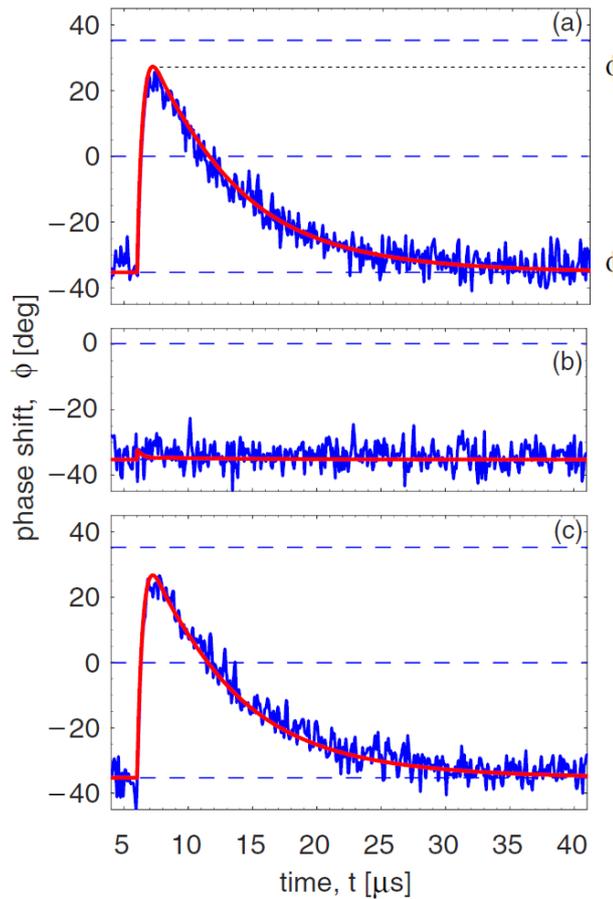
$|g\rangle \leftrightarrow |e\rangle$ flips, refocus phase evolution



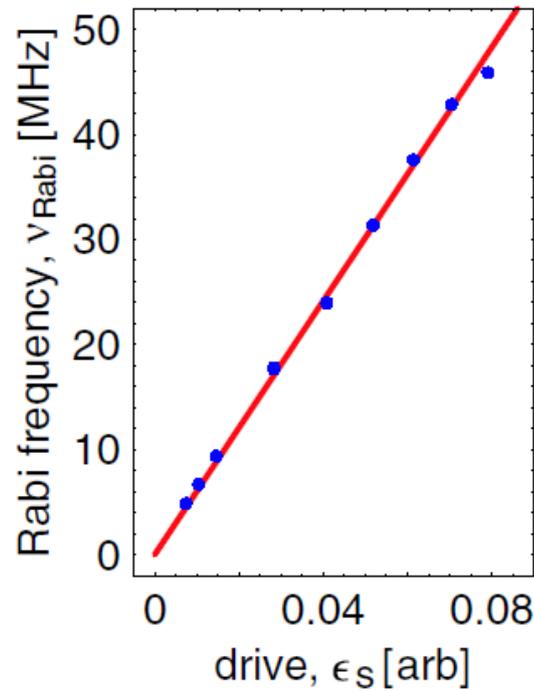
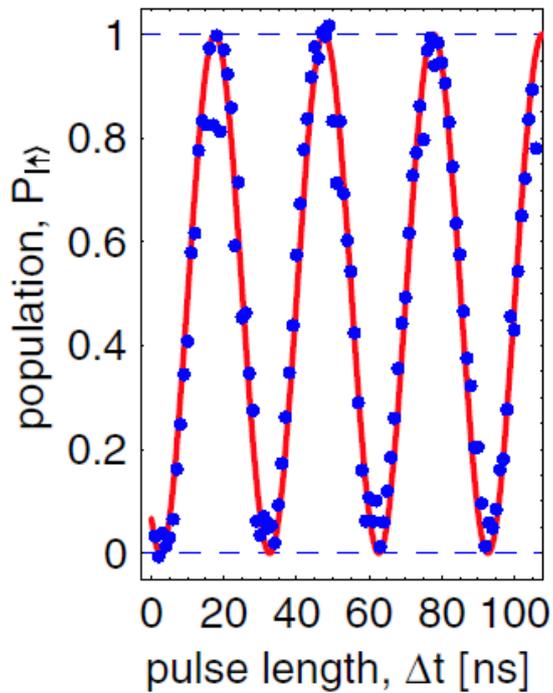
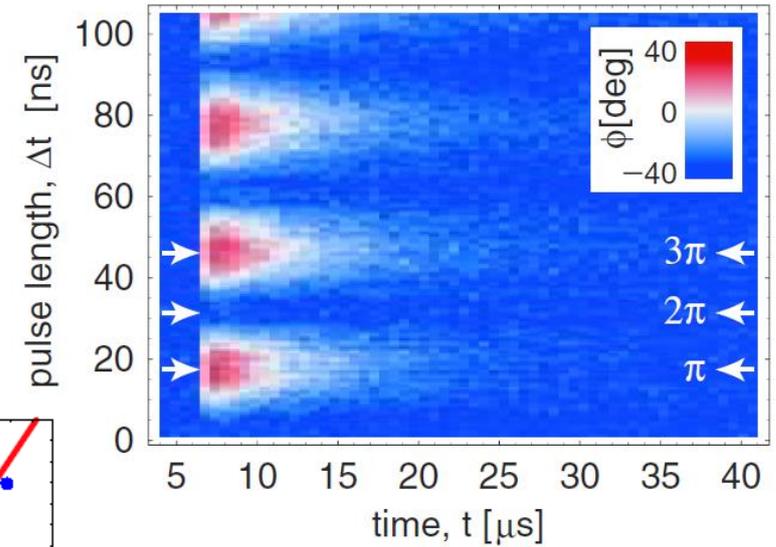
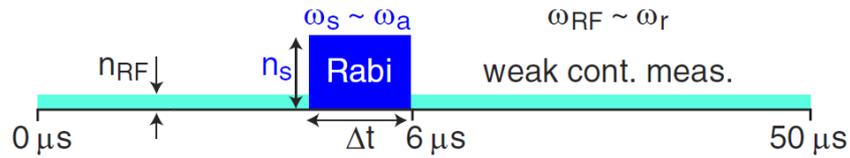
$\pi/2$ -pulse ($\omega_d \Delta t = \pi/2$)

Rotates into equatorial plane and back

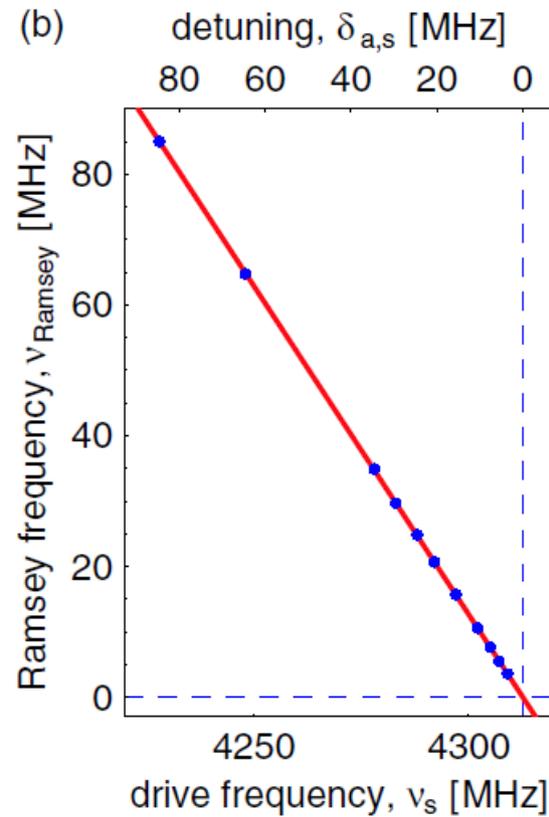
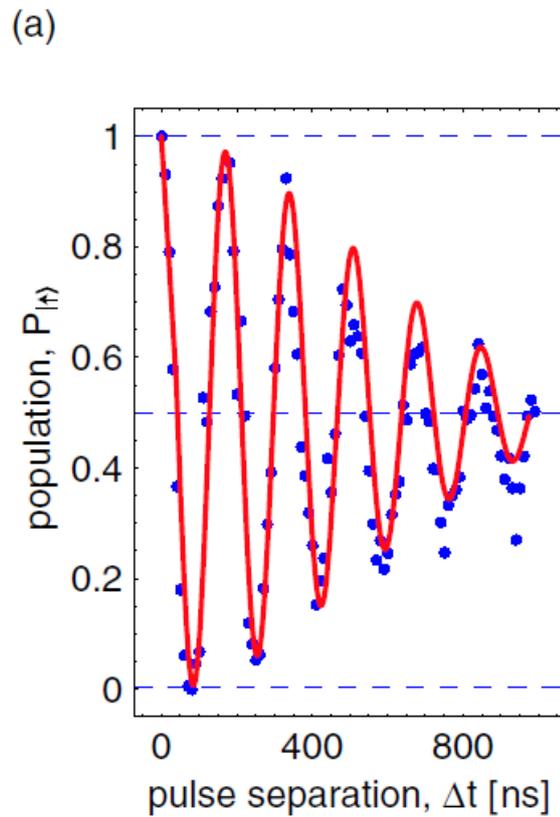
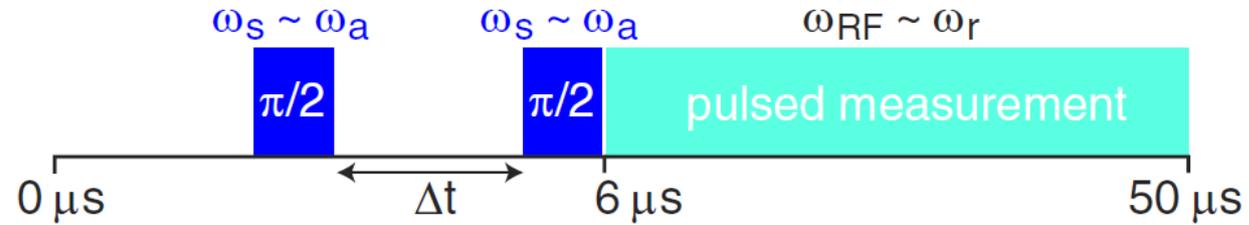
Energy relaxation and driven Rabi oscillations



Energy relaxation and driven Rabi oscillations



Ramsey fringes (T_2^*)



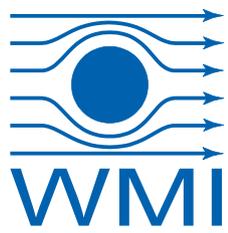
Nationale und Internationale Forschungsaktivitäten

folgendes Diagramm zeigt

die Ergebnisse



Quantenwissenschaften & -technologie



Extrem kompetitives Forschungsgebiet an internationalen Spitzenplätzen!



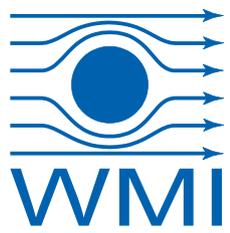
**notwendig:
international führendes
Zentrum in Deutschland**

350.000 m²
China Quantum Center in Hefei – 10 Billion Euro Funding





EU Quantenflaggschiff



QUANTUM FLAGSHIP

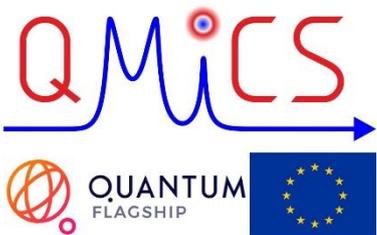
Discover Understand Engage Participate

The future is Quantum.

Fördersumme: 1 Mrd. €
Laufzeit: 10 Jahre

The Second Quantum Revolution is unfolding now, bringing enormous advancements in our ability to detect and manipulate quantum objects. The Quantum Flagship is driving this revolution in Europe.

<https://qt.eu/>



WMI koordiniert Projekt **“Quantum microwave communication and sensing”** & baut weltweit erstes Q-LAN im Mikrowellenbereich



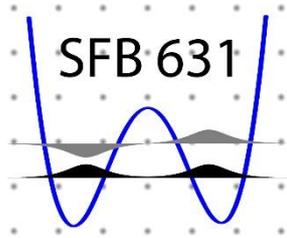
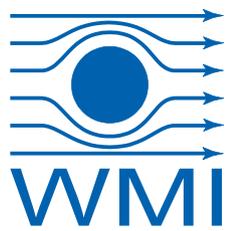
Supraleitendes Quantencomputing im EU-Flaggschiff



The image shows a screenshot of the OpenSuperQ website. The top navigation bar includes the OpenSuperQ logo and menu items: Project, Approach, Partners, News, Events, Publications, and Media. A prominent teal button in the center reads "Participate in our User Questionnaire". Below the navigation, the text "An Open Superconducting Quantum Computer" is displayed. At the bottom, there are three circular icons: "Project" (a microchip), "Approach" (a quantum circuit diagram), and "Partners" (a globe). A large yellow callout box with a white background and a yellow border is overlaid on the bottom right, containing the text "WMI Mitglied im „Basic Science Board“".



Supraleitende Schaltkreise in München



Sonderforschungsbereich 631 (2003-15)

Festkörperbasierte Quanteninformationsverarbeitung



Exzellenzcluster Nanosystems Initiative Munich (2006-18)

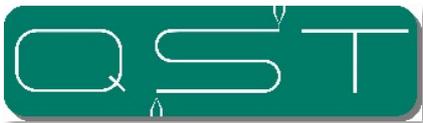
Forschungsbereich 1: *Quantum Nanophysics*



Graduiertenschulen:

Exploring Quantum Matter (2014-22)

Quantum Science & Technology (2016-21)



WMI Mitglied

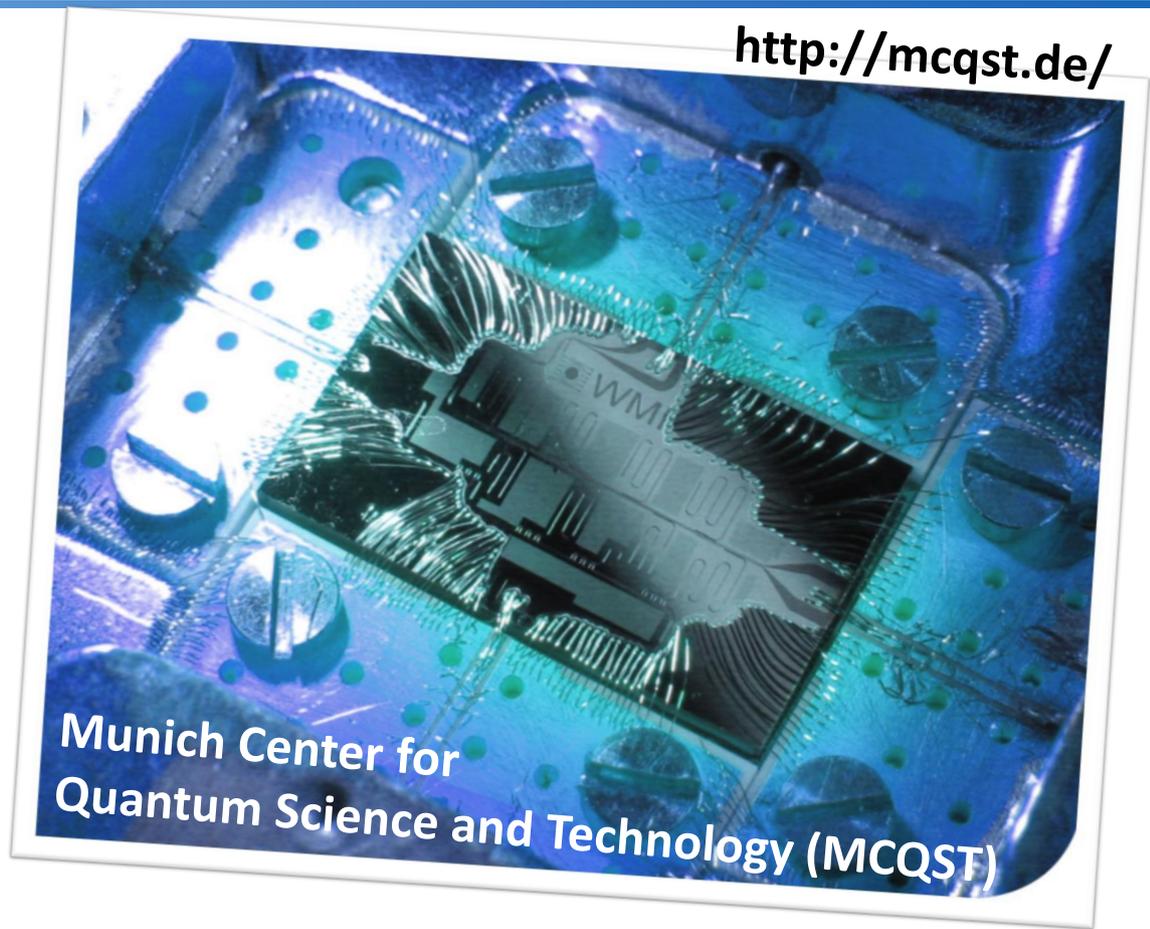
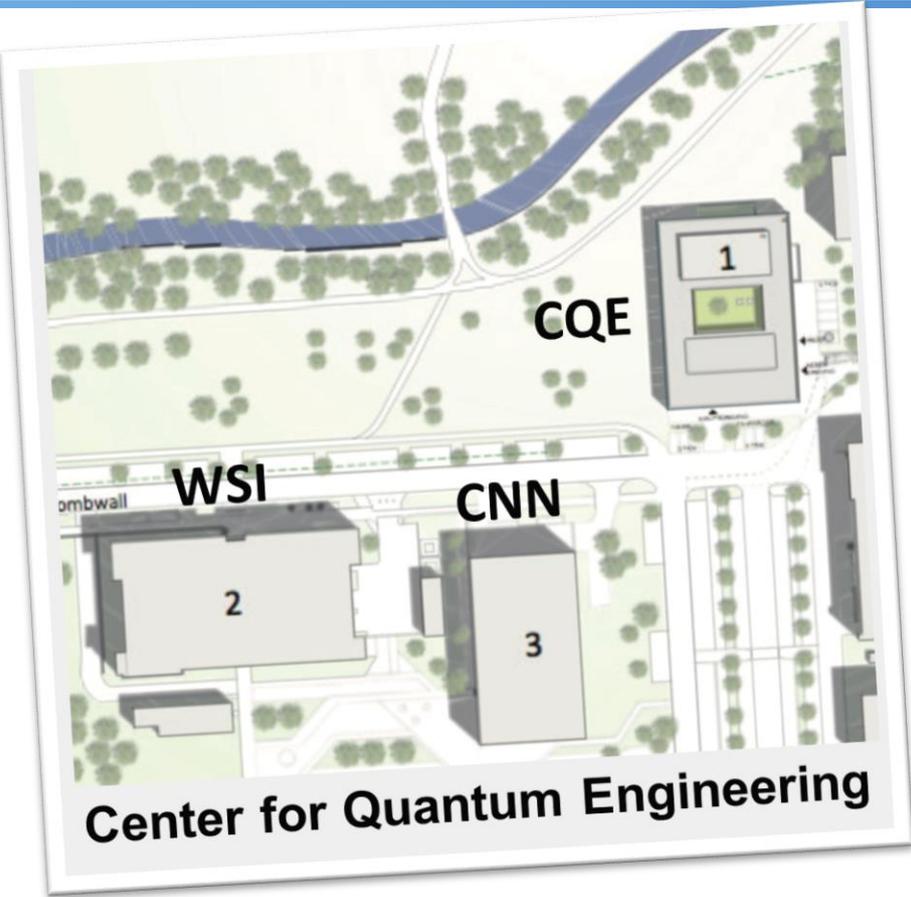
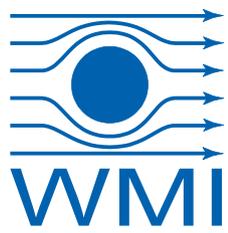


Münchener Quantenzentrum (seit 2014)

TUM, LMU, MPG, BAdW



Quantenengineering@ München



Forschungsbau: ca. 40 Mio. €
Fertigstellung: ca. 2022

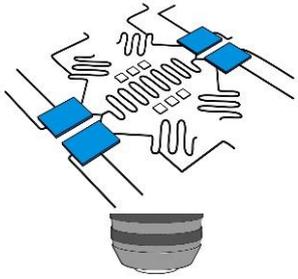
Exzellenzcluster: ca. 9 Mio. € / Jahr
Förderzeitraum: 2019 - 2025



WMI Mitglied



Deutsches
Museum

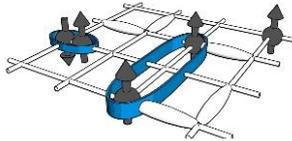


Skalierbare Quantencomputer

Schlüsselkomponenten, neue Architekturen, Software, ...

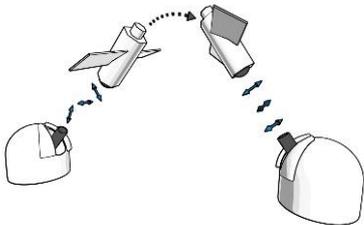
Quantensimulatoren

>10 000 Qubits, programmierbar, verbesserte Kontrolle, ...



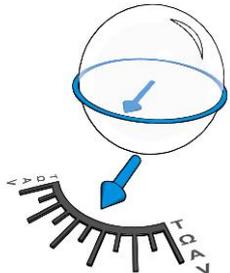
Quantenkommunikation

sicher, skalierbar, Basis für Quanteninternet, ...



Hybride Quantensysteme

Schnittstellen zwischen Technologieplattformen, topologische Systeme,

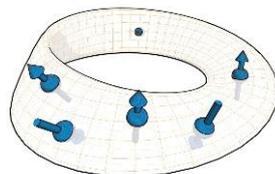


Kontrolltechnologie für Quantensysteme

optimale Kontrolle, Vielteilchensysteme, ...

Quellen für Quantenlicht & Quantensensoren

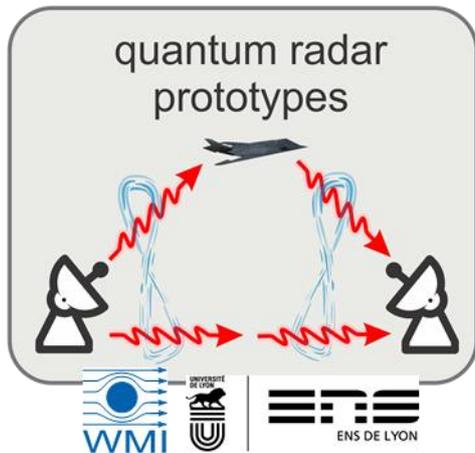
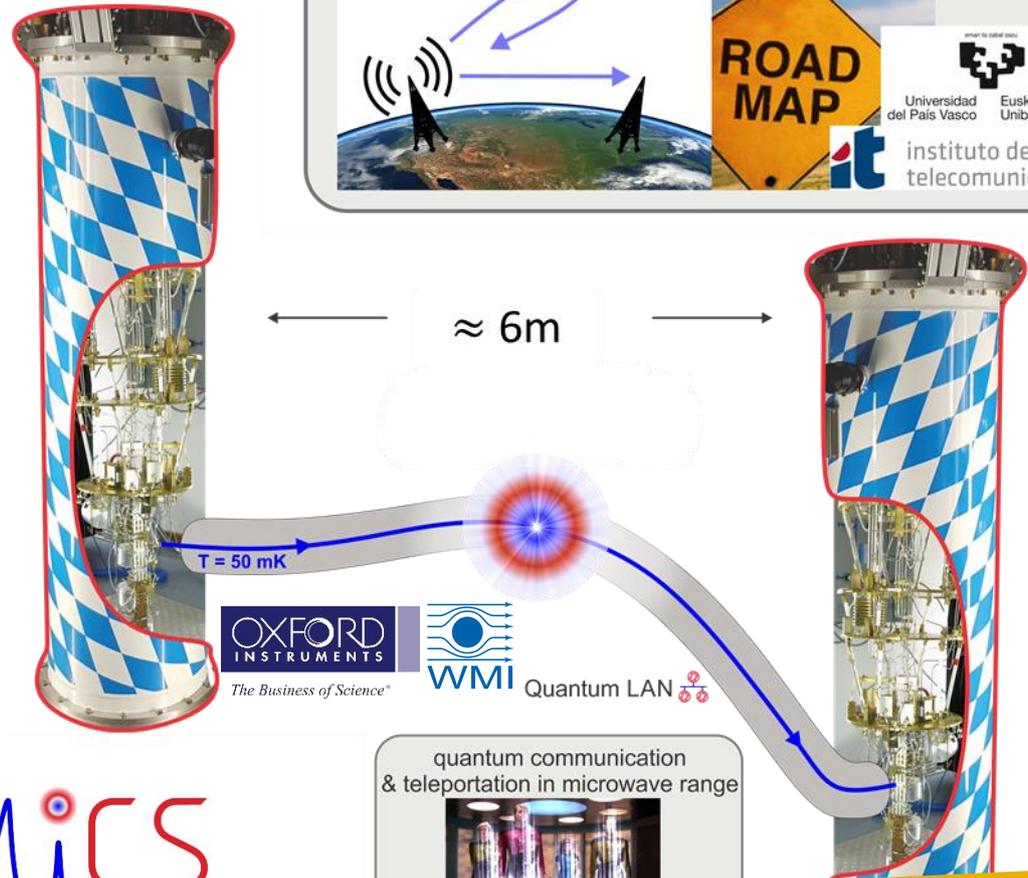
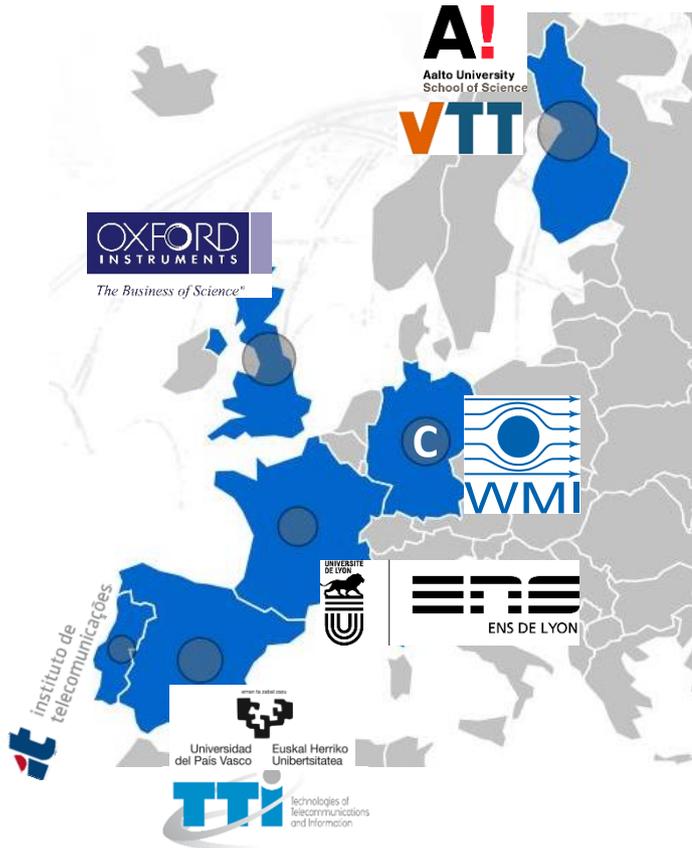
für Anwendungen in Metrologie, Quantennetzwerken, Biologie, Medizin



Quantenmaterialien

maßgeschneiderte Materialein, neuartige Q

WMI Mitglied

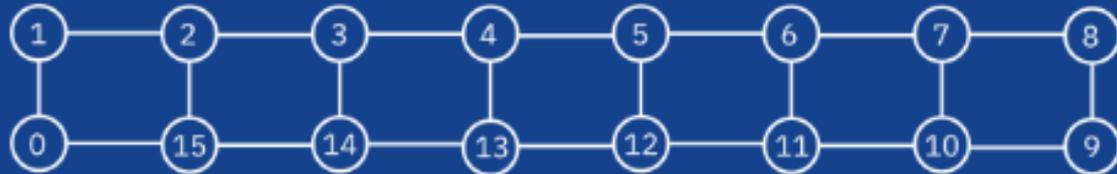
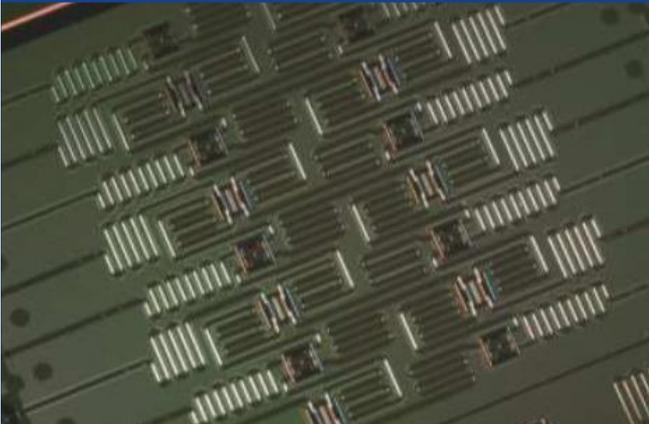


WMI koordiniert
 Flaggschiffprojekt QMiCS
<https://qmics.wmi.badw.de/>

Industrielle Aktivitäten zu supraleitenden Quantenschaltkreisen

Quantenschaltkreise
in anisotropen

IBM Q 16 Rueschlikon [ibmqx5]



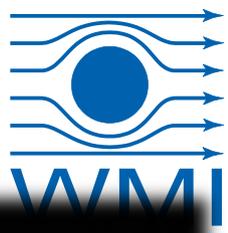
Last Calibration: 2018-08-08 04:13:34

Gatterpräzision > 99.6%

| | Q0 | Q1 | Q2 | Q3 | Q4 | Q5 | Q6 |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Frequency (GHz) | 5.26 | 5.40 | 5.28 | 5.08 | 4.98 | 5.15 | 5.31 |
| T1 (μs) | 27.60 | 35.10 | 45.30 | 53.00 | 31.00 | 45.80 | 34.90 |
| T2 (μs) | 20.80 | 57.70 | 59.40 | 95.60 | 50.90 | 47.70 | 32.00 |
| Gate error (10⁻³) | 2.48 | 2.83 | 2.96 | 1.68 | 1.99 | 2.13 | 3.35 |
| Readout error (10⁻²) | 6.32 | 8.32 | 16.34 | 3.92 | 10.36 | 5.64 | 8.36 |



IBM Q System One



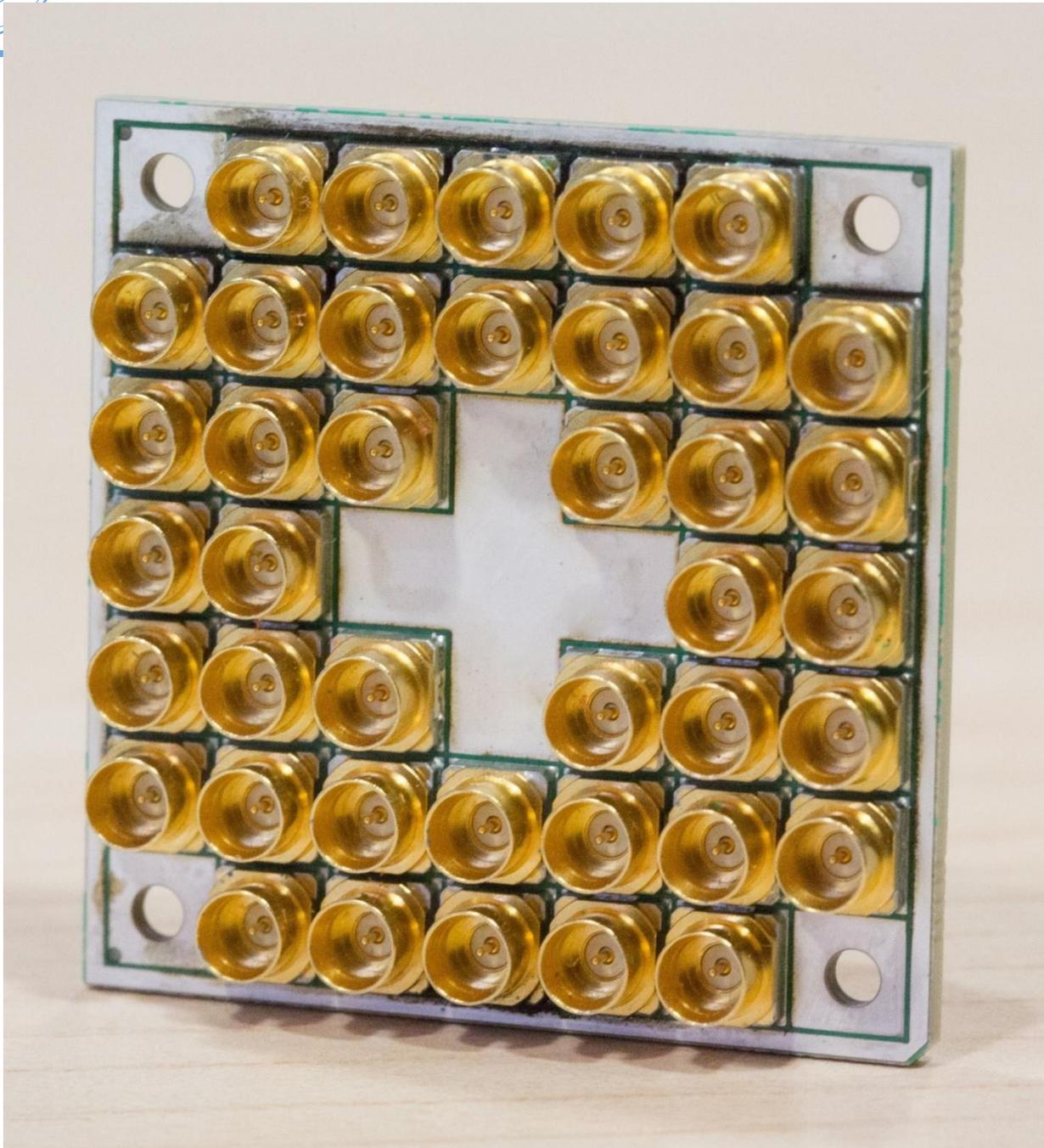
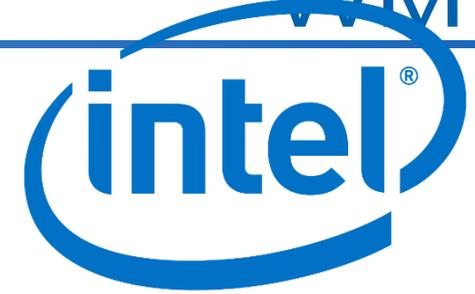
20 qubit machine



CES Las Vegas, January 2019



Intel Delivers 17-Qubit Superconducting Chip



Oct. 2017:

chip with advanced packaging delivered to QuTech

Intel's 17-qubit superconducting test chip for quantum computing has unique features for improved connectivity and better electrical and thermo-mechanical performance.

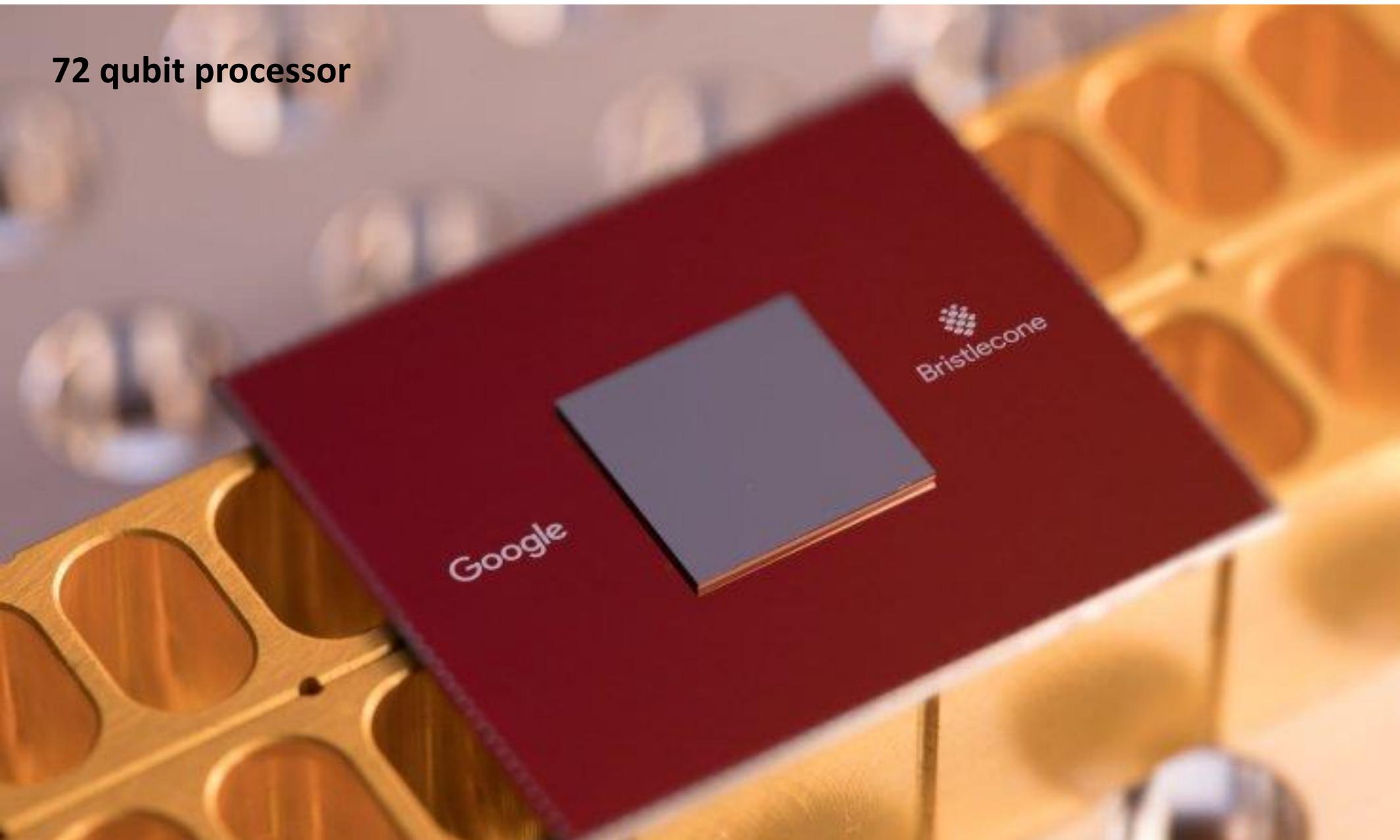
Google Announces 'Bristlecone' Quantum Computing Chip

By Ryan Whitwam on March 6, 2018 at 2:23 pm | [23 Comments](#)

Google has lifted the lid on its new quantum processor, **Bristlecone**. The project could play a key role in making quantum computers "functionally useful."

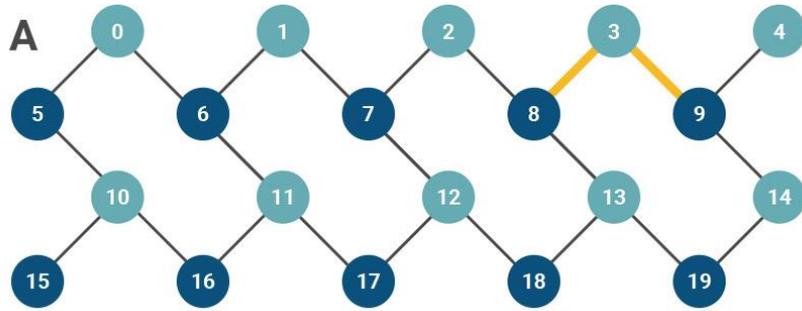
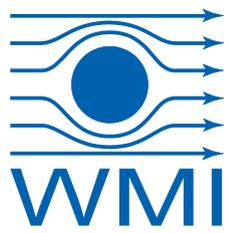
[f](#) [t](#) [G+](#) [r](#) [Y](#) 1.5K SHARES

72 qubit processor

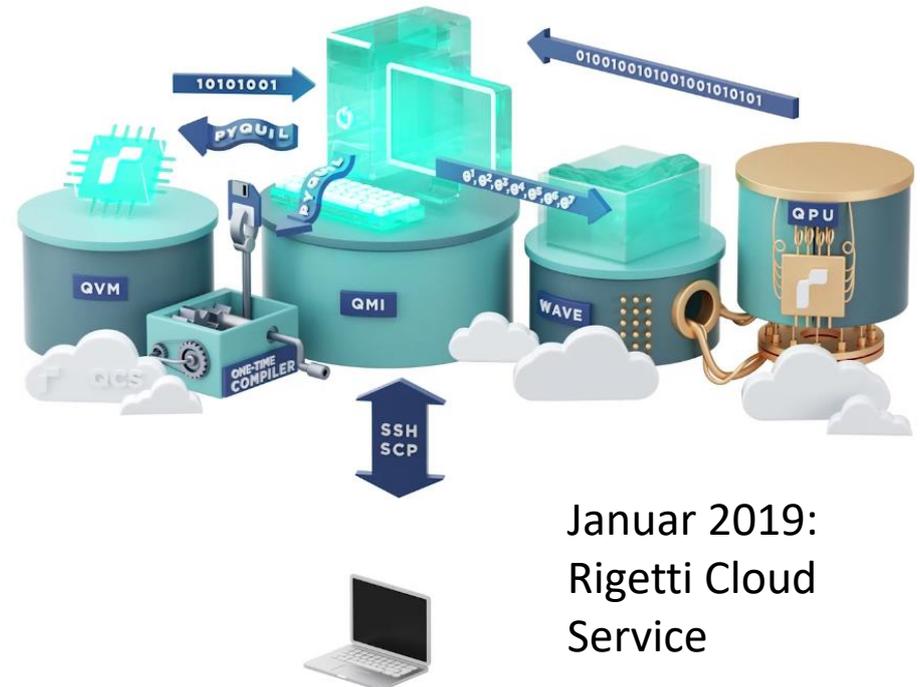
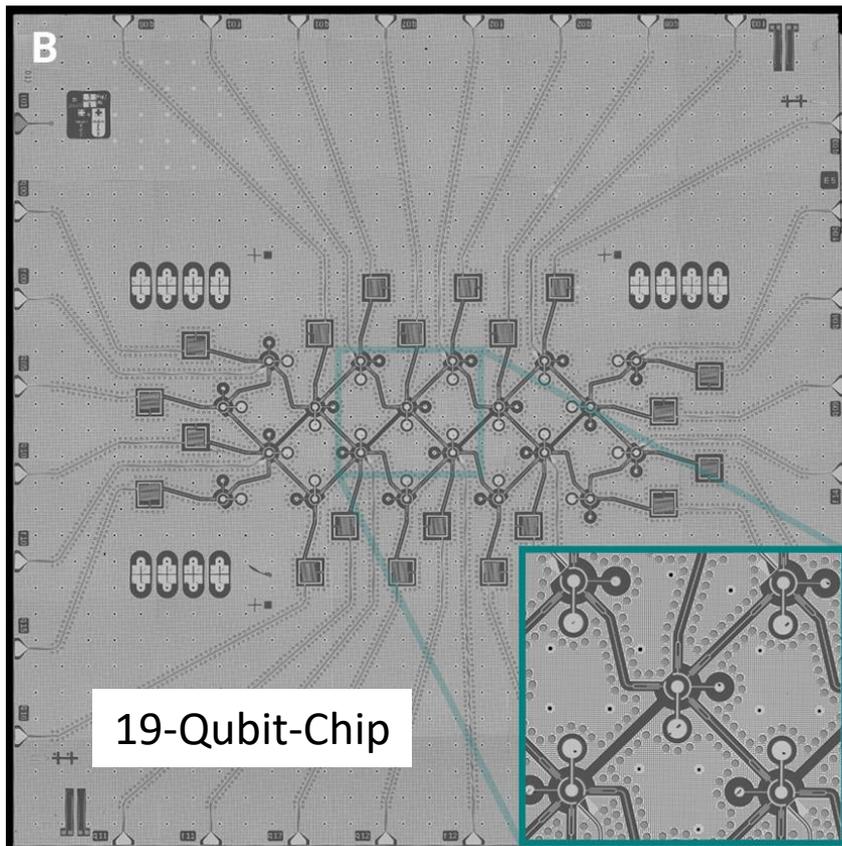




Rigetti Quantum Computing



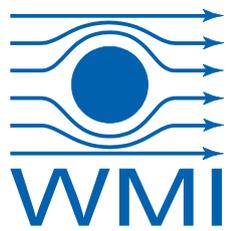
rigetti



Januar 2019:
Rigetti Cloud
Service



Viele Quantum Software Startups



| Partner | IBM/Qiskit | Google/Cirq | Rigetti |
|-------------------------------|------------|-------------|---------|
| Zapata Computing | X | X | X |
| Strangeworks | X | | X |
| QxBranch | X | | X |
| Quantum Benchmark | X | X | |
| QC Ware | X | X | X |
| Q-Ctrl | X | | |
| Cambridge Quantum Computing | X | X | |
| 1QBit | X | | X |
| Heisenberg Quantum Simulation | | X | X |
| Entropica Labs | | | X |
| Horizon Quantum Computing | | | X |
| OTI Lumionics | | | X |
| ProteinQure | | | X |
| Qulab | | | X |
| Riverlane Research | | | X |

**Pre-Threshold Quantumhardware ist bereits ein
Geschäftsmodell!**

Supraleitende 5-50 Qubitsysteme kommerziell verfügbar

Weg zu fehlerkorrigierten Qubits noch weit

Nachweis eines Quantenvorteils steht noch aus

Weg zu nützlichen Anwendungen noch sehr weit

Trotzdem Optimismus → Weiterhin öffentliche & private
Multimillionen-€-Investitionen

Langzeitvorhersagen...

“I think there is a world market for maybe five computers”

Thomas J. Watson, chairman of IBM, 1943

**“Whereas a calculator on the Eniac is equipped with 18000 vacuum tubes and weighs 30 tons,
computers in the future may have only 1000 tubes and weigh only 1½ tons”**

Popular Mechanics, March 1949

“There is no reason anyone would want a computer in their home”

Ken Olson, president, chairman and founder of DEC, 1977

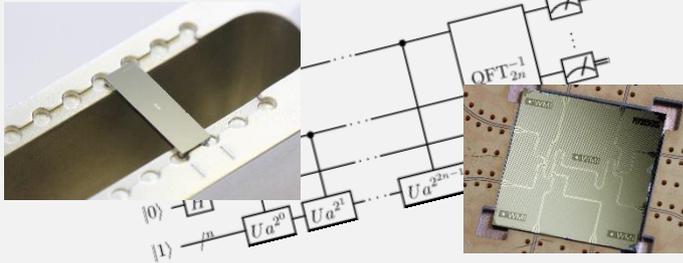
... sind meistens falsch !!!

Epilog: Supraleitende Quantenschaltkreise Quantenmikrowellen

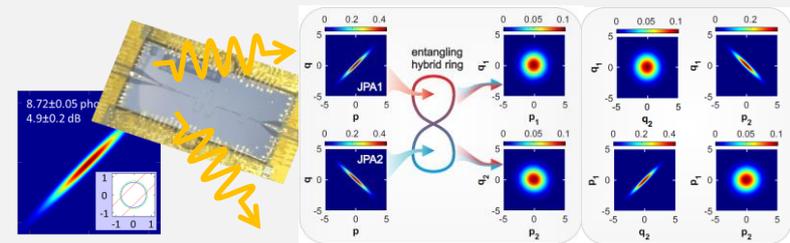
Quantenmikrowellen

Quantenschaltkreise

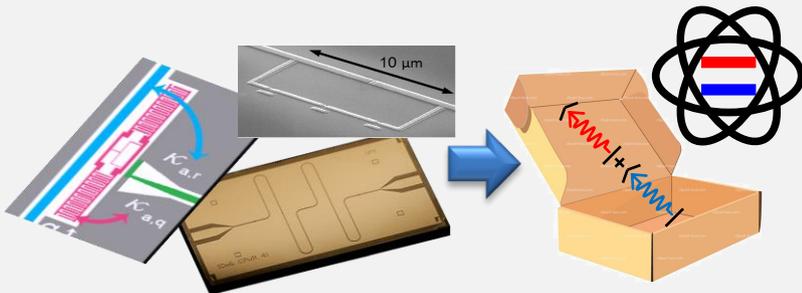
Grundlagen für Quantencomputing und -simulation



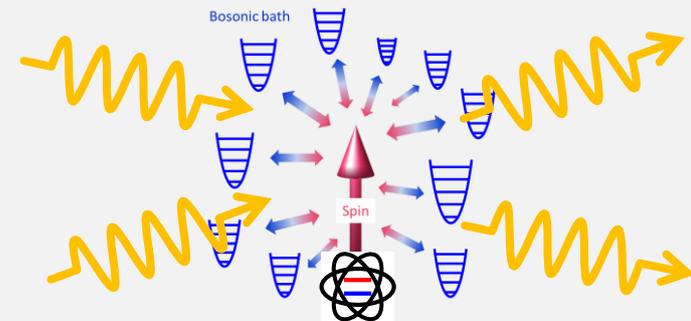
Quantenkommunikation und -sensorik mit Mikrowellen



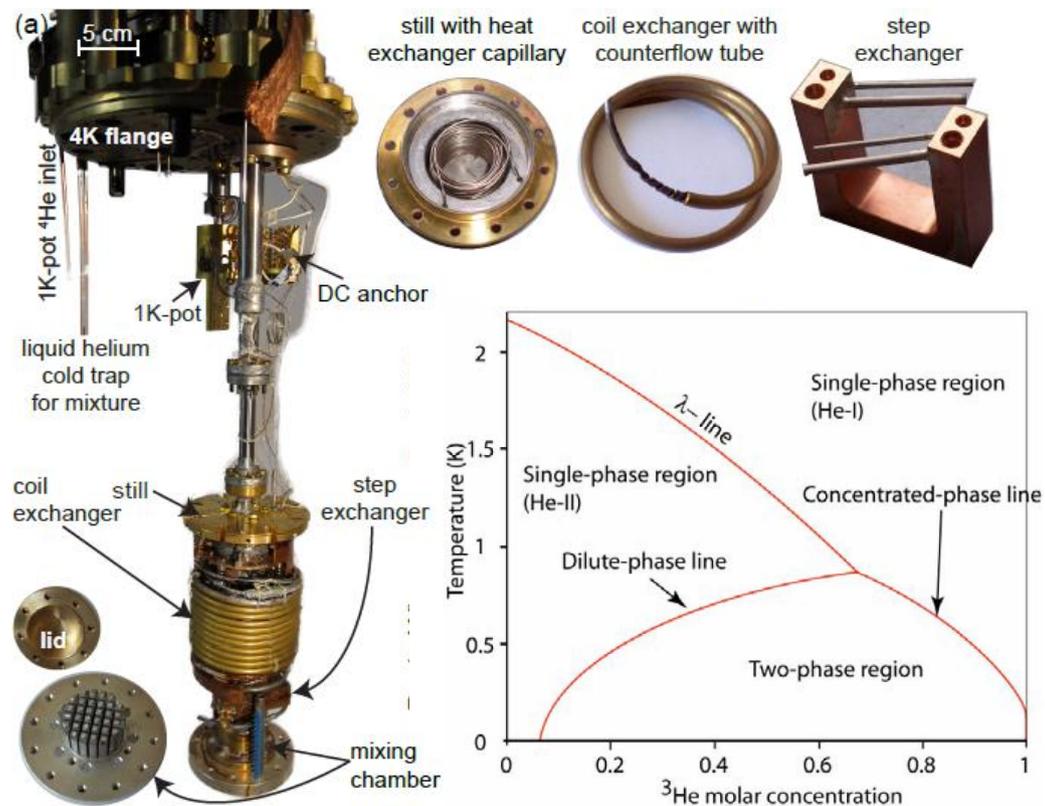
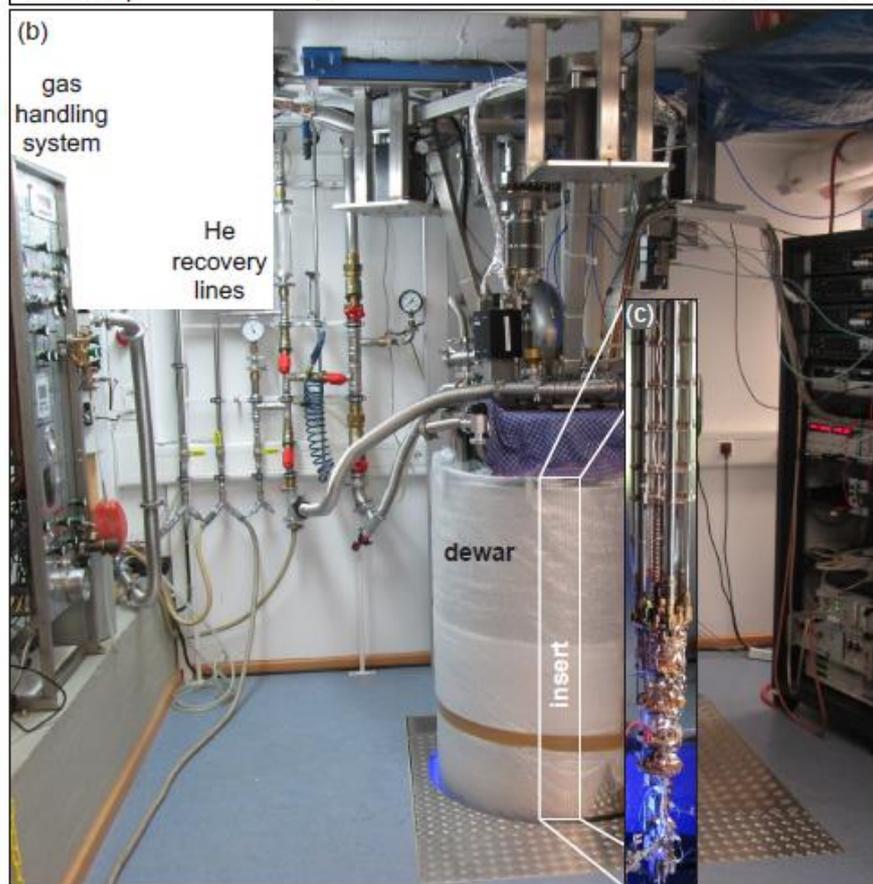
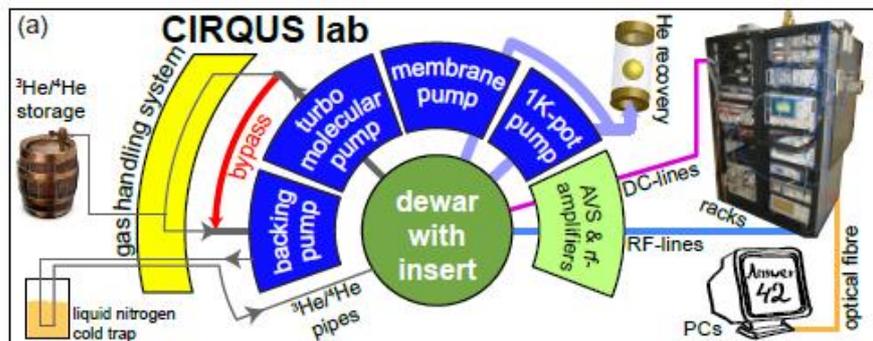
Licht-Materie-Wechselwirkung



Quantenmikrowellenphotonik



Quantencomputing @WMI → Derzeit eher
Grundlagenforschung als Hardwareskalierung



Commercially available
WMI: home-made cryostat

Typische Setups

