Quantentechnologie

Von den Grundlagen zur industriellen Anwendung

PD Dr. habil. Sascha Mehlhase (Munich Quantum Valley)

Kurze Geschichte der Quantenphysik

Über 100 Jahre von den Anfängen bis heute

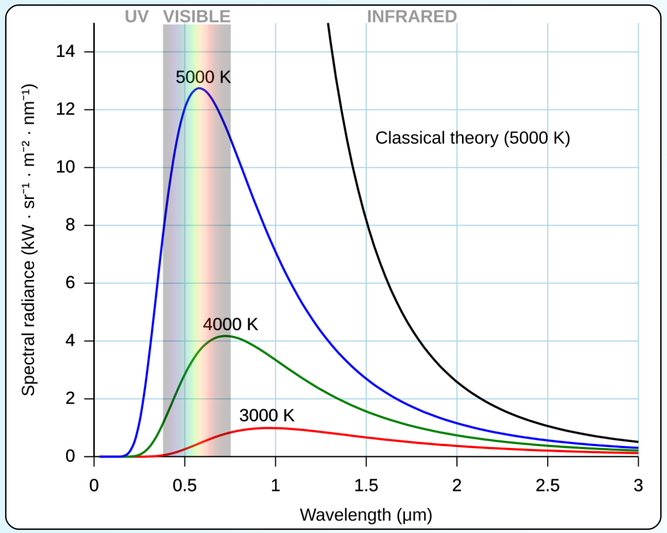


- 1900 schlägt **Max Planck** vor, dass die Abstrahlung von Schwarzen Körpern in ‘Energiepaketen' erfolgt und führt das nach ihm benannte Wirkungsquantum *h* ein

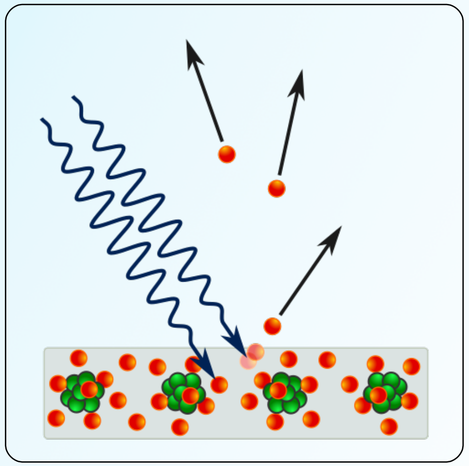


- 1905 erklärt **Albert Einstein** den photo-elektrischen Effekt über die Quantifizierung der Energie (und später des Impulses) des Lichts

- 1909 gibt **Einstein** erste Hinweise auf Welle-Teilchen-Dualismus



WikiMedia

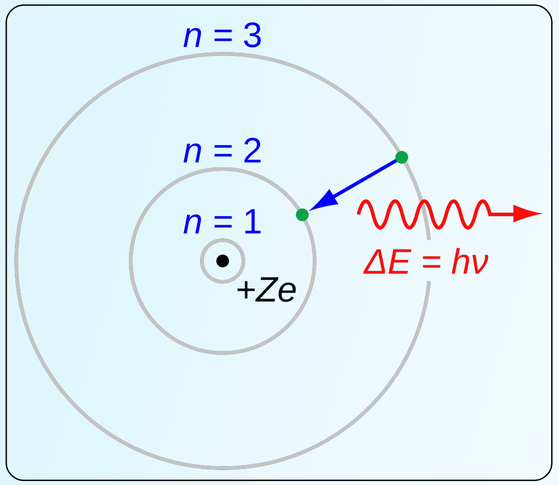


WikiMedia | Ponor

Kurze Geschichte der Quantenphysik

Über 100 Jahre von den Anfängen bis heute

- 1910–1918 entwickelt **Niels Bohr** sein Atommodell
- 1923 postuliert **Louis de Broglie** Materiewellen bzw. den Welle-Teilchen-Dualismus des Elektrons
- 1925 fand **Werner Heisenberg** den Ansatz aus dem die Quantenmechanik entwickelt wurde
- mit **Max Born** und **Pascual Jordan** entwickelte sich daraus eine anwendbare Theorie



WikiMedia | JabberWok

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{m \cdot v}$$

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{\hbar}{2} \qquad \Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}$$

$$\hbar = \frac{h}{2\pi}$$

Kurze Geschichte der Quantenphysik

Über 100 Jahre von den Anfängen bis heute

- 1925/26 entwickelt **Erwin Schrödinger** die nach ihm benannte Gleichung und begründet die Wellenmechanik als Beschreibung der Quantenmechanik

$$i\hbar\frac{\partial\psi}{\partial t} = \hat{H}\psi$$

- 1928 bringt **Paul Dirac** Spezielle Relativitäts-theorie und Quantenmechanik zusammen

$$i\gamma^\mu\partial_\mu\psi = m\psi$$

- darum feierte die Welt 2025 das 100-jährige Jubiläum der Quantenmechanik

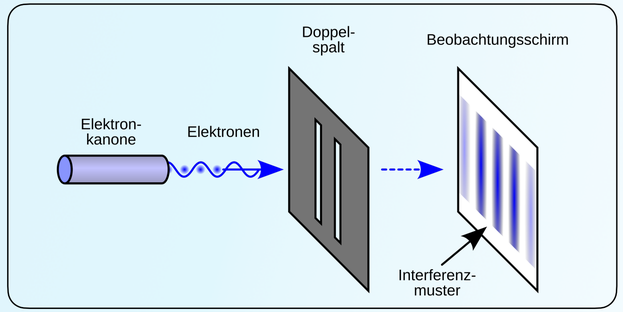
INTERNATIONAL YEAR OF
Quantum Science
and Technology

Quantum2025

Grundlagen der Quantenphysik

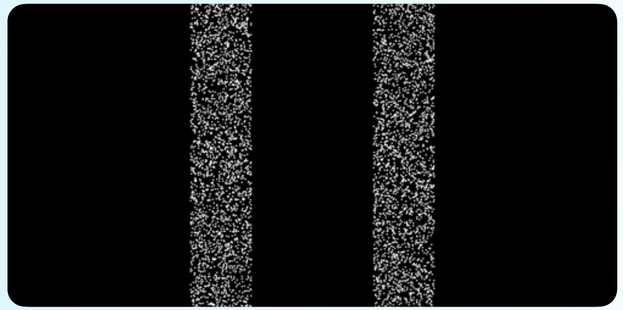
Welle-Teilchen-Dualismus

- **Doppelspalt**-Experiment verdeutlicht Wellennatur der Materie



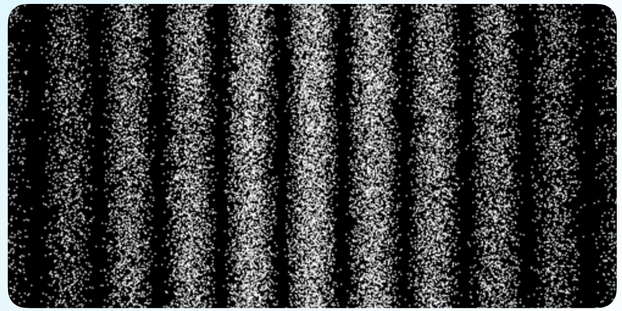
WikiMedia | NekoJaNekoJa, J. Kalliauer

klassisches Streumuster

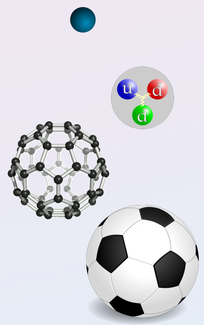


WikiMedia | JasperOCommons

quantenmechanisches Interferenzmuster



MikiMedia | J. Olbrich



WikiMedia | J. Rybak
WikiMedia | Sponk

Objekt	Masse	Wellenlänge
Elektron	$9{,}1 \cdot 10^{-31}$ kg	36 µm
Neutron	$1{,}7 \cdot 10^{-27}$ kg	20 pm
C_{60}	$1{,}2 \cdot 10^{-24}$ kg	28 fm
Fußball	0,5 kg	$7 \cdot 10^{-38}$ m

bei 20 m/s Geschwindigkeit

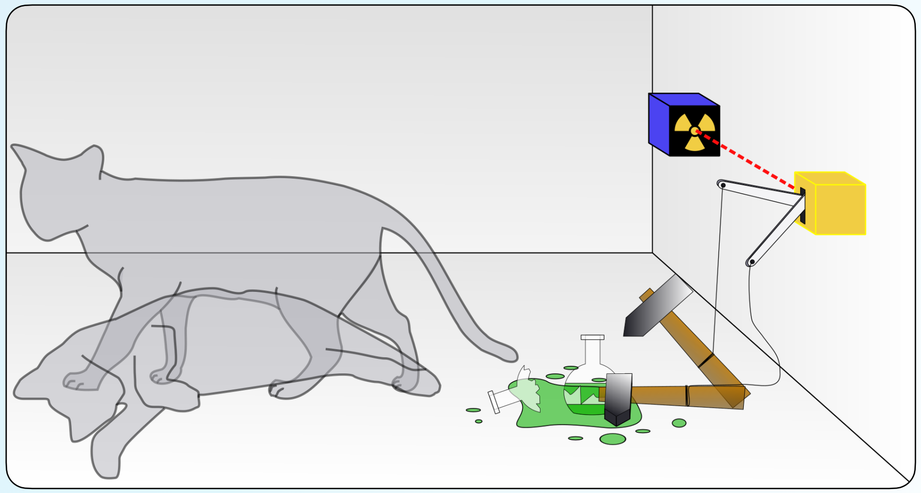
Grundlagen der Quantenphysik

Superposition

- In der Wellenlehre die ungestörte Überlagerung (Interferenz) mehrerer Wellen des gleichen Typs
- Lineare Überlagerung mehrerer Zustände

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

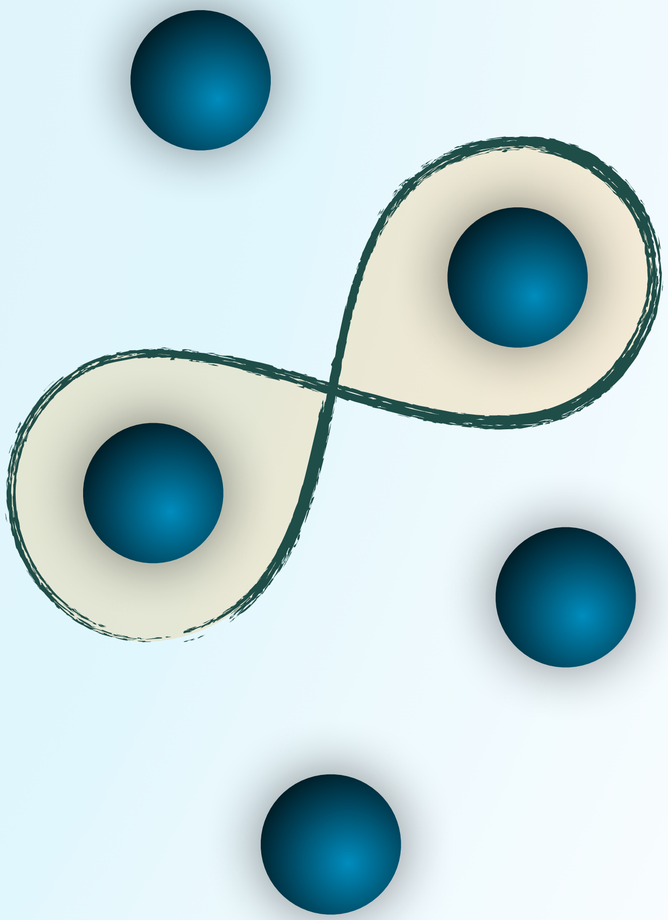
$$|\psi\rangle = \sum_{i=1}^{n} c_i |\varphi_i\rangle$$



WikiMedia | Dhatfield

Grundlagen der Quantenphysik

Verschränkung



- Beschreibt ein zusammengesetztes physikalisches System, welches **als Ganzes** betrachtet einen **wohldefinierten Zustand** einnimmt, ohne dass man jedem Teilsystem einen eigenen wohldefinierten Zustand zuordnen kann

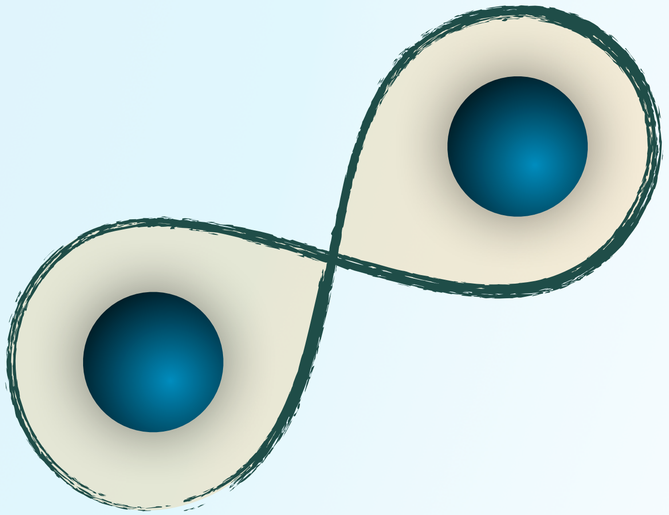
- Manipulation an einem der Teilsysteme hat **unmittelbaren Einfluss** auf alle Teilsysteme

- **Messung/Festlegung** eines Teilsystems legt unmittelbar den Zustand alle Teilsystem fest
  » Verschränkung bricht zusammen

Grundlagen der Quantenphysik

Verschränkung

- Schrödinger (1935): “Verschränkung ist nicht irgendein, sondern **geradezu das charakteristische Merkmal** der Quantenmechanik.”
- Einstein (1935): “**Spukhafte Fernwirkung**”
- 1964 postulierte **John Bell** den experimentelle Nachweis anhand der Bellschen Ungleichung
- **Stuart Freedman** und **John Clauser** führten 1972 einen ersten exp. Bell-Test an Photonen durch; 1982 folgte **Alain Aspect** und 1999 **Anton Zeilinger**



$$W(\mathbf{a}_h, \mathbf{b}_h) \leq W(\mathbf{b}_h, \mathbf{c}_v) + W(\mathbf{a}_h, \mathbf{c}_h)$$

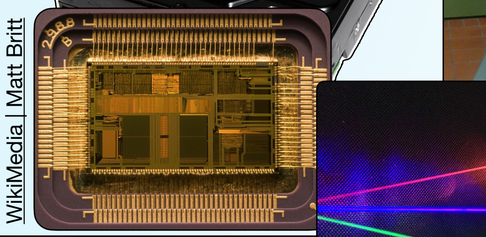
Die 1. Quantenrevolution

Die Quantenmechanik als Grundlage …

- … für ein besseres Verständnis bzw. die Entwicklung von
  - Atomen und Molekülen
  - Atomuhren
  - Halbleitern » Transistor, LED
  - Magnetismus » Datenspeicher
  - Supraleitung » Magnet, Sensoren
  - Lasern
  - Medizintechnik » MRT
  - Informations- und Kommunikationstechnologie



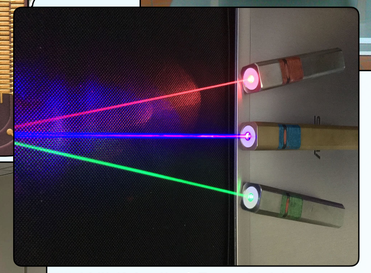
WikiMedia | Asim18



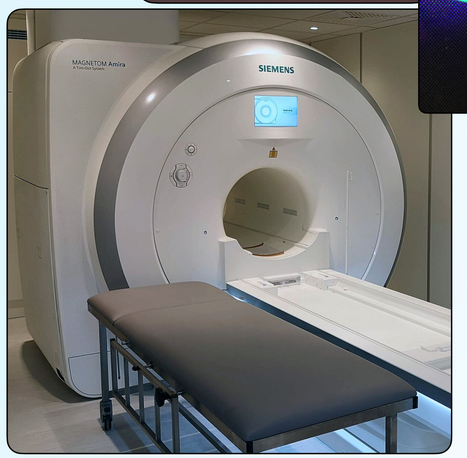
WikiMedia | Matt Britt



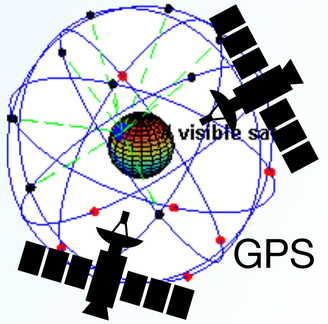
WikiMedia | Brunswyk



WikiMedia | Pangkakit



WikiMedia | S. Verzilin



Die 2. Quantenrevolution

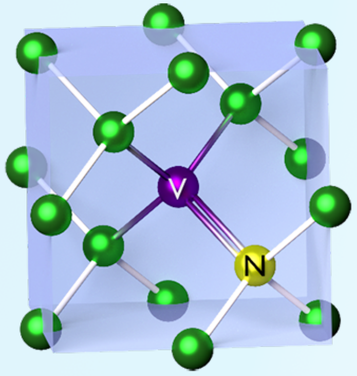
Kontrolle und Manipulation von Quantensystemen

- **Ausnutzen der Quanteneigenschaften**
  einzelner Atome, Fehlstellen oder Photonen
- **Ausnutzen** von Superposition und
  Verschränkung **von Quantenobjekten**
- **Gezielte Kontrolle** einzelner
  Quantenobjekte (Qubits)
- Herstellung **maßgeschneiderter Quantensysteme**

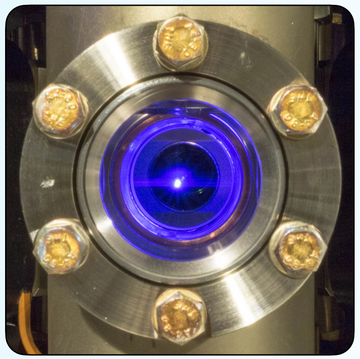
Die 2. Quantenrevolution

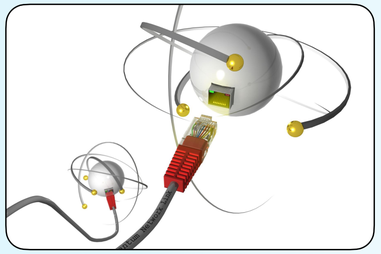
Anwendungsfelder und Einsatzbereiche

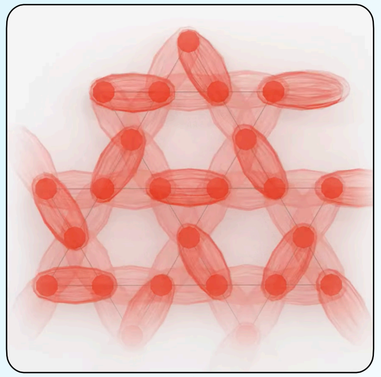
- Präzisionsmetrologie (z.B. bessere Atomuhren)
  » Navigation, Geodäsie, …
- Quantensensorik (z.B. NV-Zentren, SQUIDs)
  » Magnetometrie, Medizintechnik, … ★Vortrag QTAS – Karl
- Quantenkommunikation (z.B. QKD, Teleportation)
  » sichere Kommunikation ★Vortrag LMU/Cube – Lukas
- Quantenmaterialien (z.B. Spinflüssigkeiten)
  » Materialien mit neuartigen Eigenschaften
- Quantensimulation und Quantencomputing
  » leistungsfähige Spezialrechner ★Vortrag planqc – Julian

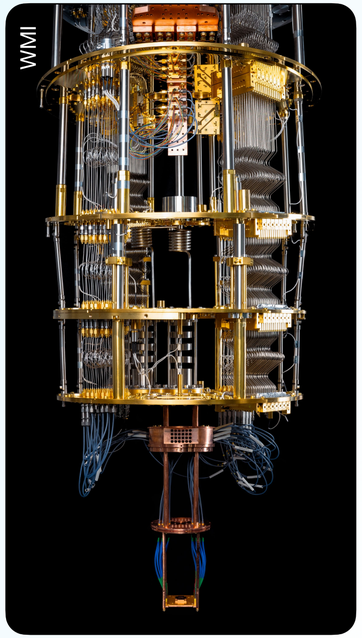


MediaWiki | NIST


MPQ | S. Blatt


MPQ | A. Neuzner


WikiMedia | Jubobroff

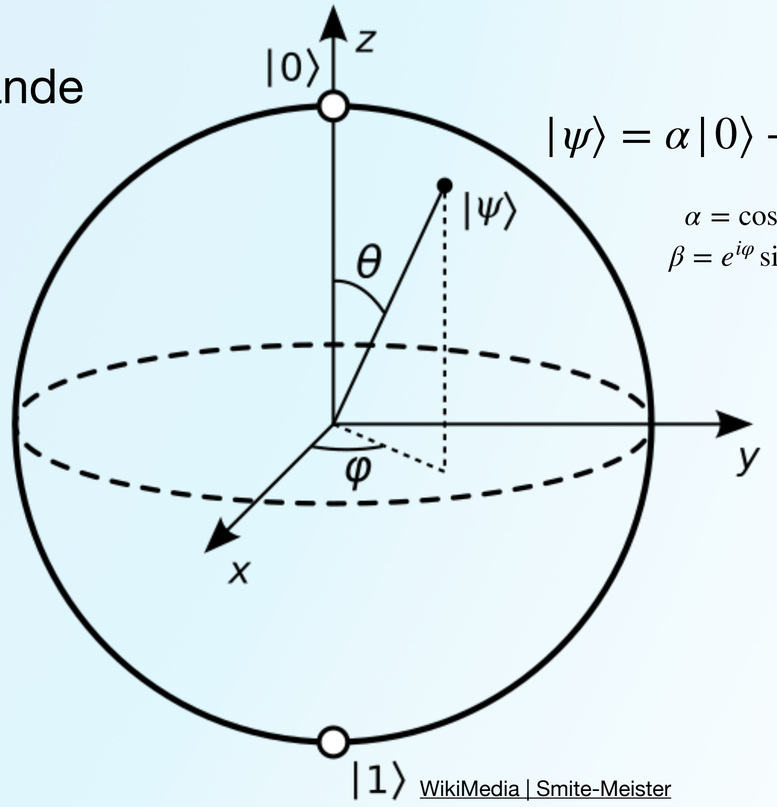


MQV | M. Stampa

Quantencomputing

Das Qubit als zentraler Baustein

- “Zweizustands-Quantensystem” » zwei messbare Zustände
- **Messung** bestimmt **zufällig** einen der beiden Eigenzustände – $|0\rangle$ oder $|1\rangle$
- **Wahrscheinlichkeit** abhängig vom aktuellen quantenmechanischen Überlagerungs-Zustand
- Auch “**Störung**” des Systems führt zum “Kollaps der Wellenfunktion” » kurze Lebensdauer
- Qubits können nicht kopiert werden



$$|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$$

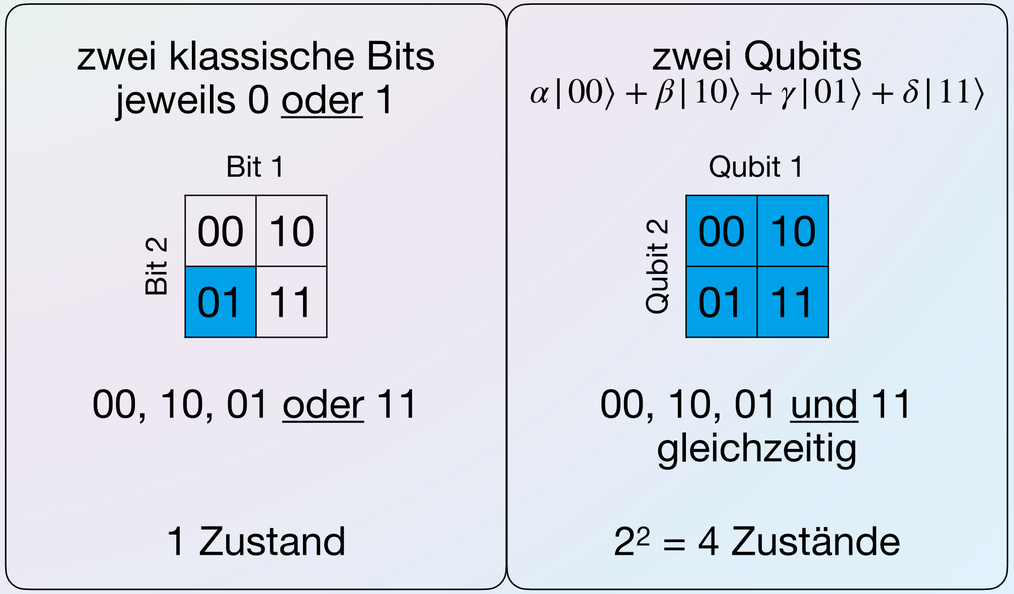
$$\alpha = \cos(\theta/2)$$
$$\beta = e^{i\varphi}\sin(\theta/2)$$

WikiMedia | Smite-Meister

Quantencomputing

Rechenvorteile von Quantencomputern

- klassisches vs. Quanten-Register



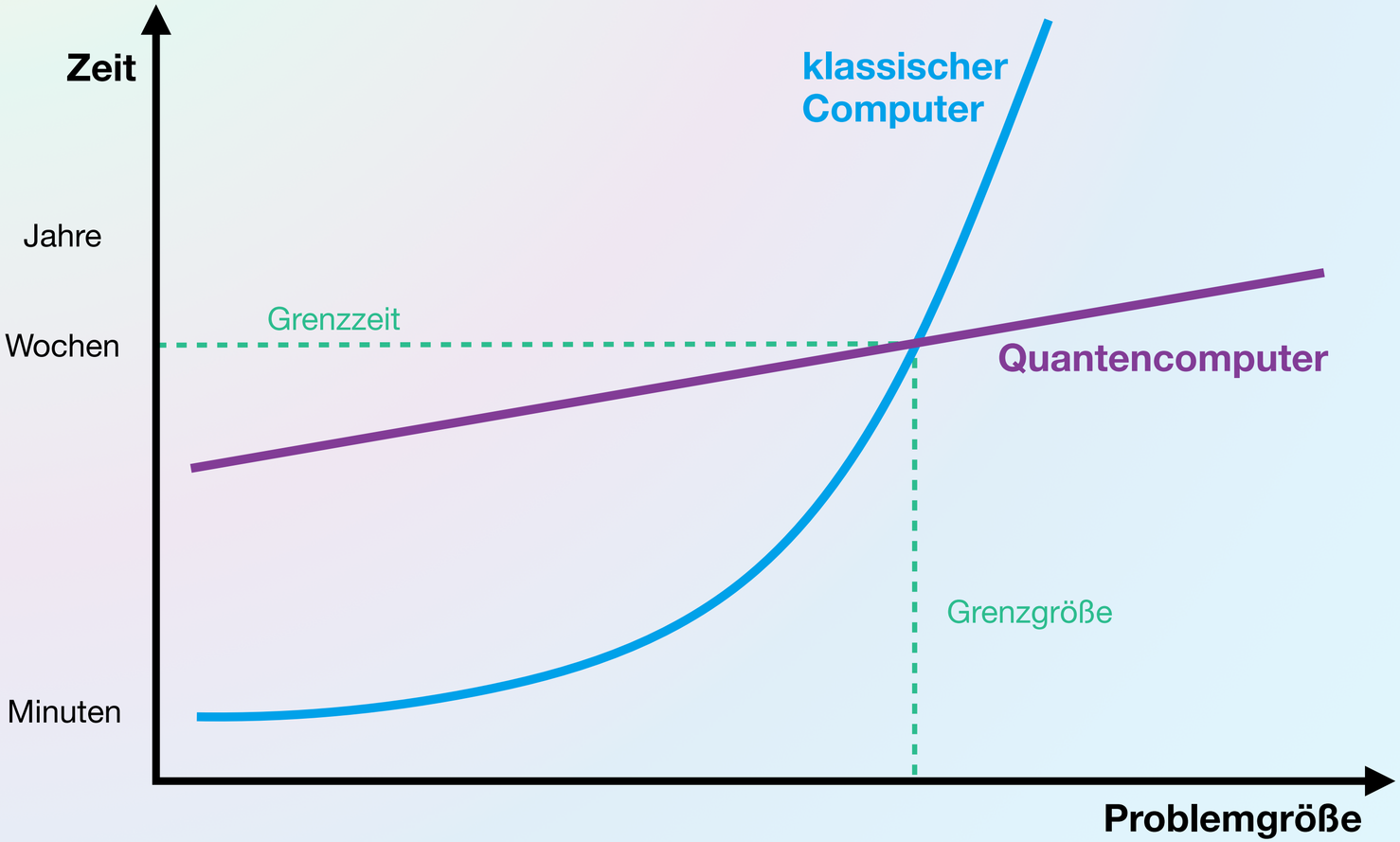
- Exponentielles Wachstum

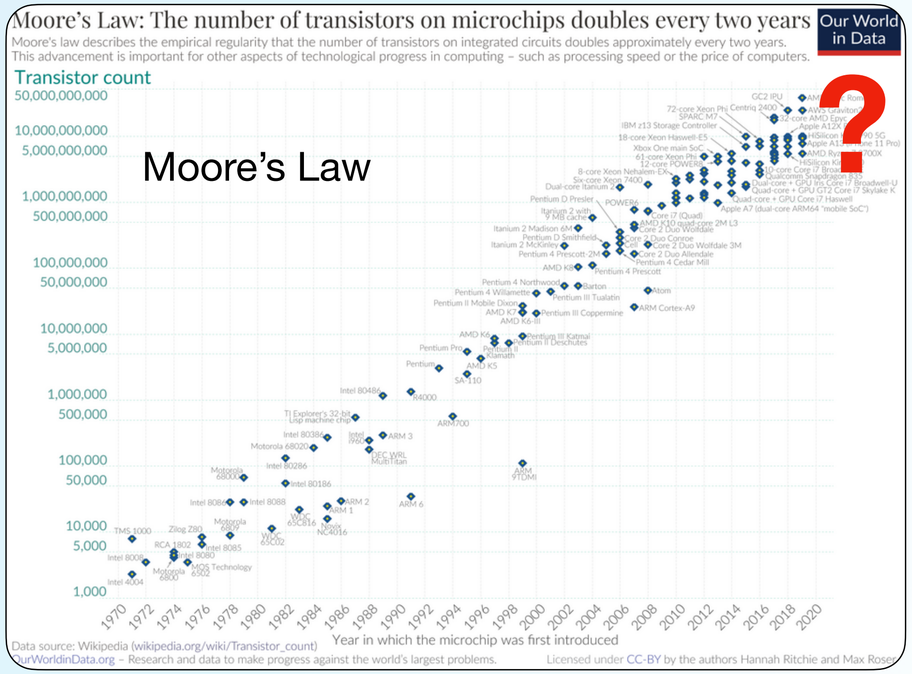
1 Qubit	2^1 = 2 Zustände $\alpha\|0\rangle + \beta\|1\rangle$
2 Qubits	2^2 = 4 Zustände $\alpha\|00\rangle + \beta\|10\rangle + \gamma\|01\rangle + \delta\|11\rangle$
3 Qubits	2^3 = 8 Zustände $\alpha\|000\rangle+\beta\|100\rangle + \gamma\|010\rangle + \delta\|001\rangle+$ $\epsilon\|110\rangle+\zeta\|011\rangle + \eta\|101\rangle + \iota\|111\rangle$
50 Qubits	$2^{50} \approx 1 \cdot 10^{15}$ Zustände
275 Qubits	$2^{275} \approx 6 \cdot 10^{82}$ Zustände

Vgl.: etwa 10^{78} bis 10^{82} Atome im beobachtbaren Universum

Quantencomputing

Quantenüberlegenheit





WikiMedia | Max Roser, Hannah Ritchie

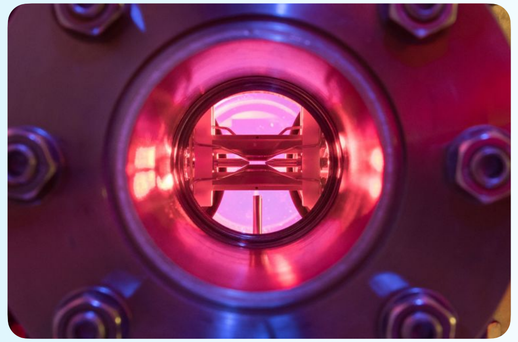
Quantencomputing

Qubit ist nicht gleich Qubit

- Arten von Qubits / Quantenrechnern
  - Ionenfallen
  - Gefangene Atome
  - Supraleitende Schaltkreise
  - Photonen
  - Kernspins in Molekülen und Festkörpern
  - …
- Jeweils mit individuellen Stärken und Herausforderungen

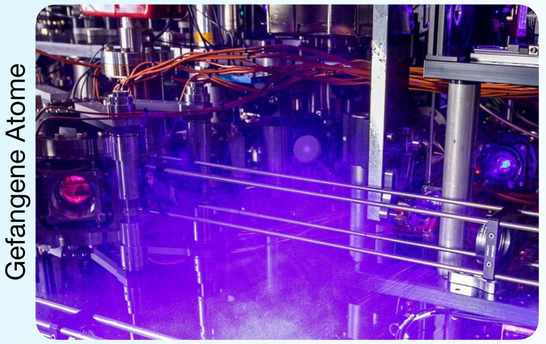
MUNICH QUANTUM VALLEY
MQV

Ionenfallen



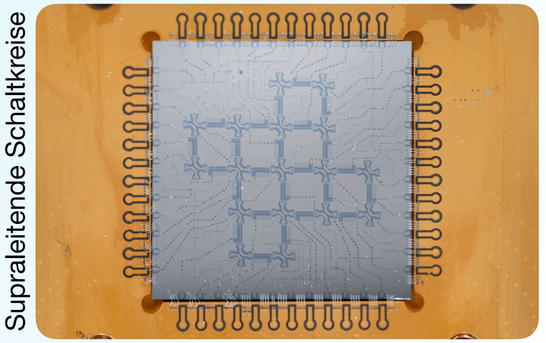
Robbie Shone

Gefangene Atome



MPQ | Axel Griesch

Supraleitende Schaltkreise

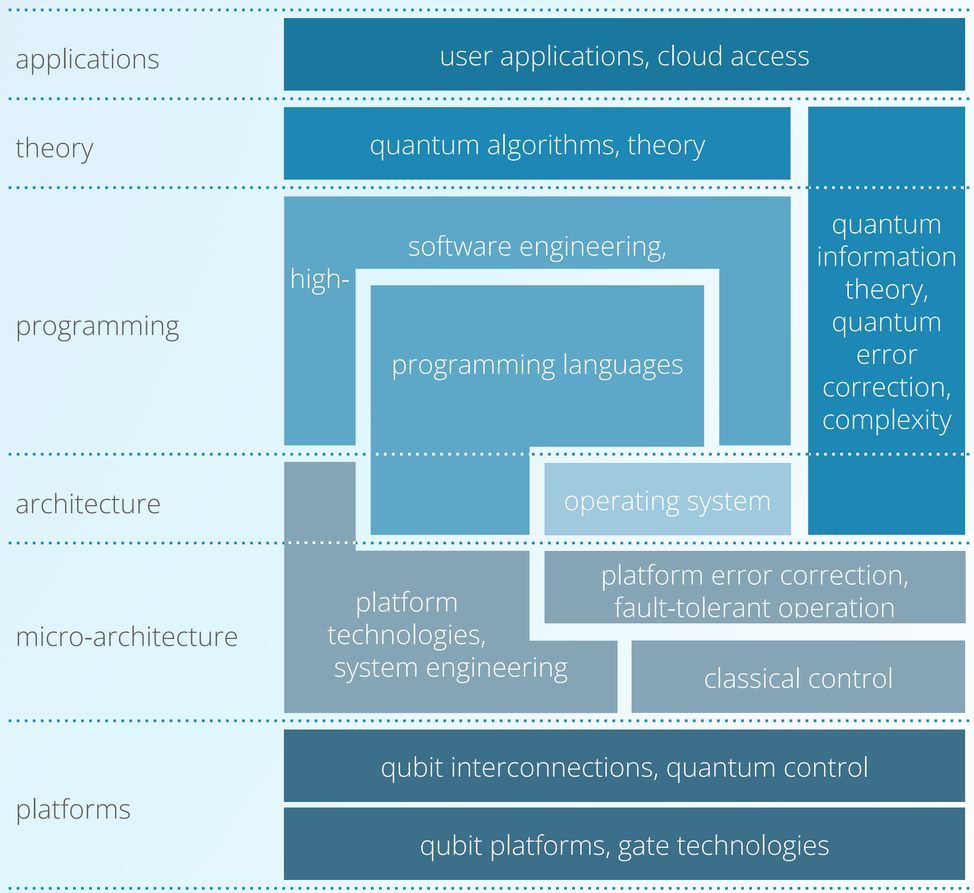


MQV | M. Stampa

Quantencomputing

Mehr als nur Hardware

- Neben den eigentlichen Qubits bedarf es
  - Steuerungshardware und -firmware
    Systemspezifische Qubitansteuerung, …
  - Software
    Systemsteuerung, Compiler, Anbindung an Hochleistungsrechner, Quantenalogrithmen, Nutzerschnittstellen, …
  - Anwendungen
    neben und um Shor- und Grover-Algorithmus existieren viele Ansätze, konkrete Anwendungsszenarien sind aber noch Teil der aktuellen Forschung
  - …
  - Quanten-Fehlerkorrektur
    Verbindung mehrerer physischer Qubits zu einem logischen (fehlerkorrigierten) Qubit
  - …



Quantencomputing

Mögliche Anwendungsszenarien

- Wird klassisches Rechnen nicht ersetzen
- Potentielle Einsatzbereiche
  - **Simulation** von quantenmechanischen Systemen
    Entwicklung von Medikamenten, Batterien, Katalysatoren und Materialien, Chemiebranche, …
  - **Optimierungsprobleme**
    Produktionsabläufe, Pharma, Logistik, …
  - **Quantum Machine Learning**
    Mobilität, Computer Vision, Bild-/Mustererkennung, …
  - **Primfaktorzerlegung**
    Shor-Algorithmus, relevant für die Sicherheit von RSA-Kryptosystemen
  - **…**



Wo stehen wir aktuell?

Quantentechnologien in der Anwendung?

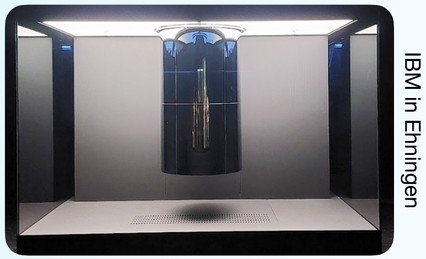
- In **Quantensensorik** und **Quantenkommunikation** sind erste Ideen/Systeme bereits in der (industriellen) **Anwendung**

- Im **Quantencomputing** existieren **erste Systeme** mit einigen zehn bis einigen hundert physischen Qubits
  - Aktuell vor allem **akademischer Natur**
  - Vor allem **Skalierung zu tausenden, gar Millionen von Qubits** und **Fehlerkorrektur** sind aktuelle **Herausforderungen**, wenn auch gleich es Ideen/Ansätze gibt

  - Zum Vergleich: Shor benötigt 2·n bis 4·n logische Qubits, bei RSA-2048 also mindestens 4096 bis 6146 logische/fehlerkorrigierte Qubits (bis zu Millionen physischer Qubits)

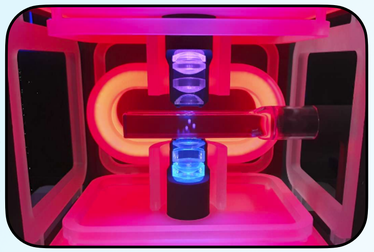


Quantum Diamonds GmbH


IBM in Ehningen



Euro-Q-Exa von IQM am LRZ


planqc GmbH



AQT am LRZ

Munich Quantum Valley

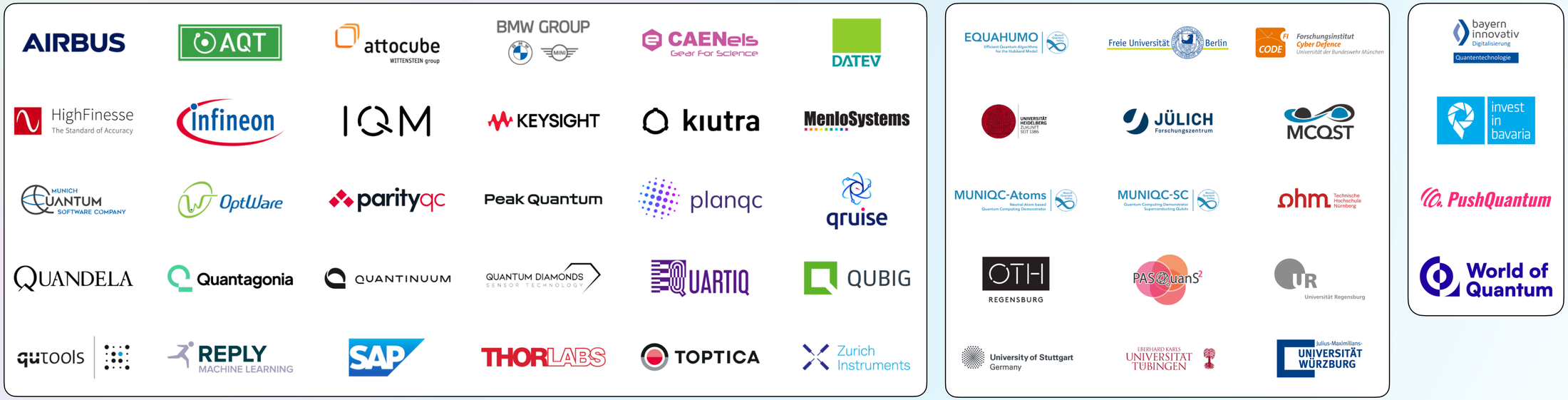
Building a quantum future

- Fördert die **Quantenwissenschaften** und **Quantentechnologien** in Bayern
- Primäres Ziel sind **Entwicklung, Betrieb und Bereitstellung von wettbewerbsfähigen Quantencomputer**
- Verbindet **Forschung**, **Industrie** und **Öffentlichkeit**
- Ermöglicht effizienten **Wissenstransfer** von der Forschung zur Industrie als Netzwerk mit internationaler Reichweite
- Bietet **Bildungsangebote** und **Gründungsförderung**

Munich Quantum Valley

Building a quantum future

- MQV Partnernetzwerk



BAdW Bayerische Akademie der Wissenschaften · Fraunhofer · FAU Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg · DLR · LMU Ludwig-Maximilians-Universität München · Max Planck Gesellschaft · TUM Technical University of Munich

Munich Quantum Valley

Building a quantum future

- Bleiben Sie auf dem Laufenden
  - https://munich-quantum-valley.de/
  - @MunichQuantum
  - MQV-Einblicke
  - MQV In Persona
- Kontakt
  - info@munich-quantum-valley.de





Vielen Dank!

Backup

Bellsche Ungleichung

- Grundlagen
  - Messrichtung $\mathbf{a}$: Filter lässt horizontal polarisierte Photonen durch. Vertikal polarisierte Photonen werden reflektiert.
  - Messrichtung $\mathbf{b}$: Filter ist um $\pi/6 = +30^\circ$ gegenüber Messrichtung $\mathbf{a}$ gedreht.
  - Messrichtung $\mathbf{c}$: Filter ist um $\pi/6 = +30^\circ$ gegenüber Messrichtung $\mathbf{b}$ gedreht. (Das heißt, er ist um $\pi/3 = +60^\circ$ gegenüber Messrichtung $\mathbf{a}$ gedreht.)

  - $W(\mathbf{a}_h, \mathbf{b}_h)$: Anteil der Photonenpaare, in denen ein Photon den Filter mit Messrichtung $\mathbf{a}$ passiert und das andere Photon den Filter mit Messrichtung $\mathbf{b}$ passiert hat.
  - $W(\mathbf{b}_h, \mathbf{c}_v)$: Anteil der Photonenpaare, in denen ein Photon den Filter mit Messrichtung $\mathbf{b}$ passiert und das andere Photon vom Filter mit Messrichtung $\mathbf{c}$ reflektiert wurde.
  - $W(\mathbf{a}_h, \mathbf{c}_h)$: Anteil der Photonenpaare, in denen ein Photon den Filter mit Messrichtung $\mathbf{a}$ passiert und das andere Photon den Filter mit Messrichtung $\mathbf{c}$ passiert hat.

Backup

Quanten-Fehlerkorrektur

- Einschränkungen
  - Der Kollaps der Wellenfunktion sorgt dafür, dass jede Messung, die Information über den Zustand eines Qubits liefert, diesen Zustand zerstört.
  - Das No-Cloning-Theorem verbietet es, den Zustand eines Qubits zu kopieren.
  - Da Qubits, anders als klassische Bits, ein Kontinuum von Zuständen erlauben, können auch Fehler kontinuierlich sein.

- Fehlertypen – allgemeine 1-Qubit-Fehler sind Linearkombinationen daraus
  - Kein Fehler: Das Qubit wird nicht verändert. Dargestellt durch den Einheitsoperator.
  - Bit-Flip: Vertauschen von |0> und |1>. Aus dem Zustand a|0> + b|1> wird a|1> + b|0>.
  - Phase: Für den Zustand |1> wird das Vorzeichen umgedreht. Aus dem Zustand a|0> + b|1> wird a|0> – b|1>.
  - Bit-Phase: Kombination der beiden oberen Fehler. Aus dem Zustand a|0> + b|1> wird –b|0> + a|1>.

- …