

Quantentechnologien in der Sekundarstufe II

Rainer Müller, TU Braunschweig

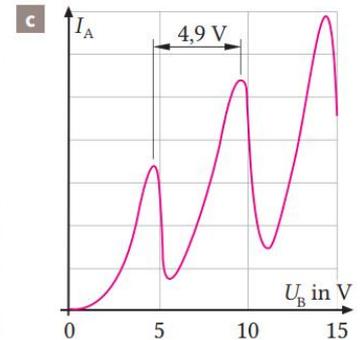
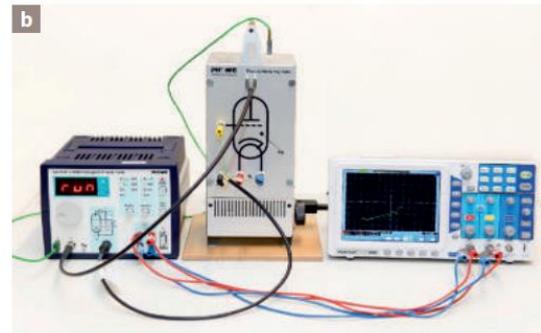
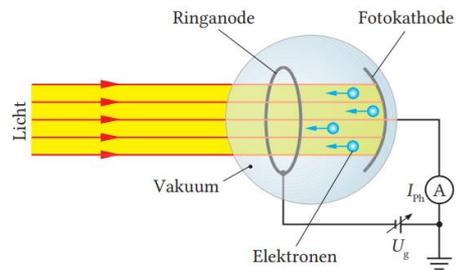
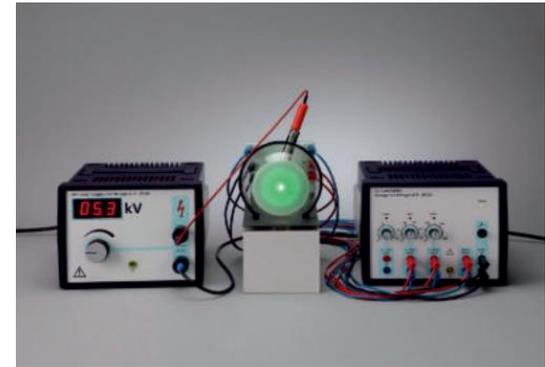
Die Quantenphysik und die neuen Quantentechnologien

Quantenphysik in der Schule

Viele traditionelle Themen aus dem Physikunterricht

- Photoeffekt
- Elektronenbeugung
- Franck-Hertz-Versuch
- Aufbau von Atomen

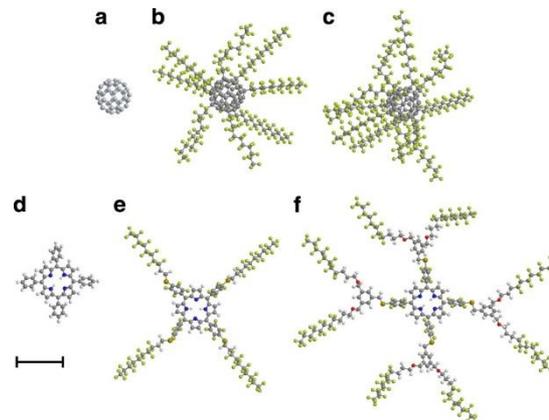
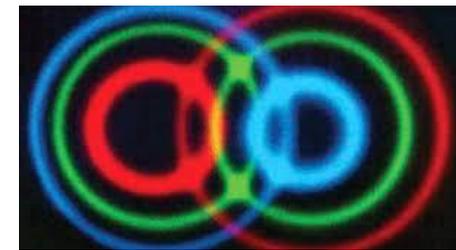
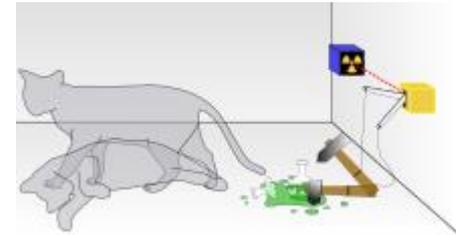
stammen aus der Entdeckungszeit der Quantenphysik



Quantenphysik in der Schule

Fortgeschrittene Themen aus der Forschung sind anspruchsvoll:

- Schrödingers Katze
- Interferenz von großen Molekülen
- Verschränkung, bellsche Ungleichung
- philosophische Debatten (Messproblem, viele Welten)

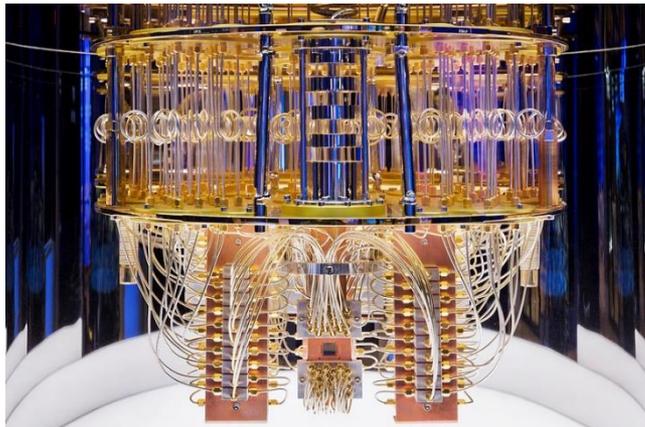


Quantentechnologien

Ganz neuer Ansatz:

**Quantentechnologien:
Die „merkwürdigen“ Effekte der Quantenphysik werden
technologisch nutzbar gemacht.**

Ingenieurwissenschaftliche Anwendung statt Grundlagenforschung.
Ist das ein Thema für den Physikunterricht?



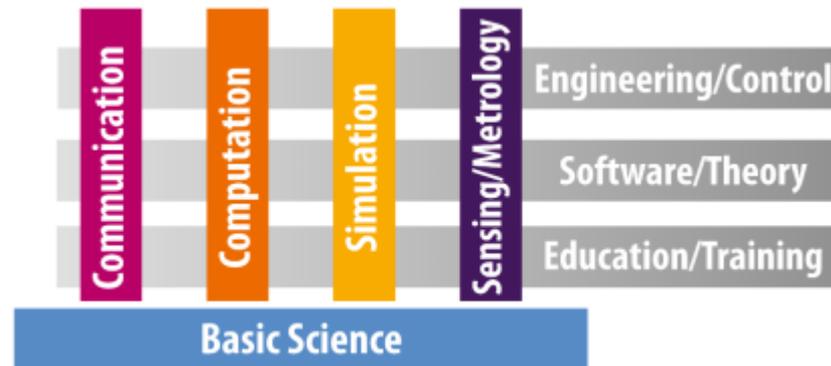
Aktuelle Entwicklung: Quantentechnologien

Zum Beispiel:

EU-Flagship-Projekt Quantum Technologies seit 2018:
mit Fokus auf Anwendungen und Produkte



QUANTUM
FLAGSHIP



„Säulen“ der Quantentechnologien:

- Quantenkommunikation
- Quantencomputer, Quantensimulationen
- Quantensensoren

Physikunterricht und Quantentechnologien

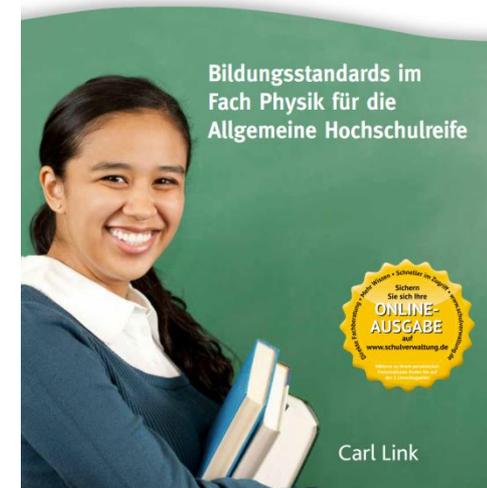
Quantenphysik in den Bildungsstandards

Bildungsstandards für die Oberstufe (2020):
moderne Themen dominieren

2.6.3 Inhaltsbereich: Quantenphysik und Materie

Quantenobjekte

Inhalte für das grundlegende und das erhöhte Anforderungsniveau	Zusätzliche Inhalte für das erhöhte Anforderungsniveau
<ul style="list-style-type: none">■ Grundlegende Aspekte der Quantentheorie: Stochastische Vorhersagbarkeit, Interferenz und Superposition, Determiniertheit der Zufallsverteilung, Komplementarität■ Zusammenhänge der Größen Energie, Impuls, Frequenz und Wellenlänge zur Beschreibung von Quantenobjekten■ quantenphysikalisches Weltbild hinsichtlich der Begriffe Realität, Lokalität, Kausalität, Determinismus	<ul style="list-style-type: none">■ stochastische Deutung mittels des Quadrats der quantenmechanischen Wellenfunktion (qualitativ)■ Ort-Impuls-Unbestimmtheit■ Koinzidenzmethode zum Nachweis einzelner Photonen



Quantentechnologien und Kontextorientierung

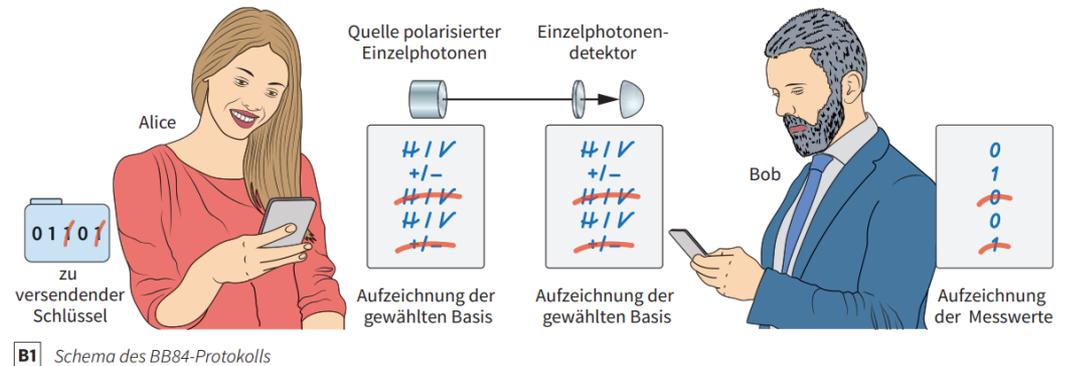
Bisher im Unterricht über moderne Quantenphysik kaum möglich:

Anwendungen, authentische Kontexte

Grundidee:

Quantentechnologien als Kontexte für den Physikunterricht

→ Geeignete Elementarisierungen müssen entwickelt werden.



Quantentechnologien zum Lernen der Quantenphysik?

Pluspunkte der Quantentechnologien:

- setzen direkt an den nichtklassischen Merkmalen der Quantenmechanik an.
- fördern begrifflich saubere Formulierungen, z. B. zu Präparation, Messung, Unbestimmtheitsrelation
- prinzipiell einfache Systeme (nur wenige Zustände)
→ Qubits, Polarisationszustände des Lichts
- teilweise qualitative Argumentationen möglich
- prinzipiell experimentell zugänglich (kein Vakuum, keine tiefen Temperaturen, starke Kostenreduktion in den vergangenen Jahren).



Quantenkryptographie

Nach den derzeitigen Erfahrungen mit Studierenden und Schülern:

Quantenkryptographie als erfolgversprechendster Inhaltsbereich

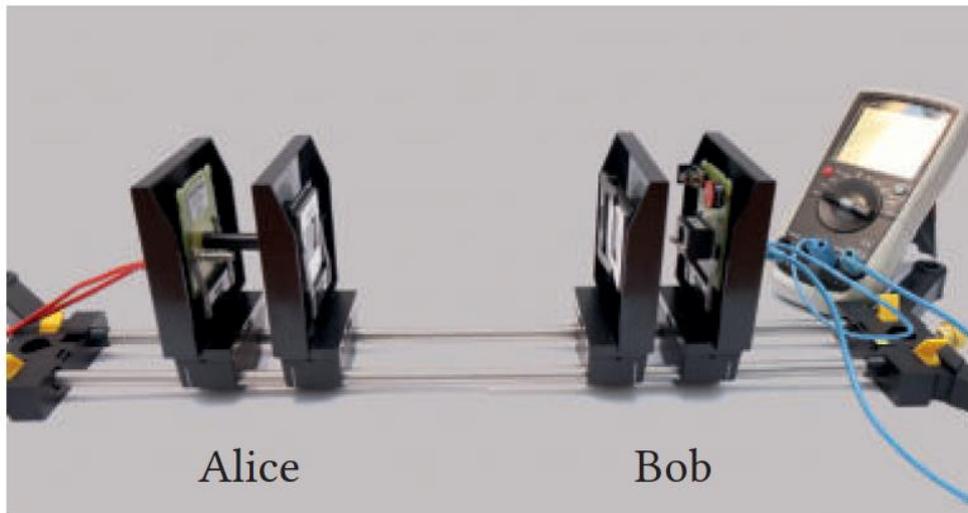
Kernstück der Quantenkommunikation

→ Verbindung zu neuen Themen aus Informatik, Mathematik, aktuellen Schlagzeilen



Quantenkryptographie

Beispiel: Analogversuch zur Schlüsselverteilung nach dem BB84-Protokoll mit Materialien aus der Schulsammlung (Reisch & Franz, PdN 2016)



* Beispielaufgabe: Bits rekonstruieren

Erläutern Sie, wie Bob aus seinen Messergebnissen ein von Alice gesendetes Bit rekonstruieren kann.

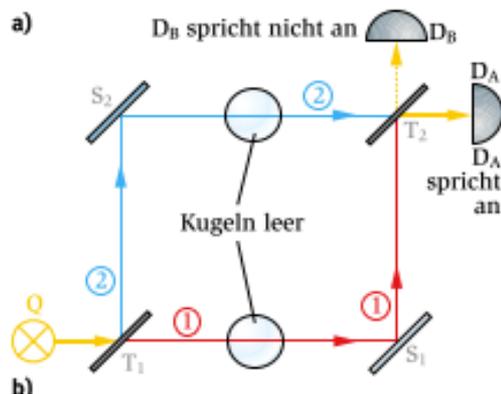
Lösung: Nehmen wir an, Alice will eine 0 versenden und sendet daher ein horizontal polarisiertes Photon. Versuch **V1** zeigt, dass ein Photon bei Bob immer dann nachgewiesen wird, wenn beide Polarisationsfilter gleich eingestellt sind (maximale Intensität im Versuch). Falls Bob seinen Polarisationsfilter auf H eingestellt hat, spricht der Detektor an. Er weiß nun, dass Alice ein H-Photon gesendet hat. Hat er dagegen seinen Polarisationsfilter auf V eingestellt hat, kann er aus dem Nicht-Ansprechen des Detektors ebenfalls schließen, dass Alice ein H-Photon gesendet hat.

Quelle: Dorn/Bader Niedersachsen Oberstufe (2019)

Quantensensorik

Das Nutzen genuin quantenmechanischer Effekte erlaubt Messungen mit höherer Empfindlichkeit.

Musterbeispiel: Bombentest (Elitzur & Vaidman 1993)
„Wechselwirkungsfreie Quantenmessung“



7. Der Knallertest: Sehen, was nicht gesehen wird →

Die Brisanz der Quantenwelt verdeutlichen wir an einem Gedankenexperiment: Ein Fabrikant für Scherzartikel füllte Glaskugeln mit einem Gas, das von bereits *einem* Photon zur Explosion gebracht wird. Leider vermischte er diese sensiblen Knaller mit leeren Kugeln. Kann man funktionierende Knaller erkennen, ohne dass sie ein einziges Photon trifft, ohne dass sie „zerstört“ werden? Anders gesagt: Kann ein Photon den Knaller umfliegen, ihn meiden und trotzdem aus der Ferne „erkennen“? Ein solches *nicht-lokales* Verhalten ist nach klassischer Physik unvorstellbar!

Quelle: Dorn/Bader BaWü SII (2010)

Der große Unbekannte: Quantencomputer

Quantencomputer

- Quantencomputer können manche (nicht alle) Operationen viel schneller ausführen als jeder klassische Computer.
- werden als disruptive Technologien angesehen (Acatech 2020)
- großes wirtschaftliches Potential
- öffentlichkeitswirksame deutschland- und europaweite Initiativen zum Bau von Quantencomputern
- gilt als „cooles Nerd-Thema“ (Status: rocket science)

Potential für die Schule?

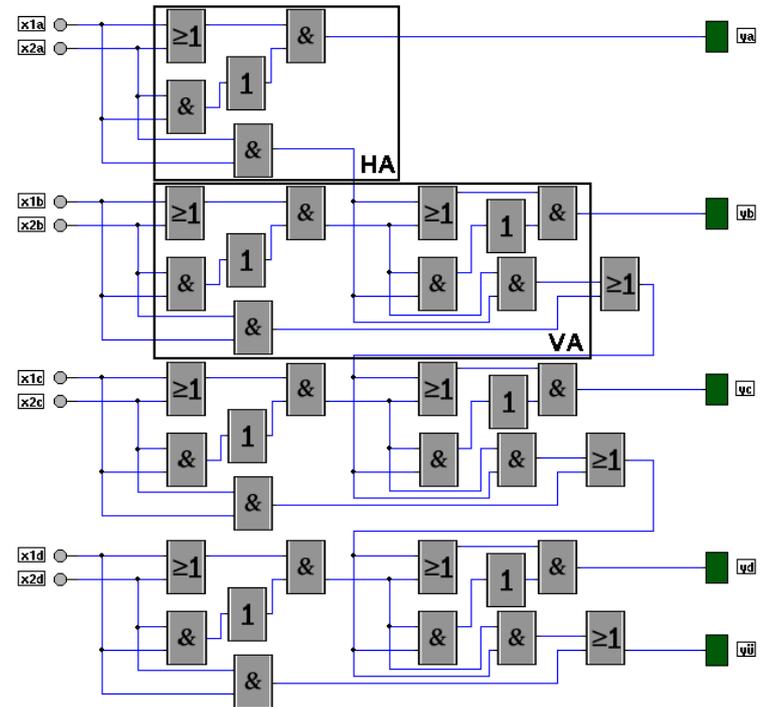


Bits und Qubits

Klassische Informatik:

Bits sind die Grundeinheiten jeder Berechnung.
Sie können die Werte 0 und 1 annehmen

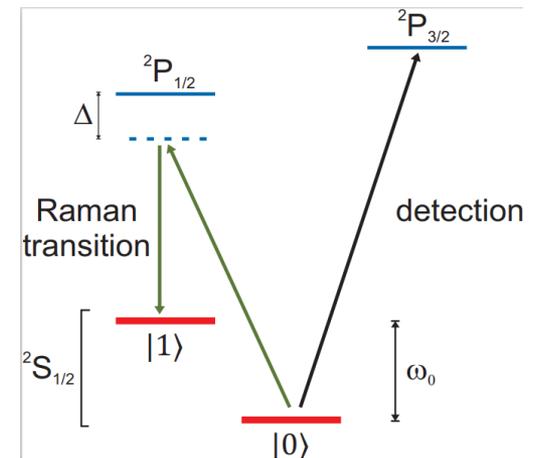
Jede Berechnung beruht auf Bitoperationen
(Gattern) wie NICHT, UND, ODER



Volladdierer, Quelle: http://www.leisering.net/4bit_va

Bits und Qubits

- Quantencomputer arbeiten mit **Qubits**
(logische Einheiten, die auf verschiedene Weise physikalisch realisiert werden können)
- Basiszustände $|0\rangle$ und $|1\rangle$: typischerweise zwei Energieniveaus in einem Ion oder anderen Quantensystem



Bits und Qubits

- Quantencomputer arbeiten mit **Qubits**
(logische Einheiten, die auf verschiedene Weise physikalisch realisiert werden können)
- Basiszustände $|0\rangle$ und $|1\rangle$: typischerweise zwei Energieniveaus in einem Ion oder anderen Quantensystem
- Es gilt **nicht** die klassische Alternative „entweder 0 oder 1“,
es sind quantenmechanische Überlagerungszustände aus diesen beiden klassischen Möglichkeiten möglich:

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

- Die Bitmanipulationen werden mit beiden Zuständen parallel ausgeführt
„Quantenparallelität“

Quantencomputer – Möglichkeiten für den Unterricht

Grundprinzipien der Quantenphysik

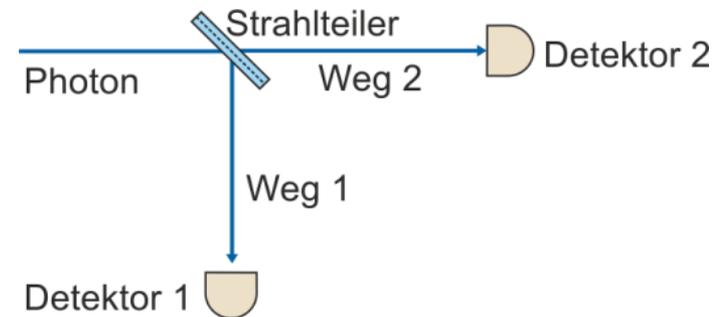
Quantencomputer beruhen auf zwei fundamentalen Grundprinzipien der Quantenphysik

1. Die Quantenphysik gehorcht Zufallsgesetzen

Einfachstes Experiment: Licht an einer Fensterscheibe

Nobelpreis 2022:
Experimente zur bellschen Ungleichung

→ Quantenphysik ist probabilistisch

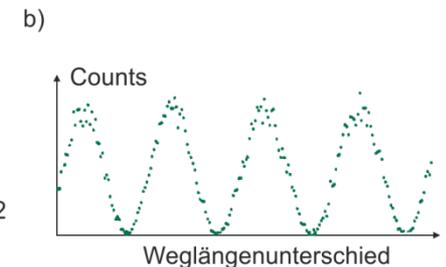
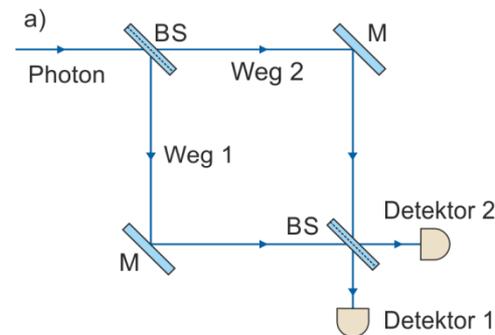
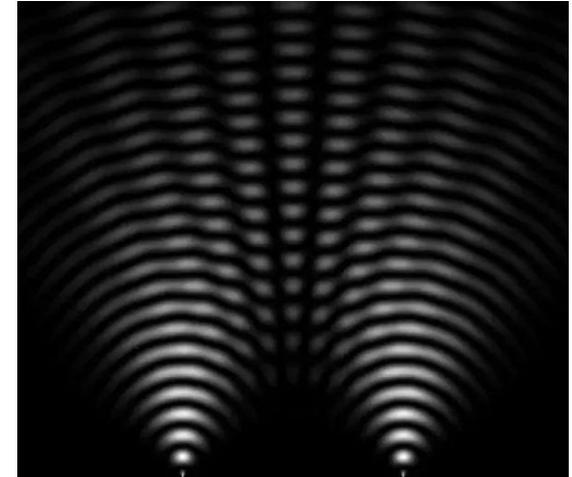


Grundprinzipien der Quantenphysik

Quantencomputer beruhen auf zwei fundamentalen Grundprinzipien der Quantenphysik

2. Klassische Alternativen schließen sich nicht aus: Überlagerung und Interferenz

Alternative Wege schließen sich nicht aus.
Ohne Detektoren → Das Photon geht
beide Wege. Kennzeichen: Interferenz



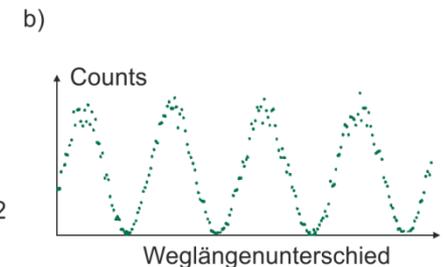
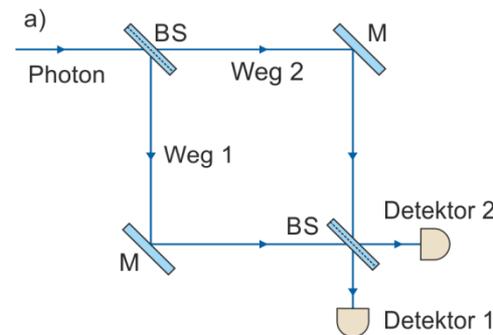
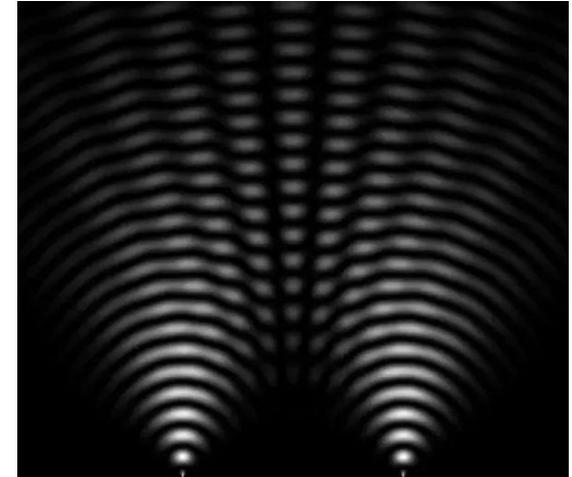
Grundprinzipien der Quantenphysik

Quantencomputer beruhen auf zwei fundamentalen Grundprinzipien der Quantenphysik

2. Klassische Alternativen schließen sich nicht aus: Überlagerung und Interferenz

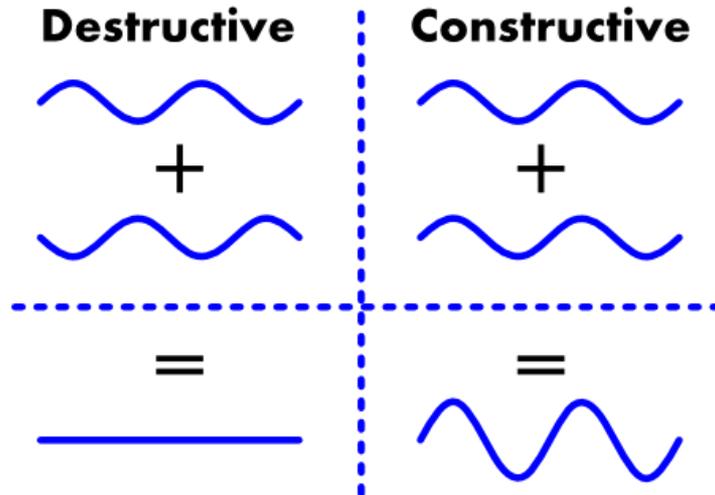
Alternative Wege schließen sich nicht aus.
Ohne Detektoren → Das Photon geht
beide Wege. Kennzeichen: Interferenz

Im Quantencomputer:
Überlagerung zwischen 0 und 1



Prinzip des Quantencomputers

Mit Überlagerung und Interferenz kann man rechnen:



Rechnen mit Interferometern → optisches Quantencomputing

Quantencomputer und Interferometer

Quantum Algorithms Revisited

BY R. CLEVE¹, A. EKERT², C. MACCHIAVELLO^{2,3} AND M. MOSCA^{2,4}

² Clarendon Laboratory, Department of Physics, University of Oxford,
Parks Road, Oxford OX1 3PU, U.K.

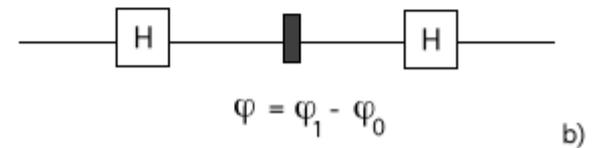
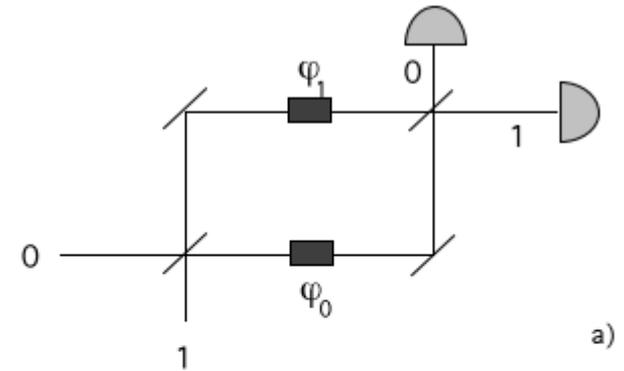
¹ Department of Computer Science, University of Calgary
Calgary, Alberta, Canada T2N 1N4.

³ I.S.I. Foundation, Villa Gualino, Viale Settimio Severo 65, 1033 Torino, Italy.

⁴ Mathematical Institute, University of Oxford, 24-29 St. Giles', Oxford OX1
3LB, U.K.

(Proc. Roy. Soc. A . 454, (1998), 339)

It turns out that viewing quantum computation as multi-particle interferomet leads to a simple and a unifying picture of known quantum algorithms. In this language quantum computers are basically multi-particle interferometers with phase shifts that result from operations of some quantum logic gates. To illustrate this point, consider, for example, a Mach-Zehnder interferometer (Fig. 1a).



Quantencomputer und Interferometer

Quantum Algorithms Revisited

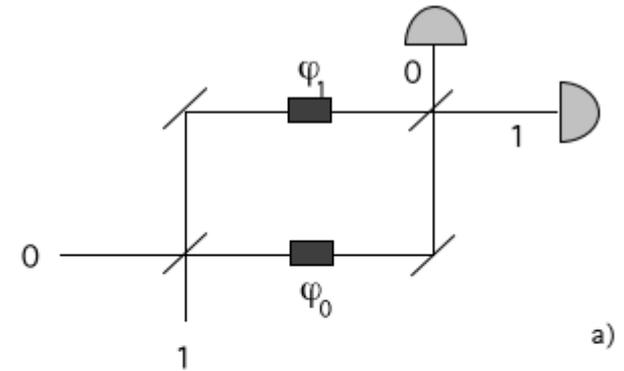
BY R. CLEVE¹, A. EKERT², C. MACCHIAVELLO^{2,3} AND M. MOSCA^{2,4}

² Clarendon Laboratory, Department of Physics, University of Oxford,
Parks Road, Oxford OX1 3PU, U.K.

¹ Department of Computer Science, University of Calgary
Calgary, Alberta, Canada T2N 1N4.

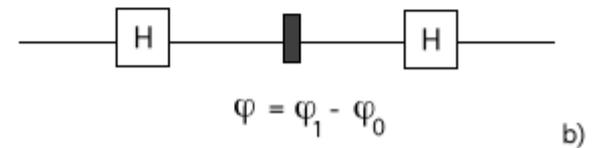
³ I.S.I. Foundation, Villa Gualino, Viale Settimio Severo 65, 1033 Torino, Italy.

⁴ Mathematical Institute, University of Oxford, 24-29 St. Giles', Oxford OX1
3LB, U.K.



Direkte Entsprechung:

Strahlteiler ↔ Hadamard-Gatter H



$$|0\rangle \rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle) \quad \text{und} \quad |1\rangle \rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle - |1\rangle).$$

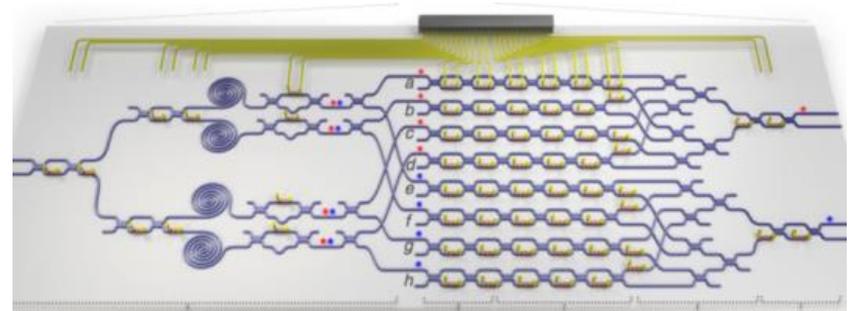
Prinzip des Quantencomputers

Rechnen mit Interferometern → optisches Quantencomputing



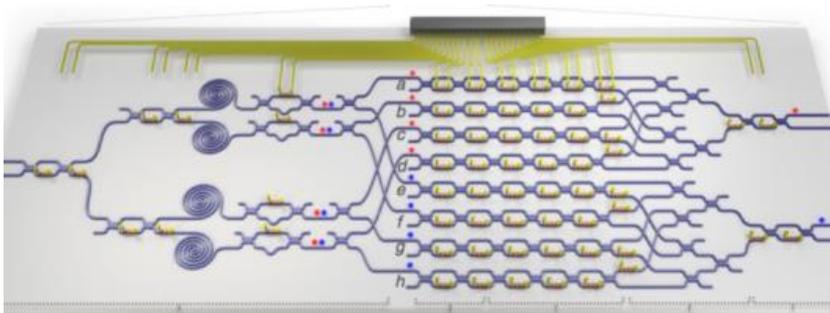
Prinzip des Quantencomputers

Rechnen mit Interferometern → optisches Quantencomputing

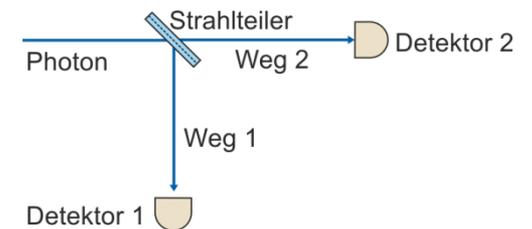


Besonderheiten des Quantencomputing

Überlagerung von Zuständen 0 und 1 → alle Rechnungen laufen parallel

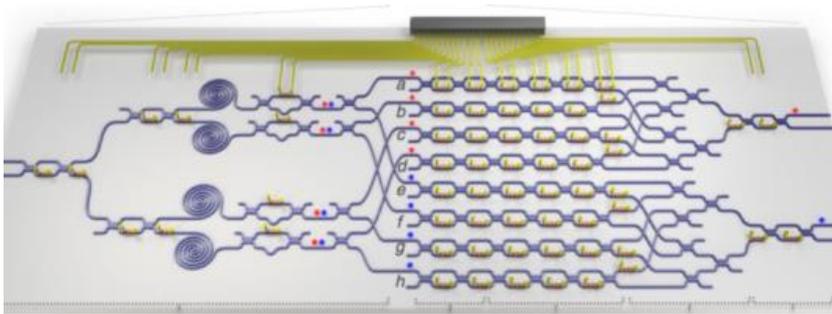


Probabilistische Natur der Quantenphysik:
Bei einer Messung zeigt sich **ein einziges** Ergebnis.



Besonderheiten des Quantencomputing

Überlagerung von Zuständen 0 und 1 → alle Rechnungen laufen parallel



Probabilistische Natur der Quantenphysik:
Bei einer Messung zeigt sich **ein einziges** Ergebnis.

Metapher: Fee im Märchen – weiß alles,
aber man hat nur eine Frage

Besonderheiten des Quantencomputing

Quantenalgorithmen:

Sind so konstruiert, dass sich aus dem einen Messergebnis eine Antwort auf das ursprüngliche Problem ergibt.

Beispiel: Periodizität einer langen Bitfolge

Algorithmen mit Quantenvorteil:

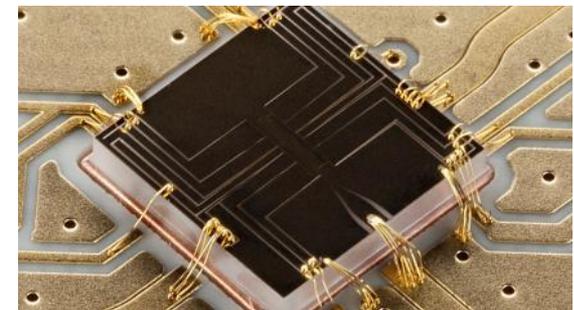
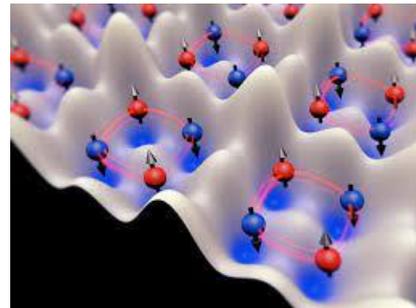
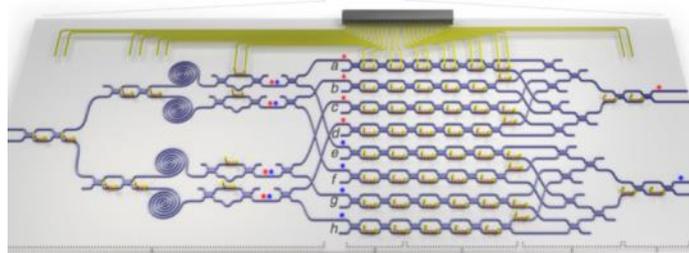
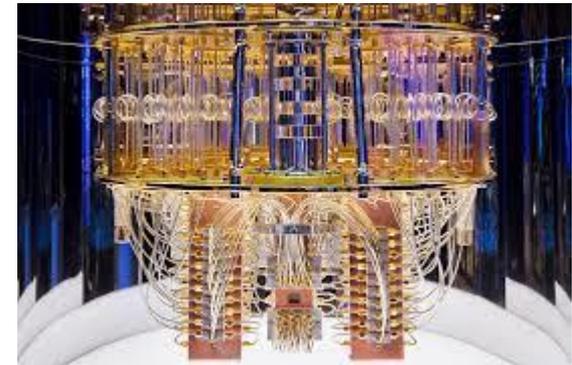
- Faktorisierung großer Zahlen (Shor-Algorithmus)
- Datenbanksuche (Grover-Algorithmus)
- Lineare Algebra (HHL-Algorithmus)
- Optimierungsprobleme *
- Simulationen quantenmechanischer Systeme *
- Quantum Machine Learning

(* = „zeitnahe“ Anwendungen)

Quantencomputer-Realisierungen

verschiedene Technologien für das Quantum Computing:

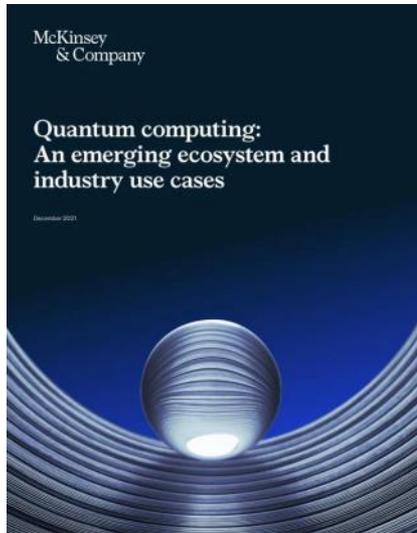
- supraleitende Qubits
- gefangene Ionen
- Neutrale Atome (optische Gitter)
- Halbleiterbasierte Qubits (Spin-Qubits)
- Photonische Qubits (optischer Quantencomputer)



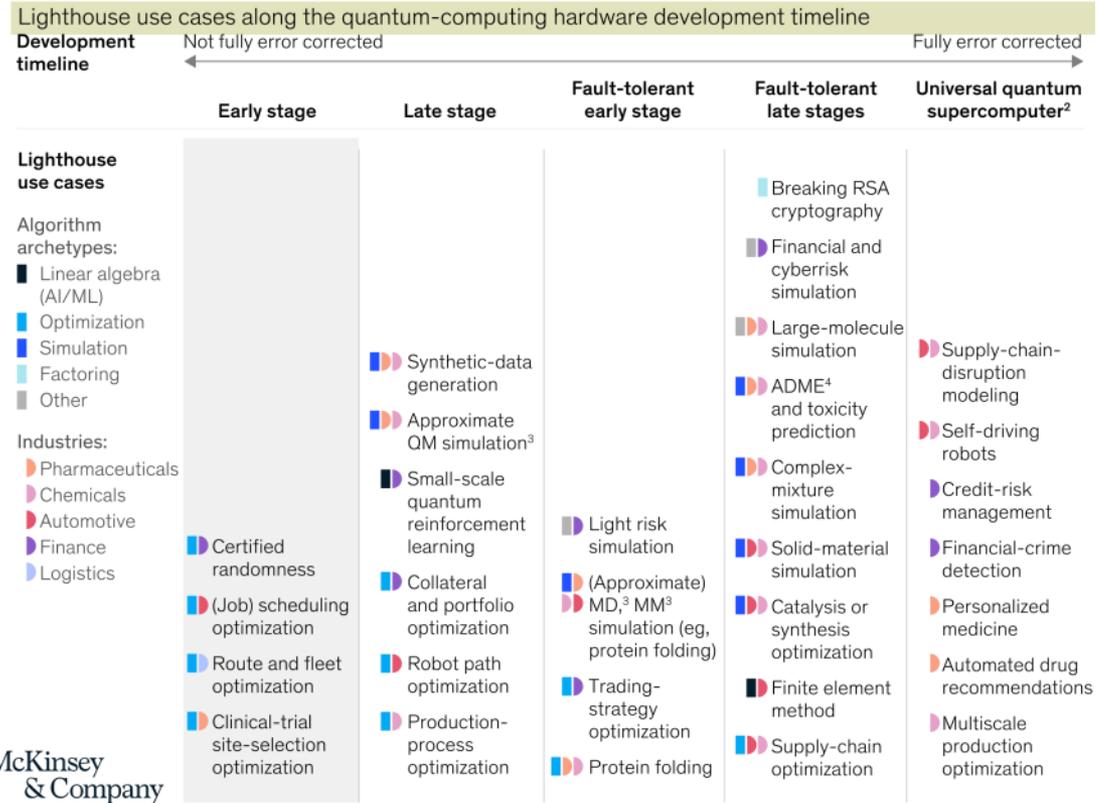
Anwendungen von Quantencomputern

Was wird man einmal damit machen können?

McKinsey Quantum Computing Report (Dez. 2021)



Maturing quantum-computing hardware will make more use cases viable.



Quantencomputer

Quantencomputing:

auf die physikalische Realisierung der Qubits kommt es nicht an.

Beim Programmieren verwendet man standardisierte Operationen (**Quantengatter**), um die Qubits zu beeinflussen.

Vergleichbar Assembler
grafische Benutzeroberflächen

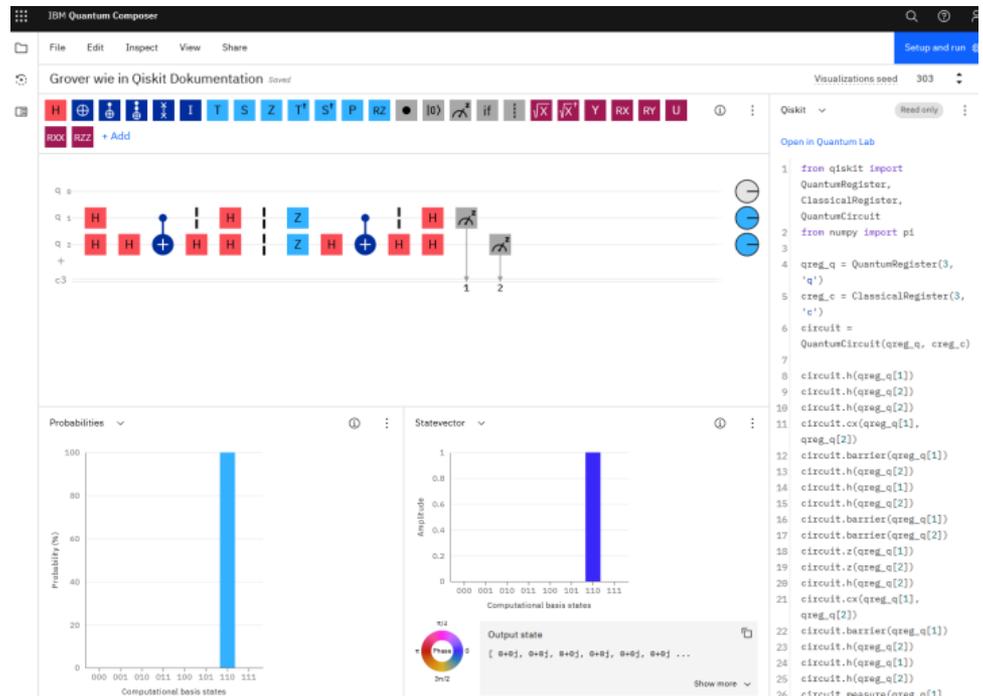
Identität	in — $\boxed{1}$ — out	<table><thead><tr><th>in</th><th>out</th></tr></thead><tbody><tr><td>$0\rangle$</td><td>$0\rangle$</td></tr><tr><td>$1\rangle$</td><td>$1\rangle$</td></tr></tbody></table>	in	out	$ 0\rangle$	$ 0\rangle$	$ 1\rangle$	$ 1\rangle$
in	out							
$ 0\rangle$	$ 0\rangle$							
$ 1\rangle$	$ 1\rangle$							
Pauli-X	in — \boxed{X} — out	<table><thead><tr><th>in</th><th>out</th></tr></thead><tbody><tr><td>$0\rangle$</td><td>$1\rangle$</td></tr><tr><td>$1\rangle$</td><td>$0\rangle$</td></tr></tbody></table>	in	out	$ 0\rangle$	$ 1\rangle$	$ 1\rangle$	$ 0\rangle$
in	out							
$ 0\rangle$	$ 1\rangle$							
$ 1\rangle$	$ 0\rangle$							
Hadamard	in — \boxed{H} — out	<table><thead><tr><th>in</th><th>out</th></tr></thead><tbody><tr><td>$0\rangle$</td><td>$\frac{1}{\sqrt{2}}(0\rangle + 1\rangle)$</td></tr><tr><td>$1\rangle$</td><td>$\frac{1}{\sqrt{2}}(0\rangle - 1\rangle)$</td></tr></tbody></table>	in	out	$ 0\rangle$	$\frac{1}{\sqrt{2}}(0\rangle + 1\rangle)$	$ 1\rangle$	$\frac{1}{\sqrt{2}}(0\rangle - 1\rangle)$
in	out							
$ 0\rangle$	$\frac{1}{\sqrt{2}}(0\rangle + 1\rangle)$							
$ 1\rangle$	$\frac{1}{\sqrt{2}}(0\rangle - 1\rangle)$							

Quantencomputer

Echte Quantencomputer sind leicht zugänglich:

- Freie Accounts nach Registrierung
- einfach zu bedienende grafische Benutzeroberfläche

Fachdidaktisches Problem: Was machen wir damit?



Quantencomputer

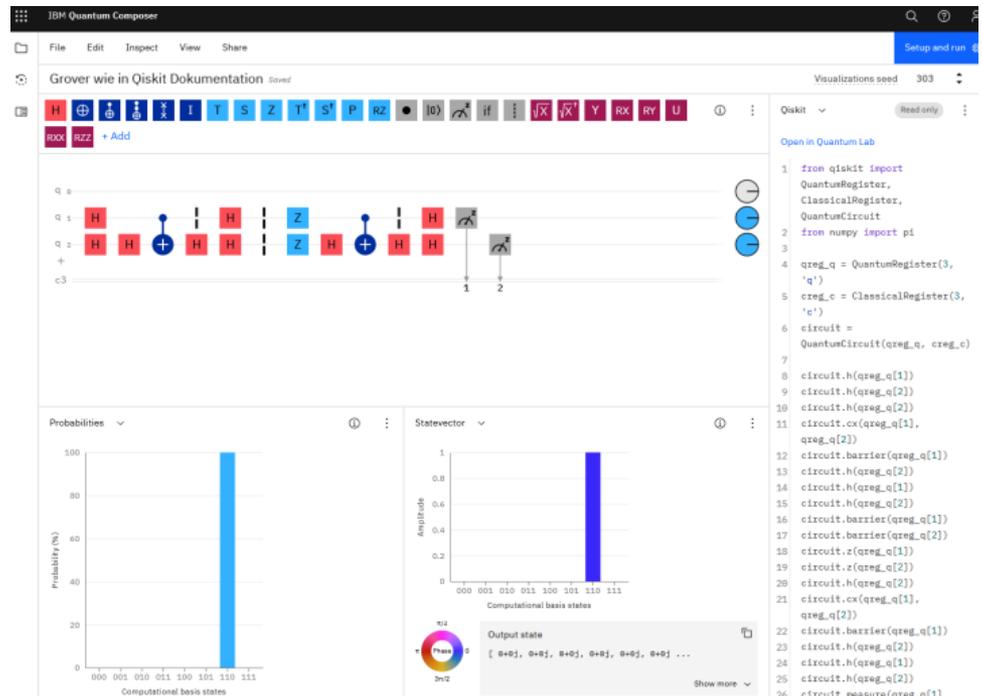
Echte Quantencomputer sind leicht zugänglich:

- Freie Accounts nach Registrierung
- einfach zu bedienende grafische Benutzeroberfläche

Fachdidaktisches Problem: Was machen wir damit?

Drei Vorschläge:

- a) Quantenspiel mit Gewinnstrategie (Quantum Penny Flip)
- b) VR-Spiel mit Quantengattern
- c) Interferenzexperiment auf IBM Q



a) Quantum Penny Flip

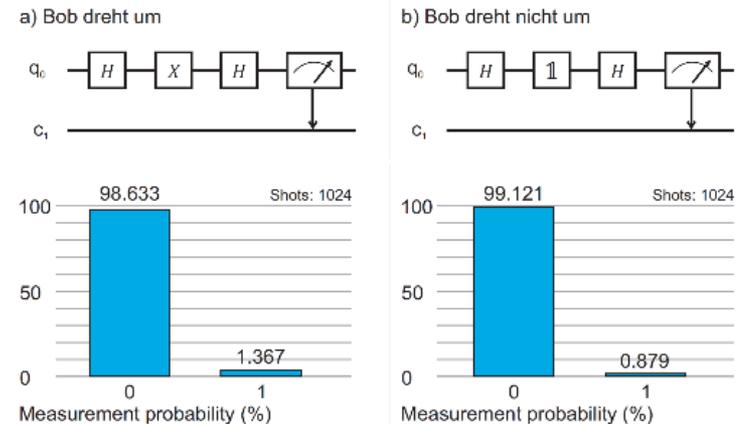
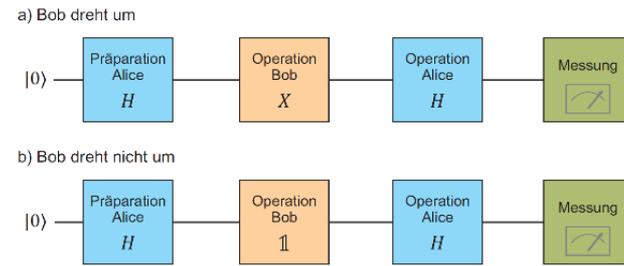
Alice und Bob wenden abwechselnd eine Operation auf ein Qubit an („Münze“)

- Umdrehen
- nicht Umdrehen
- Überlagerungszustand (H-Gate)
nur Alice kann Quantenphysik

→ **Gewinnstrategie für Alice**
(Meyer 1999)

Selbständiges Durchspielen auf einem
echten Quantencomputer möglich

Müller, Greinert: “Playing with a Quantum Computer”
arxiv.org/abs/2108.06271

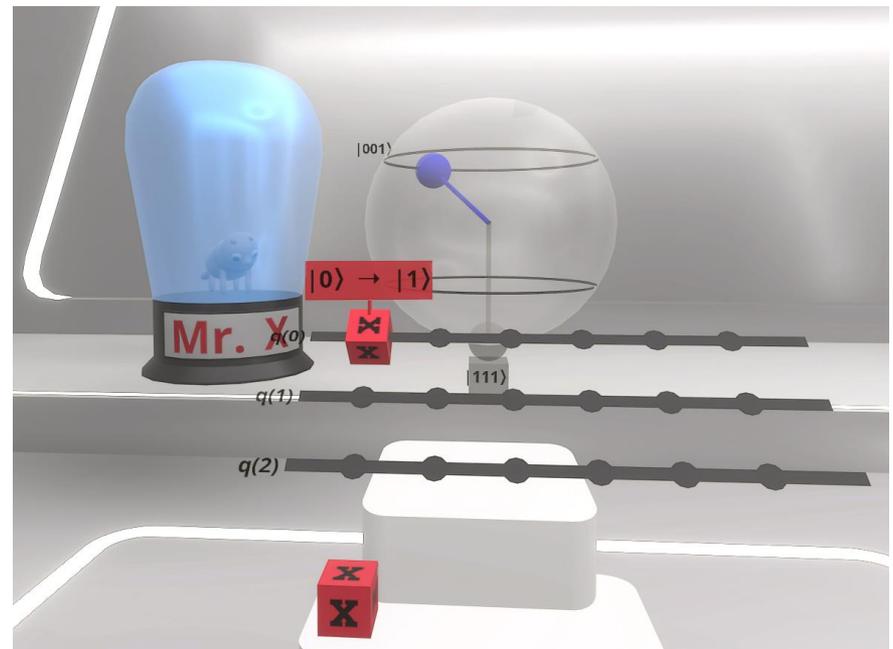


b) QuantumVR

Escape-Room-Spiel in VR,

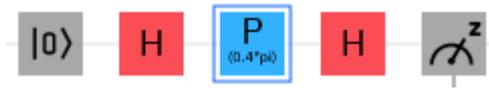
Outreach-Projekt, bei dem verschiedene Aufgaben mit Quantengattern gelöst werden müssen

<https://store.steampowered.com/app/2089590/QuantumVR/>

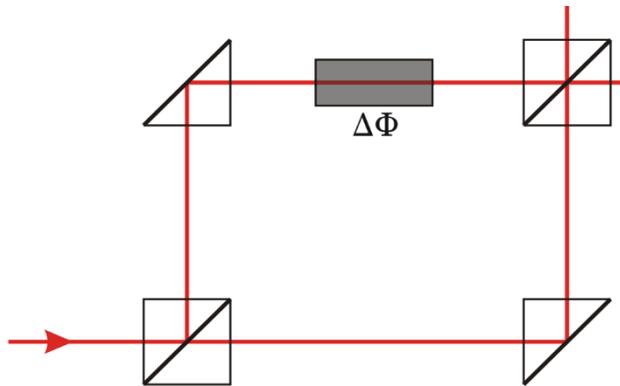


c) Interferenzexperiment

Ein „Interferometer“ auf dem Quantencomputer bauen (Dorn-Bader Oberstufe 2022)



Gleiche Struktur wie Mach-Zehnder-Interferometer

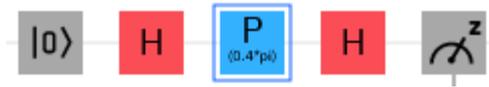


Arbeitsteilig in Gruppen für verschiedene Phasenverschiebungen $\Delta\phi$

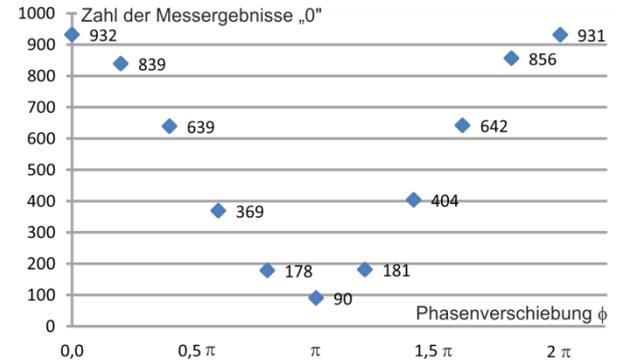
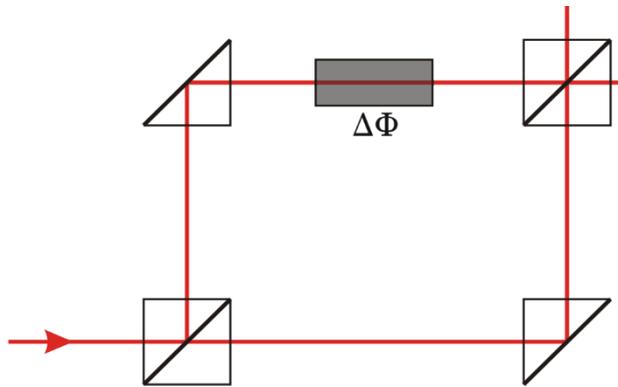
Ausprobieren auf IBM Q

c) Interferenzexperiment

Ein „Interferometer“ auf dem Quantencomputer bauen (Dorn-Bader Oberstufe 2022)



Gleiche Struktur wie Mach-Zehnder-Interferometer

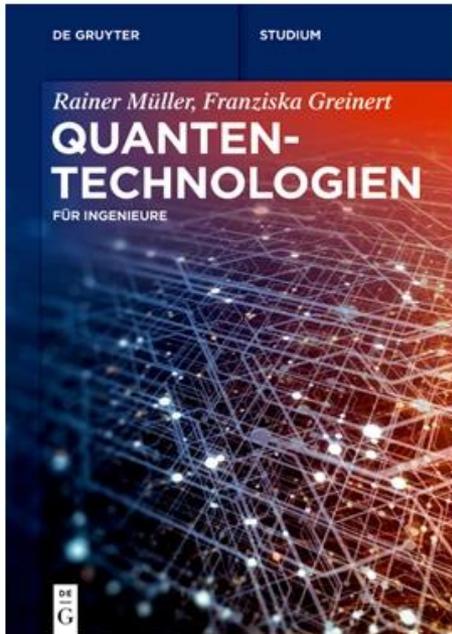


Arbeitsteilig in Gruppen für verschiedene Phasenverschiebungen $\Delta\phi$

Quantentechnologien zum Lernen der Quantenphysik?

Tendenzen:

- „die alte Quantenmechanik, aber unter neuer Perspektive gesehen“
- Möglichkeit der Kontextorientierung
- Quantenkryptographie als vielversprechende Anwendung
→ „kommt gut an“
- Gegenüber heute: Polarisierung des Lichts wird wichtiger werden.
→ experimentelle Möglichkeiten
- Verbindung zu Informatik und Mathematik (Stochastik) statt Chemie (Atomphysik)
- Neue Inhalte für Aufgabenstellungen werden erkennbar (bisher in der Quantenphysik begrenzt).
- Sehr nahe an modernen Anwendungen
- Einsatzmöglichkeit von Quantencomputern: fachdidaktische Herausforderung



Müller / Greinert

Quantentechnologien

Für Ingenieure

Fachbuch

Buch, Softcover

2023

236 S. 19 b/w and 85 col. ill.

De Gruyter Oldenbourg. ISBN 978-3-11-071719-8

Format (B x L): 16.8 x 23.8 cm

Gewicht: 426 g

Das Werk ist Teil der Reihe: ► **De Gruyter Studium**