

Gesche Pospiech
TU Dresden, Fakultät Physik, Professur Didaktik der Physik

Quantenphysik und Quantentechnologien - Chancen für den Physikunterricht!?

32. Karlsruher Didaktik-Workshop
31. 5. 2024

Die 2. Quantenrevolution

- **... kam auf leisen Sohlen**
 - getrieben von Fragen nach den Grundlagen der Quantenphysik und ihrer Bedeutung für unser Weltverständnis
 - Und (zunächst) **nicht**: weil man konkrete Anwendungen entwickeln wollte.
- **Erkenntnisgewinnung mit ungeahnten Auswirkungen**
 - Klassische Instrumente führen zur Entdeckung der Quantenphysik, der 1. Quantenrevolution
 - Quantenphysikalische Instrumente führen zur 2. Quantenrevolution: Quantensensoren, Quantenmetrologie, Quanteninformation, Quantenkommunikation ...

Quantentechnologien

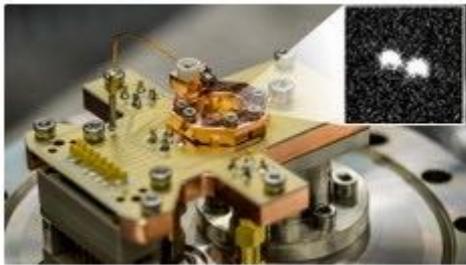
Schwerpunkte der Forschung in Deutschland unter der Federführung des Bundesministeriums für Bildung und Forschung



QUANTENTECHNOLOGIE IM AUFWIND

Mehr Mut für Europas Entscheidungsträger

Die Quantenkryptographie ist die erste wirklich breite und weltweite Anwendung der Quantentechnologie. Ein Gespräch mit dem



QUANTENTECHNOLOGIEN

Wettlauf um den Quantencomputer Made in Germany

An vielen Orten Deutschlands wird an leistungsfähigen Quantencomputern gearbeitet, zum Teil in Zusammenarbeit mit großen IT-Firmen. Nun will auch das Land Niedersachsen einen solchen Wunderrechner bauen. 400 Wissenschaftler sind an dem Projekt beteiligt.

MÄCHTIGER QUANTENCOMPUTER

Wenn Photonen rechnen

Jetzt präsentieren auch chinesische Forscher einen Quantencomputer, der Rekorde bricht. Er berechnete eine für klassische Rechner unlösbare Aufgabe innerhalb von Minuten.



TEST FÜR QUANTENKRYPTOGRAFIE

Quantencodes spuken über den Dächern von Shanghai

Chinesische Forscher nehmen eine wichtige Hürde bei der Quantenkommunikation: Quantencodes lassen sich mit Lichtpulsen kilometerweit direkt durch die Luft übertragen – und das jetzt sogar innerhalb von Millionenstädten.

MANFRED LINDINGER 07.01.2021 ★ 33

Bedeutung für den Quantenphysikunterricht

- **Neue Wege zur Vermittlung der Grundlagen einer quantenphysikalischen Beschreibung der Welt**
- **„Demystifizierung“ der Quantenphysik im Rahmen pragmatischer Anwendung**
 - Quantenphysik ist Teil unserer Welt, nicht ein „Alien“

„..... we always have had a great deal of difficulty in understanding the world view that quantum mechanics represents. At least I do, because I'm an old enough man that I haven't got to the point that this stuff is obvious to me. Okay, I still get nervous with it. And therefore, some of the younger students ... you know how it always is, every new idea, it takes a generation or two until it becomes obvious that there's no real problem. It has not yet become obvious to me that there's no real problem.....“

(Feynman 1982)

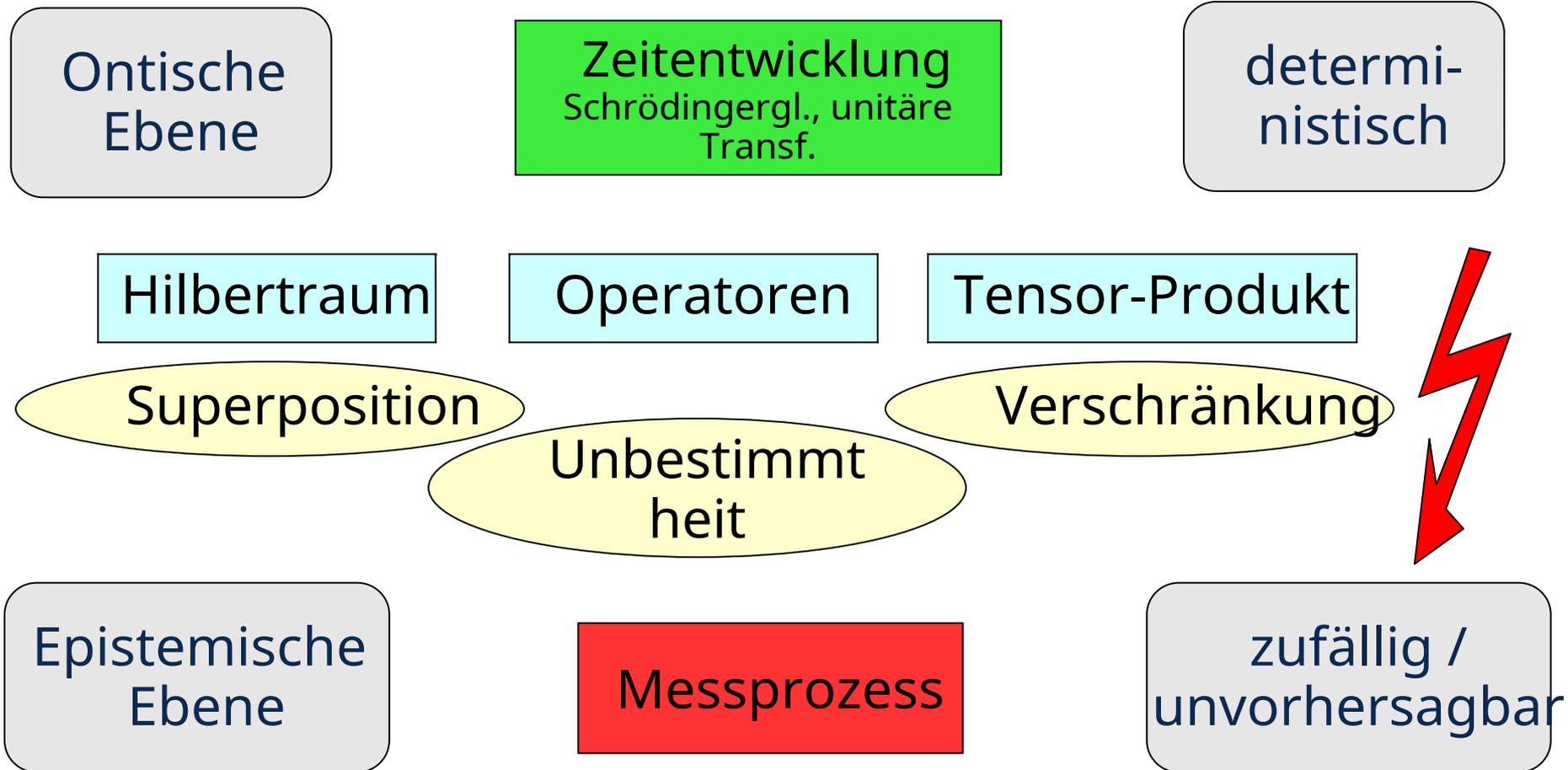
Quantenphysik ist eine normale physikalische Theorie

- **1. Quantenrevolution**
 - Experimentelle Beobachtungen: Spektrallinien, Strahlung schwarzer Körper, ..
 - Theorie: Mathematische Beschreibung beschränkt auf beobachtbare Phänomene
 - Problem: Physikalische Interpretation der Mathematik
 - Anwendungen: Laser, Transistor, ...
- **2. Quantenrevolution**
 - Theorie: Bell-Ungleichung, ...
 - Experimente: Nichtlokalität, Verschränkung, ...
 - Anwendungen: Quantencomputer, „Quantengeräte“,

Zentrale Begriffe

- **Eindeutige mathematische Beschreibung**
- **Probleme bei verbaler Beschreibung/ Interpretation**
- **„Wesenszüge“**
 - Superposition/ Interferenzfähigkeit
 - Unbestimmtheit/ Komplementarität
 - Verschränkung
 - **Stochastische, eindeutige Messergebnisse**
 - **(Ausschließliche) Vorhersagbarkeit von Wahrscheinlichkeiten**

Die Unvereinbarkeit



Quantenphysik als Teil unserer Welt

Nicht gegen die Quantenphysik kämpfen, sondern sie nutzen, d.h. quantenphysikalisch denken:

- **Kryptographie - Superposition:** Zufall des Messergebnisses für Erzeugung einer perfekten Zufallsfolge nutzen
- **Quantenkryptographie - Unbestimmtheit** (Sicherheit der Kommunikation): Auch ein Spion kann die Unbestimmtheit nicht überlisten
- **Quantenteleportation - Verschränkung:** nicht messen, sondern verschränken
- **Quantencomputer – Messprozess, ...** : Quantenobjekte gezielt manipulieren mit dem Ziel, die Wahrscheinlichkeit des korrekten Resultats zu erhöhen
- **Quantensensorik:** höchste Präzision der Quantenphysik

Quantenphysik ist unverzichtbarer Bestandteil der Allgemeinbildung

- **Weltbeschreibung**
 - Komplementär zur klassischen Physik
 - Auseinandersetzung mit Verständnis: Interpretationsdebatte
 - Bewusstes Einnehmen einer pragmatischen Haltung
- **Ziele des Physikunterrichts**
 - Bewusstsein für das Wesen der Physik
 - Kompetenz zur Reflexion von Berichten in populären Medien
 - Teilnahme am gesellschaftlichen Diskurs
- **Anwendungs- und Alltagsbezug**
 - Relevanz der Grundlagen der Quantenphysik für Anwendungen in der Quantentechnologie
 - Hoher Bedarf an Spezialisten in einem interdisziplinären Feld

Quantenphysik im Kontext Philosophie oder Technologie?

Schwerpunkt 1. Quantenrevolution

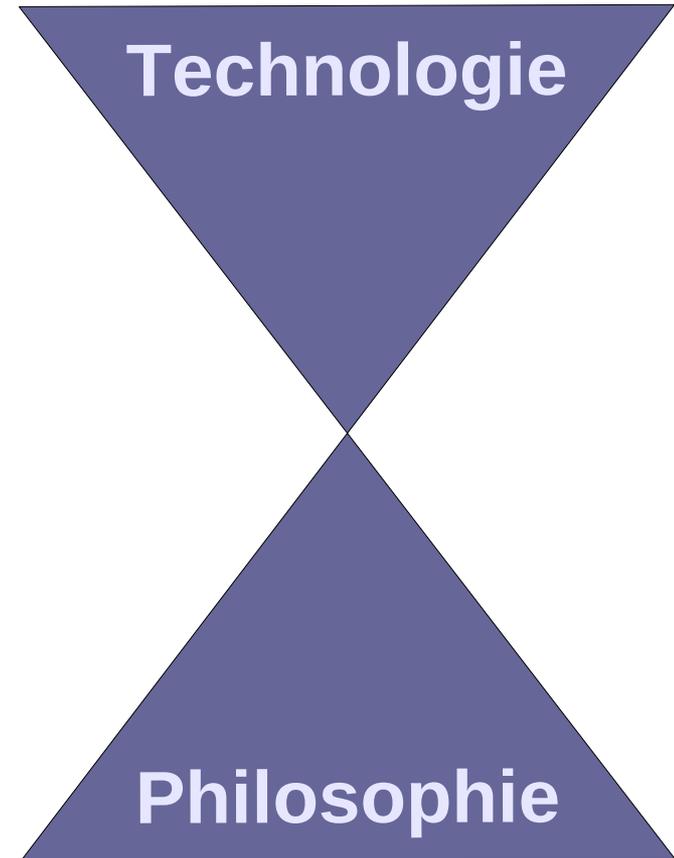
- Neue Grundlagen der Physik, v. a. Unbestimmtheit, Messprozess und Verschränkung führen zu:

Diskussion über Interpretation und Weltbild
- Philosophische Fragen

Schwerpunkt 2. Quantenrevolution

- Technologische Anwendungen zeigen

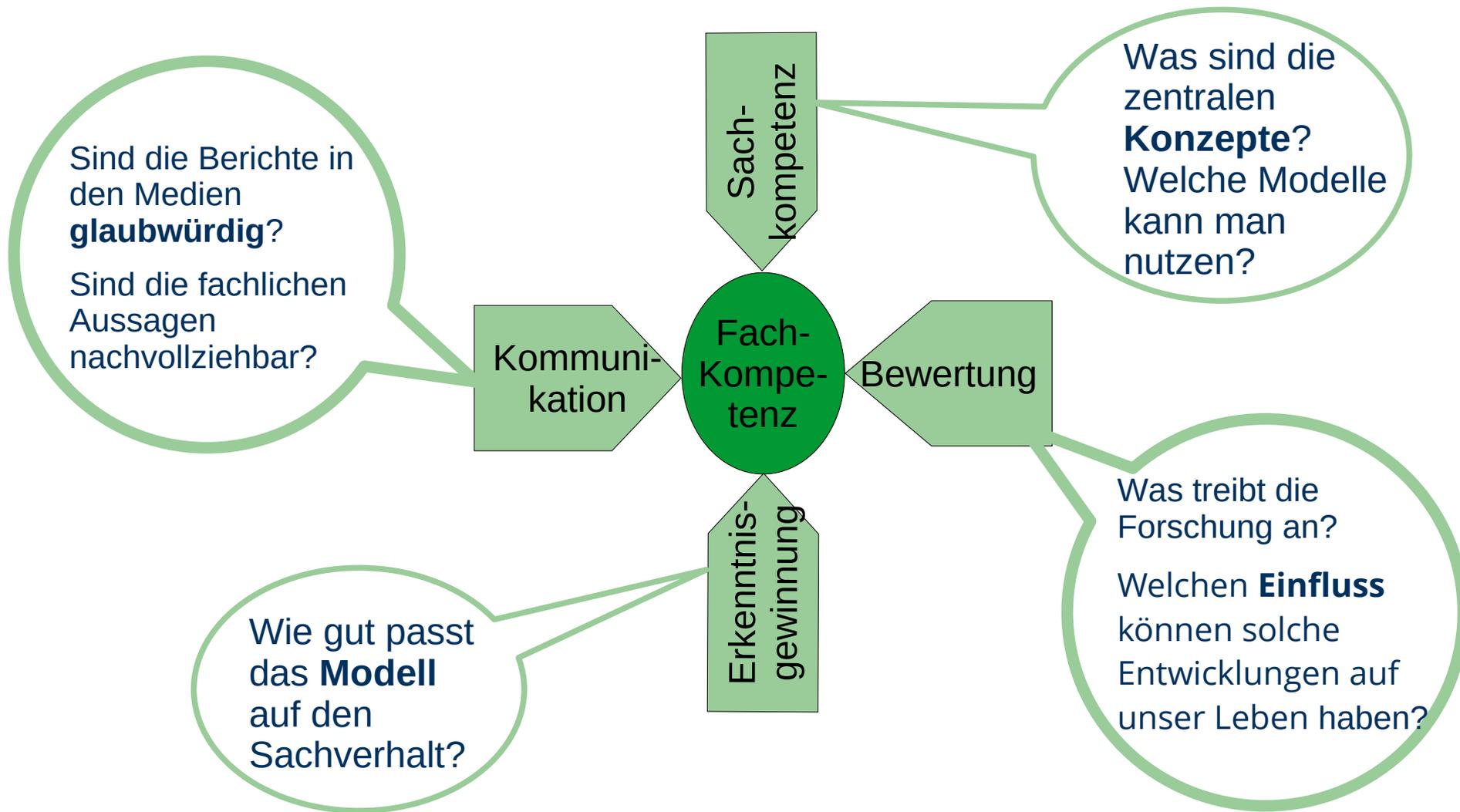
Quantenphysik als politischer und wirtschaftlicher Faktor
- Soziale, ökonomische, strategische Fragen



Quantenphysik im Rahmen allgemeiner Bildungsziele

- **Wie kann Quantenphysik zu Bildungszielen beitragen?**
 - Macht mathematischer Deduktionen
 - Bedeutung experimenteller Präzision
 - Bedeutung und Grenzen physikalischer Modelle in Erklärungen
 - Bewusste Einnahme klassischer und Erschließung neuer Perspektiven auf die Welt (quantenphysikalisches Weltbild)
- **Erschließung moderner Technologien**
 - Auseinandersetzung mit Anwendungen
 - Wahrnehmen und Bearbeiten von Problemstellungen

Quantenphysik und die Bildungsstandards

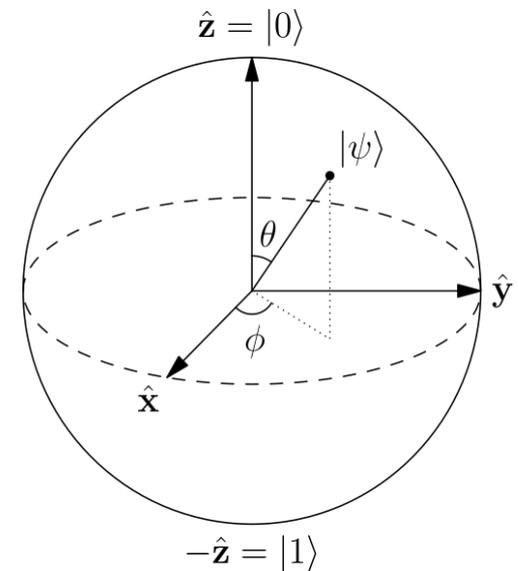


Lehren und Lernen der Quantenphysik erfordert Bewusstsein für Sprache und Modelle

- **Begriffe und mathematische Strukturen lassen sich nicht trennen**
 - Mathematische Strukturen bestimmen die möglichen Phänomene und Interpretationen.
- **Wichtige Elemente im Lehrprozess**
 - Überlegter Einsatz von Modellen
 - Sensible Nutzung von Sprache und Worten, die in der klassischen Physik eine festgelegte Bedeutung haben
 - Verwendung von Analogien und Metaphern
- **Einordnung historischer Debatten**
 - Überdenken von Vermittlungstraditionen
 - Interpretationsdebatten sollten relativiert werden
 - Vermeidung eines mehr oder weniger historischen Lehrpfades

Nutzung von Zwei-Zustandssystemen

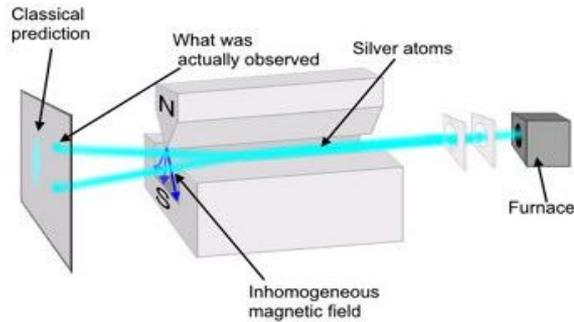
- **Mathematisch einfach**
 - Zweidimensionaler Zustandsraum, Darstellung auf Blochkugel
 - Diskrete Eigenwerte
- **Physikalisch vielseitig einsetzbar**
 - Übertragbar auf zahlreiche (stark vereinfachte) Beispiele
 - Relevant für aktuelle Anwendungen, v.a. Quantencomputer und Quantenalgorithmen
- **Vorteile für das Lernen**
 - Prinzipien der Quantenphysik klar sichtbar
 - Keine Interferenz mit klassischen Begriffen/ Modellen wie Welle und Teilchen



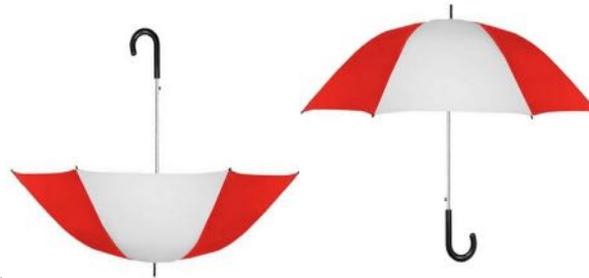
Q-Bit als abstraktes Zwei-Zustandssystem

- **Abgeleitet vom klassischen Bit**
 - Anschluss an Informatik
- **Abgeleitet vom Spin resp. Modellsystemen (Polarisation)**
 - Anschluss an Physik
- **Physikalisch-mathematische Grundlage: Superposition**
 - Veranschaulichung an der Blochkugel oder am Blochkreis
 - „Zwischenzustände“ möglich

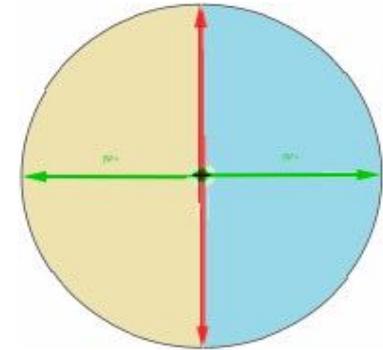
Repräsentationen – von gegenständlich bis mathematisch



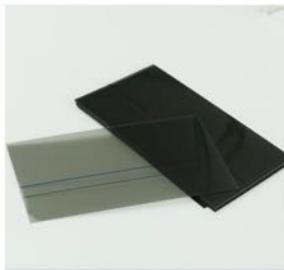
a)



c)

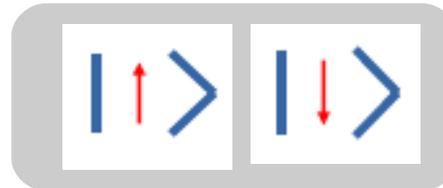


e)



b)

Gedanken- oder
Analogieexperiment



d)

Symbolisch-
bildliche
Darstellung



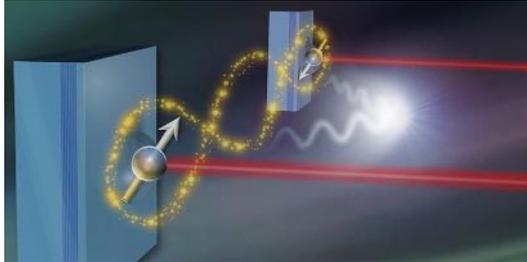
f)

Symbolisch-
mathematische
Darstellung

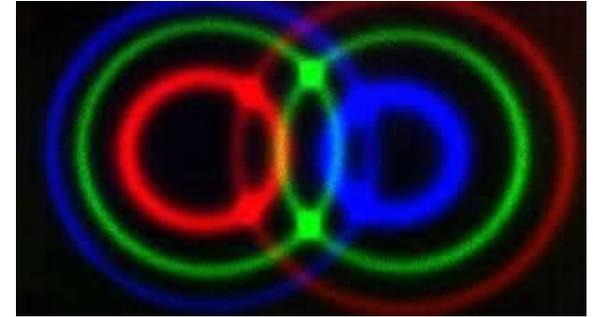
Beispiele: Darstellung von Verschränkung



<https://www.youtube.com/watch?v=IVbsnEeVNWo>



<https://www.phys.ethz.ch/de/forschung/highlights/research-highlights/2017/04/schnellere-verschraenkung-entfernter-quantenpunkte.html>



<https://www.weltderphysik.de/gebiet/teilchen/news/2017/das-ganze-ist-viel-mehr-als-die-summe-der-teile/>



https://www.deutschlandfunk.de/rekord-bei-verschraenkung-physiker-legen-grundstein-fuer.676.de.html?dram:article_id=458230

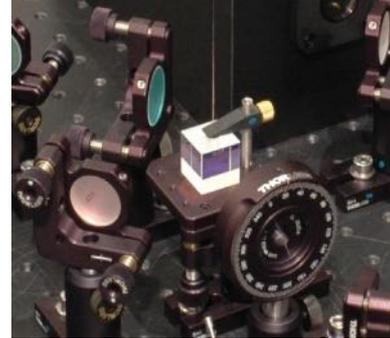


<https://www1.physik.uni-hamburg.de/ilp/ag-schnabel/forschung/quantenkommunikation.html>



<https://www.sciencefocus.com/science/quantum-theory-the-weird-world-of-teleportation-tardigrades-and-entanglement/>

Simulationen



- **Typen von Simulationen**
 - Interaktive Bildschirmexperimente (quantumlab)
 - Simulationen in einer symbolischen Darstellung (<https://www.st-andrews.ac.uk/physics/quvis/>)
- **Einbettung von Simulationen mit Tutorials (A. Kohnle)**
 - Vertrautmachen mit der Simulation
 - Systematisch mit der Simulation arbeiten
 - Aufgaben bearbeiten und Probleme lösen

The screenshots show the QuVis interface for three different quantum experiments. Each interface includes a quantum circuit diagram, a table of results, and a 'Simulation' button. The top screenshot is for 'Quanten Kryptographie (BBM92)', the middle for 'Quanten Kryptographie (BB84)', and the bottom for 'Quanten Bombentest'.

Metapher zur Unbestimmtheit bei Quantenobjekten

Ein Bauer hat eine Herde mit **weißen und schwarzen Kühen und Pferden**. Diese möchte er jetzt zählen. Er treibt alle Tiere durch ein Doppel-Gatter: Links können nur die **Kühe**, rechts nur die **Pferde** hindurchgehen. In einem zweiten Schritt bringt er die **Pferde** unwiderruflich weg und sortiert danach die **Kühe** der **Farbe** nach, um eine Herde mit **weißen Kühen** zu erhalten. Nun möchte er sich vergewissern, daß er richtig sortiert hat, schaut nach, indem er nur die **weißen Kühe** wieder durch das Doppel-Gatter schickt, und entdeckt plötzlich **Pferde** darunter.

Überblick über Quantentechnologien

Quantensensorik

Anwendungsorientierung der Quantenphysik

- **Krebsdiagnostik**
 - Bildgebung mit Hilfe von Verschränkung (verschränkte Photonen im Mikrowellenbereich)
- **Gravimetrie**
 - Messung geringer Unterschiede durch Interferenz von Atomwolken – Bose-Einstein-Kondensate
- **Neurologische Anwendungen**
 - Hirndiagnostik durch hochaufgelöste Messung von Magnetfeldern
 - Steuerung von Prothesen, Exoskeletten, ...

Messung von Magnetfeldern mit NV-Zentren in Diamant

- **Zentrale physikalische Inhalte**
 - Spin, Kernspin
 - Energieniveaus von Atomen
- **Übergreifende Aspekte**
 - Berufsorientierung: Technologie und Grundlagenforschung
 - Vielfalt: Interdisziplinäre Forschungs- und Entwicklungsarbeit

Quantenkommunikation

Quantenkryptographie in den Medien

QUANTENKRYPTOGRAPHIE

Schlechte Karten für Lauscher

VON MANFRED LINDINGER - AKTUALISIERT AM 10.02.2021 - 18:58



Eine neue Ära für das Internet: In China werden abhörsichere Quantencodes bereits per Glasfaser und Satellit über große Distanzen verschickt. Nun zieht Europa nach und will ebenfalls seine kritische Infrastruktur besser schützen.

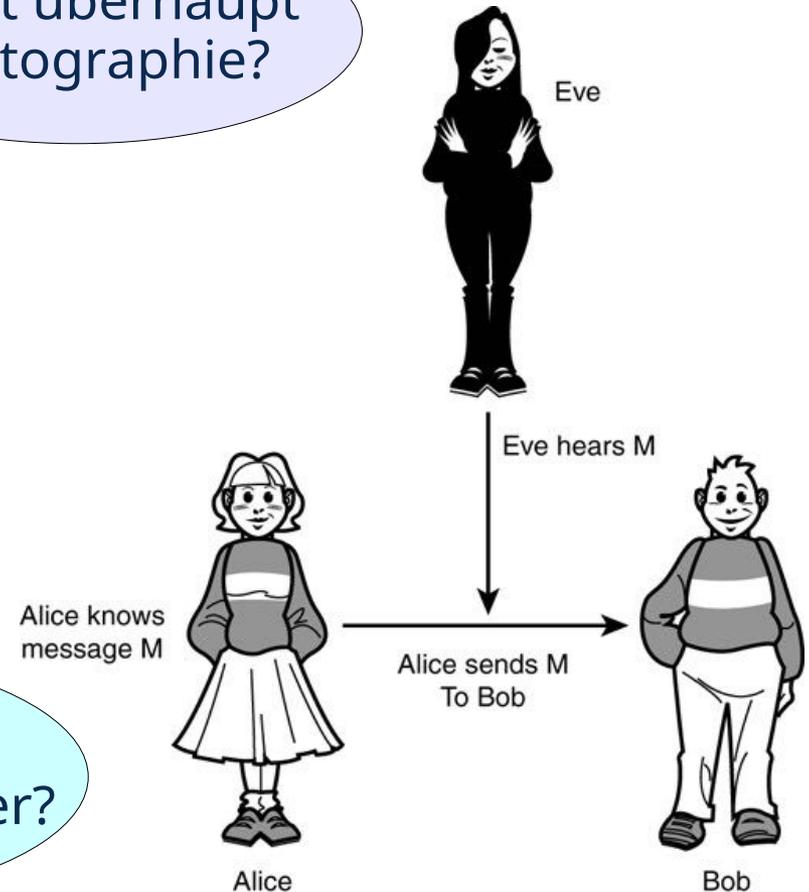
Problemstellung: Wie kann Kommunikation sicher werden?

Können Nachrichten so verschlüsselt werden, dass man ein mögliches Abhören entdeckt?

Was ist überhaupt Kryptographie?

Wie funktioniert Quantenkryptographie?

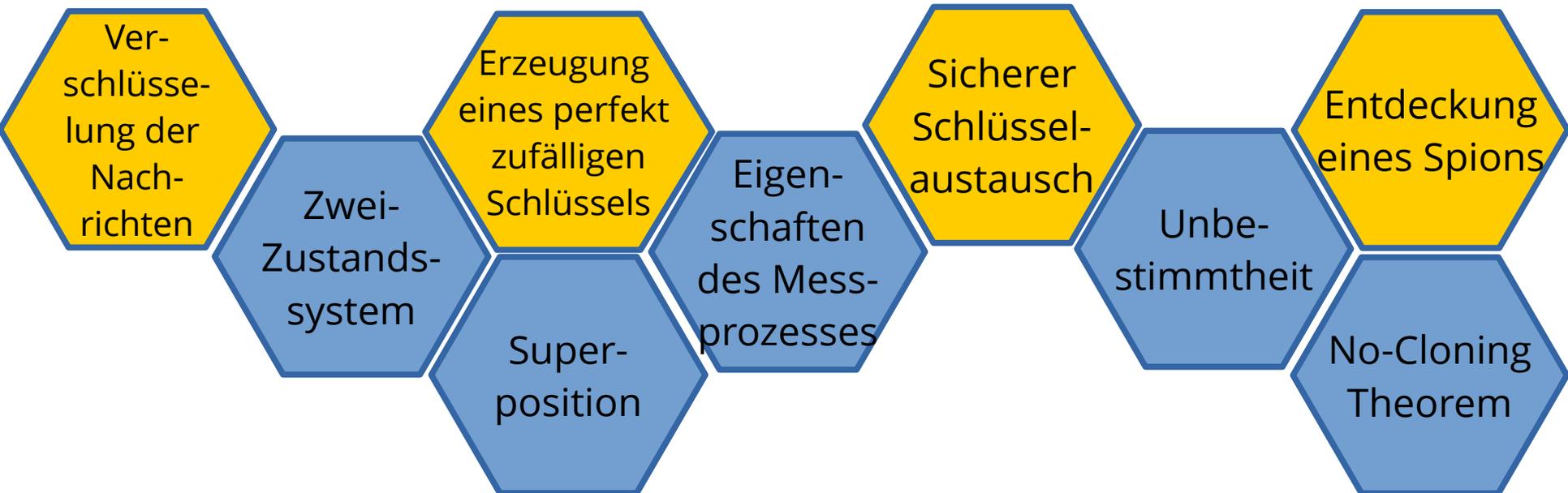
Warum ist Quantenkryptographie so sicher?



Verknüpfung von Konzepten und Anwendung



Beispiel Quantenkryptographie



Nutzen der Unbestimmtheit für die Quantenkryptographie (BB84 Protokoll)

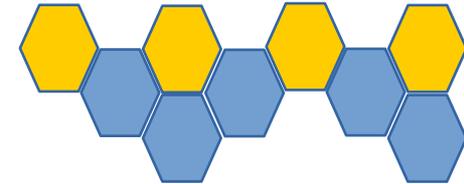
Wie kann “Unbestimmtheit” dazu dienen, einen Spion zu finden?

- **Ausgangslage:** Wenn Alice und Bob bei einem Photon die gleiche Basis verwendet haben, sind automatisch auch ihre Messresultate gleich.
- **Bedingung:** Wenn Eve nicht weiß, welche gemeinsame Basis verwendet wurde, wählt sie mit gewisser Wahrscheinlichkeit eine „falsche“ Basis.
 - No-Cloning-Theorem verhindert grundsätzlich Wissen um gemeinsame Basis
- **Folgerung:** Die zwischengeschaltete Messung durch Eve bewirkt, dass die Messresultate von Alice und Bob nicht mehr immer übereinstimmen
- **Abwehr:** Alice und Bob vergleichen einen Teil (ca 10-20%) ihrer Messresultate.

Einführung der Quantenkryptographie – Piloterprobung

- **Konzeption und Planung**

- Konzeption entlang des beschriebenen Interlacing
- Anknüpfen an klassische Kryptographie
- Berücksichtigung der Akzeptanzbefragung zur Dirac-Notation



- **Ergebnisse**

- Auch Interesse an technischer Realisierung
- Verständnis von Unbestimmtheit und Messprozess benötigt mehr Zeit als zuvor geplant
- Kleinschrittiges Vorgehen wichtig, keine Probleme mit der Mathematisierung

Quantenkommunikation

- **Quantenkryptographie, genauer gesagt: Quantenschlüsselaustausch, war das erste industrielle Spin-off**
- **Quantenteleportation wurde zur Demonstration der Verschränkung genutzt.**
- **Quantenrepeater nutzen Verschränkung resp. Übertragen von Verschränkung (entanglement swapping)**
 - Erste Prototypen sind realisiert (2023): NV-Zentren, Ionenfallen
 - Vision eines Quanteninternet

Realisierung eines Quantenrepeaters

- **Mit Hilfe einer Ionenfalle mit zwei $^{40}\text{Ca}^+$ -Ionen als Quantenspeicher**
- **Das eigentliche Protokoll**
 - Die beiden Ionen werden in den Grundzustand versetzt
 - Mit Laserpulsen werden sie energetisch angeregt.
 - Anschließend senden sie ein Photon aus, so dass die Ion-Photon Paare jeweils in einem verschränkten Zustand sind.
 - Die Photonen werden auf die Telekom-Wellenlänge konvertiert und mit Hilfe von Glasfaser zu dem Knoten A resp. Knoten B geleitet.
 - Im Repeater wird das deterministische „entanglement swapping“ durchgeführt, so dass nun die beiden Photonen an den Knoten A und B verschränkt sind.

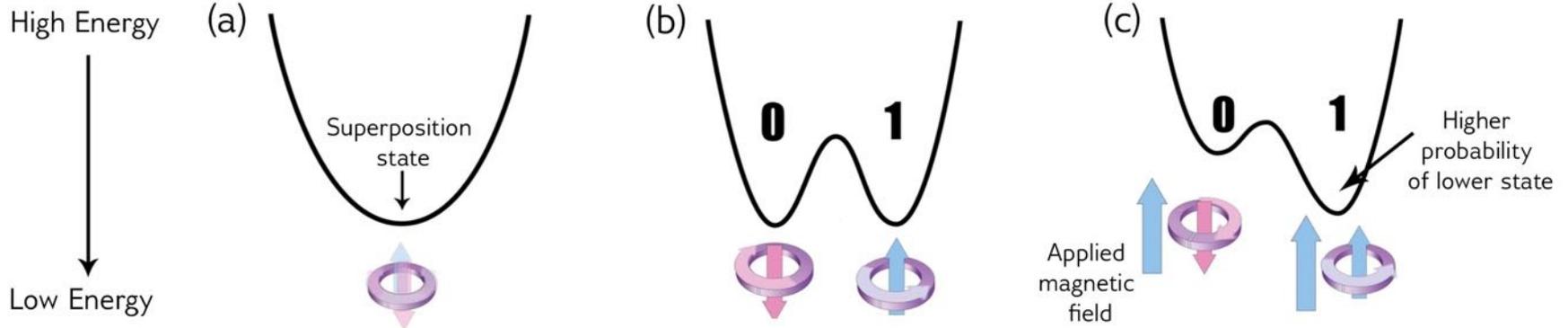
Quantencomputer

Quantencomputer

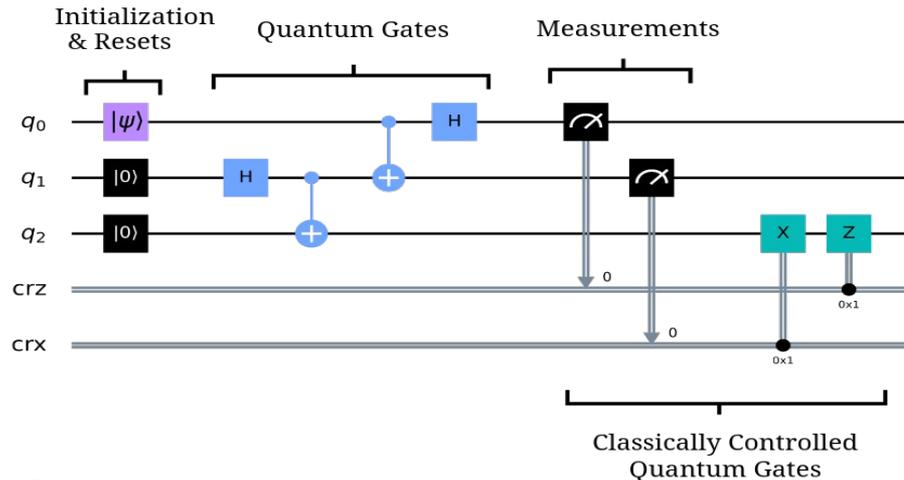
- **Forschung wurde durch eine erste Anwendungsmöglichkeit, den Shor'schen Algorithmus (1992), getriggert**
- **Rasante Fortschritte in den letzten Jahren in der Hardware-Entwicklung**
- **Geeignete Algorithmen für Quantencomputer noch nicht ganz klar**
- **Hybrid-Architekturen erscheinen wahrscheinlich**

Verschiedene Quantencomputer

Quantum annealing

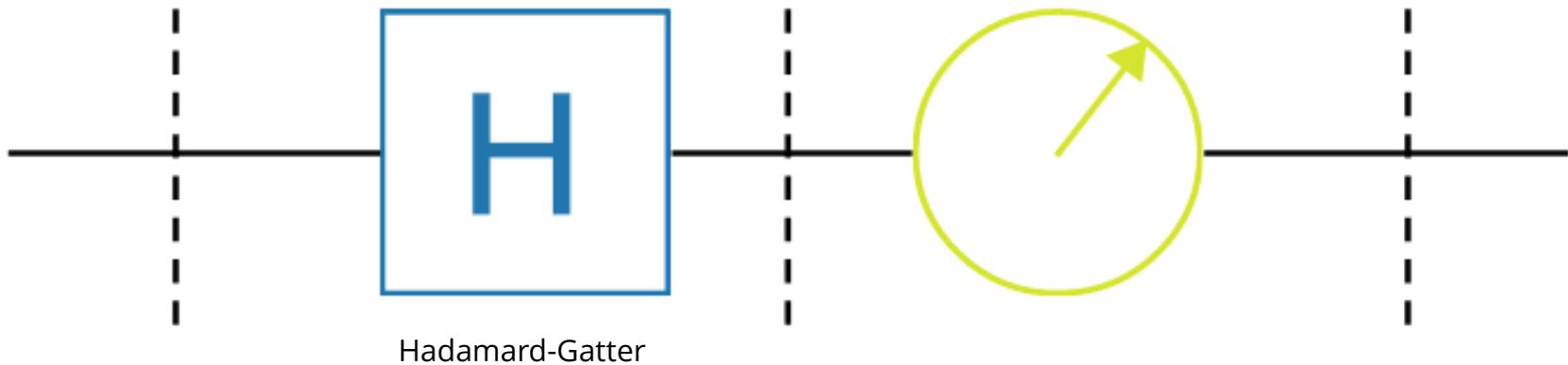


Quantum logic circuit



„Hello World“ des Quantencomputers

- **Der Quanten-Münzwurf**
 - Q-Bit initialisieren
 - Q-Bit in Superpositionszustand bringen
 - Q-Bit messen



Katja Michalowski, 2021

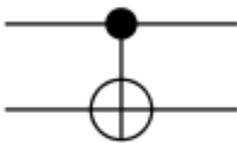
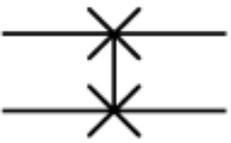
Erzeugung von Verschränkung

- **Aus physikalischer Sicht**

- Parametrische Downconversion (verschränkte Photonen)
- Strahlteiler

- **In einem Quantencomputer**

- CNOT-Gatter (oder SWAP-Gatter)
- Realisierung der Verschränkung hängt von Art der Q-Bits ab.

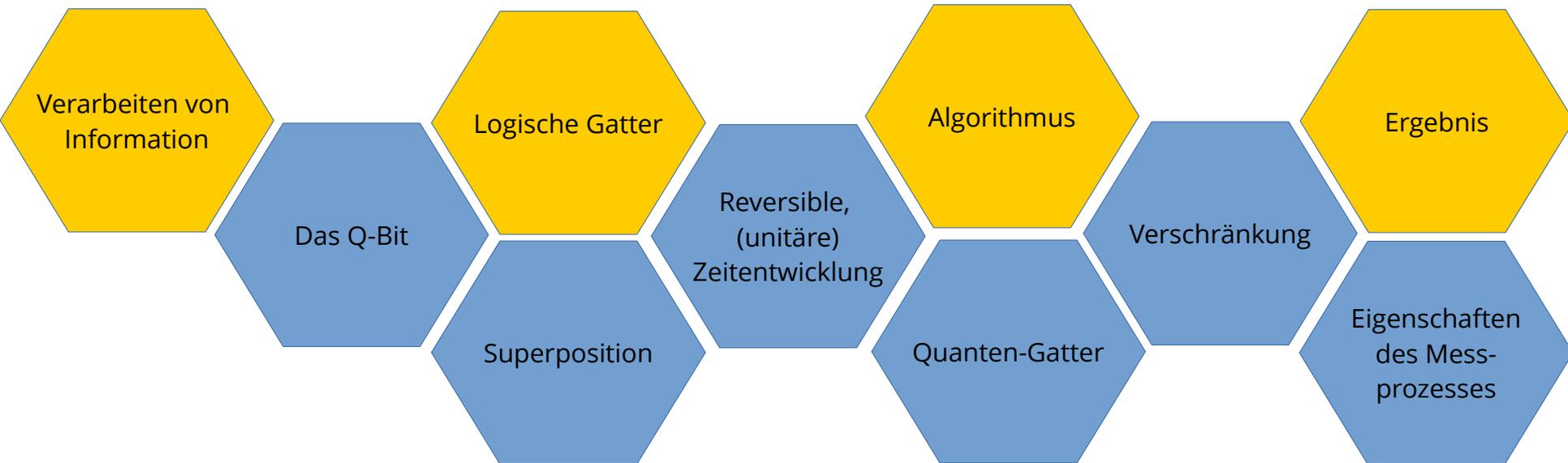
CNOT	SWAP
	
Herstellen von Verschränkung	
$ 0, 0\rangle, 0, 1\rangle$ bleiben $ 1, 0\rangle \rightarrow 1, 1\rangle$ $ 1, 1\rangle \rightarrow 1, 0\rangle$	$ 0, 0\rangle, 1, 1\rangle$ bleiben $ 1, 0\rangle \rightarrow 0, 1\rangle$ $ 0, 1\rangle \rightarrow 1, 0\rangle$
$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$

Charakteristika eines Quantencomputers

- **Reversible Algorithmen**
 - Reversible Quantengatter als Grundlage
- **Q-Bits “kondensieren” Information durch die Superposition (“dense coding”)**
 - Q-Bits lassen sich verschränken → n Q-Bits können 2^n Bits kodieren
- **(Beliebig) viele verschränkte Q-Bits lassen sich in einem einzigen Schritt manipulieren**

Verbindung Informatik und Quantenphysik

Beispiel Quantencomputer



Quantensimulationen

- **Simulation einfacher Moleküle**
 - Umgebung des Qubits zum Teil der Berechnung machen, nicht als Fehlerquelle wahrnehmen

Öffentliche Investitionen in Quantencomputer 2018-2021 in Mio. US\$

LBBW Blickpunkt Corporates

Quantencomputer – eine Innovation, die die Welt verändern kann

ERSTELLT AM: 10.01.2022 17:05

ERSTMALIGE WEITERGABE: 10.01.2022 17:13



https://www.lbbw.de/konzern/research/2022/studien/20220110-blickpunkt-corporates-quantencomputer_aehmi5wjsf_m.pdf

Bedeutung dieser Technologien für den Unterricht zur Quantenphysik

**Welche Technologien sind
in welcher Hinsicht
geeignet, um Schülerinnen und Schüler
in die Grundlagen der Quantenphysik
und deren Anwendungen einzuführen?**

Charakteristik ausgewählter Anwendungen

Anwendung	Grundprinzip
Quantenkryptographie	Messprozess, Unbestimmtheit
Quantenteleportation	Verschränkung
Quantenannealer	Schrödingergleichung, Hamiltonian
Quantencomputer	Q-bit, Verschränkung, Unitarität
Quantensensor	e. g. Atomare Energieniveaus, Spin, ..

Kriterien für die Auswahl einer Anwendung

- **Berücksichtigung zentraler Konzepte resp. Prinzipien**
- **Interesse der Lernenden**
- **Möglichkeit zur sachgerechten Vereinfachung**
- **Möglichst direkte Bedeutung der Konzepte für die Funktionsweise der Anwendung**
- **Relevanz des Unterschieds von klassischer und Quantenphysik**

Entscheidungsmatrix

	Gewicht	Kryptographie	Teleportation	Annealer	Quanten computer	Sensor
Youtube calls		1.211000	10.430000	<100000	18.010000	466000
Interesse	0,2	2	4	1	5	1
Verein- fachung	0,3	5	4	2	3	4
Klarheit	0,3	5	5	3	3	3
Relevanz	0,2	5	5	3	5	3
Summe	1	4,4	4,5	2,3	3,8	2,9

Fazit

- **Die Grundprinzipien der Quantenphysik sind Teil der Allgemeinbildung, da sie zu einer vollständigen physikalischen Weltbeschreibung gehören**
- **Quantentechnologien, insbesondere der Quanteninformatik, nutzen die Grundprinzipien der Quantenphysik in sehr direkter Art und Weise**
- **Quantentechnologien sind ein zukunftssträchtiges Feld, auch im Hinblick auf die Berufswahl**