

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

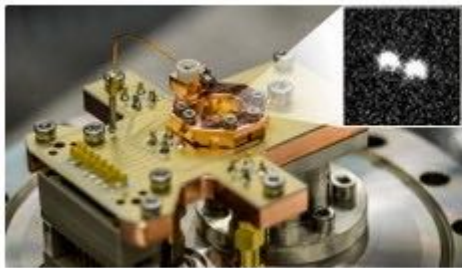
Schwerpunkte der Forschung in Deutschland unter der Federführung des Bundesministeriums für Bildung und Forschung



## 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)

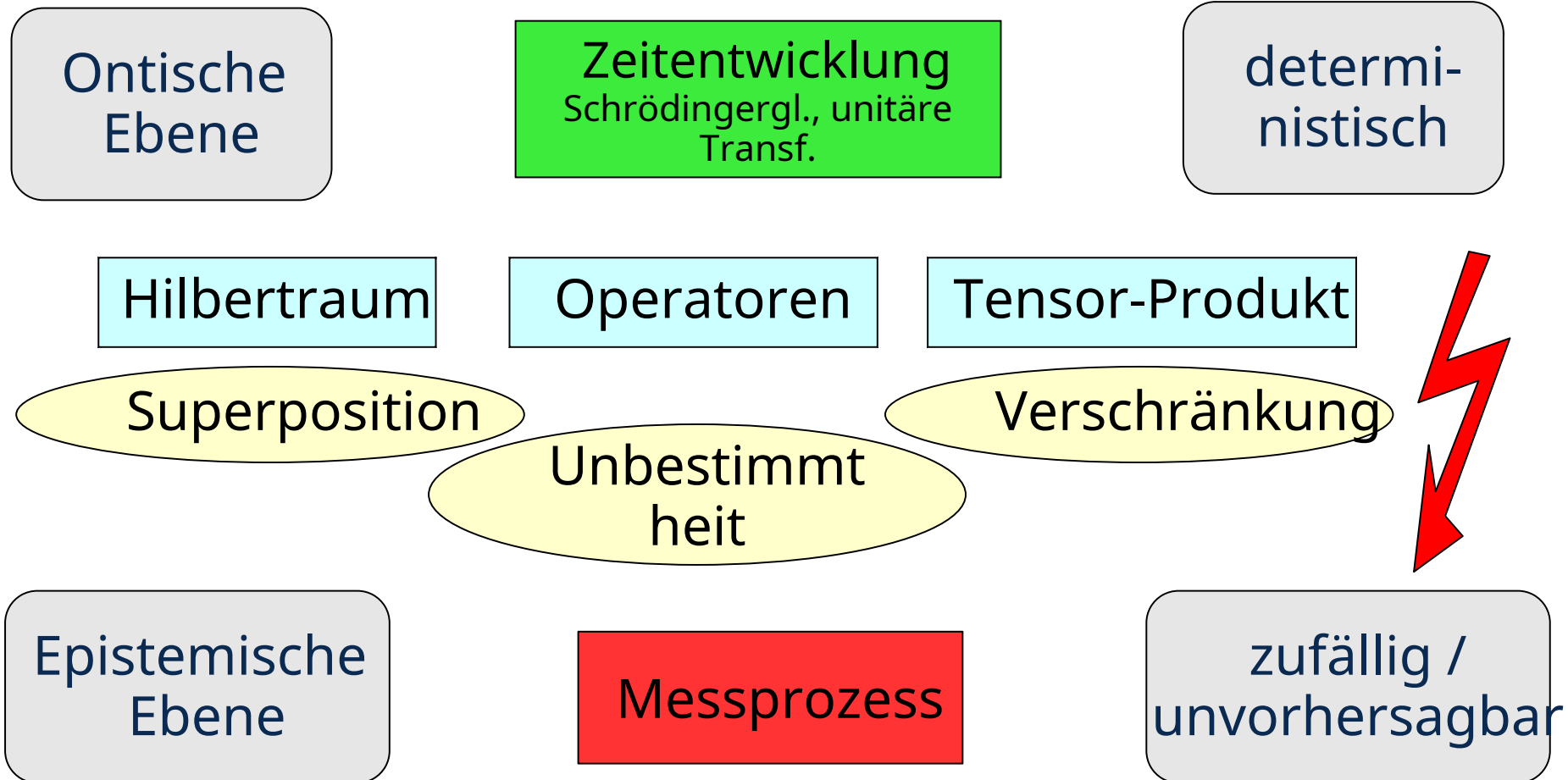
# Quantenphysik ist eine normale physikalische Theorie

- **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

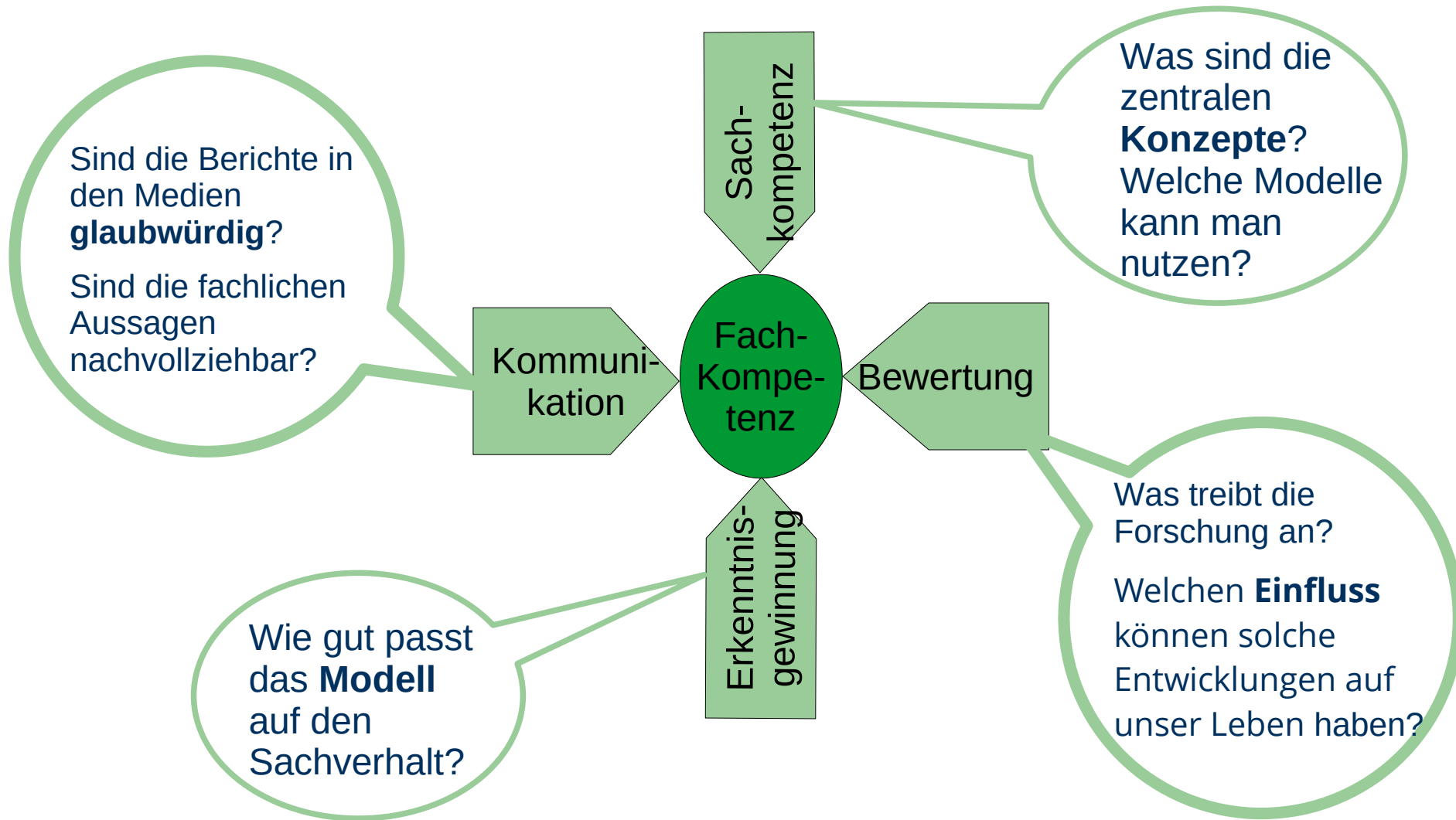
- Technologische Anwendungen zeigen  
  
Quantenphysik als politischer und wirtschaftlicher Faktor
- Soziale, ökonomische, strategische Fragen



# 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

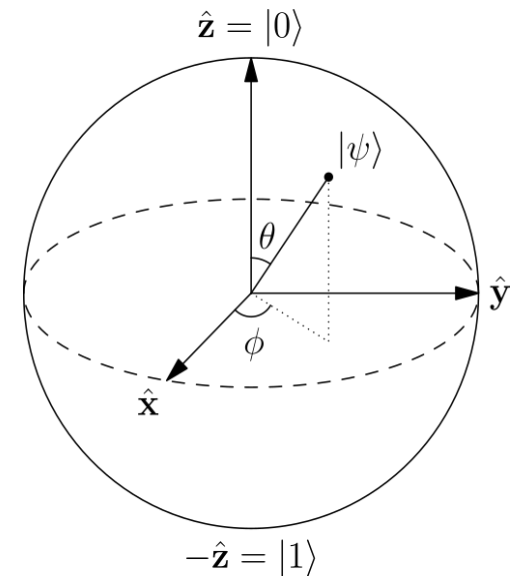


# Lehren und Lernen der Quantenphysik erfordert Bewusstsein für Sprache und Modelle

- **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

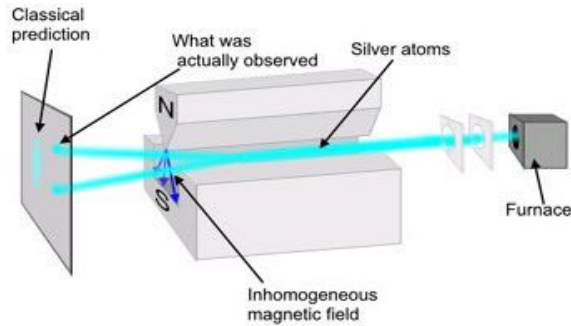
- **Mathematisch einfach**
  - Zweidimensionaler Zustandsraum, Darstellung auf Blochkugel
  - Diskrete Eigenwerte
- **Physikalisch vielseitig einsetzbar**
  - Übertragbar auf zahlreiche (stark vereinfachte) Beispiele
  - Relevant für aktuelle Anwendungen, v.a. Quantencomputer und Quantenalgorithmen
-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



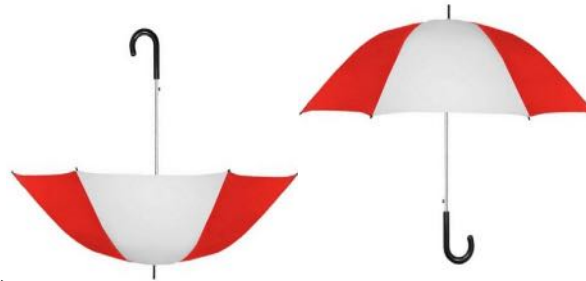
# Q-Bit als abstraktes Zwei-Zustandssystem

- **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

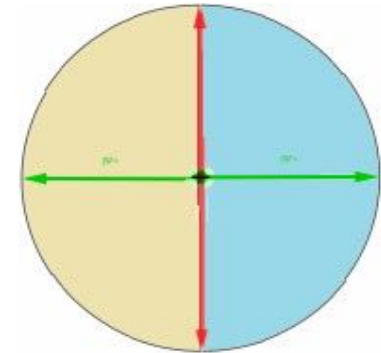
# Repräsentationen – von gegenständlich bis mathematisch



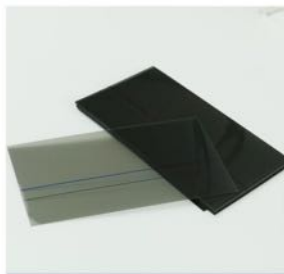
a)



c)

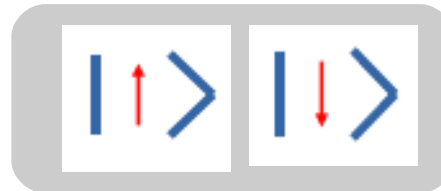


e)



b)

Gedanken- oder  
Analogieexperiment



d)

Symbolisch-  
bildliche  
Darstellung



f)

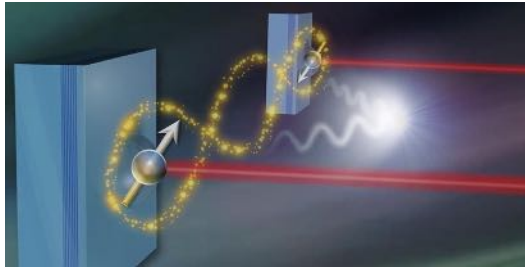
Symbolisch-  
mathematische  
Darstellung



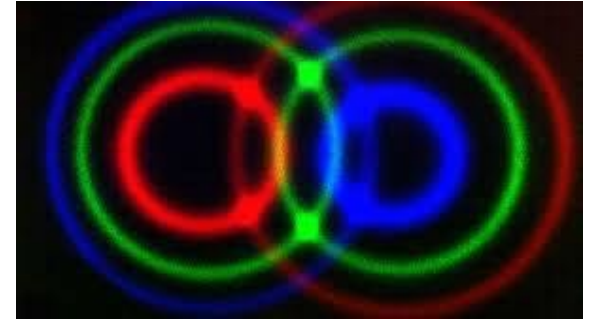
# Beispiele: Darstellung von Verschränkung



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

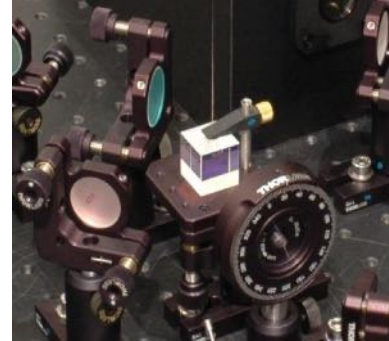


<https://www1.physik.uni-hamburg.de/ilp/ag-schnabel/forschung/quantenkommunikation.html>



<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 display the QuVis software interface for quantum simulations. Each interface includes a title bar, a simulation diagram, control options, and a data table.

**Quanten Kryptographie (BBM92)**: Shows a quantum circuit with two parties, Alice and Bob, and a table of results for different input states.

Ergebnis	Alice	Bob	Ergebnis	Alice	Bob	Ergebnis	Alice	Bob
0	0	0	1	1	1	2	2	2
1	1	1	0	0	0	3	3	3
2	2	2	1	1	1	4	4	4
3	3	3	0	0	0	5	5	5

**Quanten Kryptographie (BB84)**: Shows a quantum circuit with two parties, Alice and Bob, and a table of results for different input states.

Ergebnis	Alice	Bob	Ergebnis	Alice	Bob	Ergebnis	Alice	Bob
0	0	0	1	1	1	2	2	2
1	1	1	0	0	0	3	3	3
2	2	2	1	1	1	4	4	4
3	3	3	0	0	0	5	5	5

**Quanten Bombentest**: Shows a quantum circuit with two parties, Alice and Bob, and a table of results for different input states.

Ergebnis	Alice	Bob	Ergebnis	Alice	Bob	Ergebnis	Alice	Bob
0	0	0	1	1	1	2	2	2
1	1	1	0	0	0	3	3	3
2	2	2	1	1	1	4	4	4
3	3	3	0	0	0	5	5	5

# 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.

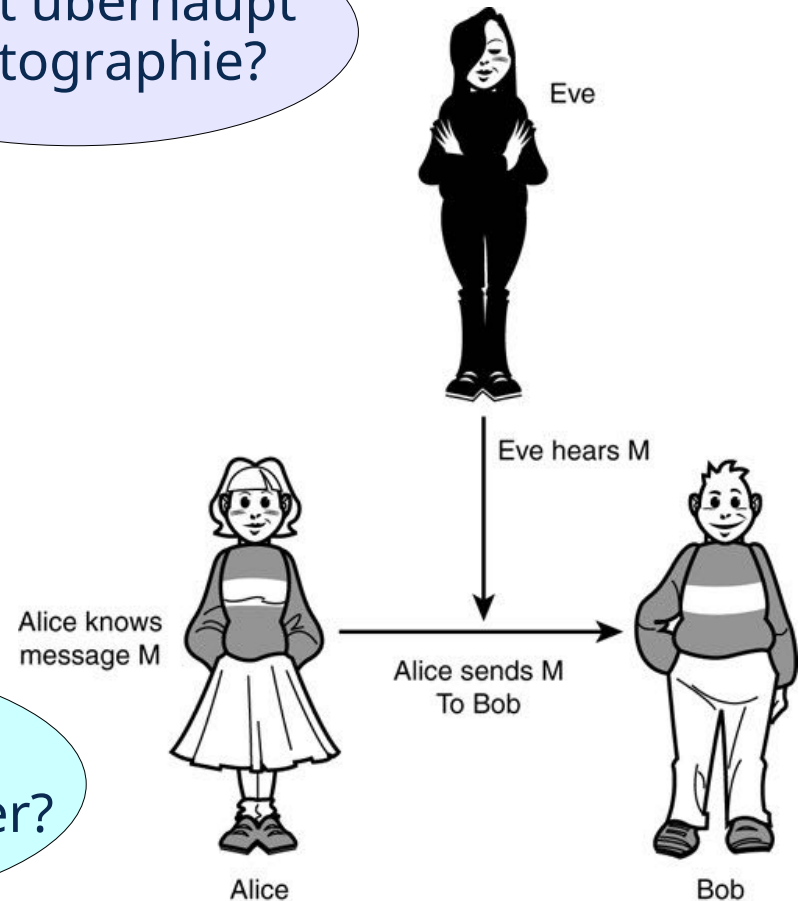
# Problemstellung: Wie kann Kommunikation sicher werden?

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

Was ist überhaupt Kryptographie?

Wie funktioniert Quantenkryptographie?

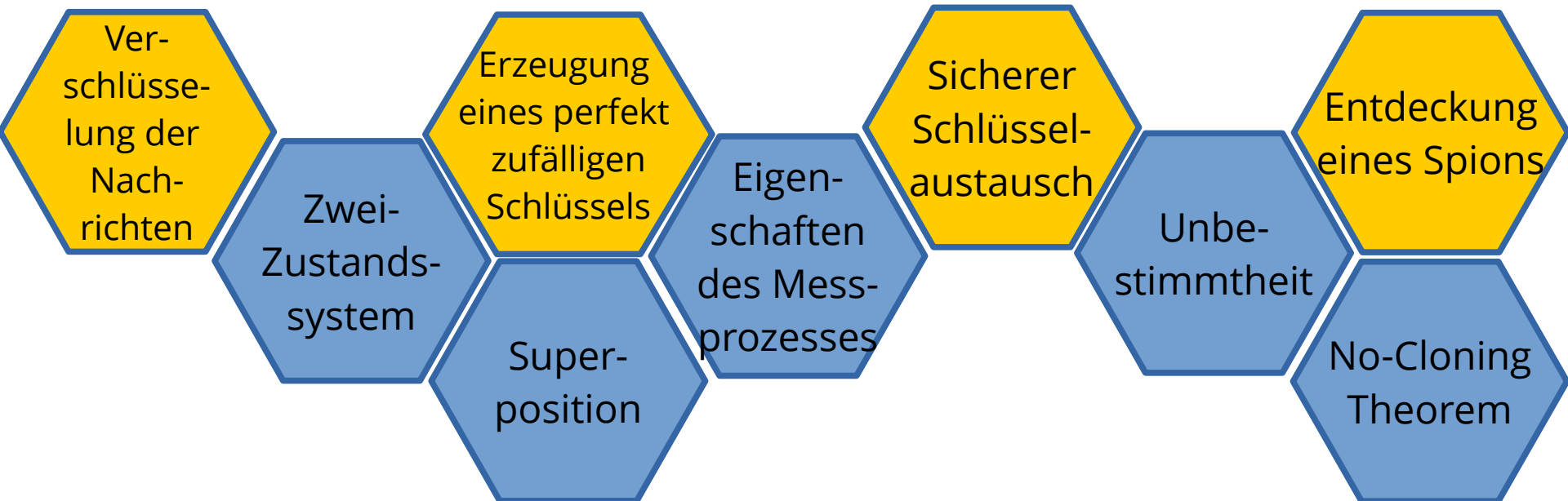
Warum ist Quantenkryptographie so sicher?



# Verknüpfung von Konzepten und Anwendung



## Beispiel Quantenkryptographie



# Nutzen der Unbestimmtheit für die Quantenkryptographie (BB84 Protokoll)

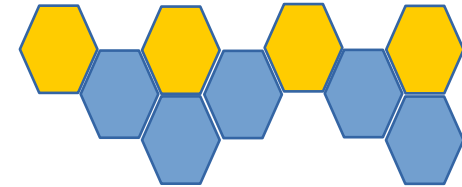
## Wie kann “Unbestimmtheit” dazu dienen, einen Spion zu finden?

- **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

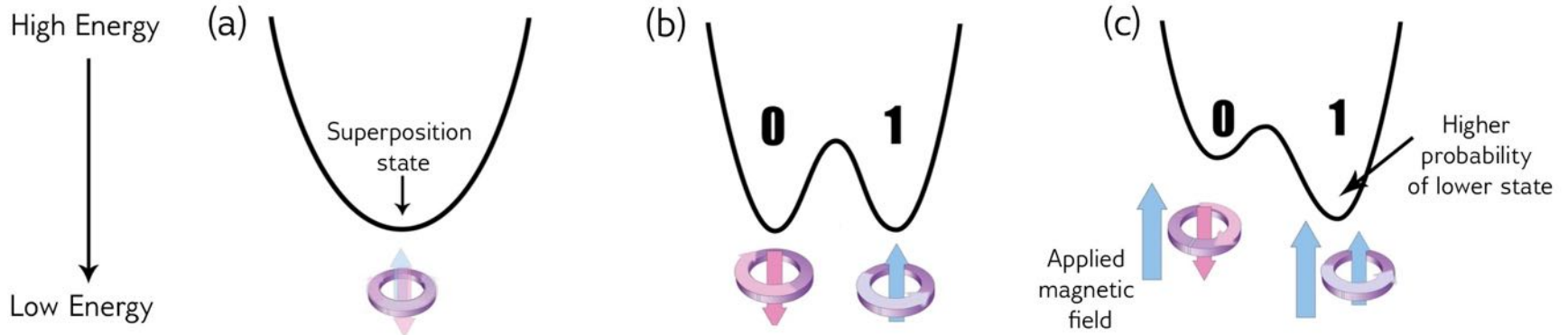


# Quantencomputer

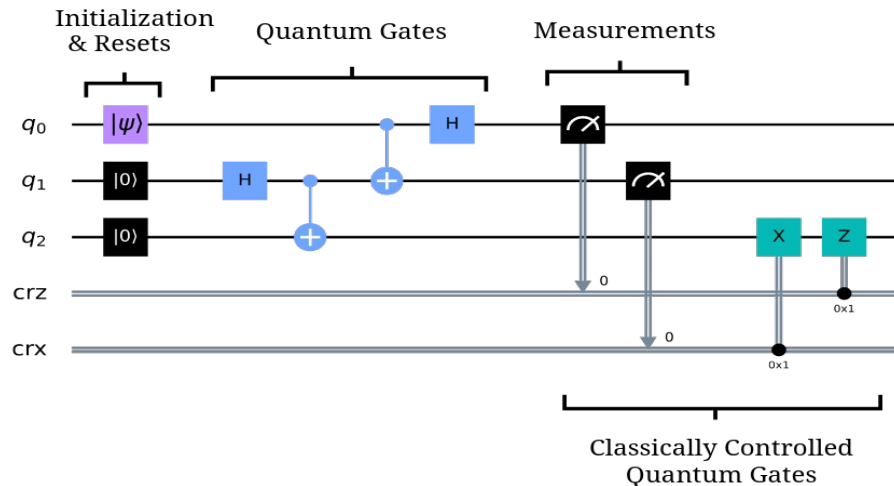
- **Forschung wurde durch eine erste Anwendungsmöglichkeit, den Shor'schen Algorithmus (1992), getriggert**
- **Rasante Fortschritte in den letzten Jahren in der Hardware-Entwicklung**
- **Geeignete Algorithmen für Quantencomputer noch nicht ganz klar**
- **Hybrid-Architekturen erscheinen wahrscheinlich**

# Verschiedene Quantencomputer

## Quantum annealing

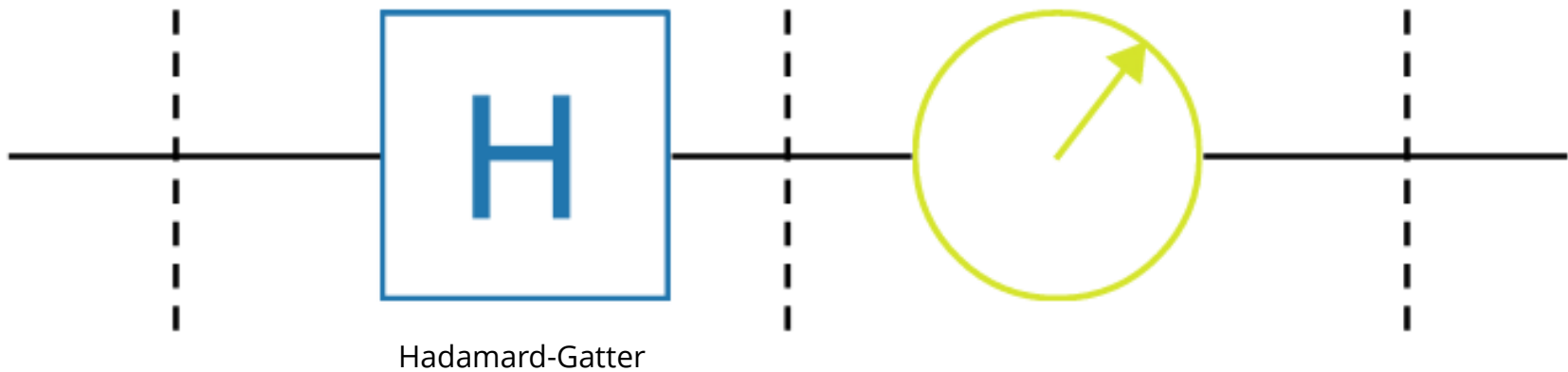


## Quantum logic circuit



# „Hello World“ des Quantencomputers

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



Katja Michalowski, 2021

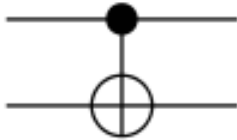
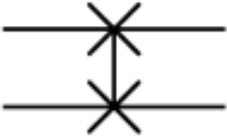
# Erzeugung von Verschränkung

- **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.

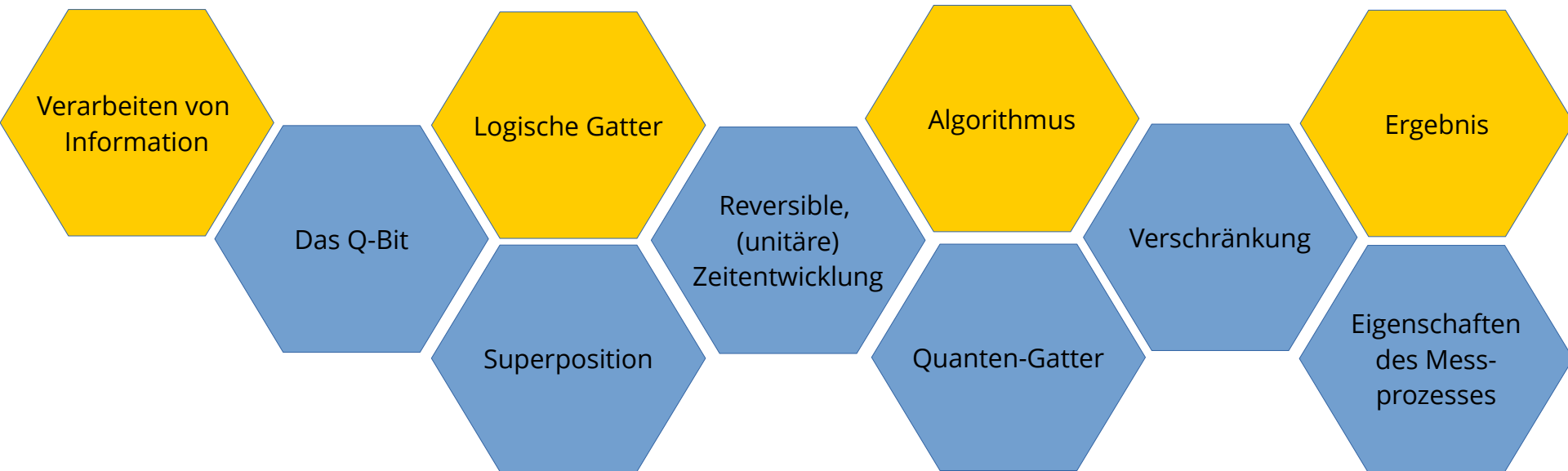
CNOT	SWAP
	
Herstellen von Verschränkung	
$ 0, 0\rangle,  0, 1\rangle$ bleiben $ 1, 0\rangle \rightarrow  1, 1\rangle$ $ 1, 1\rangle \rightarrow  1, 0\rangle$	$ 0, 0\rangle,  1, 1\rangle$ bleiben $ 1, 0\rangle \rightarrow  0, 1\rangle$ $ 0, 1\rangle \rightarrow  1, 0\rangle$
$\begin{pmatrix} 1 & 0 &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

# 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](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

	<b>Gewicht</b>	<b>Kryptographie</b>	<b>Teleportation</b>	<b>Annealer</b>	<b>Quanten computer</b>	<b>Sensor</b>
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
<b>Summe</b>	<b>1</b>	<b>4,4</b>	<b>4,5</b>	<b>2,3</b>	<b>3,8</b>	<b>2,9</b>

# 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**