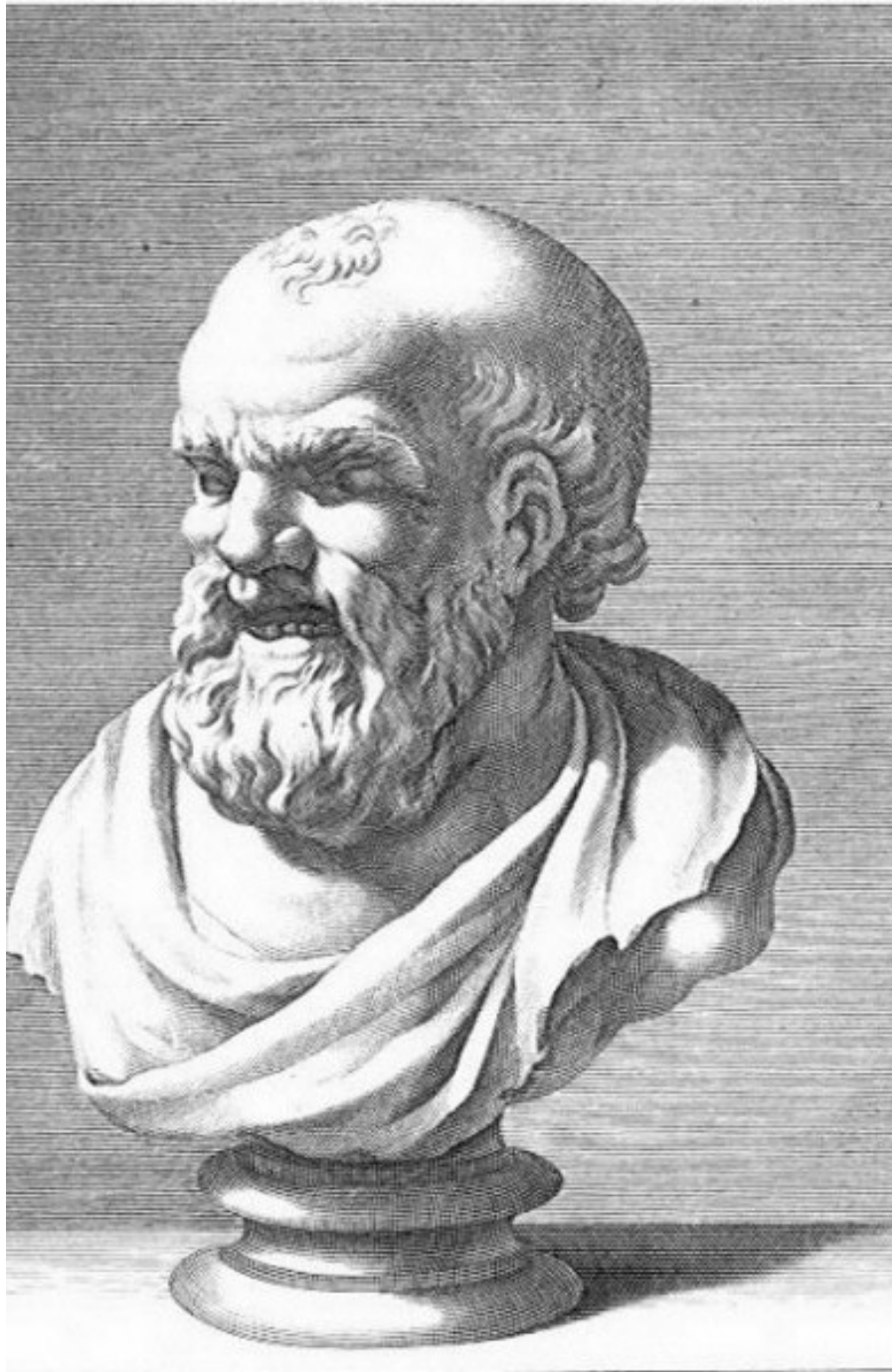


Was sind Quanten?



DEMOCRITUS

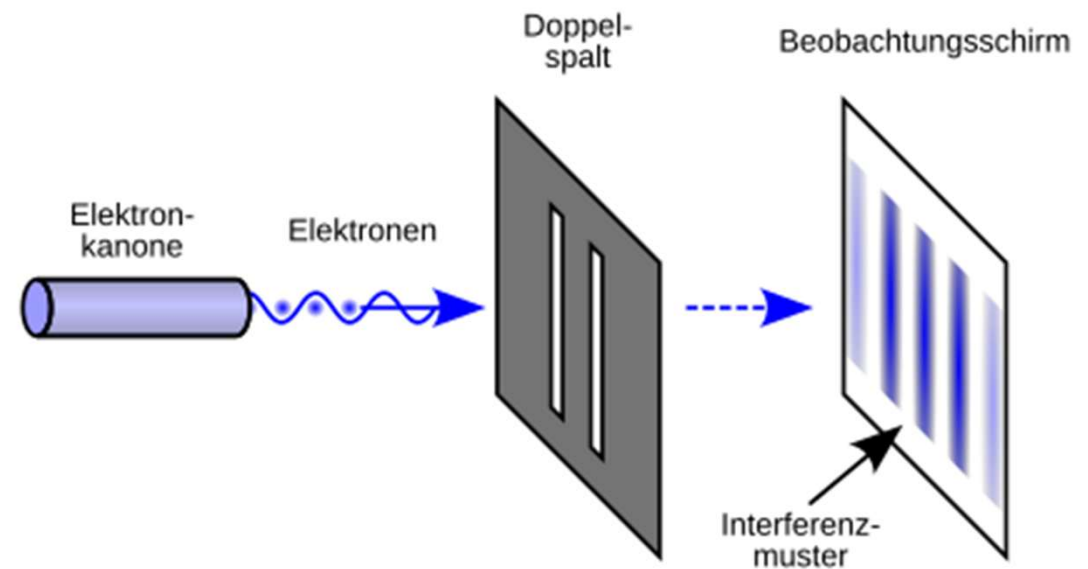
*Ex marmore antiquo apud J. E.*

## Ursprung des Begriffs

- Quant = lat. „quantum“ → „wie groß“ / „wie viel“
- Bedeutet messbares, quantifizierbares
- Demokrit: Materie nicht unendlich teilbar → Atome

# Natur des Lichts

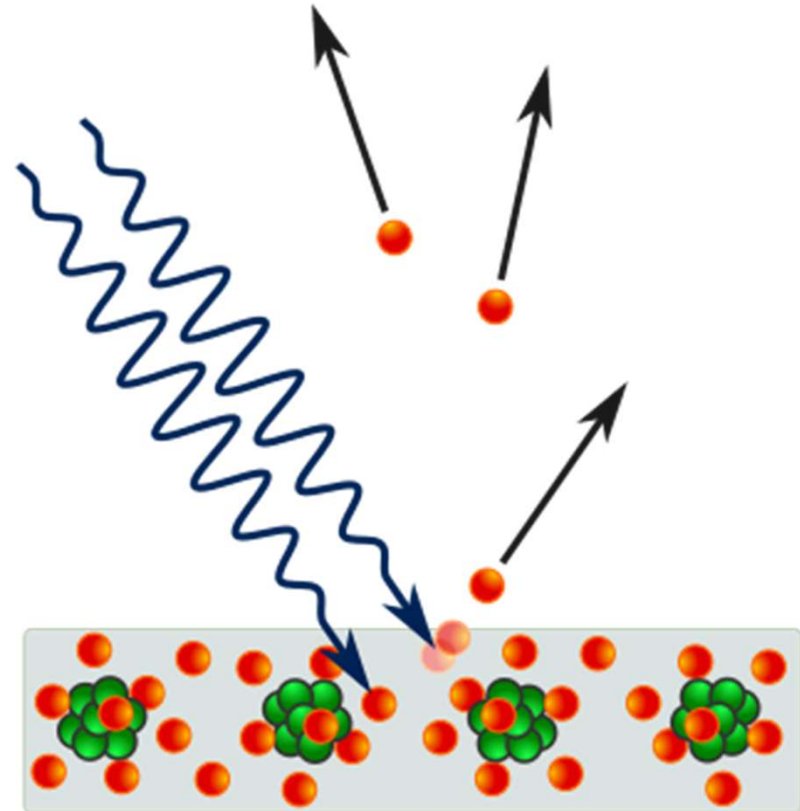
- Thomas Young:  
Doppelspaltversuch  
(1801 bis 1803) →  
Licht = Welle mit  
typischen  
Überlagerungsmuster  
(Interferenz)



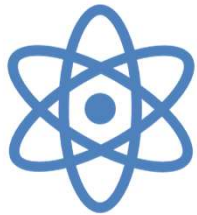
# Der Photoeffekt

- Licht löst Elektronen aus Metalloberflächen
- Stromfluss abhängig von der Farbe (Frequenz), nicht Helligkeit (Erwartung)
- Albert Einstein (Idee von Max Planck):
  - Licht tritt in Energiepaketen (Photonen) → Teilcheneigenschaft

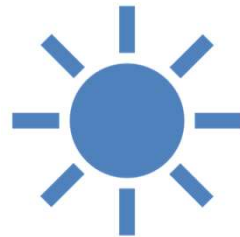
→ **Wellen-Teilchen Dualismus**



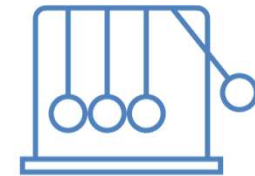
# Beispiele für Quantenobjekte



- Elektronen und Quarks



- Photonen und Gluonen



- Gitterschwingungen in Kristallen

# Quantenmechanik

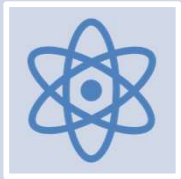


Ein Bereich der Physik, der die Eigenschaften und Wechselwirkungen von Materie und Energie auf der Skala von Atomen und subatomaren Partikeln beschreibt

# Mathematische Grundlagen



**Schrödinger-Gleichung:** Eine der grundlegenden Gleichungen der Quantenmechanik, die die zeitliche Veränderung der Quantenzustände eines Systems beschreibt.



$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi(x, t) = H \Psi(x, t)$$

$\psi$ : Wellenfunktion des Teilchens

$i$ : imaginäre Einheit

$\hbar$ : reduziertes Planck'sches Wirkungsquantum

$\hat{H}$ : Hamilton-Operator (Gesamtenergie des Systems)

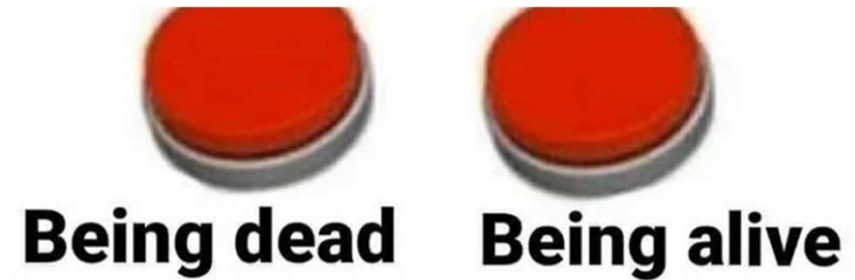
# Superposition & Qubits

Klassisches Bit: klar definierter Zustand  $\rightarrow$  0 oder 1

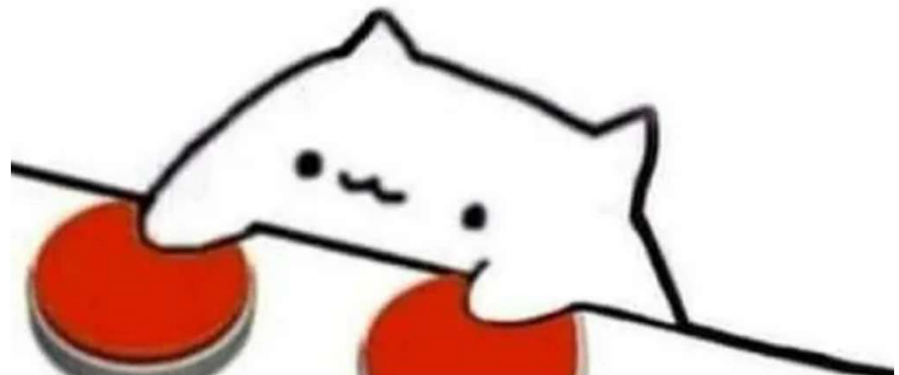
Qubit: kann in **Superposition** existieren (Schrödingers Katze)  
 $|0\rangle$  &  $|1\rangle$

Mehrere Qubits  $\rightarrow$   $2^n$  Zustände gleichzeitig

Superposition zerfällt  $\rightarrow$  Qubit fällt auf  $|0\rangle$  oder  $|1\rangle$



**Schrödinger's cat**





# Bloch-Kugel

Grafische Darstellung eines Qubit Zustandes

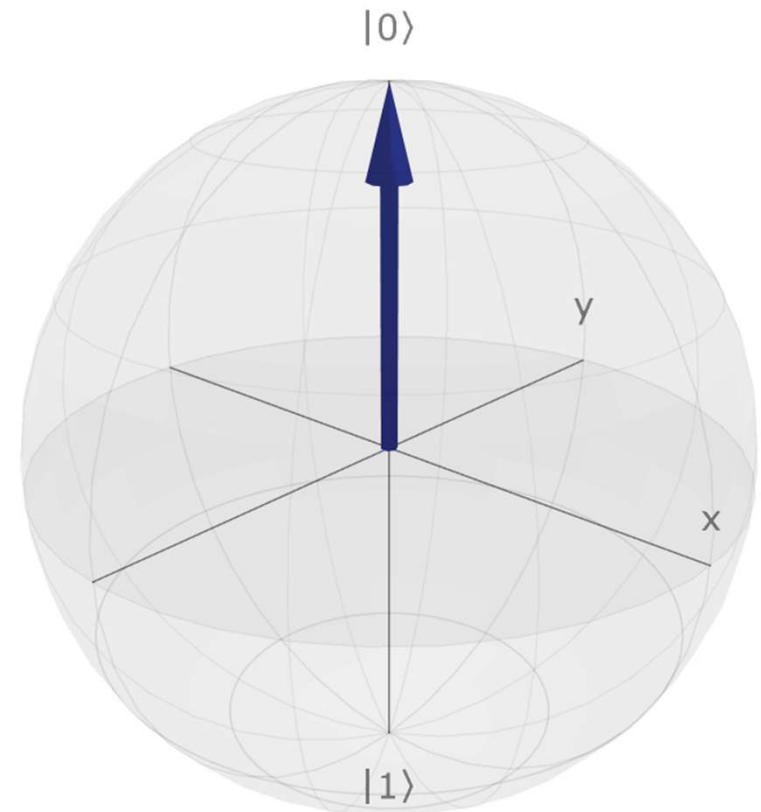
Jeder Punkt auf der Kugel = möglicher Qubit-Zustand

$|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$  mit  $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$  &  $\alpha, \beta \in \mathbb{C}$

Wahrscheinlichkeit:

$|0\rangle$  zu messen =  $\alpha^2$

$|1\rangle$  zu messen =  $\beta^2$



<https://bloch.kherb.io/>

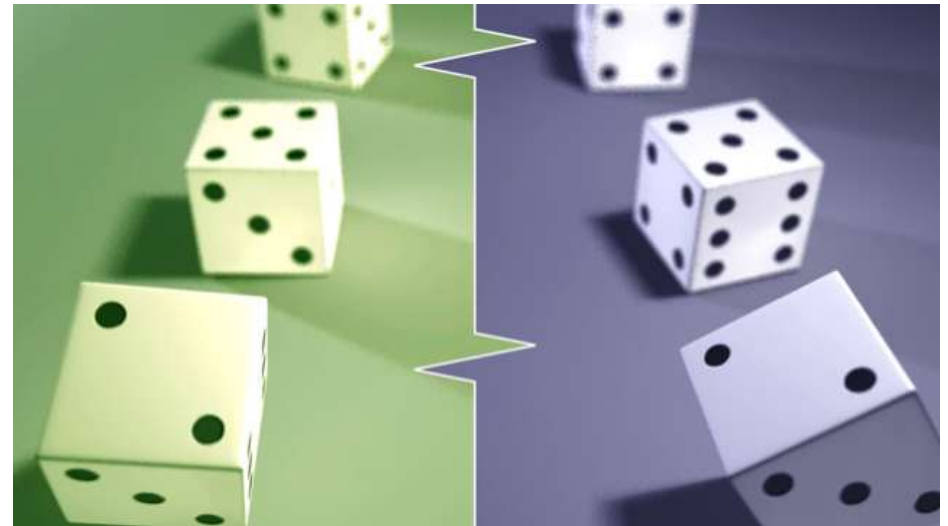
# Verschränkung

Zwei oder mehr Teilchen sind so miteinander verbunden (Quantensystem), dass die Messung des Zustands eines Teilchens den Zustand der anderen sofort beeinflusst, unabhängig von der Entfernung

Bell'sche Ungleichung:

$$S = |E(a,b) - E(a,b') + E(a',b) + E(a',b')| \leq 2$$

$S > 2$ , dann Verschränkung



# Was ist Quantenkommunikation?

Die Quantenkommunikation beschäftigt sich mit dem Aufbau von quantenphysikalisch abgesicherten Verbindungen und der Verteilung von Quantenzuständen. Die abgesicherten Verbindungen können Punkt-zu-Punkt oder mit vertrauenswürdigen Knoten verteilt erreicht werden.

- Nutzung von **Quantenzuständen** (erzeugt durch Polarisierung) zur abhörsicheren Nachrichtenübertragung
- Nutzt Superposition und Verschränkung
- Quantenschlüsselverteilung zur Erstellung eines gemeinsamen Schlüssels (siehe Protokolle der Kryptographie)
- Besondere Eigenschaft: Abhören verändert automatisch den Quantenzustand → erkennbar

# Polarisationsrichtungen

## H , V , D , A

### Basen (Photonenzustände):

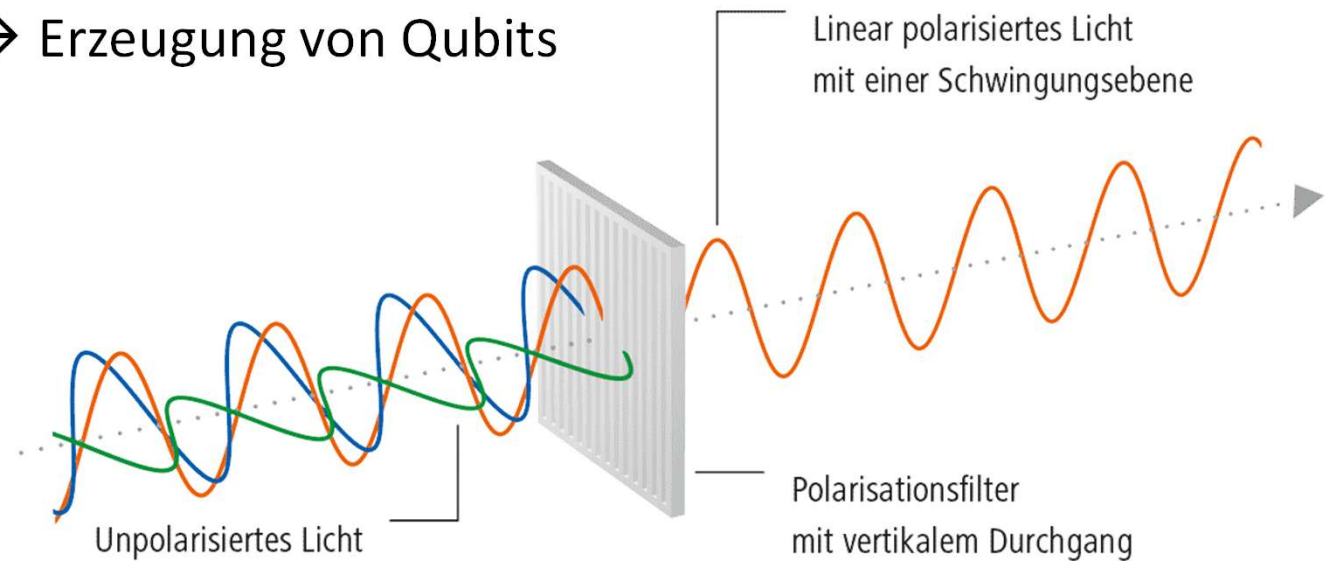
- Orthogonal : H/V – Basis [+]
  - H: horizontal  $\rightarrow$
  - V: vertikal  $\uparrow$
- Schräg: D/A – Basis [X]
  - D: diagonal  $\nearrow$
  - A: antidiagonal  $\nwarrow$

### Zustände werden als $|0\rangle$ oder $|1\rangle$ festgelegt

- z.B: H/V – Basis  $\rightarrow |H\rangle = 0, |V\rangle = 1$

# Wie funktioniert sie?

- Erfordert Basiselemente des Quantencomputers
- Polarisation der Schwingungsrichtungen der Photonen mittels Polarisationsfilter → Erzeugung von Qubits



- Begrenzung: Photonenabsorption in Glasfasern → ca. 100 km Reichweite
- Lösung: Quantenrepeater zur Reichweitenerhöhung → zentrales Forschungsthema

# Quellen

- <https://www.helmholtz.de/glossar/begriff/quantenkommunikation/>
- <https://www.quantentechnologien.de/fileadmin/public/Redaktion/Dokumente/PDF/Publicationen/Qutega-QT-Grundlagen-und-Anwendungen-01-2017-C1.pdf>
- <https://schneppat.de/superposition-verschraenkung-leicht-erklaert/>
- <https://www.youtube.com/watch?v=FrVzD9YxnQQ>
- Fraunhofer Gesellschaft, Quantenkommunikation. [Online]. Available: <https://www.fraunhofer.de/de/forschung/artikel-2025/quantenforschung/quantenkommunikation.html>
- Leon Lindenberger, "Wie Quantenkommunikation den Datentransport künftig sicherer machen könnte," Geo, 2025. [Online]. Available: <https://www.geo.de/wissen/forschung-und-technik/abhoersicher--wie-quantenkommunikation-alltag-werden-koennte-35665814.html>
- Prof. Dr. Roman Schnabel, Quantenkommunikation und Verschränkung. [Online]. Available: <https://www.physik.uni-hamburg.de/iqp/ag-schnabel/forschung/quantenkommunikation.html>
- <https://www.forschung-it-sicherheit-kommunikationssysteme.de/forschung/it-sicherheit/quantenkommunikation>