

# Einführung in die Quantenkommunikation

Irene Diener, Toni Roob, Jarod A. M. Békési

30. September 2025



Figure 1: Particle-free interaction

# Inhaltsverzeichnis I

- 1 Was sind Quanten?
- 2 Was ist Quantenmechanik?
- 3 Was ist Quantenkommunikation?
  - Polarisation
- 4 Quantenteleportation & Quantennetzwerke
- 5 Quellenverzeichnis

# Ursprung des Begriffs

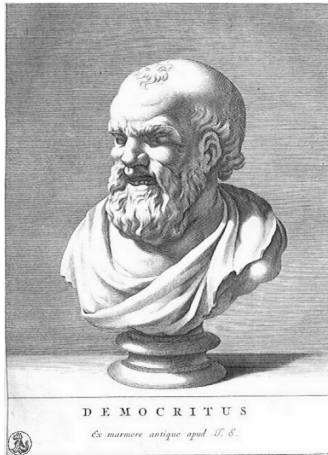


Figure 2: Demokrit (460–370 v. Chr.)

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

# Der Photoeffekt

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

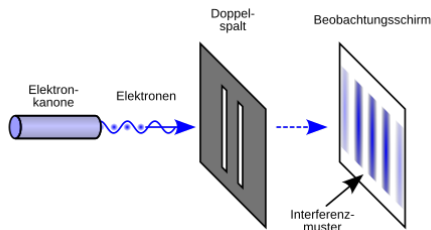


Figure 3: Doppelspalt

# Natur des Lichts

- 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**

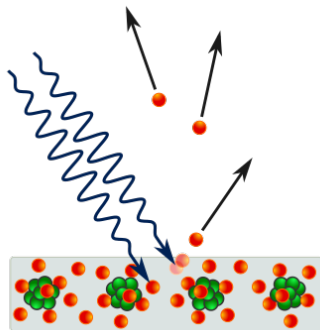
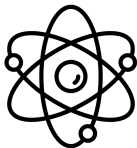
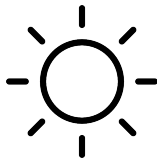


Figure 4: Photoelektrischer Effekt

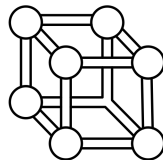
# Beispiele für Quantenobjekte



Elektronen & Quarks



Photonen & Gluonen



Gitterschwingungen in  
Kristallen

# Inhaltsverzeichnis I

- 1 Was sind Quanten?
- 2 Was ist Quantenmechanik?
- 3 Was ist Quantenkommunikation?
  - Polarisation
- 4 Quantenteleportation & Quantennetzwerke
- 5 Quellenverzeichnis



## Definition

Ein Bereich der Physik, welcher 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.

## Mathematische Formulierung

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

$i$ : Imaginäre Einheit;  $\psi$ : Wellenfunktion des Teilchens

$\hbar$ : Reduzierte Planck-Konstante;  $\hat{H}$ : Hamiltonoperator

# Mathematische Grundlagen

## Schrödinger-Gleichung

Eine der grundlegenden Gleichungen der Quantenmechanik, die die zeitliche Veränderung der Quantenzustände eines Systems beschreibt.

## Mathematische Formulierung

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

$i$ : Imaginäre Einheit;  $\psi$ : Wellenfunktion des Teilchens

$\hbar$ : Reduzierte Planck-Konstante;  $\hat{H}$ : Hamiltonoperator

# Superposition & Qubits

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

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

Mehrere Qubits:  $2^n$  Zustände gleichzeitig

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



Figure 5: Visualisierung von Schrödingers Katze

# Bloch-Kugel

Grafische Darstellung eines Qubit Zustandes

Jeder Punkt auf der Kugel = möglicher Qubit-Zustand

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

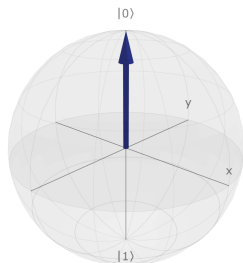
mit

$$|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1 \text{ \& } \alpha, \beta \in \mathbb{C}$$

Wahrscheinlichkeit:

$$|0\rangle \text{ zu messen} = \alpha^2$$

$$|1\rangle \text{ zu messen} = \beta^2$$



Bloch-Kugel

Figure 6: Bloch-Kugel

# 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:

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

$S > 2$ , dann Verschränkung



Figure 7: Veranschaulichung von Quantenverschränkung

# Inhaltsverzeichnis I

- 1 Was sind Quanten?
- 2 Was ist Quantenmechanik?
- 3 Was ist Quantenkommunikation?**
  - Polarisierung
- 4 Quantenteleportation & Quantennetzwerke
- 5 Quellenverzeichnis

## Definition

Quantenkommunikation ist die Nutzung der “Prinzipien der Quantenmechanik wie Quantenverschränkung und Quantensuperposition, um Informationen nahezu abhörsicher zu übertragen”. [Fra25]

- 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



## Definition

Quantenkommunikation ist die Nutzung der “Prinzipien der Quantenmechanik wie Quantenverschränkung und Quantensuperposition, um Informationen nahezu abhörsicher zu übertragen”. [Fra25]

- 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

## Definition

Licht besteht aus elektromagnetischen Wellen. Das elektrische Feld schwingt immer senkrecht zur Ausbreitungsrichtung. Die Richtung dieser Schwingung nennt man **Polarisation**.

# Polarisationsrichtungen<sup>1</sup> |

H, V, D, A

## Basen (Photonenzustände):

Orthogonal: H/V – Z-Basis

H,  $0^\circ$ : horizontal  $\rightarrow$

V,  $90^\circ$ : vertikal  $\uparrow$

Schräg: D/A – X-Basis

D,  $45^\circ$ : diagonal  $\nearrow$

A,  $135^\circ$ : antidiagonal  $\nwarrow$

# Polarisationsrichtungen<sup>1</sup> II

H, V, D, A

## Jones-Vektoren

$$|H\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad |V\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix},$$

$$|D\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad |A\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \end{pmatrix}$$

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

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

<sup>1</sup> lineare Polarisation

# 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

# Malus' Gesetz

## Definition

$$P(\text{Durchgang}) = \cos^2(\phi - \theta)$$

$\phi$ : Polarisationswinkel;  $\theta$ : Ausrichtung des Polarisators

- **Klassisch**: Dieses Gesetz beschreibt die *Intensität* des Lichtstrahls nach einem Polarisator.
- **Quantenmechanisch**: Es ist die *Wahrscheinlichkeit*, dass ein einzelnes Photon durchkommt.

# Übung I

Ein horizontal polarisiertes Photon ( $\phi = 0^\circ$ ) trifft auf einen Polarisator, dessen Transmissionsrichtung bei  $\theta = 45^\circ$  liegt.  
Wie groß ist die Wahrscheinlichkeit, dass das Photon den Polarisator passiert?

# Lösung I

## Photon horizontal

$$\phi = 0^\circ; \theta = 45^\circ$$

$$P = \cos^2(-45^\circ) = 0.5$$

⇒ Jedes Photon hat also eine 50% Chance, durchzukommen.



# Übung II

Ein Laserstrahl mit einer Intensität von  $I_0 = 10 \text{ mW}$  ist bei  $30^\circ$  polarisiert. Er trifft auf einen Polarisator, dessen Transmissionsrichtung bei  $0^\circ$  liegt. Welche Intensität  $I$  hat der Laserstrahl nach dem Durchgang durch den Polarisator?

# Lösung II

## Laserlicht

$I_0 = 10mW$ ; Polarisation bei  $30^\circ$ ; Treffen des Polarisators bei  $0^\circ$

$$I = I_0 \cos^2(30^\circ) = 7.5mW$$

# Übung III

Zwei Polarisatoren sind gekreuzt ( $0^\circ$  und  $90^\circ$ ). Es fällt kein Licht durch. Was passiert jedoch, wenn ein dritter Polarisator mit  $45^\circ$  zwischen die beiden eingefügt wird? Wie groß ist dann die Intensität des durchgelassenen Lichts in Abhängigkeit von  $I_0$ ?

# Lösung III

## Drei-Polarisatoren-Experiment

- Zwei gekreuzte Polarisatoren ( $0^\circ$  und  $90^\circ$ )  
 $\Rightarrow I = 0$
- Hinzufügen eines dritten Polarisator bei  $45^\circ$ :

$$I = I_0 \cdot \cos^2(45^\circ) \cdot \cos^2(45^\circ) = \frac{1}{4} I_0$$

$\Rightarrow 25\%$  des Lichts passiert den Aufbau.

# Bedeutung in der Quantenkommunikation

- Polarisationszustände sind Träger von Information (Qubits).

# Inhaltsverzeichnis I

- 1 Was sind Quanten?
- 2 Was ist Quantenmechanik?
- 3 Was ist Quantenkommunikation?
  - Polarisation
- 4 Quantenteleportation & Quantennetzwerke
- 5 Quellenverzeichnis



# Inhaltsverzeichnis I

- 1 Was sind Quanten?
- 2 Was ist Quantenmechanik?
- 3 Was ist Quantenkommunikation?
  - Polarisation
- 4 Quantenteleportation & Quantennetzwerke
- 5 Quellenverzeichnis



# Quellenverzeichnis I



FRAUNHOFER GESELLSCHAFT:

Quantenkommunikation.

(2025).

<https://www.fraunhofer.de/de/forschung/artikel-2025/quantenforschung/quantenkommunikation.html>, Abruf:  
17.09.2025

# Abbildungsverzeichnis I