

# 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 Quanten-Teleportation

- Ablauf und Aufbau

5 Quantennetzwerke

6 Quellenverzeichnis

# Ursprung des Begriffs

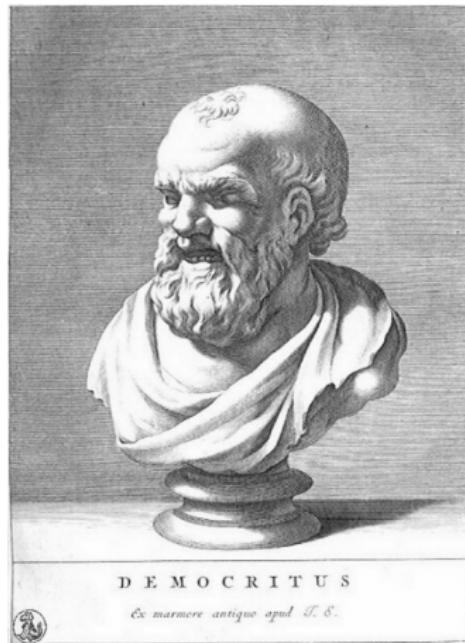


Figure 2: Demokrit (460–370 v. Chr.)

- 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)

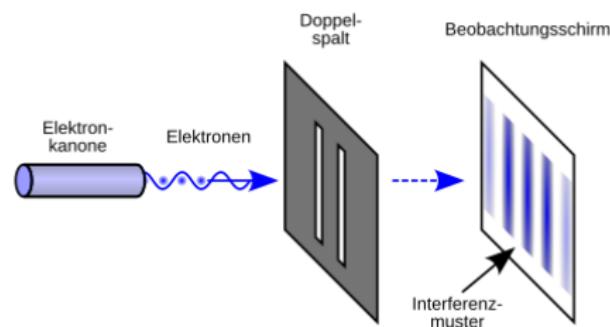


Figure 3: Doppelspalt

# Natur des Lichts

- Licht löst Elektronen aus Metallocberflächen
- Stromfluss abhängig von der Farbe (Frequenz), nicht Helligkeit (Erwartung)
- Albert Einstein (Idee von Max Planck):

– Licht tritt in Energiepaketen (Photonen) → Teilcheneigenschaft

→ **Wellen-Teilchen Dualismus**

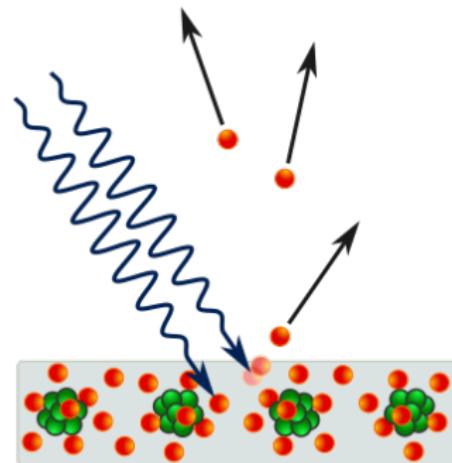
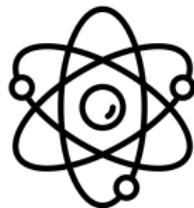
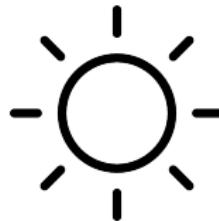


Figure 4: Photoelektrischer Effekt

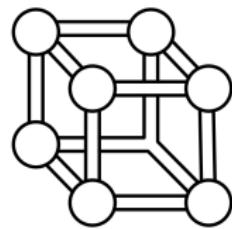
# Beispiele für Quantenobjekte



Elektronen & Quarks



Photonen & Gluonen



Gitterschwingungen in  
Kristallen

# Inhaltsverzeichnis I

1 Was sind Quanten?

2 Was ist Quantenmechanik?

3 Was ist Quantenkommunikation?

- Polarisation

4 Quanten-Teleportation

- Ablauf und Aufbau

5 Quantennetzwerke

6 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 I

Klassisches Bit: klar definierter Zustand → 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  $|1\rangle$

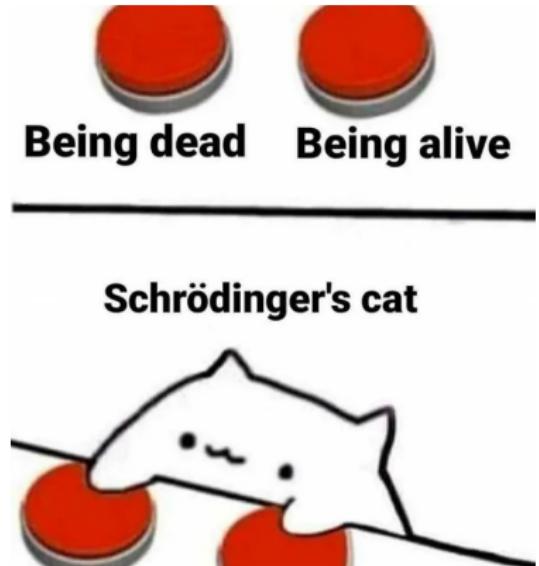


Figure 5: Visualisierung von Schrödingers Katze

# Superposition & Qubits II

## Definition

“[A] single qubit is in a superposition of two classical bits, [...] the measurement actually only results in one classical bit of information: either 0 or 1.” [HIP<sup>+</sup>21]

## Definition

*Hier muss ich noch in die SLUB – [Sch95]*

# Bloch-Kugel

Grafische Darstellung eines Qubit Zustandes

Jeder Punkt auf der Kugel = möglicher Qubit-Zustand

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

mit

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

Wahrscheinlichkeit:

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

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

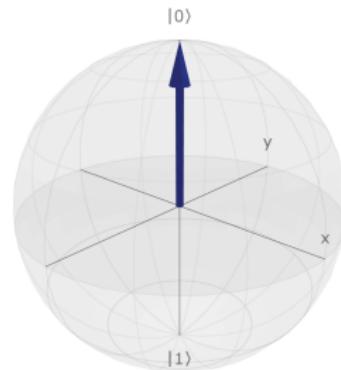


Figure 6: Bloch-Kugel

# 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?
  - Polarisation
- 4 Quanten-Teleportation
  - Ablauf und Aufbau
- 5 Quantennetzwerke
- 6 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 Polarisation) 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 Polarisation) 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 →

V,  $90^\circ$ : vertikal ↑

Schräg: D/A – X-Basis

D,  $45^\circ$ : diagonal ↗

A,  $135^\circ$ : antidiagonal ↙

# Polarisationsrichtungen<sup>1</sup> ||

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

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

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

# 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).
- Eine Messung verändert den Zustand und kann nicht rückgängig gemacht werden.
- Unbekannte Zustände lassen sich nicht perfekt kopieren (**No-Cloning-Theorem**).
- Grundlage für sichere Quantenkryptographie (z. B. im BB84-Protokoll).

# Inhaltsverzeichnis I

1 Was sind Quanten?

2 Was ist Quantenmechanik?

3 Was ist Quantenkommunikation?

- Polarisation

4 Quanten-Teleportation

- Ablauf und Aufbau

5 Quantennetzwerke

6 Quellenverzeichnis

# Quanten-Teleportation

- Überträgt den Zustand eines Qubits von einem Ort zum anderen - ohne das ursprüngliche Teilchen zu bewegen.
- **Nicht** das Teilchen reist, sondern die “**Bauanleitung**” seines Quantenzustands.
- Schlüsseltechnologie für Quantenkommunikation und zukünftige Quantennetzwerke - **sichere** und **verlustfreie** Übertragung.

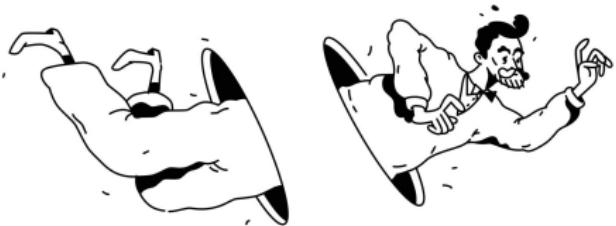
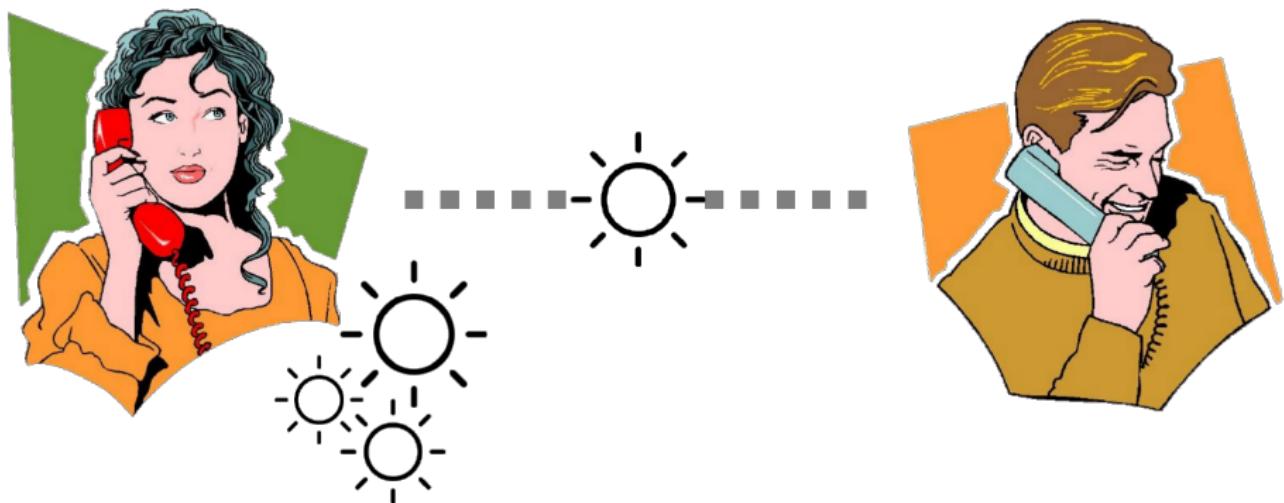
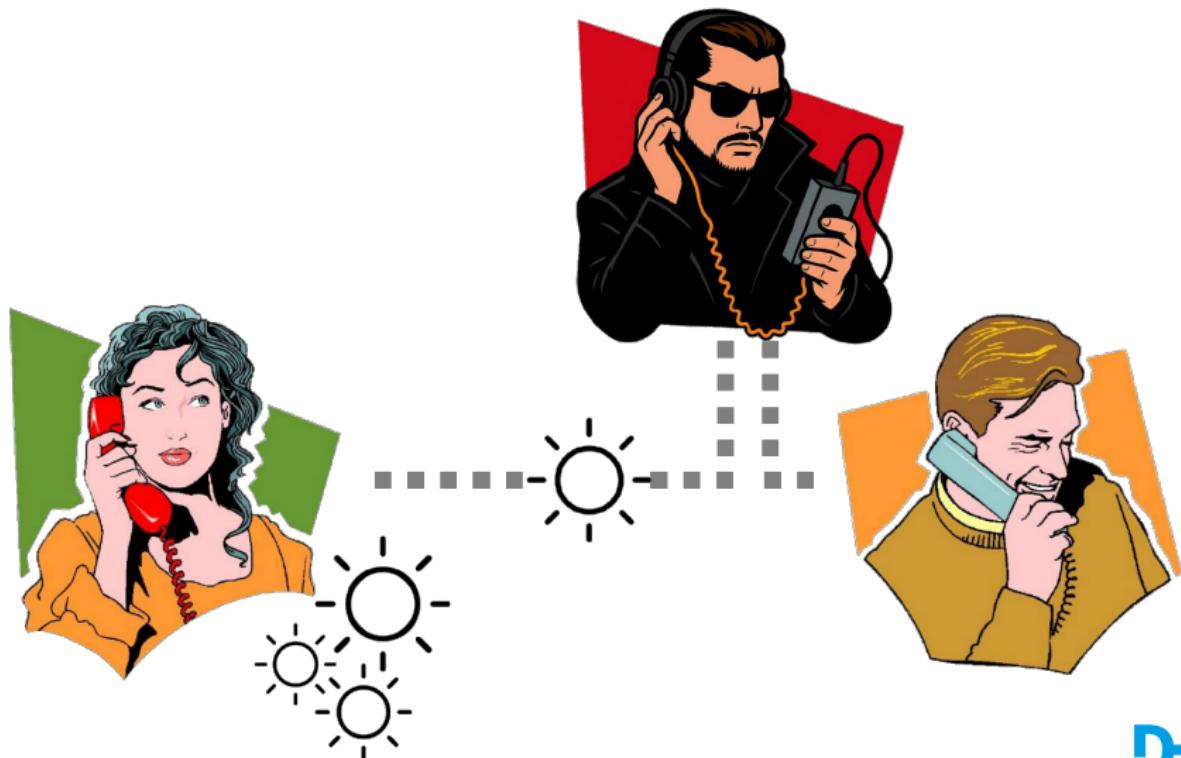
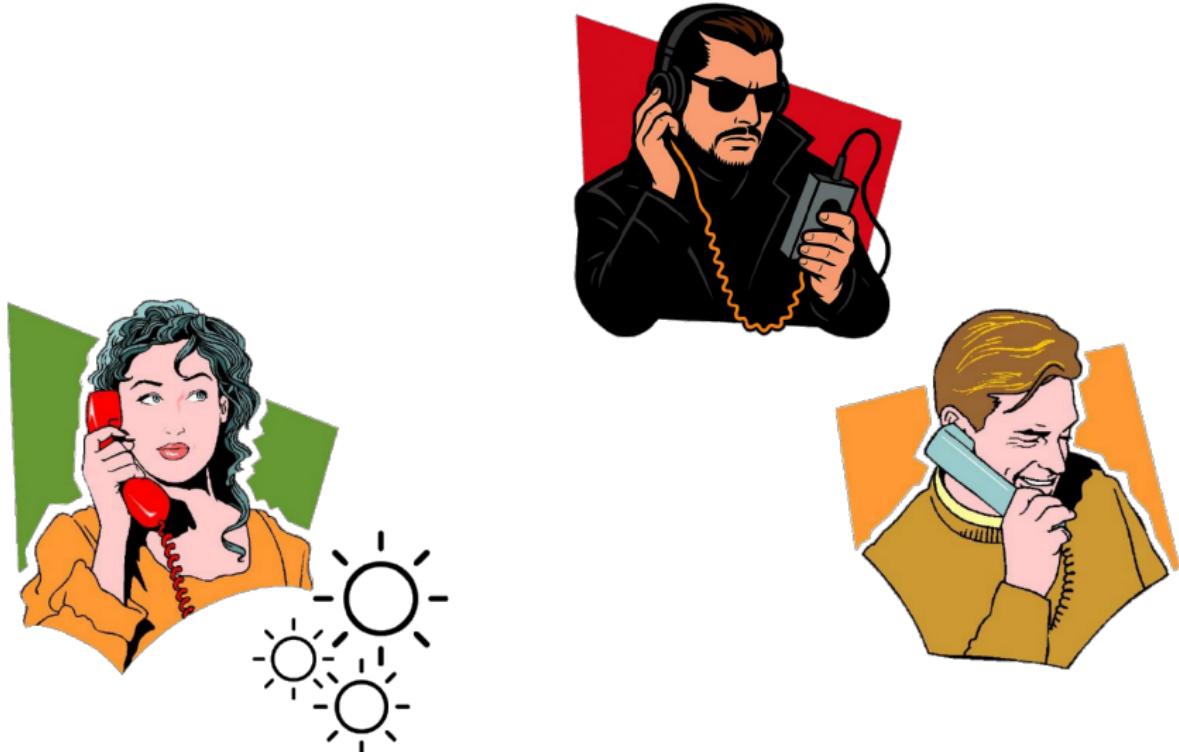


Figure 8: Illustration eines fliegenden Mannes durch ein Loch









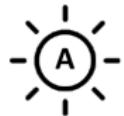


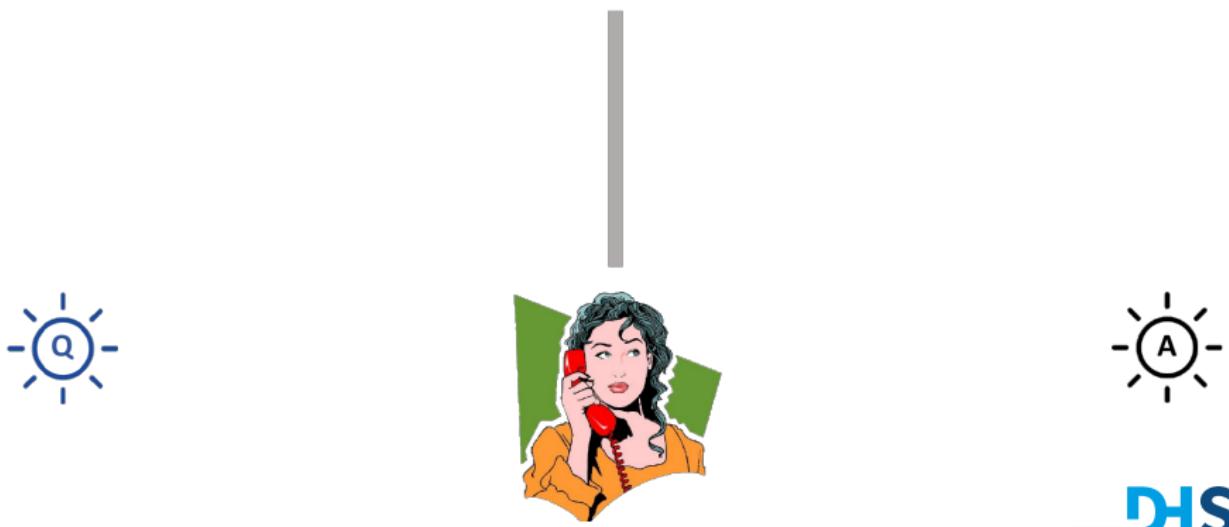














# Halbdurchlässiger Spiegel

- Teilt ein einfallendes Photon mit 50% Wahrscheinlichkeit in zwei Ausgänge auf:  
**Transmission** oder **Reflexion**.
- In der Quantenmechanik bedeutet das:  
Das Photon geht in eine **Überlagerung** beider Wege – es ist “gleichzeitig” reflektiert und durchgelassen.

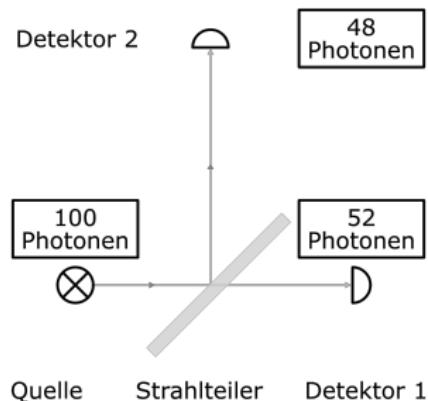
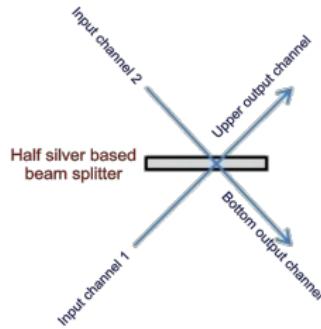


Figure 9: Photonen am halbdurchlässigen Spiegel

## Hong–Ou–Mandel-Effekt



## Hong Ou Mandel (HOM) Effect

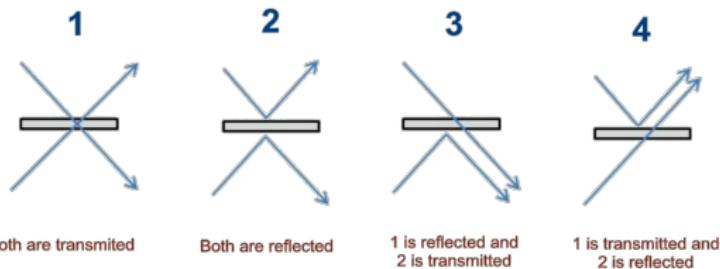


Figure 10: Beam Splitter

Figure 11: HOM Effekt

Dieses Verhalten macht den Beam Splitter zur zentralen Komponente für **Bell-Messungen**, Quanten-Interferometer und **Quanten-Teleportation**.

# Bell States

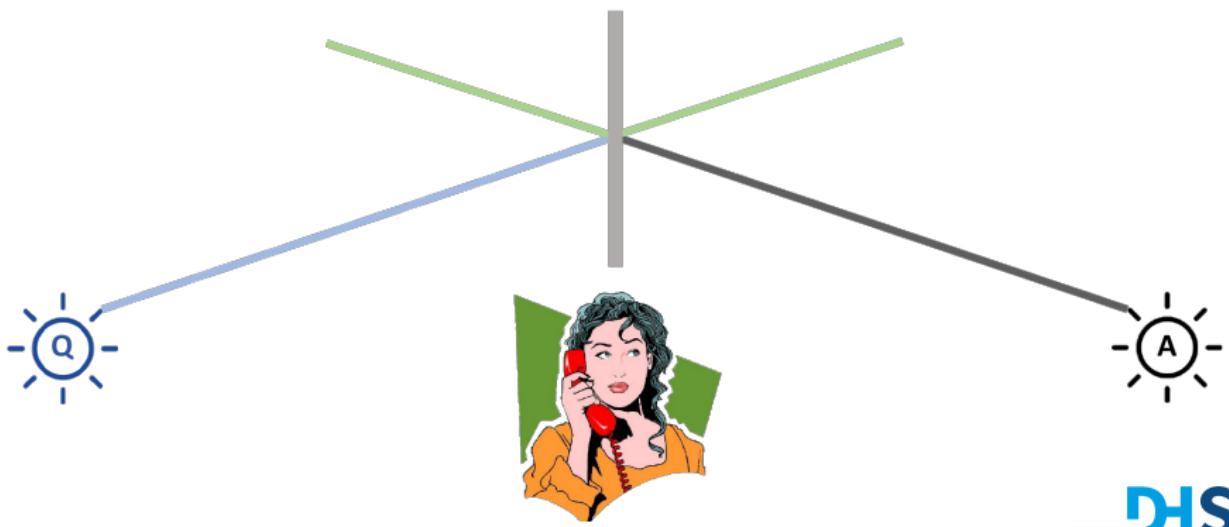
$$|\Phi^+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|0\rangle_A \otimes |0\rangle_B + |1\rangle_A \otimes |1\rangle_B)$$

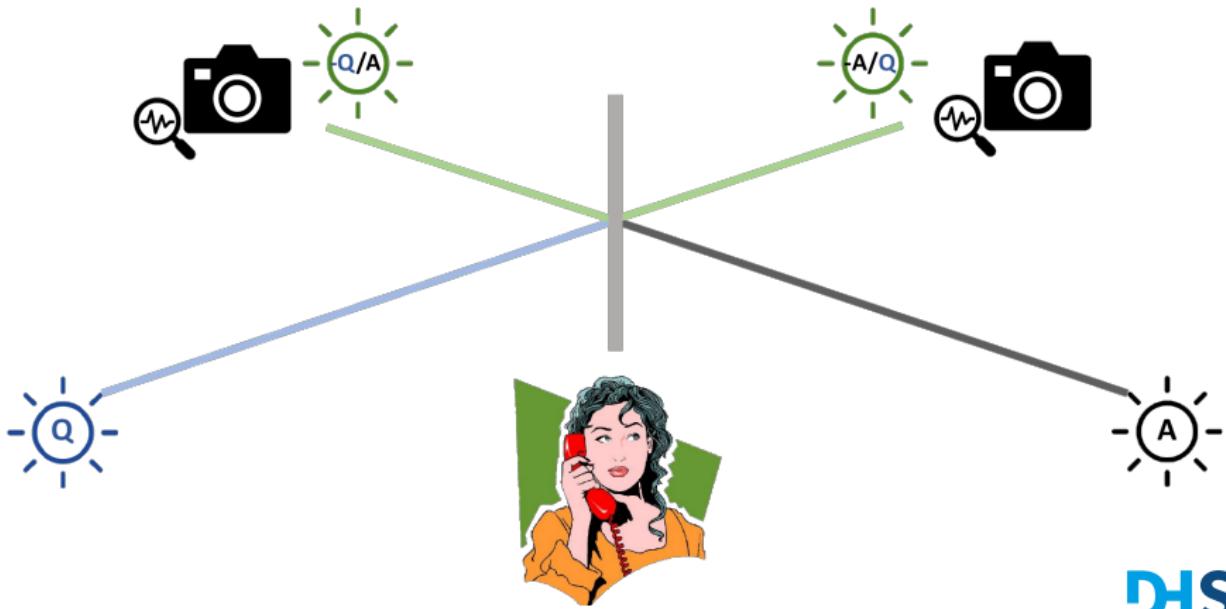
$$|\Phi^-\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|0\rangle_A \otimes |0\rangle_B - |1\rangle_A \otimes |1\rangle_B)$$

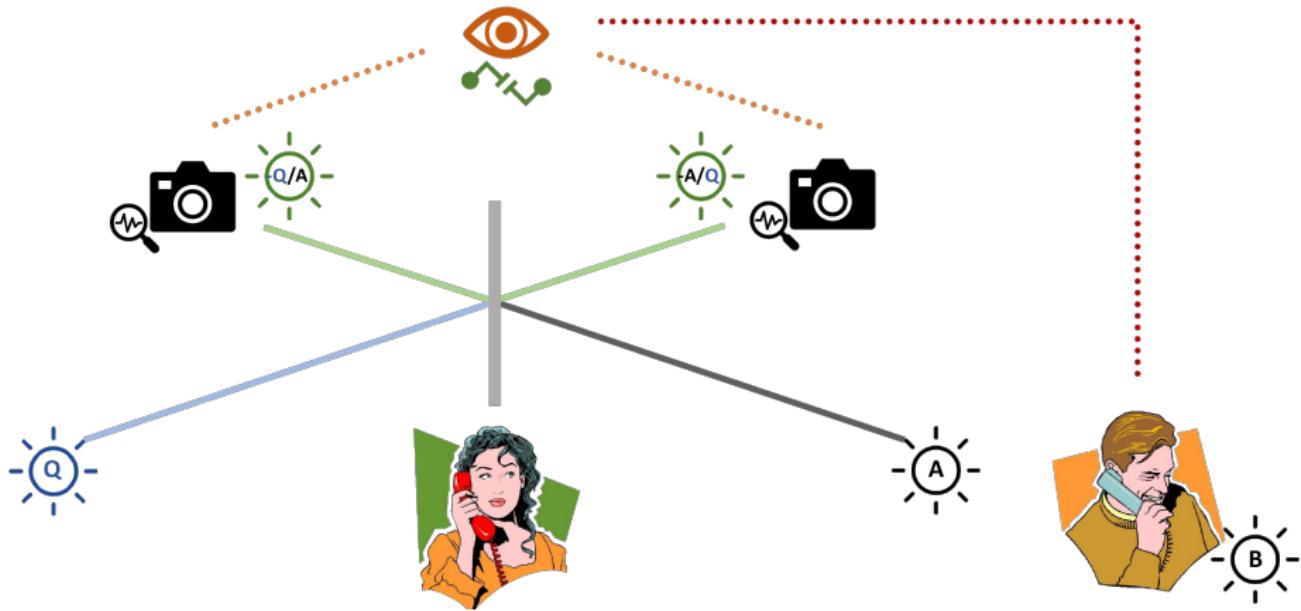
$$|\Psi^+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|0\rangle_A \otimes |1\rangle_B + |1\rangle_A \otimes |0\rangle_B)$$

$$|\Psi^-\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|0\rangle_A \otimes |1\rangle_B - |1\rangle_A \otimes |0\rangle_B)$$









# Inhaltsverzeichnis I

1 Was sind Quanten?

2 Was ist Quantenmechanik?

3 Was ist Quantenkommunikation?

- Polarisation

4 Quanten-Teleportation

- Ablauf und Aufbau

5 Quantennetzwerke

6 Quellenverzeichnis

**Quantennetzwerke** = klassisches Netzwerk für Quanteninformation

## Aufbau:

**Knoten:** Sender, Empfänger, Zwischenstationen

**Quantenkanäle:**

Glasfaser, Satelliten → verschränkte Photonen oder Qubits

**Funktionsprinzip:**

Erzeugung verschränkter Photonenpaare

Photon A bleibt bei Alice, Photon B → Bob

Messung von A → instantane Verbindung zu B

**Quanten-Repeater:**

Erzeugen neue verschränkte Paare

Verknüpfen diese via Entanglement Swaps → Knoten weit entfernt  
verschränkt

Verlängern Reichweite durch kontrollierte Verschmelzung

**Klassischer Kanal:**

Austausch von Korrekturbits & Bestätigungssignalen

**Eigenschaften:**

Quantenkanäle übertragen einzelne Photonen (Polarisation)

**No-Cloning-Theorem:**

Quanteninfos nicht kopierbar

## Anwendungen:

Quantenkryptographie (BB84, E91)

Quanten-Teleportation

Verteilte Quantencomputer

Fundamentale Physik-Tests

## Ausblick:

Ziel: Quanteninternet → verschränkte Zustände weltweit verteilen

Erste Demos: Glasfaser & Satelliten (z. B. "Micius"-Projekt)

Zukunft: Ergänzung/Absicherung klassischer Kommunikationsnetze

# Inhaltsverzeichnis I

1 Was sind Quanten?

2 Was ist Quantenmechanik?

3 Was ist Quantenkommunikation?

- Polarisation

4 Quanten-Teleportation

- Ablauf und Aufbau

5 Quantennetzwerke

6 Quellenverzeichnis

# Quellenverzeichnis I



FRAUNHOFER GESELLSCHAFT:  
Quantenkommunikation.  
(2025).

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



In: HUGHES, Ciaran ; ISAACSON, Joshua ; PERRY, Anastasia ; SUN, Ranbel F. ; TURNER, Jessica:

*What Is a Qubit?*

Cham : Springer International Publishing, 2021. –  
ISBN 978–3–030–61601–4, 7–16

# Quellenverzeichnis II



SCHUMACHER, Benjamin:  
Quantum coding.

In: *Phys. Rev. A* 51 (1995), Apr, 2738–2747.

<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevA.51.2738>. –

DOI 10.1103/PhysRevA.51.2738

# Abbildungsverzeichnis I