

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

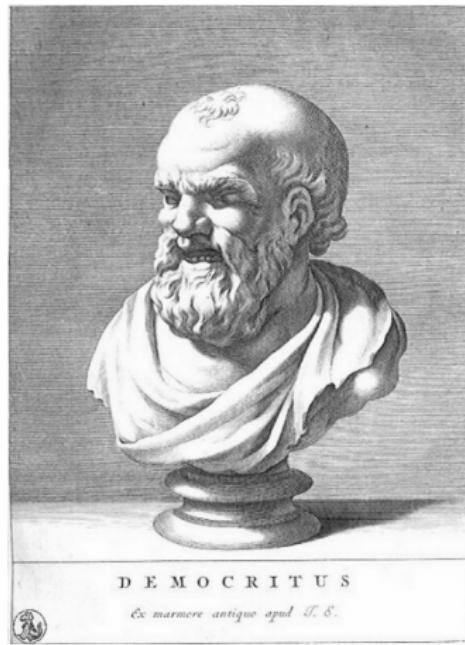


Figure 2: Demokrit (460–370 v. Chr.)

- 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)

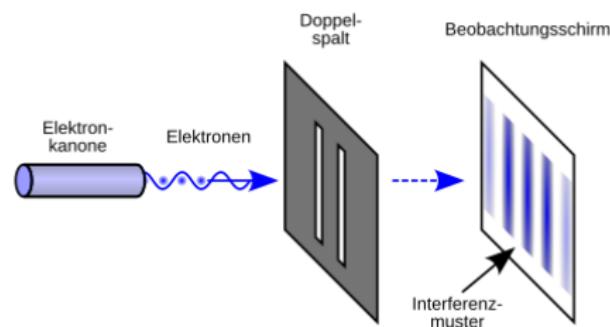


Figure 3: Doppelspalt

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**

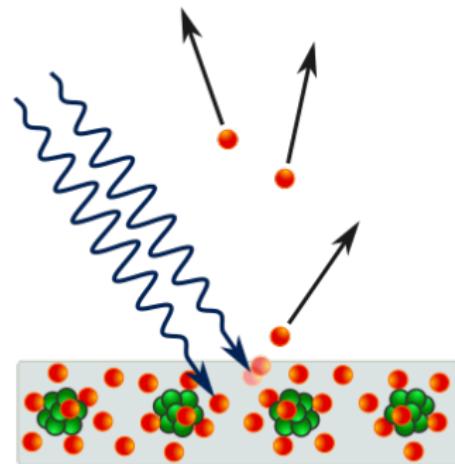
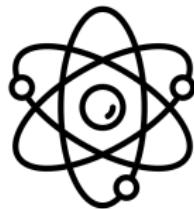
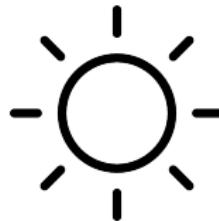


Figure 4: Photoelektrischer Effekt

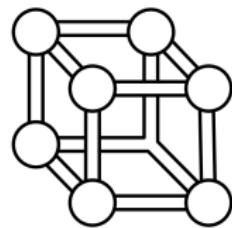
Beispiele für Quantenobjekte



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; ψ : 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; ψ : 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 $|1\rangle$

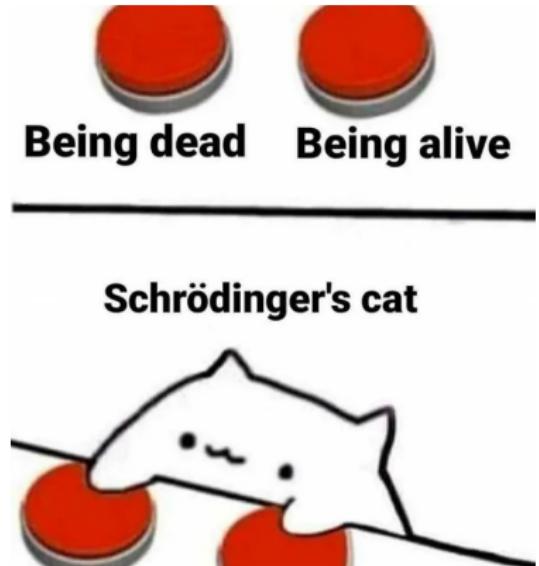


Figure 5: Visualisierung von Schrödinger's Katze

Superposition & Qubits II

Definition

“For our elementary coding system we choose the two-level spin system, which we will call a "quantum bit" or qubit. The qubit will be our fundamental unit of quantum information, and all signals will be encoded into sequences of qubits.” [Sch95]

“The analogy between the bit and the qubit is obvious. The qubit is more general, since there are more possible coding states than just two (although there are only two orthogonal ones), and since a collection of qubits can exist in a nonclassically entangled quantum state.” [Sch95]

Superposition & Qubits III

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⁺21]

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:

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

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

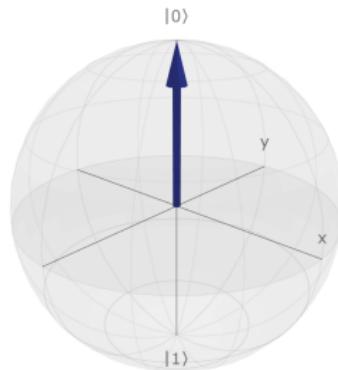


Figure 6: Bloch-Kugel

Bell States

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

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

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

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

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**.

Polarisationsrichtungen¹ |

H ,V ,D ,A

Basen (Photonenzustände):

Orthogonal: H/V – Z-Basis

H, 0° : horizontal →

V, 90° : vertikal ↑

Schräg: D/A – X-Basis

D, 45° : diagonal ↗

A, 135° : antidiagonal ↙

Polarisationsrichtungen¹ ||

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 $\rightarrow |H\rangle = 0, |V\rangle = 1$

¹ 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

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

ϕ : Polarisationswinkel; θ : 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° polarisiert. Er trifft auf einen Polarisator, dessen Transmissionsrichtung bei 0° liegt. Welche Intensität I hat der Laserstrahl nach dem Durchgang durch den Polarisator?

Lösung II

Laserlicht

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

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

Übung III

Zwei Polarisatoren sind gekreuzt (0° und 90°). Es fällt kein Licht durch. Was passiert jedoch, wenn ein dritter Polarisator mit 45° 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° und 90°)
 $\Rightarrow I = 0$
- Hinzufügen eines dritten Polarisator bei 45° :

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

\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.

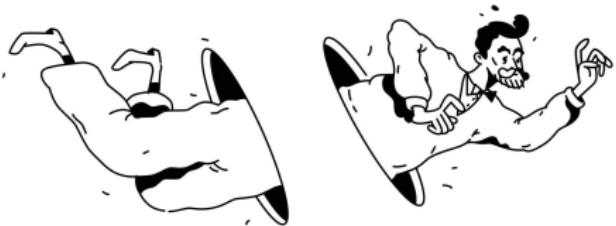
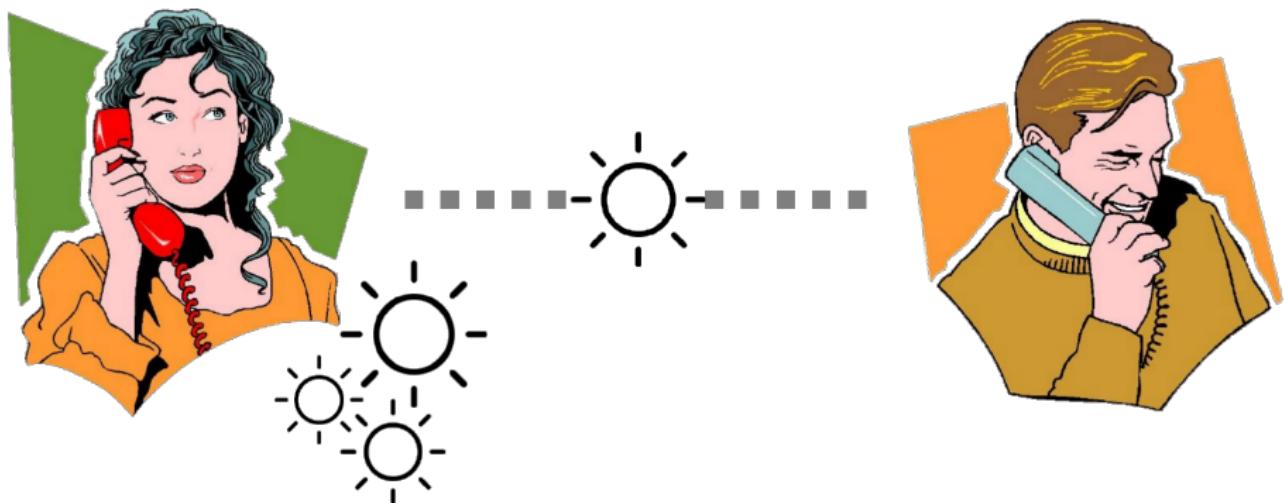
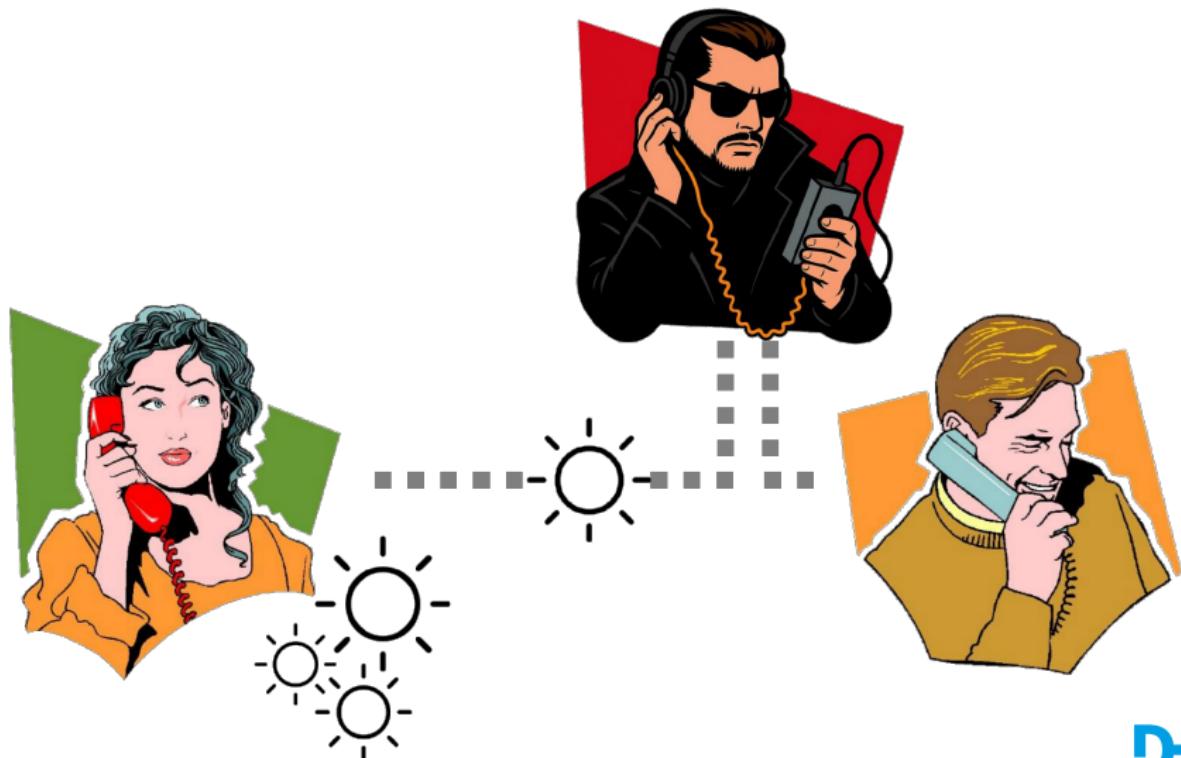


Figure 8: Illustration eines fliegenden Mannes durch ein Loch









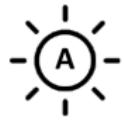




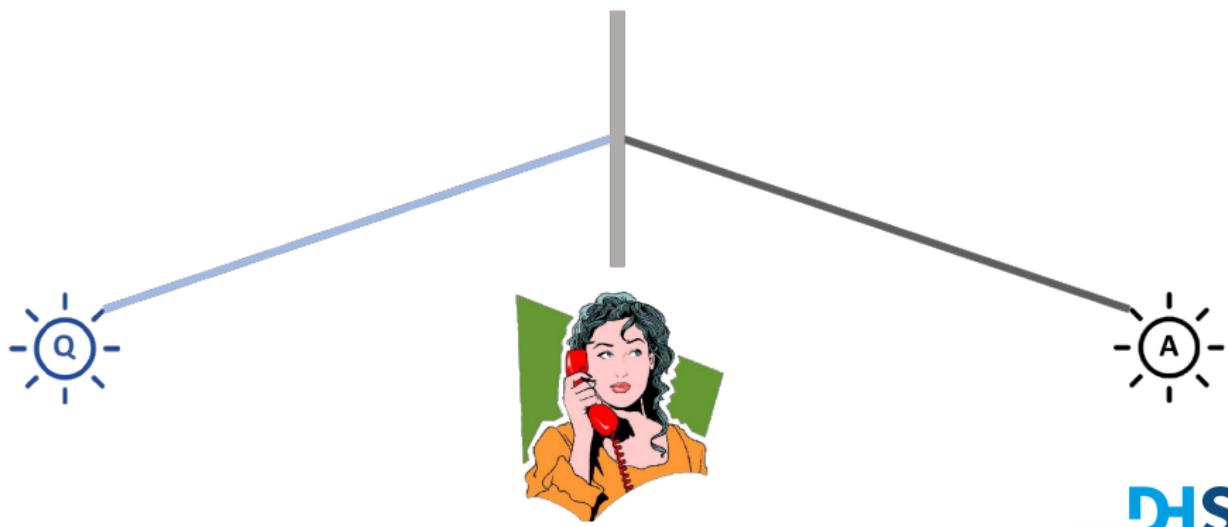












Halbdurchlässiger Spiegel

- 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.

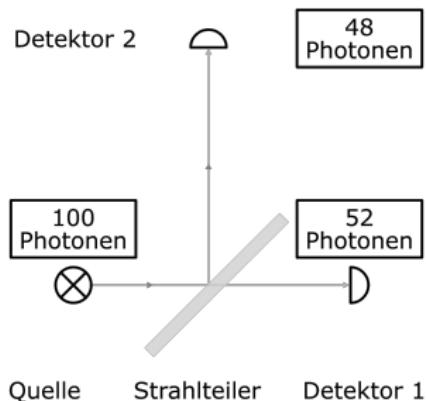
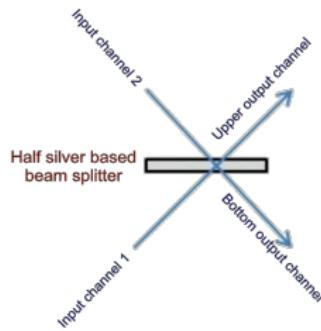


Figure 9: Photonen am halbdurchlässigen Spiegel

Hong–Ou–Mandel-Effekt



Hong Ou Mandel (HOM) Effect

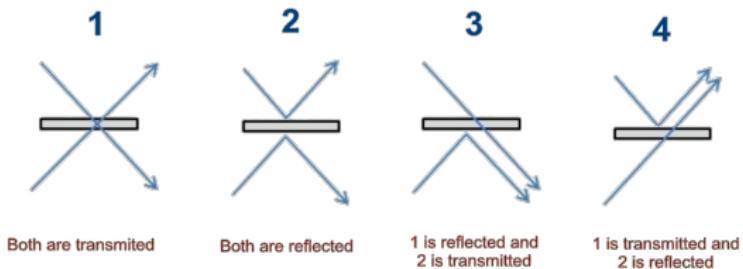


Figure 10: Beam Splitter

Figure 11: HOM Effekt

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

Bell States

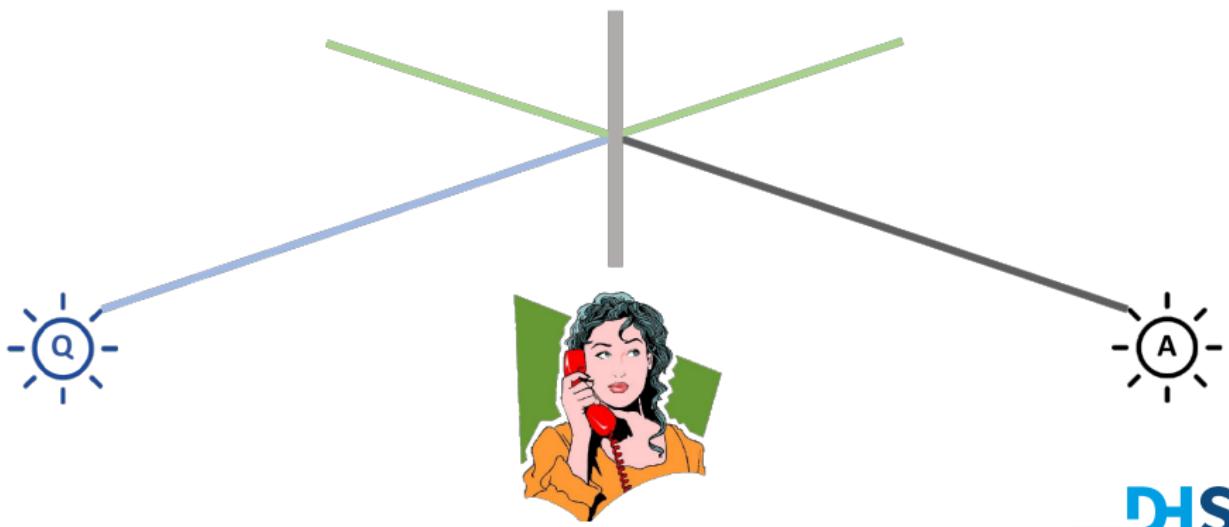
$$|\Phi^+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|0\rangle_A \otimes |0\rangle_B + |1\rangle_A \otimes |1\rangle_B)$$

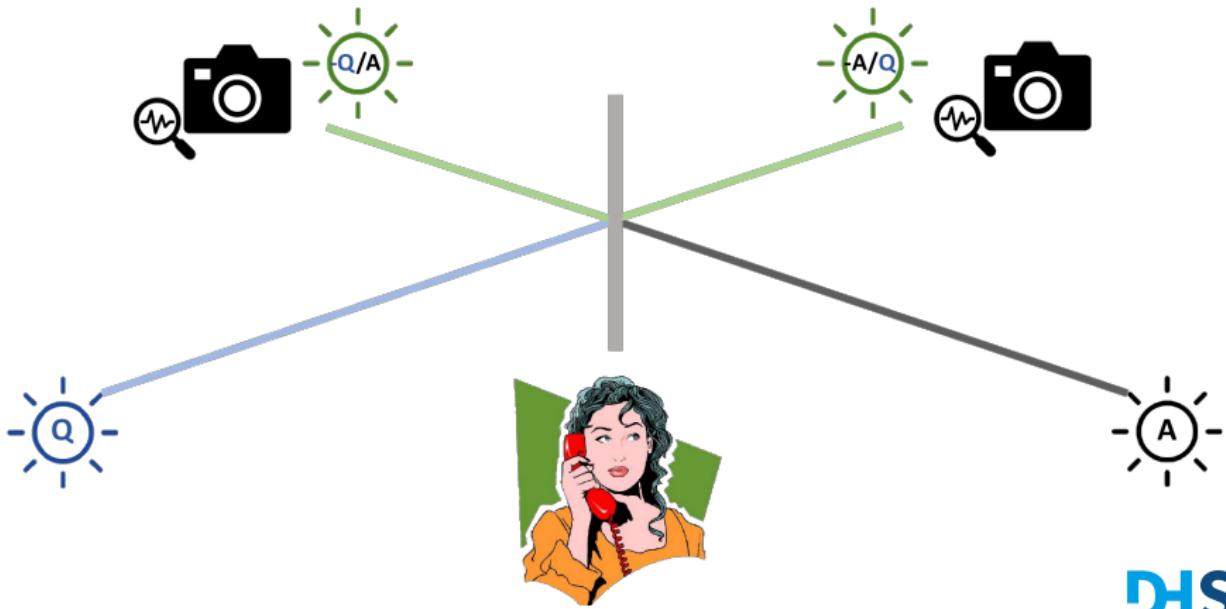
$$|\Phi^-\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|0\rangle_A \otimes |0\rangle_B - |1\rangle_A \otimes |1\rangle_B)$$

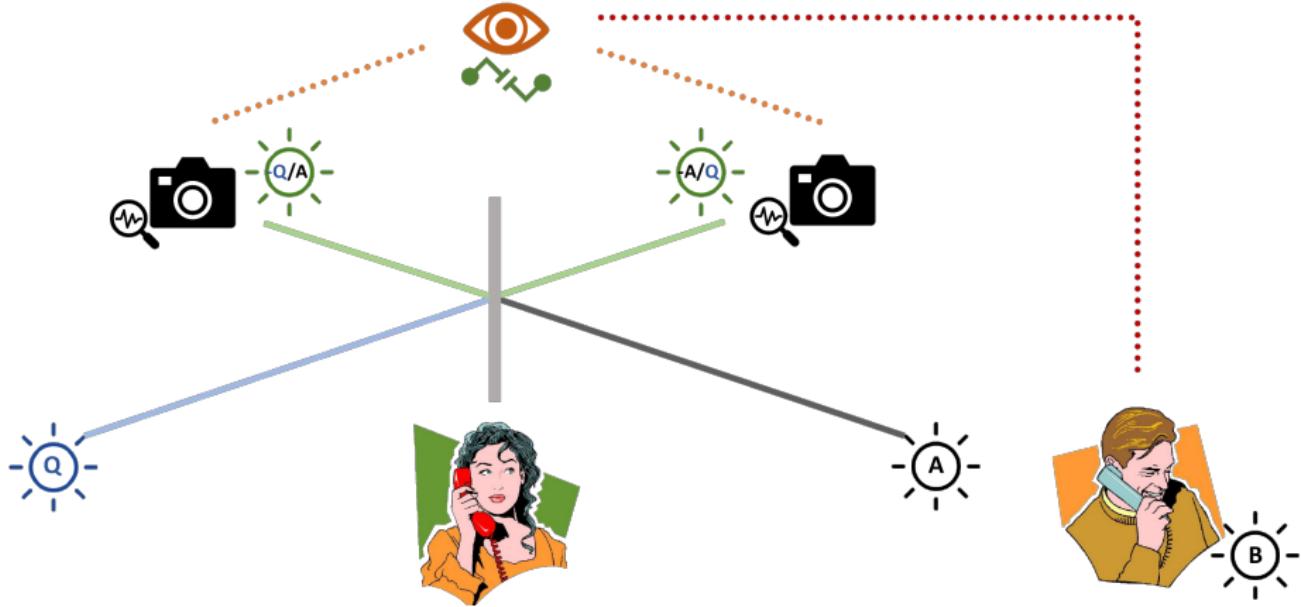
$$|\Psi^+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|0\rangle_A \otimes |1\rangle_B + |1\rangle_A \otimes |0\rangle_B)$$

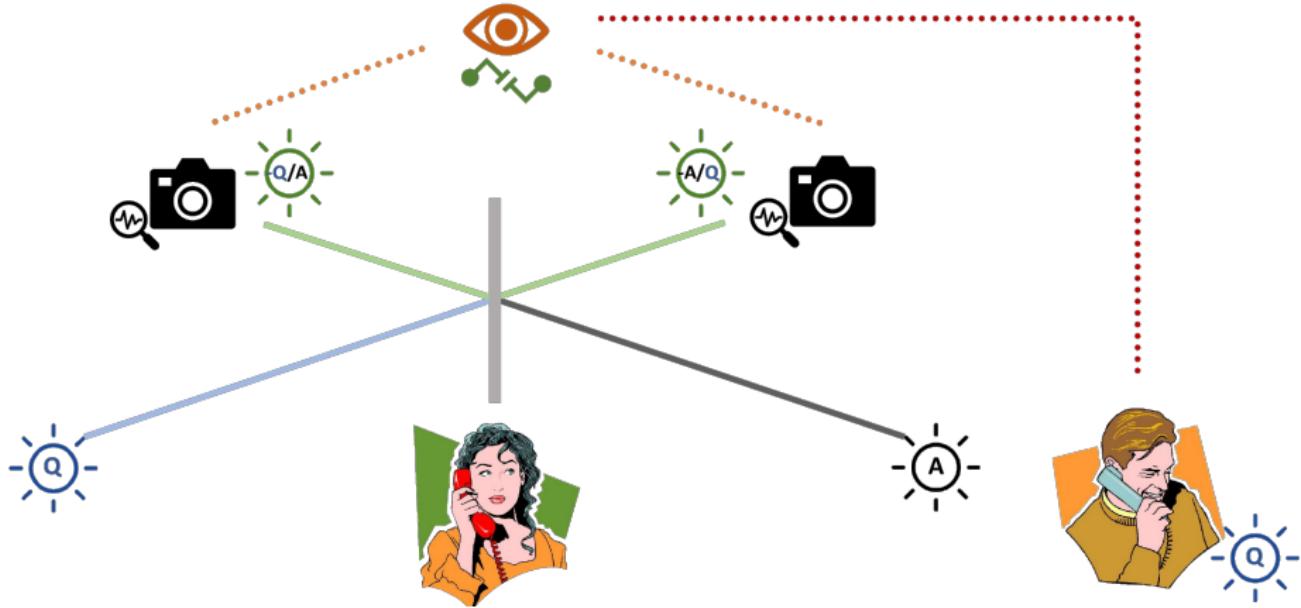
$$|\Psi^-\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|0\rangle_A \otimes |1\rangle_B - |1\rangle_A \otimes |0\rangle_B)$$











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