

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

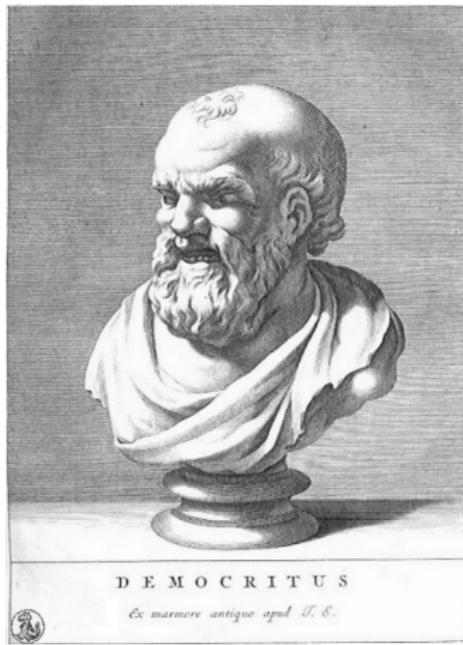


Figure 2: Demokrit (460–370 v. Chr.)

- 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)

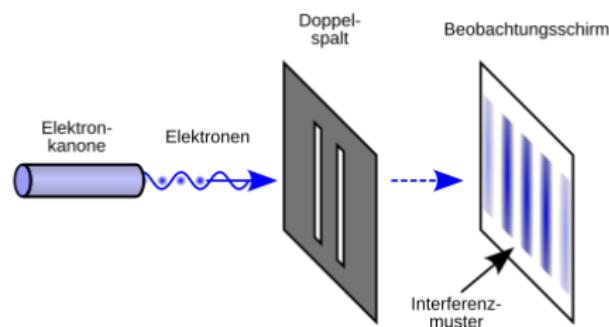


Figure 3: Doppelspalt

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**

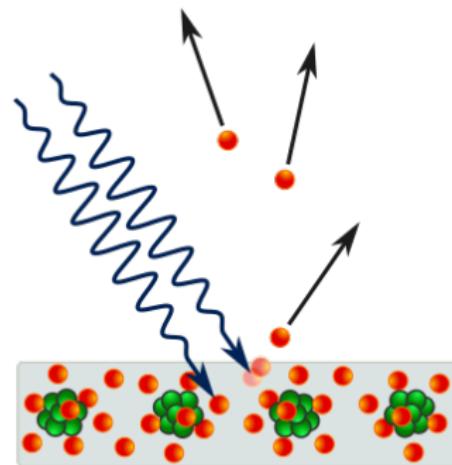
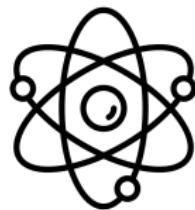
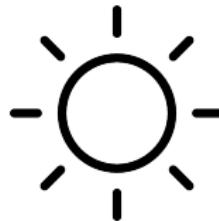


Figure 4: Photoelektrischer Effekt

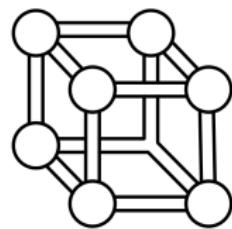
Beispiele für Quantenobjekte



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

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 $|1\rangle$

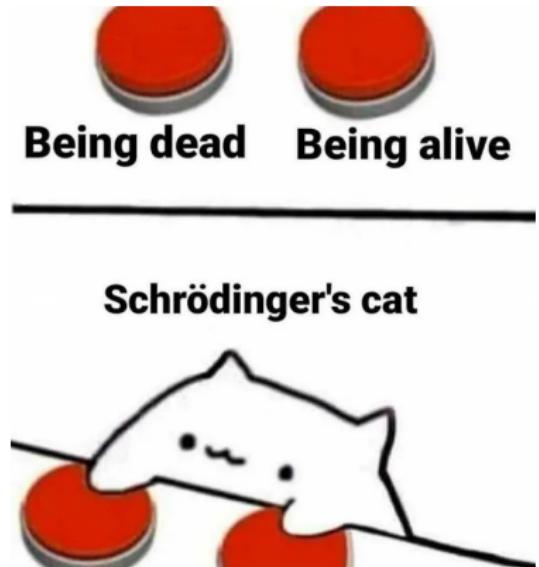


Figure 5: Visualisierung von Schrödinger's Katze

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:

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

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

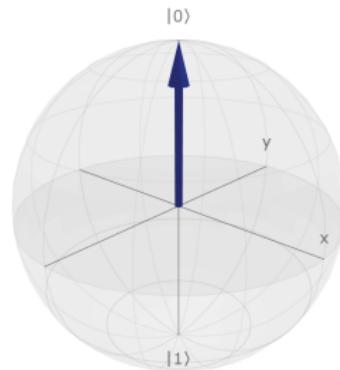


Figure 6: Bloch-Kugel

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**.

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.

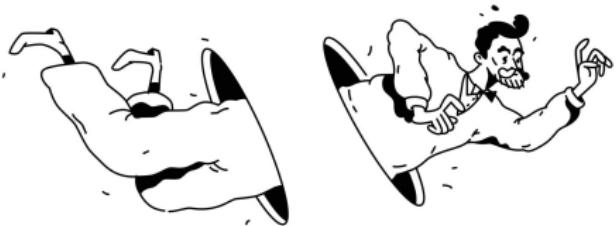
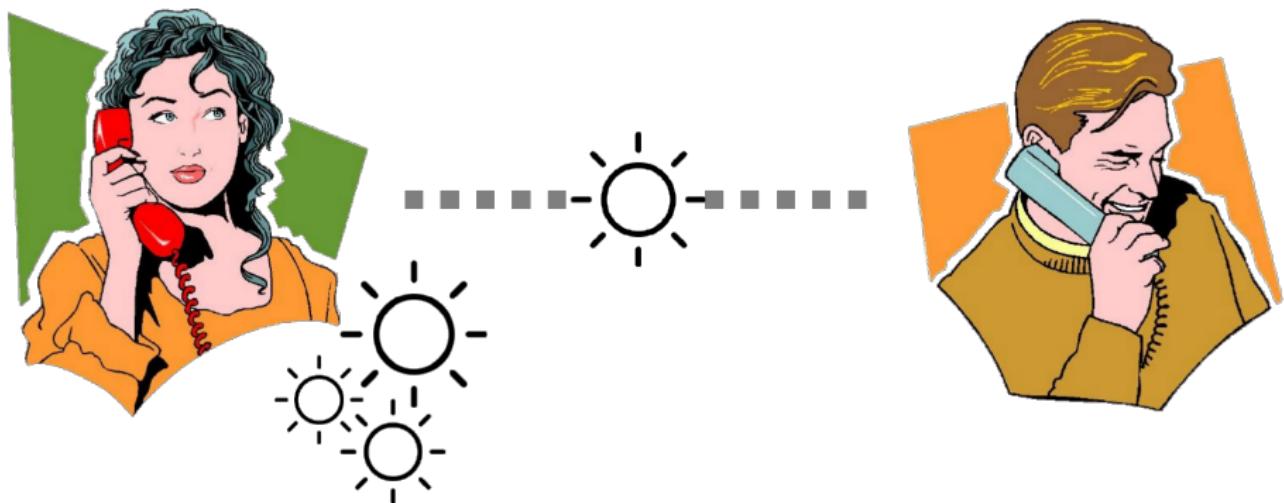
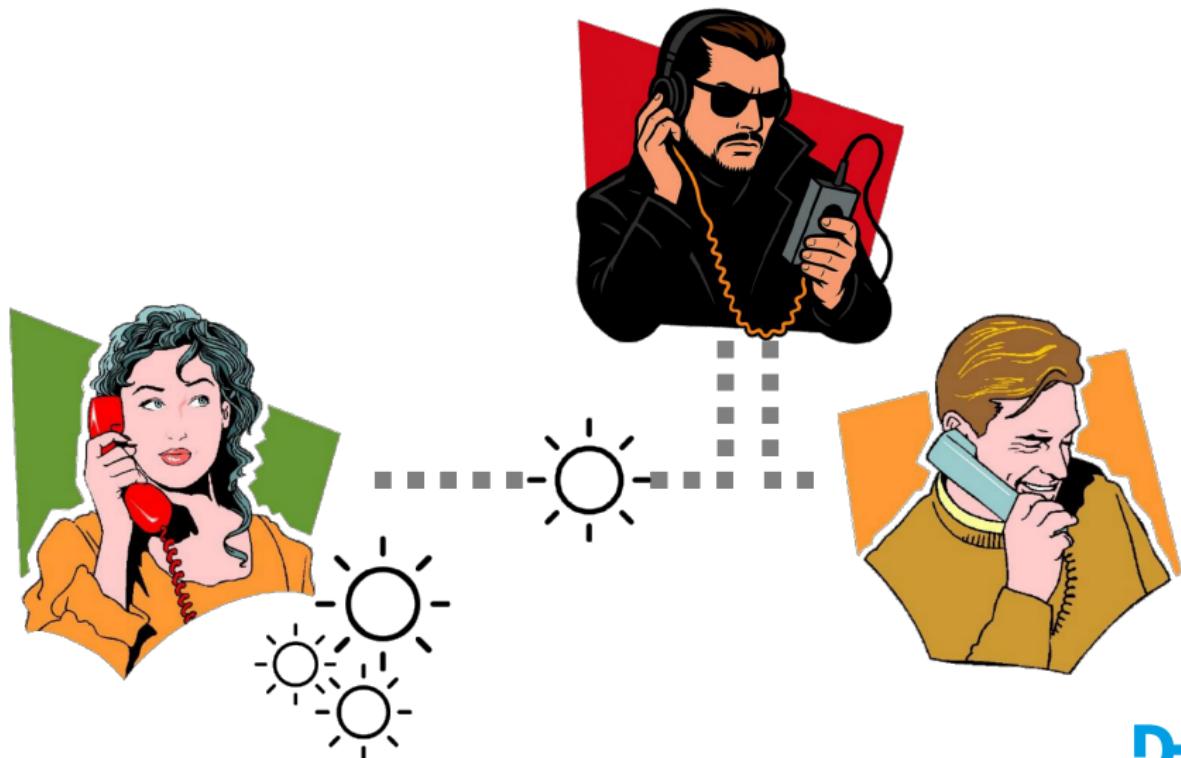
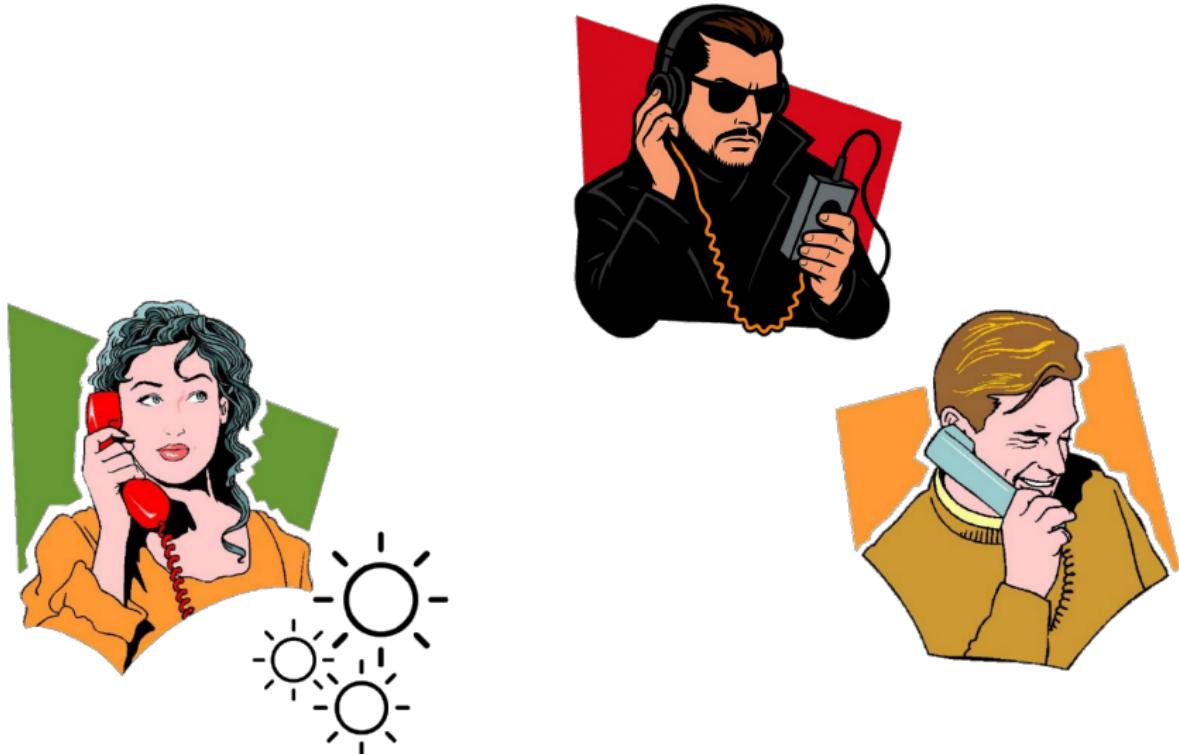


Figure 8: Illustration eines fliegenden Mannes durch ein Loch









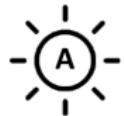


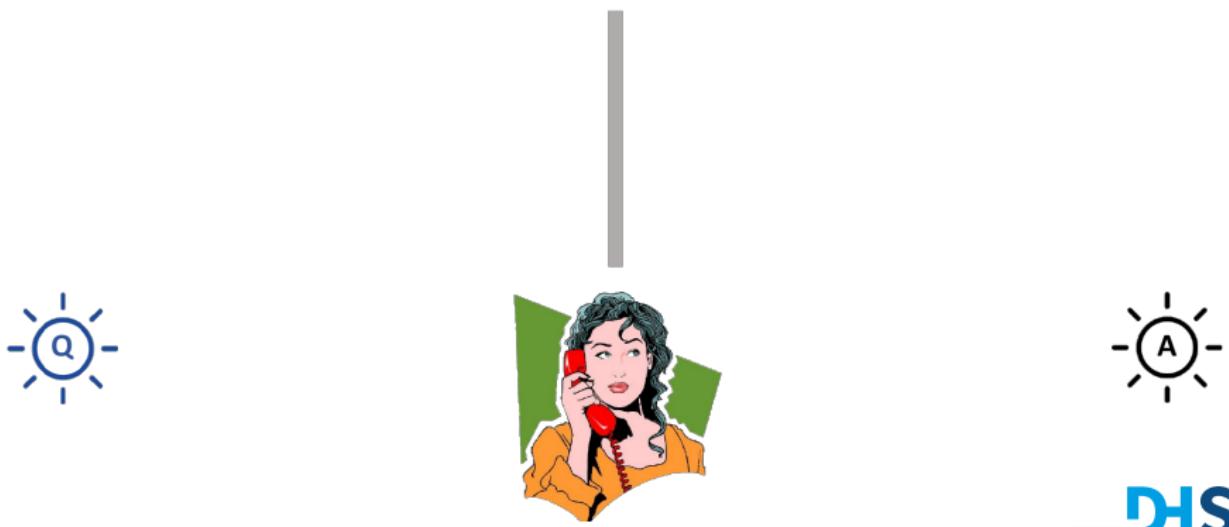














Halbdurchlässiger Spiegel I

- 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.

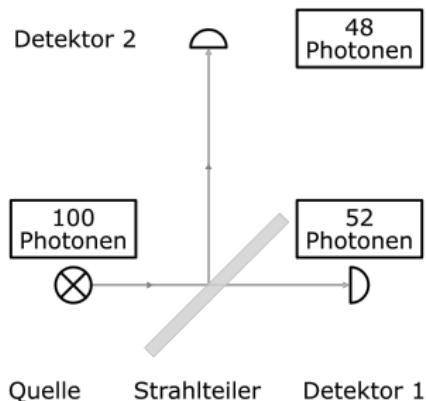


Figure 9: Photonen am halbdurchlässigen Spiegel

Halbdurchlässiger Spiegel II

- Treffen zwei Photonen gleichzeitig von gegenüberliegenden Seiten auf:
 1. Sie können **interferieren** (Hong–Ou–Mandel-Effekt)
 2. Sie können den Spiegel gemeinsam auf demselben Ausgang verlassen (niemals getrennt)
- Dieses Verhalten macht den Beam Splitter zur zentralen Komponente für **Bell-Messungen**, Quanten-Interferometer und **Quanten-Teleportation**.

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

Abbildungsverzeichnis I