

TryScience Workshop:

Wie man einen Quantencomputer programmiert

Nicolai Lang

16. Februar 2026

Voraussetzungen

→ Zielgruppe: Physik + Mathematik auf **Oberstufen-Niveau**

→ Benötigte Konzepte:

- Vektoren (**Lineare Algebra**)
- Wahrscheinlichkeiten
- Trigonometrie

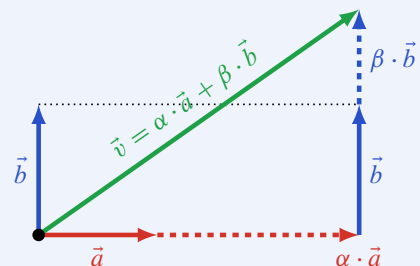
Erinnerung: Linearkombinationen

→ Beispielvektoren in \mathbb{R}^2 :

$$\vec{a} = \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix}, \quad \vec{b} = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^2 \quad (1)$$

→ Linearkombination (skalieren + addieren), $\alpha, \beta \in \mathbb{R}$:

$$\vec{v} = \alpha \cdot \vec{a} + \beta \cdot \vec{b} = \begin{pmatrix} \alpha a_1 + \beta b_1 \\ \alpha a_2 + \beta b_2 \end{pmatrix} \quad (2)$$



1 Von Vektoren zu Qubits

→ **Qubit**: elementarer Träger von Quanteninformation (vgl.: **Bit** im klassischen Computer)

→ Hardware eines Quantencomputers: **Quantenspeicher** + **Quantenprozessor**

Beispielplattform: **Quantencomputer mit neutralen Atomen**

(ein Atom pro Qubit, laserbasierte Kontrolle)

→ Sicht des Programmierers: abstraktes Zweizustandssystem (Hardwaredetails ignorieren!)

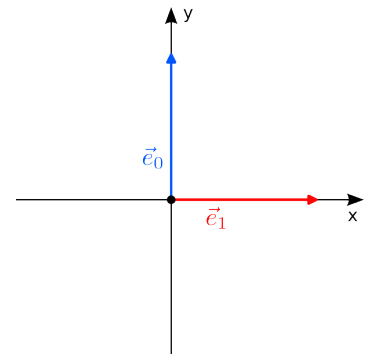
→ **Quanteninformationstheorie**

→ “Qubits können in zwei Zuständen gleichzeitig sein.” → Zustände = Vektoren?

Klassische Bit-Basis: zwei orthogonale Vektoren \vec{e}_0, \vec{e}_1 :

$$0 \leftrightarrow \vec{e}_0 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad \text{und} \quad 1 \leftrightarrow \vec{e}_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3)$$

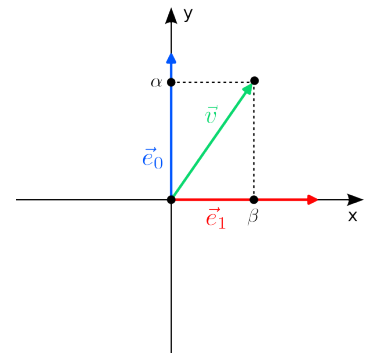
- Basisvektoren sind nur **Labels** für zwei Zustände
- Motivation: Vektoren erlauben Superpositionen durch Linearkombinationen



→ Superposition (Linearkombination):

$$\vec{v} = \alpha \cdot \vec{e}_0 + \beta \cdot \vec{e}_1 = \begin{pmatrix} \beta \\ \alpha \end{pmatrix} \quad (4)$$

- **Amplituden**: $\alpha, \beta \in \mathbb{R}$ (können negativ sein!)
- **Basiszustände**:
 $(\alpha, \beta) = (1, 0) \Rightarrow \vec{v} = \vec{e}_0$
 $(\alpha, \beta) = (0, 1) \Rightarrow \vec{v} = \vec{e}_1$



→ Hypothese: Zustand eines Qubits wird durch 2D Vektor \vec{v} beschrieben (?)

→ Fast korrekt! → Nebenbedingung: **Normierung**:

$$|\vec{v}| = \sqrt{\alpha^2 + \beta^2} \stackrel{!}{=} 1 \quad (5)$$

Motivation: Wahrscheinlichkeitsinterpretation bei der → *Messung* (später)

Achtung: Abstrakte Vektoren

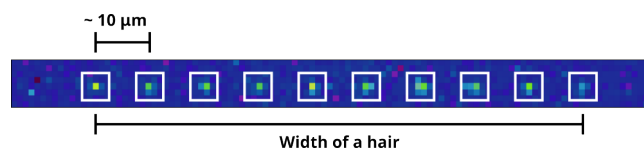
→ $\vec{v} \in \mathbb{R}^2$ ist *Zustandsvektor*, kein Ortsvektor!

Implementierung von Qubits mit neutralen Atomen

→ Physikalisches Qubit: Brauchen zwei interne Quanten-Zustände \vec{e}_0, \vec{e}_1

→ Beispiel: einzelne **Strontium-Atome**, mit Lasern in Fallen gehalten (“optische Pinzetten”)

→ Abbildung mit Mikroskop (Fluoreszenzbild):

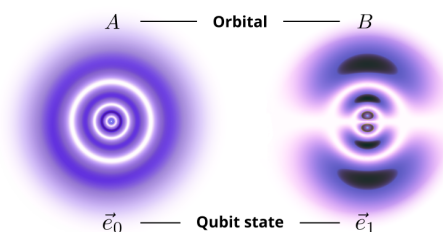


- Weiße Kästchen: bekannte Fallenpositionen (Atome können dunkel sein → *später*)
- Jeder helle Fleck: ein Atom

Achtung: Abbildung von Atomen

- Atomdurchmesser $\sim 0.1 \text{ nm}$ vs. Abbildungswellenlänge $\sim 500 \text{ nm}$
- Optische Bilder können keine “Atomform” auflösen

→ Basiswahl: zwei **elektronische Orbitale** A und B des Atoms (“Elektronen-Orbits”):



- Kodierung: $A \leftrightarrow \vec{e}_0$ und $B \leftrightarrow \vec{e}_1$
- Superposition: Linearkombinationen von \vec{e}_0, \vec{e}_1

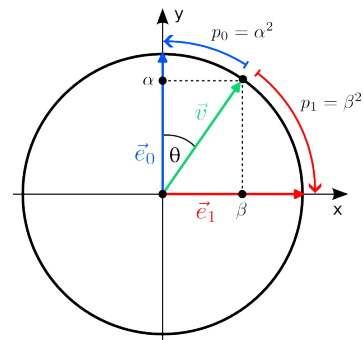
→ Warum einzelne Atome?

- Unerwünschte → *Messungen* durch die Umgebung verringern (**Dekohärenz**)
- Vakuum + mikroskopische Systeme: leichter zu isolieren als makroskopische Objekte

2 Messungen

- Besonderheit der Quantenmechanik: **Messungen**
- Ergebnisse: **diskrete** Basiszustände \vec{e}_0 oder \vec{e}_1 (kein “dazwischen”) (Qubits sind *keine* kleine “Kompassnadeln”!)
- **✱ Born-Regel**: Wahrscheinlichkeiten aus Amplituden-Quadraten:

$$\vec{v} = \alpha \vec{e}_0 + \beta \vec{e}_1 \xrightarrow{\text{Messung}} \vec{v}_{\text{neu}} = \begin{cases} \vec{e}_0 & \text{mit Wahrsch. } p_0 = \alpha^2 \\ \vec{e}_1 & \text{mit Wahrsch. } p_1 = \beta^2 \end{cases} \quad (6)$$



Zustand nach der Messung:

✱ Kollaps auf den beobachteten Basiszustand \vec{v}_{neu}

- Zusammenfassung:
 - **Quantisierung**: diskrete Ergebnisse aus einem kontinuierlichen Zustandsraum
 - **Probabilistisch**: zufällige Ergebnisse mit zustandsabhängigen Wahrscheinlichkeiten
 - **Kollaps**: Zustandsupdate auf den gemessenen Basiszustand
- Wahrscheinlichkeitsinterpretation macht Normierung notwendig:

$$p_0 + p_1 \stackrel{!}{=} 1 \quad \Leftrightarrow \quad |\vec{v}|^2 = \alpha^2 + \beta^2 \stackrel{!}{=} 1 \quad \Leftrightarrow \quad |\vec{v}| \stackrel{!}{=} 1 \quad (7)$$

- **✱ Ein-Qubit-Zustandsraum = Einheitskreis** (Winkel θ):

$$\vec{v} = \cos(\theta) \vec{e}_0 + \sin(\theta) \vec{e}_1 = \begin{pmatrix} \sin(\theta) \\ \cos(\theta) \end{pmatrix} \quad \text{für } 0 \leq \theta < 2\pi. \quad (8)$$

Erinnerung: $\sin^2(\theta) + \cos^2(\theta) = 1$ (automatisch normiert)

- Implikation für Quantencomputer:
 “Quantenprogramme” viele Male wiederholen (**✱ Shots**) um Mittelwerte zu berechnen

Achtung: Was gilt als Messung?

- Messung \approx Wechselwirkung, die **Zustandsinformation** in die Umgebung verteilt
- Kein bewusster Beobachter erforderlich
- “Zufällige Messungen” (z. B. Streuphotonen) → unerwünschter Kollaps (***Dekohärenz**)
- Technische Herausforderung: “Informationsleck” verhindern (**Isolation**)

3 Notation der Quantenphysik

→ Übliche Notation = **Dirac-Notation**: Vektoren \vec{v} werden als **Kets** $|\Psi\rangle$ geschrieben:

$$\vec{v} \mapsto |\Psi\rangle \quad \text{und} \quad \vec{e}_0 \mapsto |0\rangle \quad \text{und} \quad \vec{e}_1 \mapsto |1\rangle . \quad (9)$$

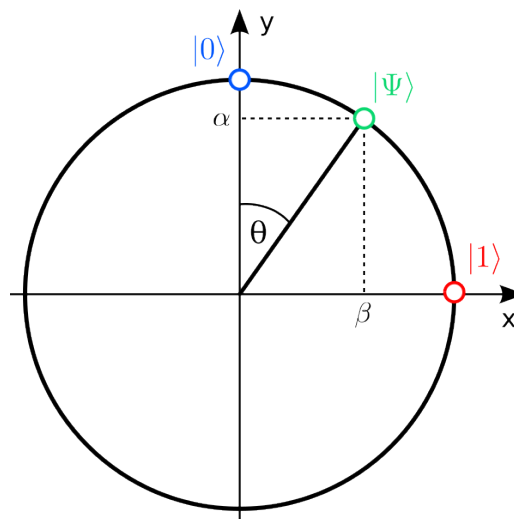
Grund: kompaktere Formeln; einfache Verallgemeinerung auf viele Qubits (→ *später*)

→ Ein-Qubit-Zustand in Dirac-Notation:

$$|\Psi\rangle = \alpha |0\rangle + \beta |1\rangle \quad \text{mit} \quad \alpha^2 + \beta^2 = 1 \quad (10)$$

- **Amplituden**: α, β
- **Basis-Kets**: $|0\rangle, |1\rangle$

→ Zustandsraum in Dirac-Notation:



Achtung: Quantenzustand vs. Wellenfunktion

- “Wellenfunktion” historisch: Zustand als Funktion des Ortes
- Qubit-Zustände $|0\rangle, |1\rangle$ sind *keine* Ortswellenfunktionen!
- Wir verwenden den Begriff **Quantenzustand**

4 Viele Qubits

→ Nützlicher Quantencomputer braucht **viele Qubits**

→ Fragen:

- Wie beschreibt man Zustände vieler Qubits?
- Wie viele Qubits sind “genug”?

4.1 Quantenzustände vieler Qubits

→ Visualisierung unmöglich: Das Ein-Qubit-Kreisbild kann nicht verallgemeinert werden!
(Rechnen mit linearer Algebra geht aber weiterhin!)

→ Messergebnisse für N Qubits: **Bitstrings** $x_1 x_2 \dots x_N$ mit $x_i \in \{0, 1\}$

→ Ein Basis-Ket für jede klassische Konfiguration:

$$|x_1 x_2 \dots x_N\rangle \quad (11)$$

→ 2^N Basiszustände für N Qubits

→ Beispiel $N = 2$ ($2^2 = 4$):

$$|00\rangle, |01\rangle, |10\rangle, |11\rangle \quad (12)$$

→ Dimension des Zustandsraums: 2^N (man benötigt 2^N orthogonale Basisvektoren)
(Beispiel: $N = 2 \rightarrow$ Zustandsraum = $\mathbb{R}^4 \rightarrow$ nicht visualisierbar)

→ Allgemeiner Zustand: **Linearkombination** aller Basiszustände:

$$|\Psi\rangle = \alpha |00\rangle + \beta |01\rangle + \gamma |10\rangle + \delta |11\rangle \quad (13)$$

Amplituden: $\alpha, \beta, \gamma, \delta \in \mathbb{R}$ (allgemein: 2^N Amplituden)

→ Messungen: Verallgemeinerung der **Born-Regel**:

$$|\Psi\rangle \xrightarrow{\text{Messung}} |\Psi_{\text{neu}}\rangle = \begin{cases} |00\rangle & \text{mit Wahrscheinlichkeit } p_0 = \alpha^2 \\ |01\rangle & \text{mit Wahrscheinlichkeit } p_1 = \beta^2 \\ |10\rangle & \text{mit Wahrscheinlichkeit } p_2 = \gamma^2 \\ |11\rangle & \text{mit Wahrscheinlichkeit } p_3 = \delta^2 \end{cases} \quad (14)$$

- **Wahrscheinlichkeiten:** Quadrate der Amplituden

- **Normierung:**

$$\alpha^2 + \beta^2 + \gamma^2 + \delta^2 \stackrel{!}{=} 1 \quad (15)$$

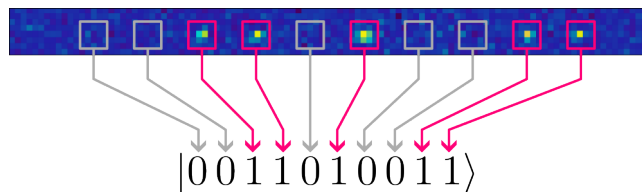
→ Weiterhin “Vektorlänge eins” in $\mathbb{R}^{(2^N)}$

Achtung: Das Kreisbild verallgemeinert sich nicht auf viele Qubits!

- **Vorsicht:** N Qubits sind *nicht* N unabhängige Punkte auf einem Kreis!
- Zählen: 2^N Amplituden $>$ N Winkel

→ Beispiel: Zustandsmessung mit neutralen Atomen:

- Atome mit Laser beleuchten (** Zustandsselektive Fluoreszenz):
 $|0\rangle = \text{Orbital } A \rightarrow \text{bleibt dunkel}, |1\rangle = \text{Orbital } B \rightarrow \text{leuchtet}$
- Kamerabild \rightarrow Bitstring-Ergebnis:



- Dunkles Kästchen $\Rightarrow |0\rangle$, helles Kästchen $\Rightarrow |1\rangle$
- Beispielmessung: $|0011010011\rangle$

4.2 Klassische Simulation von Quantenzuständen

→ Klassische Simulation von N Qubits $\rightarrow 2^N$ **Amplituden** speichern

→ Speicherabschätzung: 4 Byte pro reeller Amplitude:

$$M = 2^N \times 4 \text{ byte} \quad \text{Speicher für Quantenzustand von } N \text{ Qubits} \quad (16)$$

- Beispiel: $M = 16 \text{ GB RAM (Laptop)} \rightarrow N \approx 32$ Qubits
- Beispiel: $M = 1 \text{ TB RAM (Server)} \rightarrow N \approx 38$ Qubits
- Beispiel: $N = 100$ Qubits (= Atome) $\rightarrow M = 2^{100} \times 4 \text{ byte} = 5 \times 10^{18} \text{ TB Speicher nötig}$

→ $N \gtrsim 50$ Qubits: schwierig zu simulieren; $N \sim 100$ Qubits: unmöglich zu simulieren

→ Quantencomputer bauen, um solche Systeme zu untersuchen!

5 Operationen auf Qubits

→ Grundprinzip eines **Quantenalgorithmus** (“Quantenprogramm”):

$$\underbrace{|\Psi_{\text{initial}}\rangle = |0 \dots 0\rangle}_{\text{Initialisierung}} \xrightarrow[\text{Der schwierige Teil!}]{\text{Transformation}} |\Psi_{\text{final}}\rangle \xrightarrow{\text{Messung}} \underbrace{\begin{cases} |0 \dots 0\rangle ? \\ |0 \dots 1\rangle ? \\ \vdots \\ |1 \dots 1\rangle ? \end{cases}}_{\text{Resultate}} \quad (17)$$

- Initialisierung: typischerweise $|0 \dots 0\rangle$
- Transformation durch **Quantengatter**: $|\Psi_{\text{initial}}\rangle \mapsto |\Psi_{\text{final}}\rangle$ (Details: Jetzt!)
- Messung: Ein Bitstring pro Shot

Probabilistische Messergebnisse → Oft wiederholen (**Shots**) → Wahrscheinlichkeiten schätzen

5.1 Quantengatter auf einzelnen Qubits

→ **Quantengatter** U = Transformation eines Quantenzustands (keine Messung!)

→ Definiere U durch seine Wirkung auf Basiszustände $|0\rangle, |1\rangle$:

$$\begin{aligned}
 |0\rangle &\xrightarrow{U} U_{00} \cdot |0\rangle + U_{01} \cdot |1\rangle \\
 |1\rangle &\xrightarrow{U} U_{10} \cdot |0\rangle + U_{11} \cdot |1\rangle
 \end{aligned} \quad (18)$$

→ U ist durch vier reelle Zahlen U_{ij} festgelegt

→ Wirkung von U auf *beliebige Superpositionen* via **Linearität**:

$$\begin{aligned}
 |\Psi\rangle = \alpha |0\rangle + \beta |1\rangle &\xrightarrow{U} \alpha (U_{00} |0\rangle + U_{01} |1\rangle) + \beta (U_{10} |0\rangle + U_{11} |1\rangle) \\
 &= \underbrace{(\alpha U_{00} + \beta U_{10})}_{\alpha'} |0\rangle + \underbrace{(\alpha U_{01} + \beta U_{11})}_{\beta'} |1\rangle \\
 &= \alpha' |0\rangle + \beta' |1\rangle \\
 &= |\Psi'\rangle
 \end{aligned} \quad (19)$$

→ Neue Amplituden $\alpha' = \alpha U_{00} + \beta U_{10}$ und $\beta' = \alpha U_{01} + \beta U_{11}$

→ Weitere Bedingung: **Orthogonalität** = U erhält **Normierung** von $|\Psi\rangle$ (ignorieren wir hier)

→ U ist Kombination aus **Drehungen** und **Spiegelungen** (→ *Beispiel unten*)

→ Wichtige Konsequenzen der Linearität:

- **No-Cloning-Theorem** (Quantenzustände können nicht kopiert werden)
- **No-Communication-Theorem** (Keine Kommunikation schneller als Licht)

Beispiel: Das Hadamard-Gatter

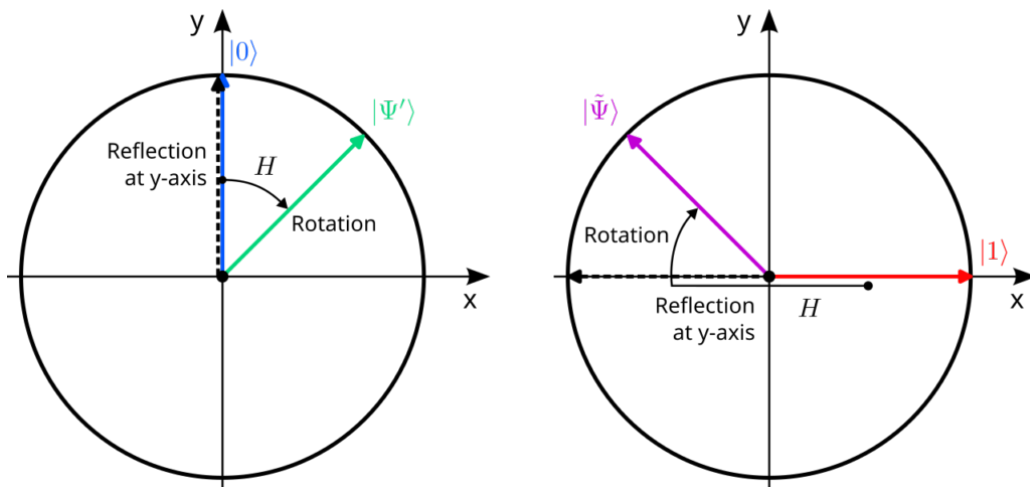
→ ✱ **Hadamard-Gatter** H erzeugt Superpositionen aus Basiszuständen:

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} = |0\rangle &\xrightarrow{H} \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot |0\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot |1\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = |1\rangle &\xrightarrow{H} \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot |0\rangle - \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot |1\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} -1 \\ 1 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (20)$$

→ Vier Koeffizienten: $U_{00} = U_{01} = U_{10} = \frac{1}{\sqrt{2}}$ und $U_{11} = -\frac{1}{\sqrt{2}}$

→ Geometrische Interpretation (ein Qubit!):

Spiegelung an y -Achse + Drehung um 45° (im Uhrzeigersinn):



→ Erinnerung: Rotation & Spiegelung wirkt auf *Zustandsraum* (nicht auf physikalischen Raum!)

5.2 Kombination von Gattern auf einem Qubit

→ Gatter können **kombiniert** werden durch **Hintereinanderausführung**:

$$|\Psi\rangle \xrightarrow{U_1} |\Psi'\rangle \xrightarrow{U_2} |\Psi''\rangle \dots \quad (21)$$

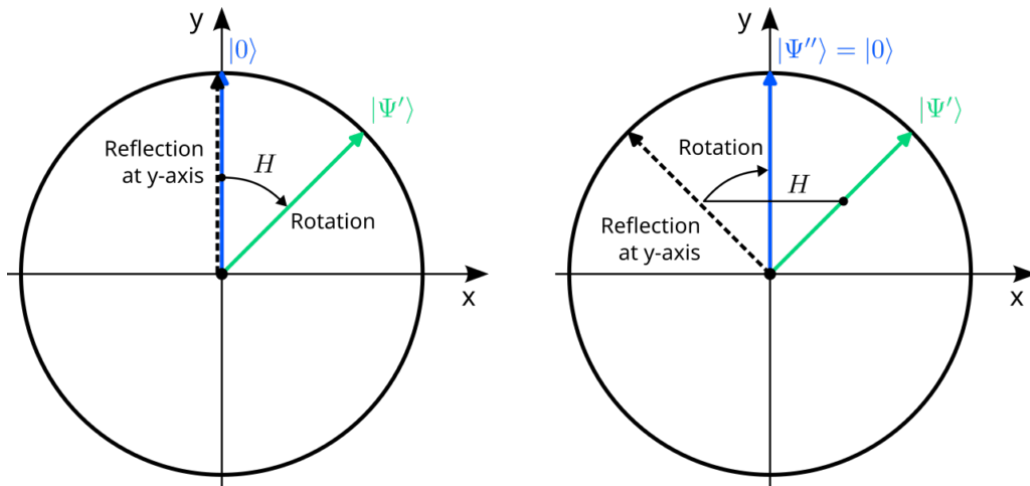
→ Ziel: Konstruktion komplizierter Gatter aus einfachen Gattern (LEGO-Prinzip)

Beispiel: Kombination von zwei Hadamard-Gattern

→ Ziel: Berechne Wirkung von zwei Hadamard-Gattern:

$$|\Psi\rangle \xrightarrow{H} |\Psi'\rangle \xrightarrow{H} |\Psi''\rangle \quad (22)$$

→ Lösungsweg 1: Geometrisches Argument (Beispiel: $|\Psi\rangle = |0\rangle$):



→ Spiegelung + Drehung → Zweimal H “macht nichts”: $|\Psi\rangle = |\Psi''\rangle$

→ Lösungsweg 2: Lineare Algebra:

- Erste Anwendung von H :

$$\begin{aligned} |\Psi\rangle = \alpha |0\rangle + \beta |1\rangle &\xrightarrow{H} \alpha \left(\frac{1}{\sqrt{2}} |0\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}} |1\rangle \right) + \beta \left(\frac{1}{\sqrt{2}} |0\rangle - \frac{1}{\sqrt{2}} |1\rangle \right) \\ &= \frac{\alpha + \beta}{\sqrt{2}} |0\rangle + \frac{\alpha - \beta}{\sqrt{2}} |1\rangle = |\Psi'\rangle \end{aligned} \quad (23)$$

- Zweite Anwendung von H :

$$\begin{aligned} |\Psi'\rangle &\xrightarrow{H} \frac{\alpha + \beta}{\sqrt{2}} \left(\frac{1}{\sqrt{2}} |0\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}} |1\rangle \right) + \frac{\alpha - \beta}{\sqrt{2}} \left(\frac{1}{\sqrt{2}} |0\rangle - \frac{1}{\sqrt{2}} |1\rangle \right) \\ &= \alpha |0\rangle + \beta |1\rangle = |\Psi\rangle = |\Psi''\rangle \end{aligned} \quad (24)$$

Ergebnis: $|\Psi''\rangle = |\Psi\rangle$ für alle Anfangszustände $|\Psi\rangle$ → Das Hadamard-Gatter ist **selbstinvers**

Achtung: Selbstinverse Gatter

- **✳️ Selbstinverse** Gatter sind etwas Besonderes und nicht die Regel!
- Beispiel: Eine Drehung um ϑ ist nur für $\vartheta \in \{0, \pi\} \pmod{2\pi}$ selbstinvers.

5.3 Gatter auf vielen Qubits

→ **✳️ Quantenalgorithmus** = Sequenz von Gattern auf vielen Qubits

→ Spezifikation von **✳️ N -Qubit Gattern**:

Definiere Wirkung auf allen 2^N Basiszuständen $|x_1 x_2 \dots x_N\rangle$

Beispiel 1: Das Hadamard-Gatter auf zwei Qubits

→ Hadamard-Gatter = Ein-Qubit-Gatter → $N = 2$ Qubits → **Zwei** Hadamard Gatter:

H_1 wirkt auf Qubit 1, H_2 auf Qubit 2

→ Erinnerung: Zwei-Qubit-Basis: $|00\rangle, |01\rangle, |10\rangle, |11\rangle$

→ Transformation für H_1 :

$$\begin{aligned} |00\rangle &\xrightarrow{H_1} \frac{1}{\sqrt{2}} |00\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}} |10\rangle \\ |01\rangle &\xrightarrow{H_1} \frac{1}{\sqrt{2}} |01\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}} |11\rangle \\ |10\rangle &\xrightarrow{H_1} \frac{1}{\sqrt{2}} |00\rangle - \frac{1}{\sqrt{2}} |10\rangle \\ |11\rangle &\xrightarrow{H_1} \frac{1}{\sqrt{2}} |01\rangle - \frac{1}{\sqrt{2}} |11\rangle \end{aligned} \tag{25}$$

Beachte: H_1 transformiert nur Qubit 1 (Qubit 2 bleibt unverändert) → **Ein-Qubit-Gatter**

→ Übungsaufgabe: Wie sehen die Transformationsregeln für H_2 aus?

Beispiel 2: Das Controlled-NOT-Gatter

→ Beispiel für ein **✳️ Zwei-Qubit-Gatter** (hängt von *zwei* Qubits ab)

→ **✳️ Controlled-NOT Gatter (CNOT)**:

Invertiert ein Qubit (**✳️ Target**) genau dann, wenn ein anderes Qubit (**✳️ Control**) in $|1\rangle$ ist

Notation: $\text{CNOT}_{i \rightarrow j}$ (Control i , Target j)

→ Transformation für $\text{CNOT}_{1 \rightarrow 2}$:

$$\begin{aligned}
 |00\rangle &\xrightarrow{\text{CNOT}_{1 \rightarrow 2}} |00\rangle \\
 |01\rangle &\xrightarrow{\text{CNOT}_{1 \rightarrow 2}} |01\rangle \\
 |10\rangle &\xrightarrow{\text{CNOT}_{1 \rightarrow 2}} |11\rangle \\
 |11\rangle &\xrightarrow{\text{CNOT}_{1 \rightarrow 2}} |10\rangle
 \end{aligned} \tag{26}$$

Beachte: Qubit 2 (Control) unverändert; Qubit 1 (Target) invertiert nur, wenn Control |1)

→ Übungsaufgabe: Wie sehen die Regeln für $\text{CNOT}_{2 \rightarrow 1}$ aus?

5.4 Viele Gatter auf vielen Qubits: ein einfacher Quantenalgorithmus

→ Zwei-Qubit Anfangszustand: $|\Psi_0\rangle = |00\rangle$

→ Ziel: Verkettung von **zwei Gattern** auf **zwei Qubits**: Erst H_1 dann $\text{CNOT}_{1 \rightarrow 2}$

- Schritt 1: H_1 anwenden:

$$|\Psi_0\rangle = |00\rangle \xrightarrow{H_1} \frac{1}{\sqrt{2}} |00\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}} |10\rangle = |\Psi_1\rangle \tag{27}$$

- Schritt 2: $\text{CNOT}_{1 \rightarrow 2}$ anwenden: (**Linearität!**)

$$|\Psi_1\rangle \xrightarrow{\text{CNOT}_{1 \rightarrow 2}} \frac{1}{\sqrt{2}} |00\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}} |11\rangle = |\Psi_2\rangle \tag{28}$$

→ Besonderer Endzustand $|\Psi_2\rangle$: **** Bell-Zustand** (auch **** EPR-Paar** genannt)

→ Wieso besonders? Messe $|\Psi_2\rangle$ (**Born-Regel**):

$$|\Psi_2\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} |00\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}} |11\rangle \xrightarrow{\text{Messung}} |\Psi_3\rangle = \begin{cases} |00\rangle & \text{mit } p_0 = 0.5 \\ |01\rangle & \text{mit } p_1 = 0 \\ |10\rangle & \text{mit } p_2 = 0 \\ |11\rangle & \text{mit } p_3 = 0.5 \end{cases} \tag{29}$$

- Beobachtbare Ergebnisse: nur |00) oder |11) (jeweils mit Wahrscheinlichkeit 1/2)
- Zufällige Ergebnisse für jedes Qubit, aber perfekt **** korreliert!**

→ **** Quanten-Verschränkung** zwischen Qubits 1 und 2

→ **Quanten-Verschränkung** = Klassisch unmöglich *starke* Korrelation zwischen Qubit-Paaren
(Experimentell überprüfbar mittels **** Bell-Tests**)