

Hallo Quantencomputer!

# TEIL 1 : Einführung

- ▶ Quantencomputer funktionieren anders als herkömmliche Computer, wie zum Beispiel der, an dem Du gerade arbeitest.
- ▶ Wir brauchen also andere Programmiersprachen, um mit Quantencomputern arbeiten zu können.
- ▶ Eine dieser Sprachen ist Qiskit.
- ▶ Qiskit wird von IBM entwickelt und alle können damit arbeiten.
- ▶ Qiskit Programme können auf echten Quantencomputern laufen, die über das Internet zugänglich sind. Zum Ausprobieren verwendet man aber häufig auch simulierte Quantencomputer.
- ▶ Wir begleiten dich heute bei Deinen ersten Schritten mit Qiskit!

# IBM Quantum Composer

- ▶ Man kann sogar Qiskit nutzen ohne zu tippen! Das geht mithilfe des IBM Quantum Composer.
- ▶ Klicke auf den Link <https://quantum-computing.ibm.com/composer/files/new>.
- ▶ Dort siehst du 2 Pop-ups. Beim ersten kannst Du unten die Sprache auf Deutsch ("Germann,,) einstellen und die Cookies Richtlinien aussuchen, denen du zustimmen möchtest.
- ▶ Das zweite Pop up kannst du schließen, in dem du auf das Kreuz (X) klickst.
- ▶ Anmelden brauchst du dich erstmal nicht.

# IBM Quantum Composer

The screenshot displays the IBM Quantum Composer interface. At the top, the title bar reads "IBM Quantum Composer" and includes a search icon, a refresh icon, a user profile icon, and a "Sign in" button. Below the title bar is a menu bar with "File", "Edit", "Inspect", "View", and "Share". A status bar indicates "Sign in to run on quantum hardware." and "Setup and run".

The main workspace is titled "Untitled circuit" and shows a quantum circuit with three qubits labeled  $q_0$ ,  $q_1$ , and  $q_2$ . The circuit editor toolbar includes gates: Hadamard (H), CNOT, multi-controlled NOT, Toffoli, CNOT, Identity (I), T, S, Z, T†, S†, P, RZ, measurement,  $|0\rangle$ ,  $|1\rangle$ , if, and  $\sqrt{X}$  gates. A palette below the toolbar contains single-qubit rotation gates: Y, RX, RY, U, RXX, RZZ, and an "+ Add" button.

On the right side, the "Visualizations seed" is 4912. Below it, the "OpenQASM 2.0" code editor shows the following code:

```
1 OPENQASM 2.0;  
2 include "qelib1.inc";  
3 qreg q[3];  
4 creg c[3];  
5
```

Below the code editor, there are two visualization panels. The "Probabilities" panel shows a graph with the y-axis labeled "Probability (%)" ranging from 0 to 5. The "Q-sphere" panel shows a Bloch sphere with a blue dot at the top pole, representing the state  $|0\rangle$ . A legend below the sphere shows "State" (checked) and "Phase angle" (unchecked).

# IBM Quantum Composer

Das sieht alles bestimmt erst einmal komisch aus, aber keine Sorge wir gucken uns das alles in Ruhe an. Uns interessieren 3 Bereiche, die wir hier unten markiert haben.

The screenshot shows the IBM Quantum Composer interface. At the top, there is a navigation bar with the title "IBM Quantum Composer" and a "Sign in" button. Below this is a menu bar with "File", "Edit", "Inspect", "View", and "Share". The main workspace is titled "Untitled circuit" and contains a toolbar with various quantum gates (H, CNOT, T, S, Z, T†, S†, P, RZ, etc.) and a circuit diagram with three qubits (q0, q1, q2). To the right of the circuit is a code editor showing the OpenQASM 2.0 code. At the bottom, there are two visualization panels: "Probabilities" and "Q-sphere".

Highlighted areas:

- Green box:** The toolbar containing quantum gates and operations.
- Orange box:** The circuit workspace showing qubit lines and gates.
- Blue box:** The "Probabilities" visualization panel.

```
1 OPENQASM 2.0;
2 include "qelib1.inc";
3 qreg q[3];
4 creg c[3];
5
```

# Quantenschaltung

Wir fangen in der Mitte an. Das ist eine Quantenschaltung und Du kannst diese Quantenschaltung benutzen, um einen Quantencomputer zu steuern. Hier erstellst Du gleich Dein erstes Programm für Quantencomputer.



# Bits und Qubits

Bevor wir jetzt im Detail alles durchgehen, wollen wir kurz erklären, wie ein herkömmlicher Computer funktioniert.

- ▶ Ein Computer ist eine Maschine, die anhand von verschiedenen Operationen Daten verarbeiten kann.
- ▶ Diese Daten werden in Form von **Bits** gespeichert.
- ▶ Ein Bit ist entweder 0 oder 1.
- ▶ Für Deinen Computer entspricht das Wort **HALLO** den Bits:

01001000 01000001 01001100 01001100 01001111

- ▶ Diese Darstellung nennen wir **Binärcode**.

# Quantenschaltung

Nun zurück zu unserem Quantencomputer.

- ▶ Ein Quantencomputer ist auch eine Maschine, die anhand von verschiedenen Operationen Daten verarbeiten kann.
- ▶ Ein Quantencomputer braucht Bits UND Qubits!
- ▶ Qubits? Das sind Quantenbits!
- ▶ Ein Qubit kann auch in den Zuständen 0 oder 1 sein. Man schreibt dann, das Qubit ist im Zustand  $|0\rangle$  bzw.  $|1\rangle$ .
- ▶ Ein Qubit kann aber auch in anderen Zuständen sein, aber hierzu erfährst Du gleich noch mehr.

# Quantenschaltung

Hier siehst Du nochmal unsere Quantenschaltung. Diese lesen wir von links nach rechts. Links siehst Du wie viele Qubits und Klassische Bits wir haben. Wie viele zählst Du jeweils? Wie Du siehst sind dort 3 Qubits gelistet und eine Zeile mit **c3**, dies entspricht 3 normalen Computer-Bits. In der Informatik ist es üblich bei 0 mit dem Zählen anzufangen, deshalb sind die Qubits  $q_0$ ,  $q_1$  und  $q_2$  benannt.



Du brauchst heute aber nur 2 Qubits und 2 Bits. Du kannst also auf eines der 3 Qubits klicken. Wenn Du mit Deinem Mauszeiger auf einen Qubit ( $q_0$ ,  $q_1$  oder  $q_2$ ) gehst, solltest Du einen kleinen roten Mülleimer sehen, wenn Du diesen anklickst, löschst Du das Qubit und die Bits werden automatisch angepasst.

# Quantengatter

- ▶ Als nächstes gucken wir uns den Bereich über unserer Quantenschaltung an.
- ▶ Quantencomputer sind noch so neu, dass man sie nicht einfach so programmieren kann, wie man es auf herkömmlichen Computer tut.
- ▶ Wir müssen also jedes Qubit einzeln steuern. Das machen wir mithilfe von **QUANTENGATTERN**.
- ▶ Ein Quantengatter sagt dem Quantencomputer, ob und wie er den Zustand eines Qubits verändern muss. Somit kann man einen Quantencomputer programmieren.
- ▶ Welche Quantengatter es gibt, siehst Du über der Quantenschaltung.



# Quantengatter

- ▶ Das wird alles ziemlich schnell kompliziert, also gucken wir uns heute nur die 3 ersten Gatter an, aber das reicht schon.
- ▶ Qubits können in verschiedenen Zuständen sein. Der Anfangszustand ist immer der Zustand  $|0\rangle$ .
- ▶ Den Zustand des jeweiligen Qubits kannst Du rechts in Deiner Quantenschaltung sehen. Die Kreise am Ende der Linien entsprechen den Zuständen.
- ▶ Wenn der Kreis grau ist, dann heißt es, dass der Qubit im Zustand  $|0\rangle$  ist.
- ▶ Die beiden Kreise sind deshalb auch grau, weil der Anfangszustand immer  $|0\rangle$  ist.

# TEIL 2: KURS

- ▶ Wir helfen Dir heute dabei, Schritt für Schritt erste Erfahrungen mit Quantencomputern zu sammeln.
- ▶ Du wirst zwei kleine sogenannten Quantenschaltungen programmieren, wie Du sie im Video schon gesehen hast.
- ▶ Gehe auf <https://quantum-computing.ibm.com/composer/files/new> .
- ▶ Wir besprechen gleich 2 Quantengatter und deren Wirkungen auf Qubits.
- ▶ Du brauchst erstmal nur ein Qubit, also lösche bitte 2 der Qubits in der Schaltung. (Gehe mit der Maus auf das jeweilige Qubit und klicke auf den roten Eimer, der erscheint.)



## Aufgabe 1 a): Das Nicht-Gatter

### Was Du wissen musst...

- ▶ Wie im Video schon erwähnt, wird der Zustand eines Qubits jeweils am Ende der Zeile in der Quantenschaltung angezeigt.
- ▶ Ist das Qubit im Zustand  $|0\rangle$ , so ist der Kreis grau.
- ▶ Ist das Qubit im Zustand  $|1\rangle$ , so ist der Kreis blau.

### Aufgabe

- ▶ Klicke auf das Nicht-Gatter über Deiner Quantenschaltung und zieh es auf die erste Zeile in Deiner Quantenschaltung.
- ▶ In welchem Zustand war das erste Qubit bevor du das Nicht-Gatter herunter gezogen hast? Und in welchem Zustand ist es jetzt?

# Lösung



VORHER



$|0\rangle$

NACHHER



$|1\rangle$

## Aufgabe 1 b): Das Nicht-Gatter

### Was Du wissen musst...

- ▶ Du weißt jetzt also, ob und wie sich der Zustand eines Qubits, das im Zustand  $|0\rangle$  ist, verändert, wenn man darauf ein Nicht-Gatter anwendet.

### Aufgabe

- ▶ Klicke auf das Nicht-Gatter über Deiner Quantenschaltung und zieh es auf die erste Zeile in Deiner Quantenschaltung, sodass nun 2 Nicht-Gatter hintereinander auf der erste Qubit wirken.
- ▶ In welchem Zustand war das erste Qubit bevor du das zweite Nicht-Gatter herunter gezogen hast? Und in welchem Zustand ist es jetzt?

# Lösung



Anfang



$|0\rangle$

1 Nicht-Gatter



$|1\rangle$

2 Nicht-Gatter



$|0\rangle$

# Nicht-Gatter

- ▶ Das Nicht-Gatter kippt also ein Qubit vom Zustand  $|0\rangle$  in den Zustand  $|1\rangle$  und vom Zustand  $|1\rangle$  in den Zustand  $|0\rangle$ .
- ▶ Wir nennen dieses Gatter **Nicht-Gatter**, weil es ein Qubit immer in den Zustand kippt, in dem es zuvor nicht gewesen ist.
- ▶ Üblicherweise wird der englische Name benutzt. Das Gatter ist also bekannter unter dem Namen **NOT-Gate**.

# Quantengatter

- ▶ Auf zum nächsten Gatter! Dafür löschen wir erstmal die Gatter aus unserer Schaltung.
- ▶ Mit einem Rechtsklick auf die jeweiligen Gatter erscheint eine Liste, klicke auf „Delete“ und das Gatter wird gelöscht.
- ▶ Was wir bisher gemacht haben, hätten wir auch mit Bits machen können, aber jetzt wird es etwas anders.

## Aufgabe 1 c): Hadamard-Gatter

### Was Du wissen musst...

- ▶ Das nächste Gatter ist das **Hadamard-Gatter!** (Englisch: Hadamard-Gate)
- ▶ Das Hadamard-Gatter ist das erste Gatter in der Liste und sieht so aus:



### Aufgabe

- ▶ Zieh das Hadamard-Gatter auf die Quantenschaltung, sodass es auf das erste Qubit wirkt.
- ▶ In welchem Zustand war das erste Qubit bevor du das Hadamard-Gatter herunter gezogen hast? In welchem Zustand ist es jetzt? Was könnte dies bedeuten?

# Lösung



- ▶ Komisch oder? Halb  $|0\rangle$ , halb  $|1\rangle$ .
- ▶ Hier siehst Du also schon, dass etwas anders als bei Bits funktioniert, weil es hier einen Zustand gibt, der weder  $|0\rangle$  noch  $|1\rangle$  ist.

# Superposition

- ▶ Was Du hier siehst ist ein Phänomen aus der Quantenmechanik (das ist ein Bereich aus der Physik).
- ▶ Herkömmliche Computer funktionieren mit Bits. Wir können immer eindeutig sagen in welchem Zustand ein Bit ist.
- ▶ Bei Qubits ist das anders. Wir kennen den Zustand eines Qubits nicht, bevor wir den Zustand messen.
- ▶ Nach der Messung ist der Qubit eindeutig in einem Zustand  $|0\rangle$  oder  $|1\rangle$ .
- ▶ Vor der Messung können wir nur mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit vorhersagen, in welchen Zustand das Qubit sein wird.
- ▶ Bisher konnten wir mit 100%-iger Wahrscheinlichkeit sagen, das Qubit ist im Zustand  $|0\rangle$  oder  $|1\rangle$ . Beim Hadamard-Gatter ist das anders.
- ▶ Das erste Qubit ist also in einem Zustand, der nach der Messung zu 50%  $|0\rangle$  und zu 50%  $|1\rangle$  sein kann.
- ▶ Wir sagen das Qubit ist in einer **Superposition** der Zustände  $|0\rangle$  und  $|1\rangle$ .



## Aufgabe 2: Superposition

### Was Du wissen musst...

- ▶ Wir haben jetzt ein Beispiel zur Veranschaulichung der Superposition. Jetzt gilt es, dies richtig zu verstehen.

### Aufgabe

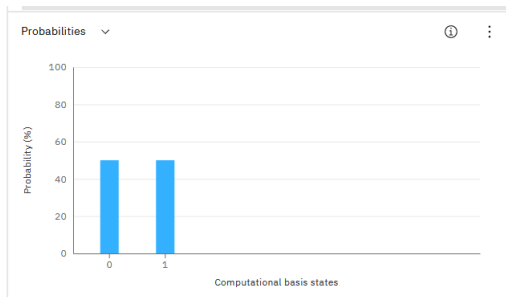
- ▶ Im Beispiel des Münzwurfs, was entspricht einem Qubit? Was entspricht den Zuständen eines Qubits? Und was entspricht der Superposition?

# Lösung

- ▶ Die Münze ist das Qubit.
- ▶ Kopf und Zahl sind die Zustände  $|0\rangle$  und  $|1\rangle$ .
- ▶ Der Zustand der Münze, wenn sie in der Luft ist, ist die Superposition.

# Wahrscheinlichkeiten

- ▶ Links unter Deiner Quantenschaltung siehst Du auch folgende Grafik:



- ▶ „Probabilities“ heißt Wahrscheinlichkeiten auf Englisch.
- ▶ Laut der Grafik ist das Qubit also mit einer 50%igen Wahrscheinlichkeit im Zustand  $|0\rangle$  und mit einer 50%igen Wahrscheinlichkeit im Zustand  $|1\rangle$ .
- ▶ Das bestätigt, was wir gerade gelernt haben.



# Aufgabe 3: Messungen

## Was Du wissen musst...

- ▶ Damit ein Quantenprogramm vollständig ist, brauchen wir Messungen.
- ▶ Ohne Messungen haben wir keine Ergebnisse, mit denen wir arbeiten können.

## Aufgabe

- ▶ Füge eine Messung zu deiner Quantenschaltung hinzu.
- ▶ Was erscheint außer dem Messungszeichen wenn Du es in die Quantenschaltung ziehst? Was könnte dies heißen?

## Lösung: Messungen

Wir fügen eine Messung zu unserer Quantenschaltung hinzu.



- ▶ Wie Du siehst, erscheint ein Pfeil nach unten von der Messungen aus.
- ▶ Das heißt, dass die Messung den Zustand des jeweiligen Qubits liest und dann die Information speichert.
- ▶ Da wir Qubits nicht „einfach lesen“ können, speichern wir die Information in Bits.
- ▶ Deshalb brauchen wir für jedes Qubit auch ein Bit.
- ▶ Dieses Programm müsstest Du jetzt sehr oft ausführen.
- ▶ Zum Beispiel könnte man die Quantenschaltung 1000 Mal ausführen und würde dann theoretisch 500 Mal den Zustand  $|0\rangle$  und 500 Mal den Zustand  $|1\rangle$  messen.
- ▶ In der Praxis kommt man diesen Werten nur sehr nah. Bei 1000 Ausführungen würde man zum Beispiel 480 Mal den Zustand  $|0\rangle$  und 520 Mal den Zustand  $|1\rangle$  messen.
- ▶ Führest Du das Programm nur einmal aus, dann würdest Du zum Beispiel den Zustand  $|0\rangle$  messen. Diese Information wäre aber nicht sonderlich aussagekräftig, da man nicht herauslesen kann, dass wir ein Hadamard-Gatter genutzt haben.

# Glückwunsch!

Du hast gerade deine erste Quantenschaltung programmiert!  
Diese Schaltung ist ein Quanten-Münzwurf. Du hast einen Qubit im Zustand  $|0\rangle$  durch das Anwenden eines Hadamard-Gatters in eine Superposition der Zustände  $|0\rangle$  und  $|1\rangle$  versetzt. Das Qubit wird dann gemessen und ist mit je 50%-iger Wahrscheinlichkeit in einem der beiden Zustände. Du hast Zufall simuliert, das können herkömmliche Computer nicht, Quantencomputer aber schon, weil sie dieses Prinzip der Superposition ausnutzen können. Du hast also einen richtigen Münzwurf simuliert. Super gemacht, gleich kommt die nächste Schaltung!

# Was Du bisher gelernt hast

Lass uns kurz eine Pause machen und zusammenfassen was Du jetzt weißt.

- ▶ Um einen Quantencomputer zu steuern, brauchst Du eine Quantenschaltung.
- ▶ Eine Quantenschaltung besteht aus Qubits und Bits.
- ▶ Qubits haben Zustände, die man messen muss und die man vorher nur mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit vorhersagen kann.
- ▶ Das Ergebnis einer Messung wird in einem Bit gespeichert.
- ▶ Ein Qubit kann in einer Superposition von verschiedenen Zuständen sein.
- ▶ Um den Zustand eines Qubits zu ändern, brauchst Du Quantengatter.
- ▶ Du kennst das Nicht-Gatter und das Hadamard-Gatter.

# Quantum Hello World

- ▶ Als nächstes programmierst Du eine Quantenschaltung, die Quantum Hello World heißt.
- ▶ Quantencomputer nutzen 2 Phänomene der Quantenmechanik aus. Superposition kennst Du schon, **Verschränkung** erarbeitest Du auch gleich.
- ▶ Grundlegende Programme von Quantencomputern basieren auf 3 Gattern, 2 davon kennst Du schon, das dritte entdeckst Du gleich.
- ▶ Lösche all die bisherigen Gatter.
- ▶ Du brauchst eine Quantenschaltung mit 2 Qubits (und 2 Bits).

## AUFGABE 3 a): Das Kontrollierte-Nicht-Gatter

### Was Du wissen musst...

- ▶ Nicht-Gatter und Hadamard-Gatter wirken jeweils auf nur ein Qubit.
- ▶ Das Kontrollierte-Nicht-Gatter (Abkürzung: KNG, Englisch: CNOT-Gate) wirkt auf 2 Qubits.
- ▶ Das KNG sieht so aus:



### Aufgabe

1. Erstelle eine Quantenschaltung mit einem KNG auf den Qubits  $q_0$  und  $q_1$ .  
In welchen Zuständen sind die Qubits vor und nach dem Anwenden des Gatters?
2. Erstelle eine Quantenschaltung mit einem Nicht-Gatter auf dem zweiten Qubit  $q_1$  und mit einem KNG auf den Qubits  $q_0$  und  $q_1$ .  
In welchem Zustand sind die Qubits vor und nach dem Anwenden des Gatters?

## AUFGABE 3 b) : Das Kontrollierte-Nicht-Gatter

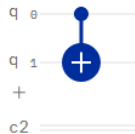
### Aufgabe

4. Erstelle eine Quantenschaltung mit einem Nicht-Gatter auf dem Qubit  $q_0$  und mit einem KNG auf den Qubits  $q_0$  und  $q_1$ .  
In welchen Zustand sind die Qubits vor und nach dem Anwenden des Gatters?
5. Erstelle eine Quantenschaltung mit je einem Nicht-Gatter auf den Qubits  $q_0$  und  $q_1$  und mit einem KNG auf den Qubits  $q_0$  und  $q_1$ .  
In welchen Zustand sind die Qubits vor und nach dem Anwenden des Gatters?

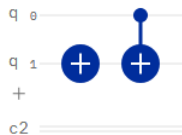
# LÖSUNG

Du solltest folgende 4 Schaltungen erstellt haben:

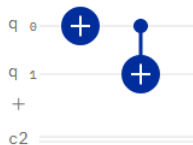
1.



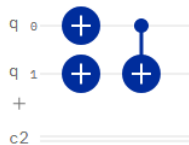
2.



3.















4.



- ▶ Man kann beide Qubits zusammen als ein System betrachten und den Zustand davon beschreiben.
- ▶ Wenn beide Qubits  $q_0$  und  $q_1$  im Zustand  $|0\rangle$  sind, sagen wir das System ist im Zustand  $|00\rangle$ .
- ▶ Auf der nächsten Seite ist die Wirkung des KNG auf die verschiedenen Systeme zusammengefasst.

# LÖSUNG

Quantenschaltung	Anfangszustand	Zustand vor KNG	Endzustand	Wirkung
1.	 $ 00\rangle$	 $ 00\rangle$	 $ 00\rangle$	X
2.	 $ 00\rangle$	 $ 01\rangle$	 $ 01\rangle$	X
3.	 $ 00\rangle$	 $ 10\rangle$	 $ 11\rangle$	✓
4.	 $ 00\rangle$	 $ 11\rangle$	 $ 10\rangle$	✓

## AUFGABE 3 c) : Das Kontrollierte-Nicht-Gatter

### Aufgabe

- ▶ Fasse zusammen wie das KNG auf das erste Qubit wirkt.
- ▶ Wann und wie wirkt das KNG auf das zweite Qubit?

# LÖSUNG

- ▶ Das KNG hat keine Wirkung auf das erste Qubit  $q_0$ .
- ▶ Das KNG hat keine Wirkung auf das zweite Qubit  $q_1$ , wenn das erste Qubit  $q_0$  im Zustand  $|0\rangle$  ist.
- ▶ Das KNG kippt das zweite Qubit  $q_1$ , wenn das erste Qubit  $q_0$  im Zustand  $|1\rangle$  ist.

# AUFGABE 4 a): Quantum Hello World

## Einführung

- ▶ Du erstellst jetzt eine Quantenschaltung, die **Quantum Hello World** heißt.
- ▶ Hierfür benötigst Du 2 Qubits, ein Hadamard-Gatter und ein KNG.

## Aufgabe

- ▶ Lösche alle Quantengatter aus Deiner Quantenschaltung.
- ▶ Erstelle eine Quantenschaltung mit Hadamard-Gatter auf dem ersten Qubit gefolgt von einem KNG, das auf beiden Qubits wirkt.
- ▶ In welchen Zuständen können die Qubits am Ende sein?

# LÖSUNG

Deine Quantenschaltung mit den Zuständen der Qubits sieht jetzt so aus:



Die Qubits können entweder beide  $|0\rangle$  oder beide  $|1\rangle$  sein.

## AUFGABE 4 b): Quantum Hello World

### Was Du wissen musst...

- ▶ Entweder beide Qubits sind im Zustand  $|0\rangle$  oder beide Qubits sind im Zustand  $|1\rangle$ .

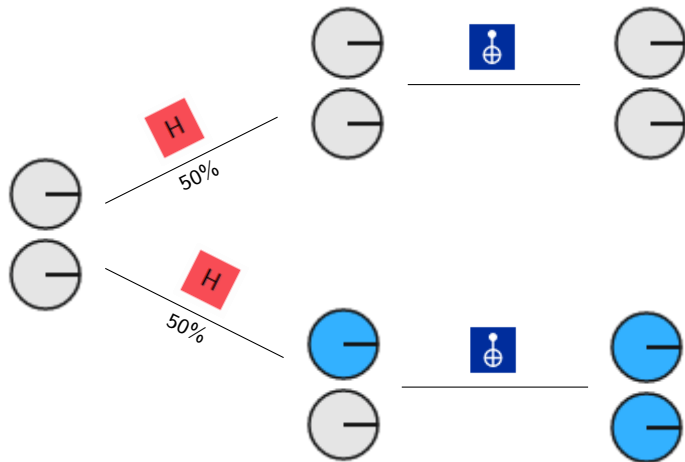
### Aufgabe

- ▶ Kannst Du erklären warum es nicht sein kann, dass das erste Qubit im Zustand  $|1\rangle$  und das zweite im Zustand  $|0\rangle$  ist?
- ▶ Mit welchen Wahrscheinlichkeiten sind beide Qubits am Ende im Zustand  $|0\rangle$ ? (Tipp: Wirf einen Blick auf die Wahrscheinlichkeiten)

# LÖSUNG

- ▶ Da auf dem ersten Qubit ein Hadamard-Gatter wirkt, ist es je 50%-iger Wahrscheinlichkeit im Zustand  $|0\rangle$  oder  $|1\rangle$ .
- ▶ Wenn das erste Qubit im Zustand  $|0\rangle$  ist, wirkt das KNG nicht auf das zweite Qubit. Das heißt das System endet im Zustand  $|00\rangle$ , wenn das erste Qubit im Zustand  $|0\rangle$  ist.
- ▶ Wenn das erste Qubit im Zustand  $|1\rangle$  ist, kippt das KNG das zweite Qubit vom Zustand  $|0\rangle$  auf den Zustand  $|1\rangle$ . Das heißt das System endet im Zustand  $|11\rangle$ , wenn das erste Qubit im Zustand  $|1\rangle$  ist.
- ▶ Der Endzustand des Systems ist also zu 50% im Zustand  $|00\rangle$  und zu 50% im Zustand  $|11\rangle$ .

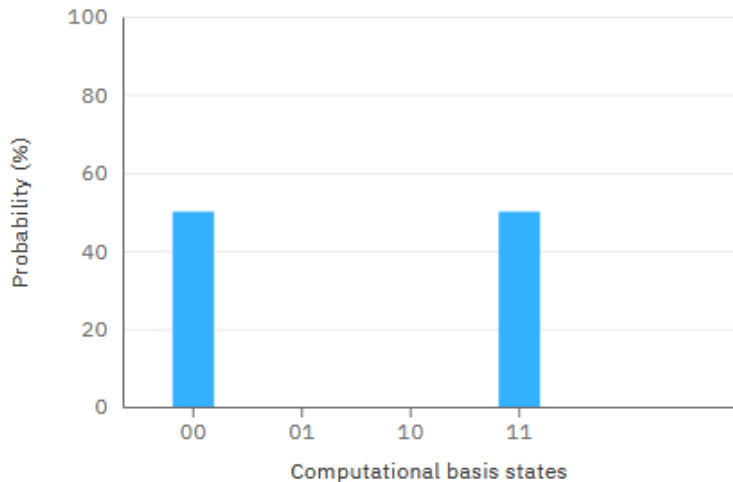
# LÖSUNG



# LÖSUNG

Ein Blick auf die Wahrscheinlichkeiten bestätigt was Du gerade herausgefunden hast.

Probabilities



# Verschränkung

- ▶ Wir beobachten hier noch ein weiteres sehr wichtiges Phänomen der Quantenmechanik.
- ▶ Es ist dir vielleicht aufgefallen, dass wir zwar nicht genau wissen in welchem Zustand das System am Ende ist, aber wenn man den Zustand von einem Qubit kennt, dann kennt man den des anderen auch.
- ▶ Wenn ein Qubit im Zustand  $|0\rangle$  ist, dann das andere auch. Das Gleiche gilt für den Zustand  $|1\rangle$ .
- ▶ Der Zustand eines Qubits bestimmt also eindeutig den Zustand des anderen.
- ▶ Diese Eigenschaft heißt **Verschränkung**. Wir sagen die Qubits  $q_0$  und  $q_1$  sind miteinander **verschränkt**.
- ▶ Diese Eigenschaft ist für Quantencomputer sehr wichtig und existiert bei herkömmlichen Computer nicht.

## AUFGABE 4 c): Quantum Hello World

### Was Du wissen musst...

- ▶ Wir haben vorhin gesagt, dass wir Messungen brauchen, damit eine Quantenschaltung vollständig ist.

### Aufgabe

- ▶ Füge je eine Messung für jedes Qubit zu Deiner Schaltung hinzu.

# LÖSUNG



## Zusammenfassung

- ▶ Du hast Deine erste Quantenschaltung fertig erstellt und ganz nebenbei die Grundlagen von Quantencomputern gelernt sowie Phänomene der Quantenmechanik benutzt.
- ▶ Herzlichen Glückwunsch!
- ▶ Die Schaltung kannst Du sogar über IBM auf einem echten Quantencomputer ausprobieren. Melde Dich dafür einfach über den Composer, den Du gerade nutzt, bei IBM an.