

# Die Bloch-Kugel in Lehrerbildung und Schule

## Visualisierung von Qubit-Zuständen

Moritz Förster\* // Gesche Pospiech\* // Julia Unger\*  
\* Technische Universität Dresden, Professur für Didaktik der Physik

Visualisierung von Zuständen

### Das Qubit

Als Qubits werden quantenphysikalische Systeme bezeichnet, welche modellhaft mit genau zwei Basiszuständen beschrieben werden können.

Das heißt:

Ein Qubit ist ein quantenphysikalisches System, welches nach einem Messprozess einen von genau zwei möglichen Basiszuständen annehmen kann.

**1** Qubit-Basen bestehen aus zwei linear unabhängigen, orthogonalen Ket-Vektoren.

**Superposition:**

Jeder beliebige Qubit-Zustand kann als Superposition zweier Basiszustände beschrieben werden.

Beispiel: Superposition bezüglich der Basis  $(|0\rangle, |1\rangle)$

$$|\psi\rangle = \alpha_0|0\rangle + \alpha_1|1\rangle$$

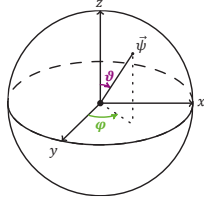
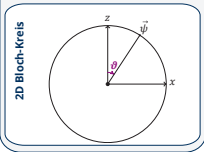
$$\text{mit: } \alpha_0, \alpha_1 \in \mathbb{C} \text{ und } |\alpha_0|^2 + |\alpha_1|^2 = 1$$

Veranschaulichung

### Die Bloch-Kugel

Die Bloch-Kugel ist eine Kugel mit Radius  $r = 1$ . Jedem Qubit-Zustand  $|\psi\rangle$  wird ein Vektor  $\vec{\psi} \in \mathbb{R}^3$  zwischen Koordinatenursprung und einem Punkt auf der Kugeloberfläche zugeordnet.

Behandlung in der Schule:  
– Vernachlässigung der relativen Phase  $\varphi$



$$|\psi\rangle = \cos\frac{\theta}{2}|0\rangle + e^{i\varphi}\sin\frac{\theta}{2}|1\rangle$$

**Einsatz in der Lehre:**

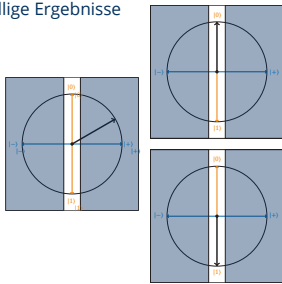
Vom mathematischen Modell zum Realobjekt



### Messprozess

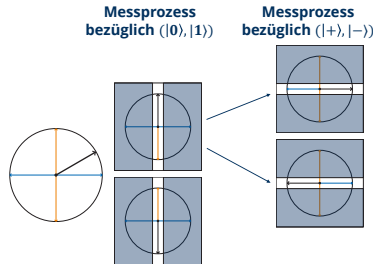
Darstellung des Messprozesses als „Schlitz“ entlang der Messbasis (Dür, Heusler 2012)

- Aktiver Messprozess
- Ergebnisse werden im Messprozess festgelegt
- Zufällige Ergebnisse



### Unbestimmtheit

Darstellung der Unbestimmtheit  
– Messprozesse bezüglich verschiedener Basen sind komplementär

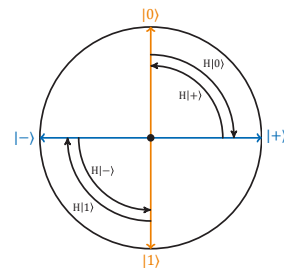


### Quantengatter

Darstellung von Quantengattern als Drehungen auf der Bloch-Kugel

- Beispiel: Hadamard-Gatter H

$$\begin{aligned} H|0\rangle &= |+\rangle & H|-\rangle &= |1\rangle \\ H|+\rangle &= |0\rangle & H|1\rangle &= |-\rangle \end{aligned}$$



Literatur:  
<sup>1</sup> Pospiech, Gesche (2021): Die zweite Quantenrevolution. Quanteninformatik im Physikunterricht. In: Johannes Grebe-Ellis und Helmut Grözebauch (Hrsg.): Physik & Didaktik der Physik. Beiträge zur virtuellen DPG-Frühjahrstagung. Virtuelle DPG-Frühjahrstagung 2021.  
<sup>2</sup> Müller, Rainer (2016): Die Quantenphysik im Spannungsfeld zwischen Fachlichkeit, empirischer Forschung und Schulpraxis. In: Christian Maurer (Hrsg.): Authentizität und Lernen - das Fach in der Fachdidaktik, Bd. 36. Jahrestagung der GDGP. S. 13-24.  
<sup>3</sup> Dirac, Paul A. M. (1957): The principles of quantum mechanics. Reprint the fourth edition St John's College, Cambridge 11 May 1957). Illinois: Snowball Publishing.  
<sup>4</sup> Dür, W. (2010). Quanteninformationstheorie im Schulunterricht. In DPG Frühjahrstagung Hannover. Symposium conducted at the meeting of DPG, Hannover.  
<sup>5</sup> Dür, W., & Heusler, S. (2012). Was man vom einzelnen Qubit über Quantenphysik lernen kann. PhysDid a - Physik Und Didaktik in Schule Und Hochschule, 1-16.  
<sup>6</sup> Filk, T. (2019). Quantenmechanik (nicht nur) für Lehramtsstudierende (1. Aufl. 2019). Springer Berlin Heidelberg.  
<sup>7</sup> Pospiech, G. (2021): Quantencomputer & Co: Grundideen und zentrale Begriffe der Quanteninformatik verständlich erklärt. Springer essentials. Springer Spektrum. https://doi.org/10.1007/978-3-658-30445-4

Mitglied im Netzwerk von:



GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium für Bildung und Forschung