

Schülervorstellungen zur Quantenphysik und zur Quanteninformationsverarbeitung

Bernadette Schorn*, Heidrun Heinke⁺

*Lehrerbildungszentrum der RWTH Aachen, Theaterplatz 14, 52056 Aachen, ⁺I. Physikalisches Institut IA, RWTH Aachen, Sommerfeldstr. 14, 52074 Aachen
Bernadette.Schorn@rwth-aachen.de, heinke@physik.rwth-aachen.de

Kurzfassung

Die Quantenphysik ist mittlerweile ein fester und wichtiger Bestandteil des Physikunterrichts in der Qualifikationsphase der Sekundarstufe II. Sie wird zu den Inhaltsbereichen des Kerncurriculums der Oberstufe gezählt und somit als Kern physikalischer Bildung erachtet [1]. Anwendungen der Quantenphysik für Quantentechnologien wie z.B. die Quanteninformationsverarbeitung thematisieren ein aktuelles und zukunftssträchtiges Thema in Forschung und Entwicklung und bilden gleichzeitig einen möglichen Zugang zur Quantenphysik über die technische Nutzbarkeit von quantenphysikalischen Phänomenen. Vor diesem Hintergrund werden in dem Beitrag erste Ergebnisse zu Vorstellungen von Schülerinnen und Schülern zu grundlegenden Konzepten der klassischen Informationsverarbeitung und der Quanteninformationsverarbeitung vorgestellt. Die Daten wurden im Rahmen von einwöchigen Physikkursen für besonders interessierte Schülerinnen und Schüler der Oberstufe erhoben. Hierzu wurde eine modifizierte Fragebogenstudie durchgeführt, bei der die Fragebögen von Schülerpaaren bearbeitet und die Diskussionen der Probandinnen und Probanden mittels Smartpens aufgezeichnet wurden.

1. Quanteninformationsverarbeitung in der Schule

Die Quanteninformationsverarbeitung gehört aktuell zu den dynamischsten Forschungsgebieten, der zudem ein großes wirtschaftliches Potential zugesprochen wird. Dies wird u.a. eindrucksvoll durch die von der EU-Kommission im Herbst 2018 gestartete neue Forschungsinitiative zu Quantentechnologien, das sogenannte Quantum Flagship, belegt. Für diese Forschungsinitiative ist ein Budget von 1 Milliarde Euro sowie eine Laufzeit von zunächst 10 Jahren angedacht, in deren Rahmen mehr als 5000 Forscherinnen und Forscher sowie Industriepartner die Grundlagenforschung zu Quantentechnologien sowie deren technischen Anwendungen in Europa vorantreiben werden [2]. Dabei ist die Forschung in die Bereiche Quantencomputer, Quantensimulation, Quantensensoren sowie Quantenkommunikation gegliedert (siehe Abb.1). Darüber hinaus sollen im Bereich der

Grundlagenforschung Fragestellungen behandelt werden, die für mehrere der genannten Forschungsbereiche relevant sind, wobei insbesondere die benötigte Technik entwickelt werden soll. Zur Realisierung der Ziele in Forschung und Entwicklung werden nicht nur eine leistungsfähige Forschungsinfrastruktur, sondern in den nächsten Jahren und Jahrzehnten vor allem auch in zunehmendem Maße Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler, Ingenieurinnen und Ingenieure, Technikerinnen und Techniker sowie Anwendungsentwicklerinnen und Anwendungsentwickler benötigt, die sich in dieses Forschungsgebiet einbringen können und wollen.

Betrachtet man die Bedarfsargumente der Gesellschaft für den Physikunterricht, so kann und soll er entsprechend dem ökonomischen Bedarfsargument einen Beitrag zur Nachwuchsförderung in der Schule leisten, indem er einerseits möglichst vielen Schülerinnen und Schülern notwendige Kompetenzen vermittelt. Andererseits ist es erforderlich, dass die Jugendlichen eine positive Einstellung gegenüber den Naturwissenschaften aufbauen bzw. beibehalten (vgl. [3]). Im Sinne des politischen Bedarfsarguments der Gesellschaft für den Physikunterricht soll dieser zudem dazu beitragen, den Weg zu einer mündigen Bürgerin bzw. einem mündigen Bürger zu ebnet, so dass sie/er in der Lage ist, sich an politischen Entscheidungsprozessen aktiv zu beteiligen. Dafür ist u.a. eine fundierte naturwissenschaftliche Bildung notwendig (ebd.). Um diesem Anspruch gerecht zu werden, bedarf es eines Physikunterrichts, der auch Themen der Modernen Physik und ihre aktuellen und potentiellen Anwendungsmöglichkeiten behandelt. Die Quanten-

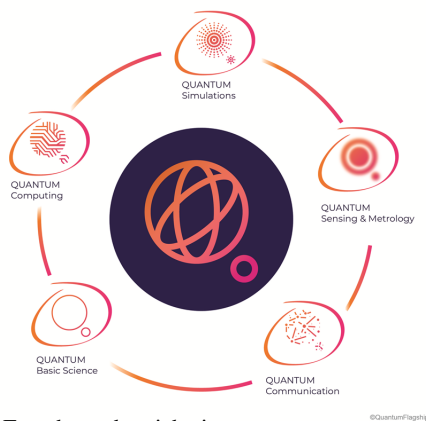


Abb.1: Forschungsbereiche im Quantum Flagship (Quelle: [2])

Informationsverarbeitung mit ihrer großen prognostizierten Zukunftsbedeutung stellt für diese Herangehensweise ein prototypisches Beispiel dar. Hier kann Schülerinnen und Schülern im Zuge des Physikunterrichts im Rahmen des Inhaltsfeldes Quantenphysik ein Einblick in Grundlagen und Anwendungsmöglichkeiten vermittelt werden, so dass sie – im Sinne der mündigen Bürgerin bzw. des mündigen Bürgers – über das zukunftsbedeutsame Gebiet informiert und – im Sinne der Nachwuchssicherung – im besten Fall dafür begeistert werden.

Zur Behandlung der Quanteninformationsverarbeitung in der Schule wurden bislang vereinzelt grundlegende Überlegungen angestellt und/oder Materialien wie Animationen, Interaktive Bildschirmexperimente und Arbeitsblätter, meist zur Quantenkryptographie, für den Einsatz im Unterricht der Sekundarstufe II entwickelt (siehe z.B. [4–11]). Als Vorteile dieser Ansätze im Vergleich zu den bisherigen Unterrichtskonzeptionen zur Quantenphysik werden u.a. angesehen, dass die betrachteten Zwei-Zustandssysteme einfacher als einige traditionell betrachtete Objekte wie Atome und Festkörper sind, die Inhalte zur Quanteninformationsverarbeitung mit einfacheren Begriffen und damit klarer formuliert werden können und (Analogie-)Experimente auch in der Schule durchführbar sind (vgl. [12]). Weitere Motive für die Behandlung von Themen der Quanteninformationsverarbeitung sind zum einen, dass (potentielle) Anwendungen wie z.B. die Quantenkryptographie bei Schülerinnen und Schülern auf Interesse stoßen (vgl. [11]). Zum anderen bieten Themen wie der Quantencomputer und die Quantenkryptographie vielfältige Möglichkeiten für fächerübergreifende Betrachtungen mit der Informatik und Mathematik. Insgesamt eröffnen sich somit im Zusammenhang mit der Thematisierung der Quanteninformationsverarbeitung vielversprechende neue und kontextorientierte Zugänge für das Lernen von physikalischen Prinzipien der Quantenphysik, die nach allen Erwartungen für Schülerinnen und Schüler interessant sind.

2. Schülervorstellungen zur Quantenphysik und zur Quanteninformationsverarbeitung

Im Allgemeinen stellt das Lehren und Lernen der Quantenphysik eine besondere Herausforderung dar, da man beim Unterrichten dieses Themas mit erheblichen sachbedingten, lehrbedingten sowie innenbedingten Lernschwierigkeiten konfrontiert wird, die sich teilweise gegenseitig bedingen und überschneiden (vgl. z.B. [13], S. 2 ff.). Im Hinblick auf die innenbedingten Lernschwierigkeiten sind vor allem die Schülervorstellungen zur Atom- und Quantenphysik zu nennen, die in hohem Maße von der klassischen Physik und deren Prinzipien sowie von Alltagserfahrungen bestimmt sind und mit den quantenmechanischen Konzepten nicht in Einklang stehen. Darüber hinaus sind die alternativen Vorstellungen und Konzepte prädominant und offenbar sehr fest in den Köpfen verankert und werden durch den Schulunterricht

nur sehr schwierig bzw. teilweise gar nicht überwunden (siehe z.B. [14–24]).

Mit dem Ziel, Lehr- und Lernmaterialien zur Quanteninformationsverarbeitung zu entwickeln sowie zu evaluieren und dabei das Modell der Didaktischen Rekonstruktion (siehe z.B. [25]) zugrunde zu legen, wurden in einem ersten Schritt Vorstellungen bzw. Konzepte von Schülerinnen und Schülern zu Grundlagen der klassischen Informationsverarbeitung und der Quanteninformationsverarbeitung erhoben. Besonderes Augenmerk liegt dabei sowohl auf den lernhinderlichen als auch anschlussfähigen Schülervorstellungen, die es bei der Konzeption der Lehr- und Lernmaterialien zu berücksichtigen gilt. Da bislang keine Untersuchungen zu den Vorstellungen bzw. Konzepten von Schülerinnen und Schülern zu Themen der Quanteninformationsverarbeitung existieren und keine Erhebungsinstrumente vorliegen, ist ein Fragebogen mit Items zur Quantenphysik, klassischen Informationsverarbeitung und Quanteninformationsverarbeitung konstruiert worden. Dieser Fragebogen umfasst Multiple-Choice-Aufgaben, Zuordnungs-Aufgaben und Aufgaben, die zeichnerisch gelöst werden sollen und enthält darüber hinaus kurze Informationstexte.

2.1. Erste Ergebnisse

Der Fragebogen wurde bislang in den Jahren 2017 bis 2019 im Rahmen der Physikwoche der RWTH Aachen eingesetzt. Die Physikwoche ist ein Angebot für die ca. 25 Gymnasien und Gesamtschulen der Städteregion Aachen, die jeweils einen Jugendlichen melden können. In der Regel setzen sich die Gruppen aus je zwei Teilnehmerinnen und Teilnehmern von 15 Schulen zusammen. Bei den ausgewählten Schülerinnen und Schülern handelt es sich um besonders begabte und interessierte Jugendliche der Jahrgangsstufen 11 und 12.

In der Physikwoche werden den Teilnehmerinnen und Teilnehmern eine Woche lang verschiedene Vorträge, Experimente und Laborbesichtigungen hauptsächlich zum Thema „Licht“ angeboten. Dabei ist auch eine Einheit zum Quantencomputer vorgesehen, deren Ablauf sich wie folgt gestaltet: Nach einer kurzen Einführung bearbeiten die Schülerinnen und Schüler den Fragebogen zur Erhebung von Vorstellungen bzw. Konzepten zu Themen der Quantenphysik, der klassischen Informationsverarbeitung und Quanteninformationsverarbeitung in 2er Gruppen mittels Smartpens, über die das Schriftbild und die Gespräche beim Ausfüllen des Fragebogens aufgezeichnet werden (vgl. [26]). Erst im Anschluss daran wird das Thema „Quantencomputer“ in einem Vortrag behandelt.

Im Folgenden werden erste Ergebnisse dieser modifizierten Fragebogenstudie zu grundlegenden Konzepten der Informationsverarbeitung im Vergleich von klassischer Informationsverarbeitung und Quanteninformationsverarbeitung vorgestellt. Diesen Ergebnis-

sen liegen die mittels Smartpens aufgezeichneten audiovisuellen Daten von 95 Probandinnen und Probanden zugrunde. Auch wenn die Bearbeitung der Fragebögen in 2er Gruppen erfolgt, bietet die Dokumentation mittels Smartpens die Möglichkeit, sowohl die schriftlichen als auch mündlichen Daten jeder einzelnen Probandin und jedem einzelnen Probanden zuzuordnen und auszuwerten (ebd.).

2.1.1. Informationsträger

In einem Informationstext zu den Informationsträgern der klassischen Informationsverarbeitung, dem Bit, und den Informationsträgern der Quanteninformationsverarbeitung, dem Qubit, werden diese als Zwei-Zustandssysteme eingeführt. Als Basiszustände eines Bits werden die Zustände „0“ und „1“ betrachtet, denen die Werte 0 und 1 zugeordnet werden. Als Basiszustände eines Qubits werden die Zustände „|0⟩“ und „|1⟩“ betrachtet, denen die Werte 0 oder 1 zugeordnet werden. Die im Anschluss an den Informationstext zu bearbeitenden Items beziehen sich auf den Zustand, den ein Bit bzw. ein Qubit annimmt. Das Antwortverhalten der Probandinnen und Probanden zu den Multiple-Choice-Aufgaben mit vorgegebenen Aussagen ist in der Abbildung 2 dargestellt:

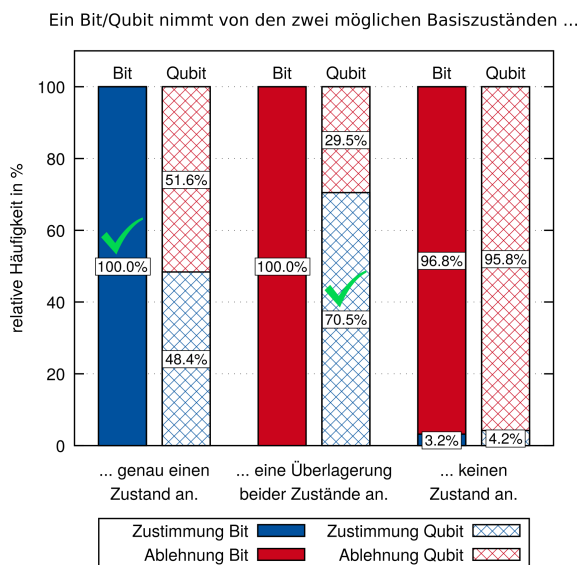


Abb.2: Antwortverhalten zu den Zuständen eines Bits/Qubits

Im Hinblick auf das Bit stimmen alle Schülerinnen und Schüler der richtigen Aussage „Ein Bit nimmt von den zwei möglichen Basiszuständen genau einen Zustand an.“ zu und lehnen die Aussage „Ein Bit nimmt von den zwei möglichen Basiszuständen eine Überlagerung beider Zustände an.“ ab. Zudem lehnen die Probandinnen und Probanden fast ausnahmslos (96,8 %) ebenfalls die Aussage „Ein Bit nimmt von den zwei möglichen Basiszuständen keinen Zustand an.“ ab.

Die bisherige Analyse der Audiodaten zeigt, dass einigen Schülerinnen und Schülern Grundlagen aus der

klassischen Informationsverarbeitung bekannt sind und sie die Items zu den Zuständen eines Bits korrekt und relativ sicher bearbeiten. Beispielsweise äußern sich die Probandinnen und Probanden wie folgt:

S1: Ein Bit kann doch nur entweder 0 oder 1 zeigen, oder? S2: Ja, nimmt genau einen Zustand an. S1: [...] Kann das auch überhaupt keinen Zustand annehmen? Oder [...] nee, eine Überlagerung nicht. S2: Auf jeden Fall nicht, nein. S1: Kann es denn auch überhaupt nichts annehmen? S2: Keinen Zustand? S1: Ich mein, das ist, das ist doch ungefähr so, als wär eine Lampe an oder aus. [...] S2: Ja, das ist 0 und 1, also geht eigentlich kein Zustand nicht. [...]

Derartige Ansätze sind nicht bei allen Jugendlichen zu erkennen und die Bearbeitung der Items zu den Zuständen eines Bits erfolgt beispielsweise nach dem Ausschlussprinzip oder basiert auf Raten.

Das Qubit betreffend stimmen die meisten Schülerinnen und Schüler (70,5 %) der zutreffenden Aussage „Ein Qubit nimmt von den zwei möglichen Basiszuständen eine Überlagerung beider Zustände an.“ zu. Ein nicht vernachlässigbarer Anteil der Probandinnen und Probanden (48,4 %) stimmt aber auch der Aussage „Ein Qubit nimmt von den zwei möglichen Basiszuständen genau einen Zustand an.“ zu. Bezüglich der Aussage „Ein Qubit nimmt von den zwei möglichen Basiszuständen keinen Zustand an.“ ergibt sich ein vergleichbares Antwortverhalten wie für das Bit und die Aussage wird von der überwiegenden Mehrheit der Jugendlichen (95,8 %) abgelehnt.

Die bisherige Analyse der Audiodaten lässt darauf schließen, dass die Bearbeitung der Items zu den Zuständen eines Qubits in der Regel auf Vermutungen, Raten und dem Ausschlussprinzip basiert. Dabei beziehen sich einige Schülerinnen und Schüler auf das „Andersartige“ eines Qubits oder auch auf Informationen aus verschiedenen Medien:

S1: Und das hier nimmt immer eine Überlagerung an, glaube ich [...] ich habe das mal so in einem Film gesehen [...] ich glaube schon, ich weiß es aber nicht genau.

Des Weiteren lassen die Audiodaten erkennen, dass der Begriff des Zwei-Zustandssystems den Probandinnen und Probanden in der Regel nicht geläufig und mit Verständnisschwierigkeiten behaftet ist.

2.1.2. Messung/Messergebnisse

In einem Informationstext wird dargelegt, dass sowohl in der klassischen Informationsverarbeitung als auch in der Quanteninformationsverarbeitung zur Berechnung von Funktionen Programme verwendet werden. Diese bestehen jeweils aus einer Abfolge logischer Verknüpfungen (auch Gatter), welche im Falle der klassischen Informationsverarbeitung auf einen Basiszustand angewendet werden und im Falle der Quanteninformationsverarbeitung gleichzeitig auf mehrere Basiszustände angewendet werden kön-

nen (Quantenparallelismus). Zur Auslesung der Ergebnisse wird in beiden Fällen eine Messung durchgeführt. Die im Anschluss an den Informationstext zu bearbeitenden Multiple-Choice-Aufgaben mit vorgegebenen Aussagen beziehen sich auf die Anzahl der Messergebnisse in der klassischen Informationsverarbeitung und in der Quanteninformationsverarbeitung. Das Antwortverhalten der Probandinnen und Probanden zu diesen Items zeigt, dass alle Schülerinnen und Schüler der korrekten Aussage „Im Falle der klassischen Informationsverarbeitung erhält man genau ein Ergebnis.“ zustimmen (siehe Abb. 3).

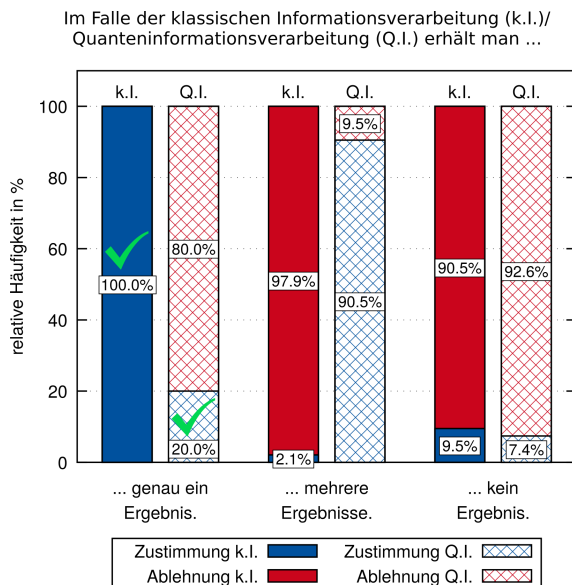


Abb.3: Antwortverhalten zur Anzahl der Messergebnisse in der klassischen/Quanten-Informationsverarbeitung

Darüber hinaus werden die Aussagen „Im Falle der klassischen Informationsverarbeitung erhält man mehrere Ergebnisse.“ (97,9 %) und „Im Falle der klassischen Informationsverarbeitung erhält man kein Ergebnis.“ (90,5 %) von den Probandinnen und Probanden größtenteils abgelehnt.

Die bisherige Analyse der Audiodaten zeigt abermals, dass einige Schülerinnen und Schüler die Items zu der Anzahl der Messergebnisse in der klassischen Informationsverarbeitung korrekt und relativ sicher bearbeiten. Dabei äußern sich die Probandinnen und Probanden z.B. wie folgt:

S1: [...] Ja richtig, genau ein Ergebnis [...] wenn Du] ein Experiment auswertest, kannst Du nur ein Ergebnis haben.

Darüber hinaus erfolgt die Bearbeitung der Items zu der Anzahl der Messergebnisse in der klassischen Informationsverarbeitung verschiedentlich mittels Raten, Vermutungen oder nach dem Ausschlussprinzip. Im Hinblick auf die Anzahl der Messergebnisse in der Quanteninformationsverarbeitung wird der zutreffenden Aussage „Im Falle der Quanteninformationsver-

arbeitung erhält man genau ein Ergebnis.“ nur in geringem Maße zugestimmt (20,0 %). Die deutliche Mehrheit der Jugendlichen stimmt der Aussage „Im Falle der Quanteninformationsverarbeitung erhält man mehrere Ergebnisse.“ zu (90,5 %) und lehnt die Aussage „Im Falle der Quanteninformationsverarbeitung erhält man kein Ergebnis.“ ab (92,6 %).

Die bisherige Analyse der Audiodaten lässt darauf schließen, dass dieses Antwortverhalten vor allem als Schlussfolgerung aus dem Quantenparallelismus resultiert, wie das folgende Zitat exemplarisch zeigt:

S1 (liest zu Beginn seiner Ausführungen noch mal einen Absatz zur Quanteninformationsverarbeitung vor): „[...] In der Quanteninformationsverarbeitung ist es möglich, ein Programm gleichzeitig auf mehrere [Basiszustände anzuwenden (Quantenparallelismus)]“ So hier, mehrere. Im Fall der Quanteninformationsverarbeitung erhält man mehrere Ereignisse. Ist ja im Prinzip genau das, was da oben steht.

Zudem beruhen die Antworten der Jugendlichen abermals vielfach auf Vermutungen, Raten, dem Ausschlussprinzip oder auf der „Andersartigkeit“ der Quanteninformationsverarbeitung. Die Probandinnen und Probanden äußern sich beispielsweise folgendermaßen:

S2: Und dadurch, dass die Quanteninformationsverarbeitung besonders ist, können mehrere Ergebnisse ... S1: ... richtig ... S2: ... hervorkommen... S1: ... und das schließt natürlich die anderen Sachen aus. S2: Genau.

Weiterhin wird in dem Fragebogen auf eine mögliche graphische Darstellung der Messung eines Wertes eines Bits oder Qubits eingegangen. Dazu werden zunächst die folgenden eindimensionalen bzw. zweidimensionalen Darstellungen von Bits und Qubits betrachtet: Eine mögliche graphische Darstellung eines Bits ist ein Pfeil der Länge 1 in einem eindimensionalen Koordinatensystem z.B. mit der z-Achse. Der Basiszustand „0“ wird durch einen Pfeil der Länge 1 vom Koordinatenursprung aus in positiver z-Achsenrichtung dargestellt (siehe Abb. 4). Der Basiszustand „1“ wird durch einen Pfeil der Länge 1 vom Koordinatenursprung aus in negativer z-Achsenrichtung dargestellt.

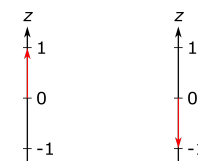


Abb.4: Graphische Darstellung der Basiszustände „0“ (links) und „1“ (rechts) eines Bits

Eine mögliche vereinfachte graphische Darstellung eines Qubits ist die eines Bloch-Kreises mit einem Pfeil der Länge 1 in einem zweidimensionalen x-z-Koordinatensystem (siehe Abb. 5): Der Basiszustand

„ $|0\rangle$ “ wird durch einen Pfeil der Länge 1 vom Koordinatenursprung aus in positiver z-Achsenrichtung dargestellt, der Basiszustand „ $|1\rangle$ “ wird durch einen Pfeil der Länge 1 vom Koordinatenursprung aus in negativer z-Achsenrichtung dargestellt und ein beliebiges Qubit „ $|\psi\rangle$ “ wird durch einen Pfeil der Länge 1 vom Koordinatenursprung aus mit beliebiger Orientierung in der x-z-Ebene dargestellt.

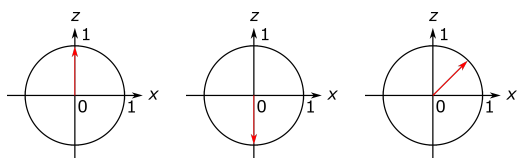


Abb.5: Graphische Darstellung der Basiszustände „ $|0\rangle$ “ (links) und „ $|1\rangle$ “ (Mitte) eines Qubits sowie einer Überlagerung (rechts)

Der Messprozess wird ebenfalls graphisch veranschaulicht: Die Messapparatur ist als eine Vorrichtung mit einem Schlitz dargestellt, die bezüglich des Koordinatensystems so platziert wird, dass der Schlitz entlang der z-Achse orientiert ist (vgl. [6]). Mithilfe dieser Messvorrichtung wird das Bit bzw. das Qubit in einen Basiszustand mit entsprechendem Wert gezwungen. Damit ist der Messprozess beendet und man kann auf den Wert des Bits oder Qubits nach der Messung in z-Richtung schließen: Befindet sich das Bit bzw. Qubit nach der Messung in dem Basiszustand „0“ bzw. „ $|0\rangle$ “ entspricht dies dem Messwert 0 (siehe Abb. 6). Befindet sich das Bit bzw. Qubit nach der Messung in dem Basiszustand „1“ bzw. „ $|1\rangle$ “ entspricht dies dem Messwert 1.

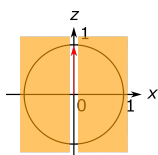


Abb.6: Graphische Darstellung des Messergebnisses „ $|0\rangle$ “

Die im Anschluss an diese Darstellungen zu bearbeitende Zuordnungs-Aufgabe bezieht sich auf das Ergebnis einer Messung an Bits bzw. Qubits in z-Richtung. Dazu sind den Probandinnen und Probanden die in Abbildung 7 graphisch dargestellten Bits und Qubits vorgegeben.

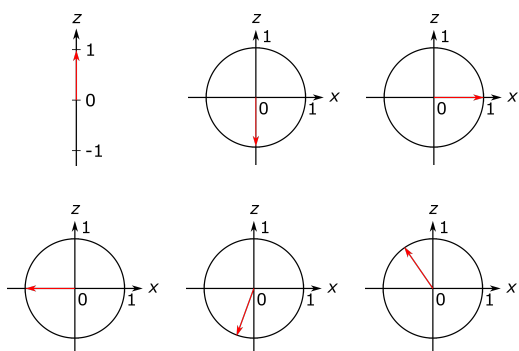


Abb.7: Verschiedene Bits bzw. Qubits vor einer Messung

Bezüglich dieser verschiedenen Bits bzw. Qubits sollen die Schülerinnen und Schüler durch eine Zuordnung von vorgegebenen Aussagen (siehe Tab. 1) angeben, in welchem Basiszustand sich das Bit bzw. Qubit nach einer Messung entlang der z-Achse befindet.

Nr.	Aussage
1	Mit Sicherheit „0“ bzw. „ $ 0\rangle$ “.
2	Mit Sicherheit „1“ bzw. „ $ 1\rangle$ “.
3	Mit größerer Wahrscheinlichkeit „0“ bzw. „ $ 0\rangle$ “.
4	Mit größerer Wahrscheinlichkeit „1“ bzw. „ $ 1\rangle$ “.
5	Gleichwahrscheinlich „0“ bzw. „ $ 0\rangle$ “ oder „1“ bzw. „ $ 1\rangle$ “.
6	Keine der Aussagen 1–5 trifft zu.

Tab.1: Aussagen möglicher Ergebnisse einer Messung in z-Richtung

Das Ergebnis lässt erkennen, dass durch die Jugendlichen in allen Fällen größtenteils eine richtige Zuordnung von Aussagen über das Messergebnis entlang der z-Achse erfolgt (siehe Abb. 8).

Die bisherige Analyse der Audiodaten zeigt, dass die Schülerinnen und Schüler auf der Grundlage des Informationstextes und der graphischen Veranschaulichung teilweise intuitiv richtig vorgehen und zu zutreffenden Schlussfolgerungen kommen. Bei einem Großteil der Probandinnen und Probanden lassen die Äußerungen jedoch darauf schließen, dass ihre Zuordnungen der Aussagen zu möglichen Ergebnissen einer Messung an Bits bzw. Qubits in z-Richtung insbesondere auf Vermutungen und Raten basiert.

Im Anschluss an diese Zuordnungs-Aufgabe stimmen die Schülerinnen und Schüler mehrheitlich der korrekten Aussage 1 „Erhält man bei einer Messung des Wertes eines Bits in z-Richtung den Wert 0, dann hat sich das Bit unmittelbar vor der Messung mit Sicherheit im Basiszustand „0“ befunden.“ zu (76,8 %) und lehnen die nicht zutreffende Aussage 2 „Erhält man bei einer Messung des Wertes eines Qubits in z-Richtung den Wert 0, dann hat sich das Qubit unmittelbar vor der Messung mit Sicherheit im Basiszustand „ $|0\rangle$ “ befunden.“ ab (80,0 %) (siehe Abb. 9).

Die bisherige Analyse der Audiodaten lässt darauf schließen, dass das Antwortverhalten überwiegend auf Raten und Vermutungen beruht, wie das folgende Zitat beispielhaft verdeutlicht:

S2: Ich würde sagen falsch, aber ich habe keine Ahnung warum.

Nur selten ist in den Gesprächen der Jugendlichen ein Bezug zu der Zuordnungs-Aufgabe wie z.B. der folgende im Zusammenhang mit der Aussage 2 feststellbar:

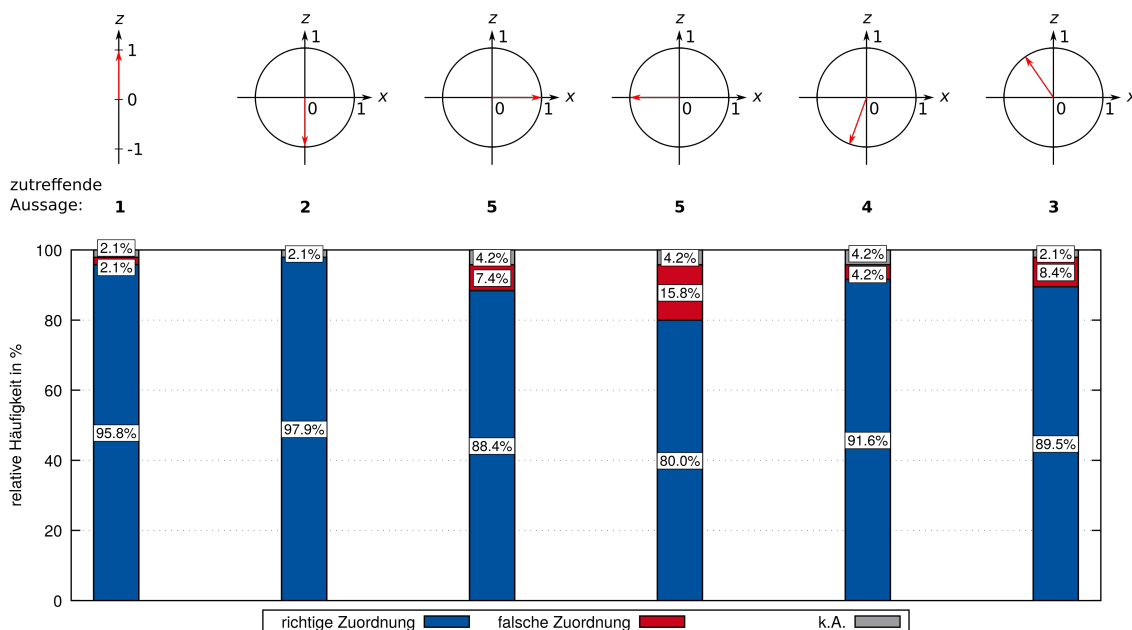


Abb. 8: Antwortverhalten für die Zuordnungs-Aufgabe zu den Ergebnissen einer Messung in z-Richtung

S2: Und was ist hier? S1: Ich glaub das ist falsch. Weil das ist ja bei den Kreisen. S2: Hmm. S1: Und wenn das Null ist, das muss ja nicht mit Sicherheit Null sein, oder? S2: Ok. S1: Also das wird ja am Ende auf Eins gedrängt und wenn das am Ende Null ist, dann kann das ja davor auch nicht Null gewesen sein, sondern irgendwie so ein anderer.

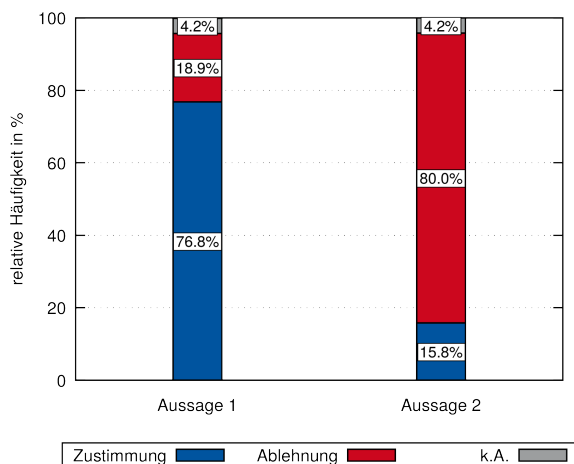


Abb.9: Antwortverhalten zum Rückschluss vom Messergebnis auf den Zustand des Bits/Qubits vor der Messung

3. Fazit

Erste Ergebnisse einer modifizierten Fragebogenstudie zur Erhebung von Vorstellungen von Schülerinnen und Schülern zu grundlegenden Konzepten der klassischen Informationsverarbeitung und der Quanteninformationsverarbeitung zeigen, dass einigen Probandinnen und Probanden Grundlagen aus der klassischen Informationsverarbeitung bekannt sind und teilweise bei den Jugendlichen anschlussfähige

Konzepte vorhanden sind. Bezüglich der Quanteninformationsverarbeitung hingegen deutet die bisherige Analyse der audiovisuellen Daten insgesamt darauf hin, dass (naturgemäß) keine fundierten Konzepte bei den Schülerinnen und Schülern existieren. Eine weitere wichtige Erkenntnis im Zusammenhang mit der Entwicklung und Evaluation von Lehr- und Lernmaterialien zur Quanteninformationsverarbeitung liefert das Resultat, dass nach einer kurzen Einführung in Begrifflichkeiten wie z.B. das Zwei-Zustandssystem und die graphische Darstellung von Bits bzw. Qubits sowie den Messprozess ein teilweise richtiges und teilweise problematisches (intuitives) Antwortverhalten festzustellen ist. Darüber hinaus zeigen die weiteren Ergebnisse der Befragungen u.a., dass sich die Schülerinnen und Schüler für das Thema Quantencomputer interessieren.

4. Literatur

- [1] Schecker, Horst; Fischer, Hans E.; Wiesner, Hartmut (2004): Physikunterricht in der gymnasialen Oberstufe. In H.-E. Tenorth (Hrsg.), Kerncurriculum Oberstufe II (S. 148 - 234). Weinheim und Basel: Beltz Pädagogik
- [2] Press Dossier – Quantum Flagship Kick-off Event, Vienna, October 29-30, 2018. Url: https://qt.eu/app/uploads/2018/11/Press_Dossier_FINAL_EMBARGOED.pdf (Stand: 6/2019)
- [3] Heering, Peter (2011): Bildungswert und Bildungsziele. In H. Wiesner, H. Schecker & M. Hopf (Hrsg.), Physikdidaktik kompakt (S. 16 - 20). Hallbergmoos: Aulis Verlag in der STARK Verlagsgesellschaft mbH & Co. KG.
- [4] Bronner, Patrick (2010): Quantenoptische Experimente als Grundlage eines Curriculums zur Quantenphysik des Photons. Berlin: Logos.

- [5] Dür, Wolfgang (2009): Quanteninformation – Ein Thema für den Schulunterricht. In: Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule, 58 (6), S. 12 - 21.
- [6] Dür, Wolfgang; Heusler, Stefan (2012): Was man vom einzelnen Qubit über Quantenphysik lernen kann. In: PhyDid A - Physik und Didaktik in Schule und Hochschule, 11 (1), S. 1 - 16. Url: <http://www.phydid.de/index.php/phydid/article/view/311> (Stand: 6/2019)
- [7] Dür, Wolfgang; Heusler, Stefan (2014): Was man von zwei Qubits über Quantenphysik lernen kann: Verschränkung und Quantenkorrelationen. In: PhyDid A - Physik und Didaktik in Schule und Hochschule, 13 (1), S. 11 - 34. Url: <http://www.phydid.de/index.php/phydid/article/view/484> (Stand: 6/2019)
- [8] Kohnle, Antje (2016): Interaktive Simulationen für Quantenphysik und Quanteninformation. In: Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule, 65 (1), S. 17 - 22.
- [9] Pospiech, Gesche (2004): Moderne Quantenphysik im Unterricht – Ein Lehrgang. Berlin: Logos.
- [10] Pospiech, Gesche; Schorn, Bernadette (2016): Der Quantencomputer in der Schule. In: Praxis der Naturwissenschaften - Physik in der Schule, 65 (1), S. 5 - 10.
- [11] Reisch, Cordula (2015): Quantenkryptographie als Thema für den Physikunterricht. Masterarbeit TU Braunschweig.
- [12] Müller, Rainer (2016): Quanteninformation – ein neues Paradigma für den Quantenphysik-Unterricht?. In: Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule, 65 (1), S. 4.
- [13] Schorn, Bernadette (2014): Quantenphysik in der Schule. Eine Unterrichtskonzeption zur Einführung in die Quantenphysik für die 10. Jahrgangsstufe, Dissertation, Technische Universität Dresden, 2014.
- [14] Bayer, Hans-Jürgen (1985): Schülvorstellungen über das Atom in der Sek. II. In H. Mikelskis (Hrsg.), Zur Didaktik der Physik und Chemie - Tagung 1984 (S. 265 - 267).
- [15] Bethge, Thomas; Niederer, Hans (1995): Students' conceptions in quantum physics. Url: <http://www.idn.uni-bremen.de/pubs/Niederer/1995-AJP-TBHN.pdf> (Stand: 6/2019)
- [16] Bormann, Malte (1988): Das Schülvorverständnis zum Themenbereich „Modellvorstellungen zu Licht und Elektronen“. In W. Kuhn (Hrsg.), Didaktik der Physik. Vorträge Physikertagung 1987 in Berlin (S. 475 - 481).
- [17] Ireson, Gren (2000): The quantum understanding of pre-university physics students. In: Physics Education, 35 (1), S. 15 - 21.
- [18] Lichtfeldt, Michael (1992): Schülvorstellungen in der Quantenphysik und ihre möglichen Veränderungen durch Unterricht. Essen: Westarp.
- [19] Stefanel, Alberto; Michelini, Marisa; Santi, Lorenzo (2012): Upper Secondary School Students learning pathways through quantum concepts. In C. Bruguière, A. Tiberghien & P. Clément (Hrsg.), E-Book Proceedings of the ESERA 2011 Conference: Science learning and Citizenship. Part [1] (R. Pinto & K. Niebert (Mithrsg.) (S. 110 - 116). Lyon, France: European Science Education Research Association. ISBN: 978-9963-700-44-8.
- [20] Olsen, Rolf V. (2002): Introducing quantum mechanics in the upper secondary school: a study in Norway. In: International Journal of Science Education, 24 (6), S. 565 - 574.
- [21] Müller, Rainer; Wiesner, Hartmut (2002): Teaching quantum mechanics on an introductory level. In: AJPh, 70 (3), S. 200 - 209.
- [22] Wiesner, Hartmut (1989): Beiträge zur Didaktik des Unterrichts über Quantenphysik in der Oberstufe. Essen: Westarp.
- [23] Wiesner, Hartmut (1996): Verständnisse von Leistungskursschülern über Quantenphysik. Ergebnisse mündlicher Befragungen. In: Physik in der Schule, 34 (3), S. 95 - 99.
- [24] Wiesner, Hartmut (1996): Verständnisse von Leistungskursschülern über Quantenphysik (2). Ergebnisse mündlicher Befragungen. In: Physik in der Schule, 34 (4), S. 136 - 140.
- [25] Kattmann, Ulrich; Duit, Reinders; Gropengießer, Harald; Komorek, Michael (1997): Das Modell der Didaktischen Rekonstruktion - Ein Rahmen für naturwissenschaftsdidaktische Forschung und Entwicklung. In: Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften (ZfdN) 3, S. 3 - 18.
- [26] Schorn, Bernadette; Baja (geb. Fraß), Stephan; Büsch, Leonard; Heinke, Heidrun (2019): Einsatz von Smartpens in fachdidaktischer Forschung und Entwicklung. In C. Maurer (Hrsg.), Naturwissenschaftliche Bildung als Grundlage für berufliche und gesellschaftliche Teilhabe. Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, Jahrestagung in Kiel 2018. (S. 412 - 415). Universität Regensburg.