

Quanteninformatik: Schlüsselkonzepte und Kompetenzen

Giulia Paparo,¹ Bettina Waldvogel,² Mareen Grillenberger³

Abstract: Die Quanteninformatik ist ein aufstrebendes Forschungsgebiet an der Schnittstelle zwischen Informatik und Physik und hat das Potenzial, die Informatik und die Gesellschaft grundlegend zu verändern. Als Thema für den Informatikunterricht in der Sekundarstufe I und II bietet sie die Möglichkeit, die Lernenden mit neuen, komplexen und spannenden Inhalten zu konfrontieren, die für ihre Zukunft relevant sein können. Darüber hinaus können grundlegende Konzepte der Informatik durch die Quanteninformatik aus einer anderen Perspektive betrachtet werden. Quanteninformatik als Thema für den Informatikunterricht ist jedoch ein noch wenig erforschtes Gebiet. Um die Möglichkeiten der Quanteninformatik als Unterrichtsgegenstand in der Schule aufzuzeigen, wird zunächst eine Analyse durchgeführt, um deren Schlüsselkonzepte zu identifizieren. Anschließend wird ein Kompetenzrahmen für die Quanteninformatik definiert und im Rahmen der Empfehlungen für Bildungsstandards der Deutschen Gesellschaft für Informatik positioniert.

Keywords: Quanteninformatik; Informatikkompetenzen

1 Einleitung

Von Quantencomputern, die einige sehr spezifische Aufgaben wesentlich effizienter lösen könnten als die besten Supercomputer, bis hin zur Quantenschlüsselverteilung, die ein unbemerktes Abhören durch Dritte physikalisch unmöglich machen könnte: Die Quanteninformatik hat das Potenzial, große Auswirkungen auf die Informatik und die Gesellschaft insgesamt zu haben [Wo17]. Es gibt gesellschaftliche, individuelle und (informatik-)didaktische Gründe die Quanteninformatik als Thema für die Schule zu erforschen. Die Vermittlung von Quanteninformatik in der Schule würde aus gesellschaftlicher Sicht nämlich bedeuten, das notwendige Wissen zu vermitteln, um früh eine Teilnahme am Diskurs über ihre Chancen und Risiken zu ermöglichen. Auf einer individuelleren Ebene bietet das Lernen über Quanteninformatik Lernenden aller Geschlechter und Hintergründe nicht nur die Möglichkeit, Interesse an einem Thema zu entwickeln, das aus beruflicher Sicht höchst relevant sein dürfte, sondern es hilft ihnen auch, anders über das zu denken, was sie bereits wissen, und zu lernen, über den Tellerrand hinauszuschauen. Aus didaktischer Sicht bietet die Quanteninformatik ein gutes Beispiel für die Entwicklung von Lehransätzen und -methoden für komplexe, interdisziplinäre Themen. Nicht zuletzt kann die Beschäftigung

¹ Pädagogische Hochschule Schwyz, IMS, Zaystrasse 42, 6410 Goldau, Schweiz. giulia.paparo@phsz.ch

² Pädagogische Hochschule Schwyz, IMS, Zaystrasse 42, 6410 Goldau, Schweiz. bettina.waldvogel@phsz.ch

³ Pädagogische Hochschule Schwyz, IMS, Zaystrasse 42, 6410 Goldau, Schweiz. mareen.grillenberger@phsz.ch

mit der Quanteninformatik aus Sicht der Informatikdidaktik den Schülerinnen und Schülern helfen, die Prinzipien der Berechenbarkeit und der Informationsverarbeitung auf einer tieferen Ebene zu verstehen. Die Quanteninformatik führt neue Konzepte und Ansätze in die Informatik ein, welche die Lernenden dazu anregen können, in einer neuen inhaltlichen Dimension über Informatik nachzudenken.

Ziel dieses Beitrags ist es, die Voraussetzungen für den Unterricht in Quanteninformatik in der Sekundarstufe I und II zu schaffen. Dafür untersuchen wir, was Quanteninformatik beinhaltet und welche Kompetenzen von den Schülerinnen und Schülern dabei erworben werden könnten.

2 Hintergrund und Terminologie

In den letzten Jahren wurden erste Ansätze zur Vermittlung von Quanteninformatik entwickelt, die jedoch noch wenig erforscht sind, und wenn, dann häufig vor allem aus der Perspektive der Physikdidaktik. Bei den wenigen veröffentlichten Studien handelt es sich meist um empirische Untersuchungen, in denen Physiklehrpersonen oder Forschende über ihre Erfahrungen im Unterricht mit kleinen Gruppen älterer Lernender, zumeist aus der Sekundarstufe II oder dem Bachelorstudium, berichten (z. B. [An21; Hu20; SH19]). Umfangreiche wissenschaftliche Untersuchungen zu den entwickelten Vermittlungsansätzen, insbesondere aus informatikdidaktischer Sicht und mit Fokus auf jüngere Lernende, fehlen noch.

Ein erster Vorschlag für einen Kompetenzrahmen für Quantentechnologien wurde mit dem *European Competence Framework for Quantum Technologies* [GM21] vorgestellt und in den Vereinigten Staaten bietet der *QIS K-12 Framework* [Fr21] einen Rahmen für das Lehren und Lernen von Quanteninformatik in der Schule. Keiner der beiden Kompetenzrahmen entspricht jedoch unseren Anforderungen an eine Kompetenzstruktur für Quanteninformatik im Informatikunterricht in den Sekundarstufen. Der erste Kompetenzrahmen wurde aus einer physikalischen Perspektive entwickelt, während das zweite Konzept, anders als der Titel vermuten lässt, sich an voruniversitäre Lernende richtet und auf einem Leistungsniveau angesiedelt ist, das für die Sekundarstufen I und II in Europa zu anspruchsvoll ist.

Im deutschsprachigen Raum haben Michaeli et al. [MSR21] kürzlich die Quanteninformatik als Thema und Aufgabe für die informatische Bildung untersucht. Sie identifizierten ihre zentralen Ideen und untersuchten verschiedene Erklärungsansätze. Nach Befragung von Fachleuten kamen sie zum Schluss, dass, obwohl Quantencomputing oft der bekanntere Begriff ist, aus der Perspektive der informatischen Bildung der Begriff "Quanteninformatik" verwendet werden sollte: Quanteninformatik ist weiter gefasst und umfasst auch andere aktuellen Forschungsfelder wie Quanten-Kryptografie oder Quanteninternet. Wir folgen in diesem Beitrag der Empfehlung von Michaeli et al. und verwenden den Begriff Quanteninformatik, um die neuen Bereiche der Informatik, die durch die aktive Nutzung der besonderen Eigenschaften quantenmechanischer Systeme ermöglicht werden, umfassend zu beschreiben. Außerdem verstehen wir hier die Quanteninformatik als das Gesamtgebiet und Quantenberechenbarkeit und Quanteninformationsverarbeitung als Teilgebiete davon.

3 Schlüsselkonzepte und Kompetenzen

Zur Behandlung der Quanteninformatik als mögliches Thema für die informatische Bildung ist es notwendig, ihre inhaltliche Zusammensetzung und die dafür erforderlichen Kompetenzen zu bestimmen. Zu diesem Zweck stellen wir die folgenden Fragen: *“Welches sind die wichtigsten Inhalte der Quanteninformatik, die aus Sicht der Informatikdidaktik relevant sind?”*, *“Welches sind die wichtigsten Kompetenzen, die Schülerinnen und Schüler der Sekundarstufen durch das Kennenlernen der Quanteninformatik erwerben könnten?”* und *“Wie ordnen sich die neuen Kompetenzen in einem Kompetenzrahmen der informatischen Bildung ein?”*. Die hier vorgestellte Studie zur Beantwortung dieser Forschungsfragen wird in Anlehnung an den von Grillenberger und Romeike [GR17] vorgeschlagenen Ansatz zur Analyse von Schlüsselkonzepten des Datenmanagements durchgeführt. Dieser Ansatz besteht aus einer zweiphasigen Analyse: Die erste Phase umfasst eine Untersuchung des Fachgebiets aus einer didaktischen Perspektive, während sich die zweite Phase mit der Strukturierung des Fachgebiets in einem breiteren Bezugsrahmen befasst.

3.1 Phase 1: Explorative Analyse und Ermittlung der Schlüsselkonzepte

Ziel der ersten Phase war es, einen Gesamtüberblick über die Quanteninformatik zu entwickeln, wobei der Schwerpunkt auf den für die informatische Bildung relevanten Aspekten lag. Wie von Grillenberger und Romeike beschrieben, basierte diese Analyse weitgehend auf der qualitativen Inhaltsanalyse nach Mayring [Ma15]. Die erste Phase zielte darauf ab, den Themenbereich zu untersuchen, seine Schlüsselkonzepte zu identifizieren und in Cluster zu strukturieren. Dies umfasste die folgenden Schritte:

(1) *Bestimmung des Ausgangsmaterials.* Die Analyse beruhte auf der nachfolgenden Literatursammlung: [Ju20; KSV02; Me07; NC10; Pr20; Wo21]. Der größte Teil der wissenschaftlichen Literatur und der Lehrbücher zur Quanteninformatik ist in englischer Sprache verfasst. Daher wurde, mit Ausnahme eines deutschsprachigen Sachbuches, hauptsächlich englischsprachige Literatur verwendet. Anschließend wurden die Schlüsselkonzepte ins Deutsche übersetzt. Begriffe, für die keine gängige deutsche Übersetzung bekannt war, wurden als englische Begriffe belassen.

(2) *Festlegung des Kategoriensystems, der Auswahlkriterien und der Analyse-Einheiten.* Die Kategorienbildung erfolgte überwiegend datengesteuert bzw. induktiv. Die Kategorien ergaben sich während der Analyse des Materials und wurden nach zwei Kriterien ausgewählt: Die Kategorie sollte einen individuellen, relevanten und häufigen Aspekt der Quanteninformatik beschreiben und aus didaktischer und/oder informatischer Perspektive relevant sein, d. h. wichtig für das allgemeine Verständnis des Feldes sein und/oder sich auf andere informatische Themen beziehen oder dazu beitragen. Die Auswerteeinheit bestand aus den unterschiedlichen Lehrbüchern. Die Kodiereinheit beschränkte sich auf eigenständige Fachbegriffe, die aus einem oder mehreren Wörtern bestanden.

(3) *Kodierphase.* Die Kodierphase bestand aus zwei Schritten, die wiederholt durchgeführt wurden: die Entwicklung eines Kategoriensystems und das Clustering der identifizierten

Schlüsselkonzepte. Als erste Kodiereinheit wurde “Quantum Computation and Quantum Information” von Nielsen und Chuang [NC10] verwendet, da dies das am häufigsten verwendete und zitierte Lehrbuch zu diesem Thema ist. Auf der Grundlage der oben genannten Kriterien wurde eine erste Auswahl relevanter Inhalte (Kategoriesystem) formuliert und anschließend geclustert. Das gleiche Verfahren wurde mit allen anderen Lehrbüchern durchgeführt. Bei jeder Kodiereinheit wurden weitere Kategorien hinzugefügt und verschiedene Möglichkeiten der Gruppierung in Betracht gezogen. Die meisten Kategorien und das Clustering wurden jedoch nicht verändert und jede Kodiereinheit bestätigte die vorgeschlagene Struktur und die Auswahl der Begriffe. Im Abschluss wurde der Grad der Tiefe jeder Kategorie eingegrenzt, insbesondere wenn es um mathematische Details ging.

(4) *Validierung*: Die Kodierung wurde von zwei Fachpersonen aus den beiden wichtigsten Teilbereichen (Quantenkommunikation und Quantencomputing) validiert. Die beiden Fachpersonen schlugen einige Fachbegriffe vor, die in der Literatur nicht enthalten sind, aber in der aktuellen Forschung von Bedeutung sind, sowie einige Umformulierungen. Darüber hinaus wurden verschiedene Möglichkeiten der Kategorisierung diskutiert. Grundsätzlich waren beide Fachpersonen mit der allgemeinen Struktur des Clusterings einverstanden und fanden keine größeren Fehler oder falsche Zuordnungen. Das Ergebnis des Clusterings ist in Abb. 1 grafisch dargestellt.

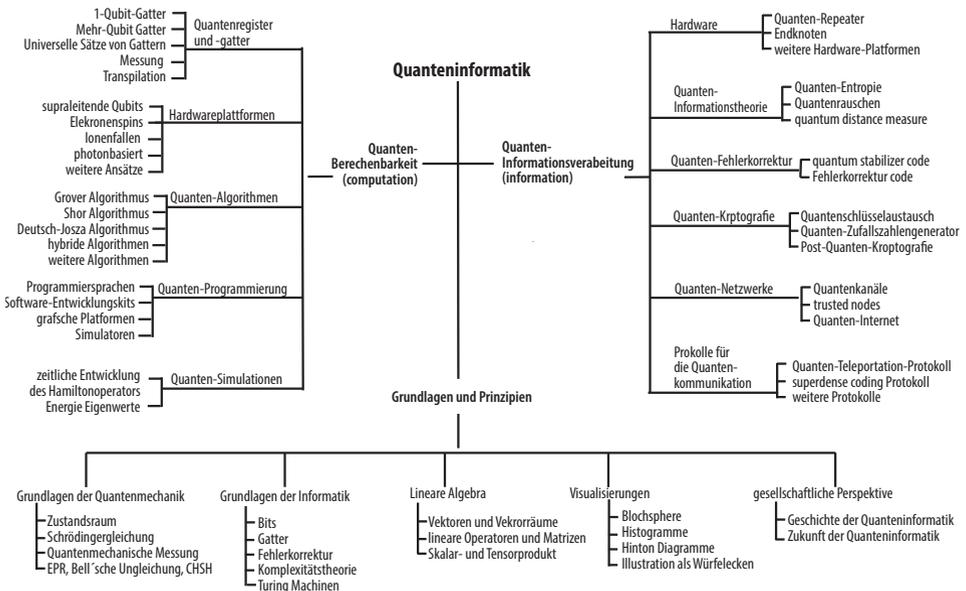


Abb. 1: Clustering der Schlüsselkonzepte der Quanteninformatik

3.2 Phase 2: Entwicklung eines Kompetenzrahmens

Während in der ersten Phase weitgehend dem Ansatz von Grillenberger und Romeike [GR17] gefolgt wurde, wurden für die Strukturierung der zweiten Phase, anstelle der “Great Principles of Computing” von Peter Denning, die Empfehlungen der Deutschen Gesellschaft für Informatik für Bildungsstandards in Informatik für die Sekundarstufen I und II [Ar08; Ar16] herangezogen. Diese bieten aus informatikdidaktischer Sicht einen allgemeinen Überblick über die zu erwartenden Kompetenzen der Schülerinnen und Schüler der Sekundarstufen und damit auch einen geeigneten Rahmen für die Strukturierung der neuen Inhalte. Jeder übergeordnete Inhalt des Clusters wurde auf seinen Bezug zu den von der Gesellschaft für Informatik formulierten informatischen Kompetenzen überprüft. Themen, die als wenig informatikrelevant eingestuft wurden (z. B. Quanten-Simulationen physikalischer Ereignisse und technische Hardwareaspekte der Quanteninformationsverarbeitung), wurden ausgeschlossen. Anschließend wurde geprüft, ob sich die Inhalte den Inhalts- und Prozessbereichen der Empfehlungen für Bildungsstandards der Deutschen Gesellschaft für Informatik (GI-Empfehlungen) zuordnen ließen. Wie aus der Tabelle 1 ersichtlich, konnte jedem Quanteninformatik-Inhaltsbereich mindestens ein übergeordneter Inhaltsbereich der GI-Empfehlungen zugeordnet werden. Darüber hinaus konnte allen Inhaltsbereichen der GI-Empfehlungen einer oder mehrere Quanteninformatik-Inhaltsbereiche untergeordnet werden, so dass der Kompetenzrahmen der Quanteninformatik eine Vertiefung und Erweiterung der GI-Empfehlungen darstellt. Wie auch bei den GI-Empfehlungen kann man die hier definierten Kompetenzen als *Opportunity-to-learn-Standards* auffassen [Ar08, S. V], da es sich um eine Angabe möglicher Kompetenzen handelt, die Lernende aufgrund des zu erwartenden Lerninputs erwerben können und welche (noch) nicht empirisch evaluiert wurden. Diese Bestimmung der Kompetenzen wird unsere künftige Entwicklung von Lehr- und Lernmaterialien sowie Unterrichtskonzepten für die Quanteninformatik in der Schule leiten. Daher ist es unser Anspruch, diese Kompetenzdefinitionen in Zukunft empirisch zu überprüfen, kritisch zu analysieren und zu überarbeiten. In einem ersten Schritt stellen wir hier die Ergebnisse unserer theoretischen Analyse vor.

3.2.1 Inhaltsbereiche der Quanteninformatik

Bei der Bestimmung der Quanteninformatik-Inhaltsbereiche folgten wir den folgenden Kriterien, dass jeder Inhaltsbereich (1) einen separaten Teilbereich der Quanteninformatik charakterisieren sollte, (2) eine Reihe von eng verwandten Konzepten unter einem geeigneten Überbegriff zusammenfassen sollte, (3) Inhalte ansprechen sollte, die für die Quanteninformatik und gleichzeitig auch für die Informatik als Ganzes relevant sind und (4) möglichst wenig Überschneidungen mit anderen Inhaltsbereichen aufweisen sollte (vgl. [Gr19]). Im folgenden Abschnitt werden die einzelnen Inhaltsbereiche der Quanteninformatik beschrieben und mit konkreten Unterrichtsbeispielen illustriert.

Quanten-Information: Ein Qubit, also ein Quantenbit, ist die fundamentale Einheit der Quanten-Information. Qubits haben, wenn sie gemessen werden, immer einen wohldefinierten Wert, weisen aber im Gegensatz zu Bits auch quantenmechanische Eigenschaften auf, wie Überlagerung und Verschränkung. Durch diese Eigenschaften lassen sich rechnerische Vorteile erzielen, da es zum Beispiel möglich ist, den Zustand von zwei oder mehr verschiedenen Qubits durch eine einzige Operation zu beeinflussen. Im Unterricht könnten Schülerinnen und Schüler zunächst mit einer Münze ein Bit darstellen und diskutieren, wie es möglich ist, damit Informationen wie verschiedene Farben oder Zahlen zu speichern. Anschließend könnten sie in das Konzept eines Qubits eingeführt werden und zum Beispiel den Quanten-Penny-Flip-Simulator [SW20] verwenden, um das unterschiedliche Verhalten von Qubits (Quantenmünzen) im Vergleich zu Bits (normalen Münzen) zu simulieren. Durch die Simulation erleben die Schülerinnen und Schüler, dass Qubits in einem Zustand der *Überlagerung* sein können, d. h. die Quantenmünzen können nicht nur Kopf oder Zahl sein, sondern auch eine Kombination aus diesen beiden Werten. Die Lernenden könnten darüber diskutieren, wie sich dies auf Berechnungsprobleme übertragen lässt. So werden sie in die Grundprinzipien der (Quanten-) Informationsverarbeitung und Berechenbarkeit eingeführt. Sie lernen, was ein Qubit ist, seine Eigenschaften und seine möglichen vorteilhaften Anwendungen.

Quanten-Informatiksysteme: Das wohl bekannteste Quanten-Informatiksystem ist der Quantencomputer. Es werden im Moment unterschiedliche Bauweisen von Quantencomputern erforscht, wie aus supraleitenden Qubits oder Ionenfallen. Wie klassische Computer, verwenden auch Quantencomputer logische Gatter als Grundbausteine ihrer Schaltkreise. Quantengatter funktionieren jedoch anders als klassische Logikgatter, und mit ihrer Hilfe lassen sich Verbindungen und Eigenschaften erzeugen, wie Überlagerung und Verschränkung, die mit klassischen Computern nicht möglich sind. In einem Quanten-Algorithmus werden die Quantengatter so platziert, dass die Wahrscheinlichkeit, das gewünschte Ergebnis zu messen, erhöht ist. Für die Programmierung von Quantencomputern stehen verschiedene Plattformen zur Verfügung. Beispielsweise bietet IBM eine ansprechende grafische Oberfläche an, auf der man per Drag & Drop die Wirkung verschiedener Gatter auf ein oder mehrere Qubits simulieren (und ausführen) kann [IB21]. Auf diese Weise können die Schülerinnen und Schüler selbst verschränkte oder überlagerte Qubits mit einer Schaltung aus den geeigneten Gattern erzeugen und es auf einem Quantencomputer testen. Sie lernen, was diese besonderen quantenmechanischen Eigenschaften bedeuten und wie man denken muss, um einen Quantencomputer zu programmieren.

Quanten-Algorithmen: Bislang gibt es nur eine begrenzte Anzahl nützlicher Algorithmen, die Quantencomputern bei grundlegenden Problemen der Informatik wie der Faktorisierung großer Zahlen einen signifikanten Geschwindigkeitsvorteil verschaffen könnten. Für viele andere Arten von Berechnungen gibt es jedoch keine einfachen Möglichkeiten, sie auf einem Quantencomputer zu implementieren, und es gibt auch keinen Vorteil, dies zu tun. Eine aktuelle Herausforderung in der Quanteninformatik besteht darin, gute und nützliche Algorithmen für Quantencomputer zu entwickeln. Von den Schülerinnen und Schülern

kann nicht erwartet werden, dass sie selbst neue Algorithmen entwickeln, aber es ist möglich, dass sie einige bekannte Algorithmen in ihren Grundzügen nachbauen und ihre Logik und Eigenschaften untersuchen. Zum Beispiel kann der Deutsch-Jozsa-Algorithmus, der historisch erste formulierte Algorithmus, der die Vorteile von Quanten-Algorithmen in Vergleich zu herkömmliche Algorithmen aufgezeigt hat, mit Hilfe einer Simulation schülergerecht vermittelt werden (vgl. [Se21]).

Quanten-Kryptografie: Einerseits hat Shors Algorithmus gezeigt, dass voll funktionsfähige Quantencomputer in der Lage wären, große Zahlen effizient zu faktorisieren und damit die heute am weitesten verbreiteten Verschlüsselungsverfahren zu gefährden, andererseits können Quanteneffekte die Kommunikation auf der Grundlage physikalischer Prinzipien sicherer machen. Die Quanten-Kryptografie macht sich die Tatsache zunutze, dass es aufgrund der Empfindlichkeit von Qubits für Dritte unmöglich ist, das System zu belauschen, ohne es zu stören und damit mit hoher Wahrscheinlichkeit entdeckt zu werden. Im Unterricht können die Grundlagen der RSA-Verschlüsselung erklärt werden und warum das heute am häufigsten verwendete Verschlüsselungsverfahren durch zukünftige Quantencomputer gefährdet ist. Anschließend können die Lernende einen Schlüsselaustausch mittels BB84-Schlüsselaustauschprotokoll und einen Lauschversuch simulieren (vgl. [Tü22]). Auf diese Weise können sie selbst erfahren, warum die quantenmechanischen Prinzipien der Überlagerung und der Messung das Protokoll sicher machen.

Quanten-Fehlerkorrektur: Die derzeitige Phase der Entwicklung von Quantencomputern wird als Noisy Intermediate-Scale Quantum (NISQ) Ära bezeichnet. Diese Prozessoren sind sehr empfindlich gegenüber ihrer Umgebung und sind noch nicht in der Lage, eine kontinuierliche Quanten-Fehlerkorrektur durchzuführen. Die Fehlererkennung und -korrektur stellt daher derzeit eine der größten Herausforderungen für den erfolgreichen Bau von Quantencomputern dar. Für den Unterricht gibt es schöne Unplugged-Beispiele (vgl. [Ni09]) für die Einführung in die Fehlerkorrektur. Entsprechend greifbare Methoden zur Einführung der Quanten-Fehlerkorrektur in den Unterricht müssen noch entwickelt werden – das Citizen Science Projekt von James Wootton kann hier sicherlich hilfreich sein [Wo16]. Schülerinnen und Schüler könnten lernen, was Fehlerkorrektur ist, warum sie für die Informatik relevant ist und warum die klassische Fehlerkorrektur für Quantencomputer nicht anwendbar ist.

Quanten-Informatik, Mensch und Gesellschaft: Wenn voll funktionsfähige Quantencomputer realisiert werden, könnten sie die am häufigsten verwendeten Verschlüsselungsverfahren knacken. Gleichzeitig könnten damit Prozessoptimierungen durchgeführt werden, die zu erheblichen Effizienzsteigerungen führen und Energieeinsparungen mit sich bringen könnten. Außerdem haben Quantensimulationen das Potenzial, zu einem besseren Verständnis quantenmechanischer Systeme beizutragen, was uns zum Beispiel die Entwicklung neuer Medikamente und Materialien ermöglichen könnte (vgl. [Wo17]). Die gesellschaftlichen Auswirkungen lassen sich gut mit den Schülerinnen und Schülern besprechen und man könnte zum Beispiel diskutieren, wie der Zugang zu Quantencomputern, wenn er auf einzelne Regierungen oder wenige private Unternehmen beschränkt ist, die Machtverhältnisse in der Gesellschaft verändern könnte.

Inhaltsbereich GI	Inhaltsbereich Quanteninformatik	Kompetenzen Die Schülerinnen und Schüler
Informationen und Daten	Quanten-Information	- unterscheiden zwischen Qubits (Quantenbits) und Bits als Informationseinheiten. - erläutern, welche neuen Möglichkeiten der Informationsverarbeitung durch Qubits möglich sind.
Informatiksysteme Sprache und Automaten	Quanten-Informatiksysteme	- erklären die Grundlagen des Aufbaus von Quantencomputern und deren Funktionsweise. - nutzen eine formale Sprache zur Interaktion mit einem Quantencomputer.
Algorithmen	Quanten-Algorithmen	- erklären, wie Quanten-Algorithmen zur Lösung wichtiger Probleme in der Informatik beitragen können. - erklären und interpretieren gegebene Quanten-Algorithmen.
Informationen und Daten Algorithmen	Quanten-Kryptografie	- erklären, warum das heute am häufigsten verwendete Verschlüsselungsverfahren durch Quantencomputer gefährdet wäre. - überprüfen, wie das BB84-Schlüsselaustauschprotokoll funktioniert und wenden es selbst an. - erklären die Vorteile der Quantenverschlüsselung und wie sie sich von anderen Methoden unterscheidet.
Informationen und Daten Algorithmen	Quanten-Fehlerkorrektur	- erklären, warum Quanten-Fehlerkorrektur grundlegend bei der Entwicklung von Quantencomputern ist.
Informatik, Mensch und Gesellschaft	Quanten-Informatik, Mensch und Gesellschaft	- benennen zukünftige Wechselwirkungen zwischen Quanteninformatik und ihrer gesellschaftlichen Einbettung. - bestimmen mögliche Entscheidungen, Normen und Verhaltensweisen als Reaktion auf die Chancen und Risiken der Quanteninformatik.

Tab. 1: Kompetenzraster für die Quanteninformatik

4 Ausblick und Fazit

Quanteninformatik kann ein vielversprechendes Thema für den Informatikunterricht in den Sekundarstufen sein, da sie einerseits den Schülerinnen und Schülern die Möglichkeit bietet, mit zukunftsweisenden Themen und Technologien in Kontakt zu kommen und neue Denkweisen zu erlernen. Andererseits können die Lernenden tiefer in die klassischen Konzepte der Informatik eintauchen und diese anders verstehen. Aus didaktischer Sicht ist die Quanteninformatik ein anspruchsvolles Thema für den Unterricht und ein interessantes Beispiel dafür, wie man Schülerinnen und Schülern komplexe Themen näher bringen kann. Mit diesem Beitrag möchten wir erste Voraussetzungen für die Einführung der Quanteninformatik in der Schule schaffen: Es wurden ihre Kernkonzepte kartiert und systematisiert, die Kompetenzen identifiziert, die die Lernenden bei der Beschäftigung mit dem Thema erwerben können, und diese aus der Perspektive der GI-Empfehlungen verortet.

Quanteninformatik ist kein abgeschlossenes Forschungsgebiet. Im Gegenteil, sie entwickelt sich rasant weiter [SA21]. Das bedeutet, dass das hier vorgestellte Clustering in den kommenden Jahren weiterentwickelt und erweitert werden muss. Auch wenn die Identifizierung der Cluster einem strukturierten methodischen Ansatz folgte und dieser von Fachleuten validiert wurde, ist dieser Prozess dennoch subjektiv und alternative Kategorisierungen sind möglich. In einem zweiten Schritt wurden Kompetenzen definiert und in die GI-Empfehlungen

eingeorndet. Diese Kompetenzen sind nur theoretisch abgeleitet und mssen in der Praxis validiert werden (z. B. soll gezeigt werden, dass Lernende in der Quanteninformatik auch mit Problemlsung ebenso wie mit theoretisch-abstrakten Inhalten konfrontiert werden). Obwohl wir die Lerninhalte durch exemplarische Unterrichtsbeispiele aus der Literatur illustriert haben, handelt es sich um eine theoretische Arbeit, die unsere zuknftige Entwicklung von Unterrichtskonzepten leiten soll. Wir stehen erst am Anfang der Bemhungen, die Frage zu klren, wie Quanteninformatik in der Schule unterrichtet werden kann und sehen gleichzeitig die wachsende Bedeutung der Quanteninformatik in der Wissenschaft sowie fr potenzielle gesellschaftliche Vernderungen. Wir sind davon berzeugt, dass sich die Informatikdidaktik weiterhin und verstarkt mit der Quanteninformatik beschftigen sollte, da der Bedarf an didaktischen Ausarbeitungen, Vermittlungskonzepten und Unterrichtsmaterialien zu den in diesem Beitrag vorgestellten Inhalten und Kompetenzen wachsen wird und Schlerinnen und Schler sowie die Gesellschaft vom Lehren und Lernen der Quanteninformatik profitieren werden.

Literatur

- [An21] Angara, P.; Stege, U.; MacLean, A.; Muller, H.; Markham, T.: Teaching Quantum Computing to High-School-Aged Youth: A Hands-On Approach. IEEE Transactions on Quantum Engineering 3/1, 2021.
- [Ar08] Arbeitskreis Bildungsstandards: Grundsätze und Standards für die Informatik in der Schule. Bildungsstandards Informatik für die Sekundarstufe I. Beilage der GI e. V. in LOG IN 150/151/28, 2008.
- [Ar16] Arbeitskreis »Bildungsstandards SII«: Bildungsstandards Informatik für die Sekundarstufe II. Beilage der GI e.V. in LOG IN 183/184/36, 2016.
- [Fr21] Franklin, D.; Rogers, M.; Rozansk, D.; Tabor, C.; Wong, T. G.; Yen, B.: QIS Key Concepts for Early Learners: K-12 Framework High School Computer Science, 2021, URL: <https://q12education.org/wp-content/uploads/2022/09/QISE-K-12-framework-HS-Computer-Science-1.pdf>.
- [GM21] Greinert, F.; Müller, R.: Competence Framework for Quantum Technologies, 2021, URL: <https://qt.eu/app/uploads/2021/09/CompetenceFrameworkQuantumTechnologiesV1.pdf>.
- [GR17] Grillenberger, A.; Romeike, R.: Key concepts of data management: an empirical approach. In: Proceedings of the 17th Koli Calling International Conference on Computing Education Research. ACM, Koli Finland, S. 30–39, Nov. 2017.
- [Gr19] Grillenberger, A.: Von Datenmanagement zu Data Literacy: Informatikdidaktische Aufarbeitung des Gegenstandsbereichs Daten für den allgemeinbildenden Schulunterricht, Diss., 2019.
- [Hu20] Hughes, C.; Isaacson, J.; Perry, A.; Sun, R.; Turner, J.: Teaching Quantum Computing to High School Students, Apr. 2020.

- [IB21] IBM Quantum: Quantum composer, 2021, URL: <https://quantum-computing.ibm.com/composer>.
- [Ju20] Just, B.: Quantencomputing kompakt: Spukhafte Fernwirkung und Teleportation endlich verständlich. Springer, Berlin, Heidelberg, 2020.
- [KSV02] Kitaev, A. Y.; Shen, A. H.; Vyalıy, M. N.: Classical and Quantum Computation. Amer Mathematical Society, Providence, 2002.
- [Ma15] Mayring, P.: Qualitative Inhaltsanalyse: Grundlagen und Techniken. Beltz Verlag, 2015.
- [Me07] Mermin, N. D.: Quantum Computer Science: An Introduction. Cambridge University Press, Cambridge, 2007.
- [MSR21] Michaeli, T.; Seegerer, S.; Romeike, R.: Quanteninformatik als Thema und Aufgabengebiet informatischer Bildung. In: INFOS 2021. S. 1–10, 2021.
- [NC10] Nielsen, M. A.; Chuang, I. L.: Quantum computation and quantum information. Cambridge University Press, Cambridge ; New York, 2010.
- [Ni09] Nishida, T.; Kanemune, S.; Idosaka, Y.; Namiki, M.; Bell, T.; Kuno, Y.: A CS Unplugged Design Pattern. SIGCSE Bull. 41/1, S. 231–235, März 2009.
- [Pr20] Preskill, J.: Physics 219 Course Information, 2020, URL: <http://theory.caltech.edu/~preskill/ph229/#lecture>.
- [SA21] Seskir, Z. C.; Aydinoglu, A. U.: The Landscape of Academic Literature in Quantum Technologies. International Journal of Quantum Information 19/02, März 2021.
- [Se21] Seegerer, S.; Romeike, R.; Woitzik, A.; Michaeli, T.: Turing-Bus: Die Reise in die Quantenzeit, 2021, URL: <https://computingeducation.de/TuringBus-Brosch%C3%BCre-ALICE-und-BOB.pdf>.
- [SH19] Schorn, B.; Heinke, H.: Schülervorstellungen zur Quantenphysik und zur Quanteninformationsverarbeitung. PhyDid B - Didaktik der Physik - Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung 1/1, Dez. 2019.
- [SW20] Seegerer, S.; Woitzik, A.: Quantum computing: as easy as a penny flip, 2020, URL: <https://helloworld.raspberrypi.org/articles/hw18-quantum-computing-as-easy-as-a-penny-flip>.
- [Tü22] TüftelAkademie: Qey-Gen, Der Quantenschlüsselgenerator, 2022, URL: <https://tueftelakademie.de/quanten1x1/quantenverschluesselung/gey-gen>.
- [Wo16] Wootton, J.: Decodoku: Gaming for science!, last accessed: 6.2.2023, 2016, URL: <http://decodoku.blogspot.com/2016/11/welcome.html>.
- [Wo17] de Wolf, R.: The Potential Impact of Quantum Computers on Society, 2017, URL: <http://arxiv.org/abs/1712.05380>.
- [Wo21] Wong, T. G.: Introduction to Classical and Quantum Computing. Rooted Grove, 2021.