

Die zweite Quantenrevolution - Quanteninformatik im Physikunterricht

Gesche Pospiech

TU Dresden, Fakultät Physik, Professur für Didaktik der Physik
gesche.pospiech@tu-dresden.de

Kurzfassung

In den letzten Jahrzehnten hat die Quantentechnologie rasante Fortschritte gemacht. Die sich daraus ergebenden Anwendungen und Möglichkeiten dringen immer stärker in das Bewusstsein der interessierten Menschen und finden ihren Niederschlag in der medialen Begleitung. Parallel dazu bahnt sich ein Paradigmenwechsel im Unterricht über Quantenphysik sowohl an der Schule als auch an der Universität an. Insbesondere treten die vielfach diskutierten Interpretationsfragen in den Hintergrund und machen einer pragmatischen Betrachtungsweise Platz, die die Besonderheiten der Quantenphysik als gegeben akzeptiert und sie für neue bislang ungeahnte Anwendungen nutzt. Dabei stellt sich die Frage, welche Aspekte für den Schulunterricht auf verschiedenen Stufen, für die universitäre Ausbildung von Physikern und von Ingenieuren von besonderer Bedeutung sind. In diesem Beitrag werde ich mich auf den Bereich der Quanteninformatik konzentrieren und ausloten, welche Aspekte sich hierbei im Sinne einer Allgemeinbildung als relevant und realisierbar für den schulischen Unterricht erweisen können.

1. Relevanz des Themas „Quantentechnologien“

Seit einigen Jahren gewinnen Technologien, die mit einzelnen Elektronen, Ionen oder Atomen arbeiten, unter der gemeinsamen Bezeichnung „Quantentechnologien“ sehr stark an Aufwind. Rainer Blatt sagt für das 21. Jahrhundert ein „Jahrhundert der Quantentechnologie“ voraus, das sowohl die Wirtschaft als auch die Gesellschaft noch einmal fundamental verändern werde (Steger 2019). Was mit Experimenten in Forschungslaboren, mit Grundlagenforschung in der Quantenphysik auf der Basis wissenschaftlicher Neugier begann, führte in den letzten Jahrzehnten zu einem deutlich zunehmenden Interesse über die Wissenschaft hinaus an möglichen Anwendungen; die entsprechenden Technologien erhielten einen Schub, der neue physikalische, ingenieurwissenschaftliche, informatische Anwendungen erschließt und zunehmend auch ökonomische und militärische Bedeutung entwickelt.

1.1 Entwicklung von der 1. zur 2. Quantenrevolution

Man hat die Quantenphysik, die „Erste Quantenrevolution“, seit 1900 mit klassischen Methoden, Experimenten und Werkzeugen gefunden, ohne dass man im entferntesten ahnte, dass man damit die klassische Physik aus den Angeln heben würde. Physikalisch gesehen beruht die Erste Quantenrevolution auf der Kontrolle des Verhaltens großer Ensembles von Quantenteilchen (Jäger 2018): Es ging darum zu beschreiben, wie man den Fluss vieler Elektronen steuern, eine große Anzahl von Photonen anregen oder auch den Kernspin zahlreicher Atome auf ein-

mal messen kann. Konkrete Beispiele sind die Kohärenz von Photonen beim Laser, die Spin-Eigenschaften der Atomkerne bei der Magnetresonanztomographie, die Bose-Einstein-Kondensation oder auch Supraleitung. Solche Anwendungen machen quantenphysikalische Effekte in unserer Welt erfahrbar. Dieser Erkenntnisgewinn führte zu gewaltigen Auswirkungen auf unser Weltbild einerseits und auf breite ökonomisch wie gesellschaftlich disruptive Anwendungen andererseits. Dazu gehört nicht nur der Laser, sondern beispielsweise auch die physikalische Grundlage moderner Festplatten, der „giant magnetoresistance“, für dessen Entdeckung im Jahr 2007 der Nobelpreis verliehen wurde und der die Voraussetzung zahlreicher Alltagsanwendungen ist.

Neben diesem Anwendungsbezug sollte man Schülern die wissenschaftliche Redlichkeit verdeutlichen, die dazu gehört, Daten mit großer Präzision zu erheben, ein fest gefügtes Weltbild auf der Basis neuer Evidenz in Frage zu stellen und die Kreativität erfahrbar machen, die dazu gehört, sich mögliche neue Beschreibungsmöglichkeiten zu erschließen. Solche Fragen zum Erkenntnisgewinn, letztendlich philosophisch verankert, gehören explizit zum Physikunterricht, genauer gesagt zum Unterricht *über* Physik.

In den letzten Jahrzehnten stehen für die Untersuchung von Quantenobjekten Instrumente zur Verfügung, die aus der Quantenphysik selber hervorgegangen sind: Laser, Photonen, Transistoren, etc.. Daher erscheint es nicht als großes Wunder, dass man mit Quantenwerkzeugen tiefer in die Quantenphysik eindringen und sie noch besser verstehen kann. Auf

dieser Basis geht es bei der Zweiten Quantenrevolution um ganz neue technologische Fähigkeiten, die vor einigen Jahrzehnten undenkbar schienen (s. a. Zitat von Schrödinger aus dem Jahr 1952 in Abb.1). Man kann heutzutage einzelne Quantenobjekte gezielt manipulieren und messen. Man kann ihre Wechselwirkungen kontrollieren und nutzen. Diese Techniken umfassen die Entwicklung von Quantensensoren, Quantenmetrologie, Quantenbildgebung, Quantensimulationen und Quanteninformation, zusammenfassend die Quantentechnologien genannt (Kagermann et al 2020). Auslöser für die aktuelle rasante Entwicklung waren die Grundlagen der Quanteninformation und Quanteninformationsverarbeitung, kurz Quanteninformatik, in Wechselwirkung mit technologischen Entwicklungen. Wie sich die Erste Quantenrevolution mit Plancks Erkenntnis 1900 angekündigt hat und sich nach 1925 rasch entwickelte, kündigte sich die neue 2. Quantenrevolution mit den Arbeiten von Bell ab ca 1964 an (Bell 1964) und nahm nach 1982 Fahrt auf (s. z. B. Aspect et al. 1982; Aspect 2015; Bouwmeester et al. 2001; Bouwmeester et al. 1997; Pan et al. 2000; s. a. Abb.1). Die begriffliche Klarheit innerhalb der Quantenphysik, die sich aus dieser reinen Grundlagenforschung ergab, schlägt sich in zunehmend pragmatischer werdenden wissenschaftlichen Darstellungen und auch in der universitären Lehre nieder.

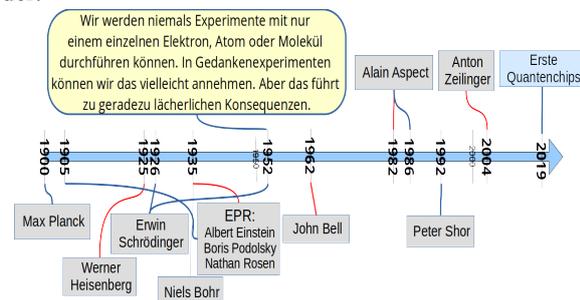


Abb.1: Unterhalb des Zeitstrahls finden sich theoretische Physiker, die die Grundlagen der Quantentheorie gelegt haben, oberhalb ausgewählte experimentelle Physiker, die mit einzelnen Quantenobjekten experimentiert und so den Weg zur zweiten Quantenrevolution bereitet haben. Die Auswahl der Physiker wird umso subjektiver und willkürlicher, je näher man dem heutigen Datum kommt. Es gibt mittlerweile so viele Beiträge, dass sich ein vollständiges Bild schlichtweg nicht mehr zeigen lässt.

Nach der ersten Phase kamen seit 1992, mit dem Shorschen Algorithmus (Shor 1994), militärische und sicherheitsrelevante, in jüngster Zeit auch ökonomische Interessen hinzu, womit plötzlich auch das Thema der Fachkräftesicherung im Bereich der Quantentechnologien virulent wird. Aus diesen beiden Gründen ist es an der Zeit, die gewonnenen Erkenntnisse auch in schulische Konzepte umzusetzen.

1.2 Quanteninformatik in den Medien

In diesem Beitrag steht die Quanteninformatik als Teilbereich der Quantentechnologien im Zentrum. Die wissenschaftliche Aktivität auf diesem Gebiet äußert sich natürlich unter anderem in stark steigenden Publikationszahlen (s. Abb. 2). Diese Entwicklung seit 1990 wurde ansatzweise quantifiziert, indem auf scholar.google.de mit dem Stichworten „quantum computing“, „quantum computer“, „quantum cryptography“ und „post quantum cryptography“ nach Veröffentlichungen gesucht wurde. Die Zahl der Suchergebnisse kann zwar nur eine grobe Abschätzung sein, weil öfters Fehlklassifizierungen auftreten. Zudem handelt es sich wohl eher um die Spitze des Eisbergs, denn Veröffentlichungen zur Lösung technischer Probleme der Quanteninformatik tragen nicht unbedingt das Schlagwort „quantum computing“ im Titel. Man sieht auch, dass Quantenkryptographie nicht mehr primär im Zentrum des Interesses steht, dafür aber Strategien gesucht werden, wie man mit der neuen Sachlage umgehen kann, wenn ein Quantencomputer wirklich (irgendwann einmal) die RSA-Verschlüsselung knacken kann („post quantum cryptography“).

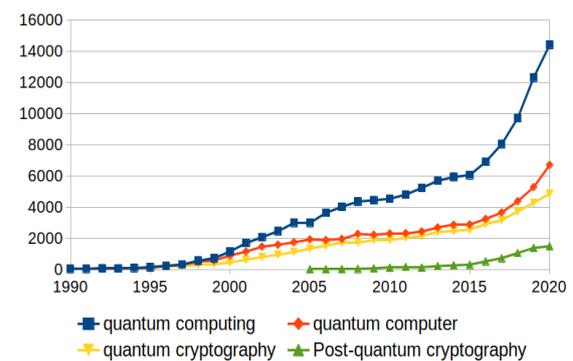


Abb. 2: Entwicklung der Publikationen zu Themen der Quanteninformatik. Es handelt sich um geschätzte Zahlen nach den zum entsprechenden Suchbegriff auf scholar.google.de angezeigten Publikationen (März 2021).

Diese zunehmende wissenschaftliche Aktivität spiegelt sich in der Wissenschaftskommunikation und in allgemeinen Medien, so dass auch entsprechende Berichte in Zeitschriften und Zeitungen eine breitere Öffentlichkeit finden. Dabei erntet der Quantencomputer, mehr noch als die Quantenkryptographie, die meisten Schlagzeilen von allen Aspekten der Quantentechnologien. Dabei sind die Schlagzeilen zuweilen durchaus reißerisch wie von Fokus-online (9.9.2015): „Quantencomputer der NSA - Monsterrechner droht die Welt ins Chaos zu stürzen“¹. Aber es gibt auch sehr informative Artikel z. B. FAZ-online (28.10.2019): „Wie funktioniert ein Quantencomputer“², der Q-Bits, Verschränkung und Quantengatter in angemessener Weise thematisiert. Jenseits aller übertriebenen Darstellungen,

¹https://www.focus.de/wissen/experten/schmeh/quantencomputer-der-nsa-quantencomputer-koennten-die-welt-ins-chaos-stuerzen-3_id_3522157.html

weitreichenden Hoffnungen oder Visionen geht die Entwicklung voran, mit grundlegenden theoretischen Analysen, experimentellen und technologischen Erkenntnissen und zunehmend realistisch und konkreter werdenden Erwartungen an künftige Leistungen eines Quantencomputers in spezifischen Bereichen, wie z. B. in der Pharmakologie zur Simulation komplexer Moleküle. So findet man entsprechende Berichte mittlerweile nicht mehr nur auf den Wissenschaftsseiten, sondern auch auf den Wirtschaftsseiten einschlägiger Zeitungen (12.2.2021): „Boehringer-Ingelheim rechnet jetzt mit Google-Quanten“³. Dabei ist das in der Öffentlichkeit präsenteste Symbol der neuen Quantentechnologien, quasi als *pars pro toto*, der Quantencomputer, das Aushängeschild der Quanteninformatik.

1.3 Exkurs: Quantencomputer

Die zentrale Frage ist:

Was macht einen Quantencomputer überhaupt aus und was kann er besser als klassische Computer?

Nach dem ersten Überschwang werden durchaus die Begrenzungen eines Quantencomputers und seine sehr spezifischen Möglichkeiten zur Kenntnis genommen. Dabei kristallisiert sich heraus, dass strukturelle, zufällige Probleme, deren Lösung zu den schwachen Seiten der klassischen Computer gehört, von Quantencomputern besser bearbeitet werden können. Zu solchen Problemen gehören: Suche in ungeordneten Datenbanken, Analyse von Netzwerken, Mustererkennung oder das Lösen linearer Gleichungssysteme mit „dünn besetzten“ Matrizen (ohne Struktur) (Montanaro, 2016). Das gemeinsame Charakteristikum all dieser Probleme ist, dass wegen der Strukturlosigkeit Element für Element einzeln betrachtet, ausgewertet oder verglichen werden muss. Daher steigt die (klassisch) notwendige Rechenzeit mehr als polynomial mit der Zahl der Elemente an. Die andere Stärke sind Optimierungsprobleme, bei denen unter zahllosen Möglichkeiten die beste ausgewählt werden soll, z. B. durch Quantenannealing. Ferner erscheint es plausibel, dass Quantensimulationen von Quantenmaterialien (v. a. in den Materialwissenschaften oder der Pharmakologie) eine Stärke des Quantencomputers sein können.

Weitgehend offen ist, welche die geeigneten Quantenalgorithmien sind, die passende Probleme auf einem Quantencomputer optimal lösen können. Die damit zusammenhängenden Fragen stehen im Zentrum der Quanteninformatik, die teilweise zurückwirkt auf die klassische Informatik, indem die Beschäftigung mit Algorithmen zur Lösung solcher Probleme, die für den Quantencomputer geeignet sind, neue Lösungen für klassische Probleme inspi-

rieren (Montanaro, 2016). Man kann sich auch vorstellen, dass irgendwann einmal für die Bewältigung bestimmter Aufgaben Quantenchips in einen klassischen Computer eingebaut werden, ähnlich wie man heute in einem Computer neben den „normalen“ Prozessoren auch Grafik-Prozessoren für spezielle Aufgaben verwendet.

Worin unterscheiden sich klassische und Quantencomputer?

Bei den meisten populärwissenschaftlichen Erklärungen des Quantencomputers steht im Zentrum, dass die Bits durch Q-Bits, oft als irgendwie geheimnisvoll konnotiert, ersetzt werden. Seltener wird die Parallelität der Algorithmen hervorgehoben, die durch Überlagerung und Verschränkung ermöglicht wird. Von entscheidender Bedeutung ist hier die Verschränkung. Ein weiterer wichtiger Punkt ist die von der Quantenphysik erzwungene Reversibilität einer Berechnung. Diese steht weniger im Fokus der meisten Erklärungen, wenngleich sie zentral für die Konstruktion eines Quantencomputers ist, weil dadurch die möglichen logischen Gatter eingeschränkt sind: beispielsweise sind AND und OR Gatter nicht reversibel, können also nicht in einem Quantencomputer verwendet werden. Anstelle dessen werden z. B. das CNOT (Controlled-not) verwendet (Pospiech, 2021; Homeister, 2018). Auch das Auslesen, der Messprozess, wird nicht oft thematisiert, ist aber wichtig, da gemäß der Quantenphysik nach einem einzigen Auslesen nur ein unvorhersagbarer, zufälliger Wert angezeigt wird. Wenn man auf einem der Quantencomputer von IBM rechnet, werden daher zunächst 1024 Wiederholungen vorgeschlagen (<https://quantum-computing.ibm.com/composer>). In dem Ergebnis sieht man dann die Statistik der möglichen Lösungen, die (wegen der unvermeidbaren Fehler in den Prozessoren) durchaus von dem ideal erwarteten Ergebnis abweicht. Die richtige Lösung sollte sich durch eine hohe Wahrscheinlichkeit auszeichnen.

Die unterschiedliche Funktionsweise von klassischem und Quantencomputer drückt sich auch darin aus, dass in gewisser Weise Software und Hardware ihre Rollen vertauschen: Die Bits eines klassischen Computers werden als Stromflüsse kodiert, die Software, das Programm, wird in den Binärcode umgesetzt. Die Gatter werden als integrierte Schaltkreise mit Hilfe von Transistoren physikalisch in der Hardware realisiert. Bei einem Quantencomputer ist dies im wesentlichen umgekehrt: Die Q-Bits sind als physikalische Objekte realisiert, die Gatter werden beispielsweise als eine Folge von Laser- oder Mikrowellenpulsen realisiert; sie manipulieren die physikalischen Objekte, wie beispielsweise Ionen in der Ionenfalle (Ambach, 2010).

Quantenüberlegenheit

Das wesentliche Ziel ist die Quantenüberlegenheit, damit sich der Forschungsaufwand lohnt:

² <https://www.faz.net/aktuell/wissen/computer-mathematik/wie-funktioniert-ein-quantencomputer-16452397.html>

³ <https://www.faz.net/aktuell/wirtschaft/digitec/boehringer-ingelheim-rechnet-jetzt-mit-google-quanten-17140677.html>

Definition der Quantenüberlegenheit: Ein Quantencomputer kann in (relativ) kurzer Zeit ein Problem lösen, für das ein klassischer Computer eine nicht mehr vernünftige oder akzeptable Zeit benötigt.

Ist man wirklich schon so weit, dass Quantencomputer bereits jetzt besser sind als klassische Computer? Diese Frage wird seit spätestens 2019 diskutiert und hat mediales Aufsehen über den Kreis der Fachwissenschaftler hinaus erregt. Die Antwort darauf ist ein klares Ja.

Um die Quantenüberlegenheit zu zeigen, muss man Probleme auswählen, die auf klassischen Computern einen besonders hohen Rechenaufwand erfordern, d. h. die überpolynomial mit der Größe des Problems wachsen: dies sind die oben genannten unstrukturierten Probleme. Daher benötigt man für den Nachweis der Quantenüberlegenheit so viele Elemente, dass man die Verschränkung von Q-Bits – die automatisch mehrere Q-Bits miteinander verknüpft – nutzen kann und diese einen echten Vorteil in Bezug auf die Rechenzeit bietet. Wegen der Verschränkung muss nicht mehr Element für Element miteinander verglichen werden, sondern man sieht alle oder zumindest Gruppen von Elementen auf einmal. Um die Überlegenheit nachzuweisen, muss zudem ein Korrektheitskriterium für das Ergebnis der Rechnung definiert sein. Was kann man zu den bisherigen Versuchen sagen?

Die heftigsten Schlagzeilen hat der erste Versuch von Google im Jahr 2019 erzeugt. Google hat einen Quantenchip Sycamore mit 53 Q-Bits entwickelt (Arute et al., 2019). Diese zeichnen sich durch eine hohe Schaltgenauigkeit (>99%) und die Möglichkeit der Entkopplung einzelner Quantenbits aus. Für den Nachweis hat Google ein sinnfreies Problem „Random number sampling“ gewählt, in dem Quantengatter in zufälliger Reihenfolge hintereinander ausgeführt werden. Ab 50 Bits kann man erwarten, dass es eine deutliche Überlegenheit des Quantencomputers durch Möglichkeiten der Überlagerung und Verschränkung gibt. Das Resultat der zufällig ausgewählten Rechnung ist ein Bitstring mit 53 Stellen mit zufällig verteilten 0 und 1, man kann es als eine Zufallszahl interpretieren. Gesucht ist die Wahrscheinlichkeitsverteilung aller möglichen Bitstrings, die das Ergebnis dieser Rechnung sein können (oder die Wahrscheinlichkeit der einzelnen Zufallszahlen). Die Rechendauer betrug 200s. Die Korrektheit des Ergebnisses wurde dadurch plausibel gemacht, dass die Ergebnisse auf dem Quantencomputer mit denen auf einem klassischen Computer bei dem gleichen Problem mit wenigen Q-Bits miteinander verglichen wurden und der Transfer zu vielen Q-Bits vollzogen wurde. Nach einer Abschätzung von Google würde ein klassischer Supercomputer 10.000 Jahre für diese Berechnung benötigen. IBM hat diesem widersprochen und eine Realisierung auf einem klassischen Computer vorgeschlagen, die nur 2,5 Tage benötigt. Dennoch bleibt ein klarer Zeitvorteil für den Quantencomputer.

Der zweite Versuch wurde 2020 von chinesischen Wissenschaftlern durchgeführt (Zhong et al., 2020). Sie realisierten den Boson-Sampling Algorithmus, der 2013 als Möglichkeit für den Nachweis von Quantenüberlegenheit vorgeschlagen wurde (Aaronson and Arkhipov, 2013) und von dem bewiesen wurde, dass er nicht in polynomialer Zeit auf einem klassischen Rechner gelöst werden kann. In diesem Fall wurde als „Quantencomputer“ ein optisches Feld realisiert, das gleichzeitig von Photonen durchlaufen wird. Der jeweilige Auftreffort der Photonen wird durch Detektoren nachgewiesen. Die Frage war: Wie häufig wird welcher Weg durch das „optische Feld“ genommen? Auch hier geht es um die Berechnung einer Wahrscheinlichkeitsverteilung des Ergebnisses, die klassisch bei hinreichend vielen Bits nicht mehr in endlicher Zeit berechnet werden kann. Es wurden letztendlich gleichzeitig bis zu 76 Photonen durch das optische Feld (300 Strahlteiler, 75 Spiegel) geschickt. Man hat den „Quantencomputer“ 200s lang rechnen lassen. Die klassische Rechenzeit wurde mit 2,5 Mrd. Jahren abgeschätzt. Hier besteht der Einwand, dass es sich nicht um einen universellen Quantencomputer, sondern um eine spezielle Anordnung für eine spezielle „Rechnung“ handelt.

An diesen vielen Fragezeichen sieht man, dass auf diesem aktiven Forschungsfeld noch zahlreiche spannende und wohl auch überraschende Entwicklungen zu erwarten sind, die letztlich Auswirkungen haben werden, die auf die Gesellschaft als Ganzes wirken.

2. Quanteninformatik und Allgemeinbildung

Wegen dieser gegenwärtigen und zukünftigen Bedeutung der Quanteninformatik wird in diesem Artikel ihre Entwicklung aus der Perspektive der Schule beleuchtet und damit zusammenhängende Aufgaben für die Physikdidaktik angesprochen. Es stellt sich prominent die Frage, wie sich der bisherige Unterricht über Quantenphysik/ Quantentheorie im Lichte der modernen Einsichten verändern sollte. Vor allem ist zu beantworten, wie man den allgemeinbildenden Auftrag der Schule im Hinblick auf den Unterricht über Quantenphysik neu definieren kann oder muss, und zugleich der dynamischen Entwicklung in der Quanteninformatik Rechnung tragen kann. Dabei erweist sich als günstig, dass gerade die physikalisch-mathematischen Grundlagen und Kernkonzepte der Quantentheorie für die Quanteninformatik zentral sind, wie in Abb. 3 symbolisiert wird: QT kann die Abkürzung von Quantentheorie wie auch Quantentechnologie zugleich sein.

Ganz grundsätzlich gehört es zu den Aufgaben des Physikunterrichts, Schülern zu ermöglichen, die Bedeutung und Relevanz aktueller Entwicklungen im Kontext einer wohl fundierten Allgemeinbildung nachzuvollziehen. Inhalte zum Quantencomputer begegnen interessierten Schülern auf z. B. Youtube und anderen Plattformen. Dies verdeutlicht, dass

physikalische Fragen und daraus folgende technologische Entwicklungen aus der Grundlagenforschung akut relevant im Sinne von „mitreden können“ sind.



Abb. 3: Doppeldeutigkeit der Abkürzung QT

Jedoch bedürfen diese Quellen sehr unterschiedlicher Qualität der Einordnung auf der Basis der Kenntnis von Grundlagen, die in der Schule oder in systematisch angebotenen außerschulischen Angeboten gelegt werden sollten, um möglichst vielen Schülern den Weg zu einem Verständnis dieser Technologie zu ermöglichen. Dieses Ziel wird gestützt durch die Bildungsstandards für die Allgemeine Hochschulreife (Kultusministerkonferenz, 2020), die eine umfassende Diskursfähigkeit in Bezug auf Physik und physikalisch-technische Anwendungen fordern. Die Bildungsstandards haben insgesamt die fachkompetente Schülerin im Blick, die sowohl über Grundlagen in Wissen und Können verfügt und physikalische Konzepte und Methoden beherrscht, als auch die Aufgeschlossenheit und Kenntnisse entwickelt, um sich Wissen zu erschließen und zudem verfolgen zu können, wie sich Wissenschaft, hier die Quantenphysik, stetig weiter entwickelt. Inhaltlich haben die Bildungsstandards behutsam den Weg zu einem modernen Zugang zur Quantenphysik geöffnet, indem manche Traditionen bewusst nicht mehr erwähnt, neue Möglichkeiten aber angesprochen werden.

2.1 Kernelemente der Quantenphysik im Unterricht: Philosophie oder Technologie?

Im Zentrum der schulischen Bildung steht die Allgemeinbildung und bezogen auf den Physikunterricht die Herausbildung eines adäquaten physikalischen Weltbildes bei Schülern. Folgerichtig geht es eher um das Funktionsprinzip des Quantencomputers, aber nicht unbedingt um das Wissen über die Technik oder seine Realisierung. Ein Kernziel des Unterrichts zur Quantenphysik muss daher die Vermittlung der Grundlagen und Unterschiede von klassischem und quantenphysikalischem Weltbild sein, das manche der vergangenen Debatten hinter sich lässt. Schon v. Weizsäcker sprach davon, dass die Trauerarbeit zum Verlust des klassischen Weltbildes überwunden werden müsse (v. Weizsäcker 1985, S. 539). Um diese Ziele zu erreichen, muss es eine Schwerpunktverschiebung in der Schule geben, weg von einem traditionellen Welle-Teilchen-Dualismus oder einem Schwerpunkt auf der Atomphysik hin zu einem modernen Zugang beispielsweise über die Quantenoptik für ein adäquates Verständnis der

Quantenphysik, auch in Relation zur klassischen Physik. Dazu trägt die mittlerweile gewonnene Klarheit über die Begriffe der Quantenphysik entscheidend bei und prägt entsprechende Unterrichtskonzepte. In diesen werden quantenphysikalische Prozesse nicht mystifiziert, sondern man geht pragmatisch mit den Eigenschaften von Quantenobjekten um. Dies ermöglicht es, ihre spannenden Anwendungen zu verstehen und dabei zugleich die Besonderheiten der Quantenphysik hervorzuheben, die diese Eigenschaften erst ermöglichen. Dazu scheint die Quanteninformatik ein passendes Thema. Denn sie ist nicht nur faszinierend, sondern ihre Grundlagen: Überlagerung, Messprozess, Unbestimmtheit und vor allem die Verschränkung sind zugleich die zentralen Konzepte der Quantenphysik überhaupt. Gerade diese Kerneigenschaften der Quantenphysik, zu denen es keinen Gegenpart in der klassischen Physik gibt, eröffnen erst die neuen Möglichkeiten in den Quantentechnologien. Damit stellt sich nicht die Frage, ob man Philosophie – die Andersartigkeit der Quantenphysik – oder die Technologie – ihre Anwendungen – behandelt, sondern nur wie man sie am besten miteinander verknüpft. Zudem lassen unterschiedliche Interessen der Schüler die Antwort auf die Frage „Philosophie oder Technologie“ nicht zu einem „entweder oder“ werden, sondern regen eher die Suche nach möglichen Schwerpunkten an.

2.2 Verknüpfung von Quanteninformatik und quantenphysikalischen Konzepten

Um die entsprechende Schwerpunktbildung im Sinne der Allgemeinbildung zu sichern und jenseits jeglicher Mystifizierung die Grundlagen der Quantenphysik pragmatisch darzustellen, muss genau herausgearbeitet werden, in welcher Weise die Kernbegriffe der Quantenphysik – Überlagerung, Unbestimmtheit und Verschränkung sowie Messprozess – konstitutiv für die Quantenkryptographie und ihre Sicherheit oder den Quantencomputer und seine besondere Leistungsfähigkeit sind. Dazu werden sie im Unterricht, auch mit Hilfe von Visualisierungen oder Metaphern (s. Abschnitt 3.3) physikalisch charakterisiert und es wird gezeigt, wie sie mathematisch konkret und eindeutig beschrieben werden können. Die mathematisch-formale Beschreibung ist auch insofern wichtig, als sie die Unvereinbarkeit konkretisiert, aber mehr bestimmend für das Wesen der Physik ist und einer eventuellen Mystifizierung den Boden entzieht. Dabei ist der Modellcharakter aller Beschreibungen zu thematisieren. Insbesondere geht es darum, den Schülern die Unterschiede der quantenphysikalischen Sichtweise zur klassischen explizit deutlich zu machen.

Beispiel Quantenkryptographie

Am Beispiel der Quantenkryptographie lässt sich die Möglichkeit einer Verknüpfung besonders gut erläutern (s. Abb. 4). Zur Verschlüsselung eines Texts oder eine Nachricht mit Hilfe eines One-Time-pads mit einem binären Schlüssel werden Bits benötigt,

also zwei-wertige Größen. Im Quantenkontext werden diese durch Q-Bits mit ihrem Zustandsraum ersetzt. Um den perfekten Zufallsschlüssel, eine unvorhersagbare oder berechenbare Folge von 0 und 1 zu erhalten, benötigt man die Überlagerung und die Zufälligkeit der Messergebnisse. Beim sicheren Schlüsselaustausch hilft gemäß dem BB84 Protokoll die Unbestimmtheit. Das No-Cloning Theorem (Wootters & Zurek 2009) stellt sicher, dass der eine oder andere mögliche Trick des Spions, wie z. B. das Kopieren und Speichern der Zufallsfolge nicht funktionieren können (Pospiech, 1999, 2021). Damit spielen in der Quantenkryptographie bis auf die Verschränkung die zentralen Konzepte der Quantenphysik eine wichtige Rolle.



Abb.4: Beispiel Quantenkryptographie. Die Aspekte der Anwendung sind gelb markiert, die physikalischen Grundlagen blau. Diese werden eingeführt, wenn eine Fragestellung aus der Anwendung die Nutzung erfordert.

Beispiel Quantencomputer

Wegen der Komplexität und der Aktualität der Diskussion kann sich ein längerer Exkurs zum Quantencomputer lohnen. Auch hier lassen sich die Anwendung und die Grundlagen der Quantenphysik eng miteinander verknüpfen (Abb. 5). Dabei können auch Parallelen zum klassischen Computer genutzt werden, die die Notwendigkeit logischer Gatter zeigen. Zusätzlich zu den Eigenschaften, die zur Quantenkryptographie benötigt werden, muss man hier noch als weitere Eigenschaften der Quantenphysik nutzen: die Reversibilität des Zeitablaufs und die Verschränkung, die in passender Weise erzeugt oder aufgelöst werden muss (Pospiech 2021).

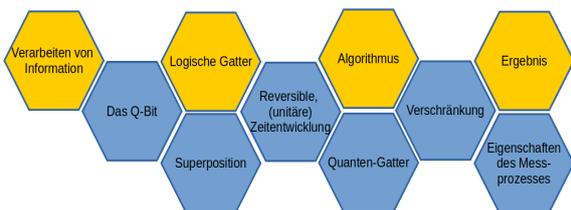


Abb.5: Beispiel Quantencomputer. Die Aspekte der Anwendung sind gelb markiert, die physikalischen Grundlagen blau. Diese werden eingeführt, wenn eine Fragestellung aus der Anwendung die Nutzung erfordert.

Im Unterricht ist also die Entwicklung des physikalischen Weltbildes – hier vor allem bezüglich des Unterschieds von klassischer Physik und Quantenphysik – sehr gut vereinbar mit der Behandlung von technologischen Entwicklungen mit Relevanz für die Gesellschaft als Ganzes. Um dies zu erreichen, muss jeder Unterricht neben der Einführung der Konzepte

„Überlagerung“ und „Unbestimmtheit“ in jedem Falle die Problematik des Messprozesses thematisieren, weil hier der Kern der Unvereinbarkeit von klassischer und Quantenphysik zu Tage tritt, und auch die mathematisch-formale Beschreibung andeuten, da diese letztendlich die Unvereinbarkeit „verursacht“. Bei der Erläuterung des Messprozesses sollte man unbedingt die eingängige Beschreibung durch Dekohärenz berücksichtigen, auch wenn sie den Messprozess nicht vollständig erklärt (Zurek 1991). Die breiten Anwendungsfelder und Bezüge über die Quanteninformatik im engeren Sinne hinaus eröffnen zahlreiche Möglichkeiten für den Unterricht oder auch außerschulische Angebote. Durch die große öffentliche Resonanz wird den Schülern zugleich die Anbindung an den Alltag jenseits konkreter Anwendungen deutlich: Es geht um Mitreden, neues Erfahren und Diskutieren.

3. Aspekte der Vermittlung

Hierbei geht es um die Frage, was der Mehrwert der Quanteninformatik für die Vermittlung (mathematisch)-physikalischer Konzepte der Quantenphysik in der Schule ist. Im Zentrum steht die Akzeptanz der Quantenphysik als einer „normalen“ physikalischen Theorie und die zielgerichtete Nutzung der besonderen Eigenschaften von Quantenobjekten, nämlich Überlagerung, Messprozess, Unbestimmtheit und Verschränkung.

3.1 Zwei-Zustandssysteme

Eine große Rolle spielen dabei Zwei-Zustandssysteme, in der Quanteninformatik als Q-Bits bezeichnet. Diese sind die einfachst möglichen Quantensysteme. Im Sinne der Didaktischen Rekonstruktion kann man an diesem „Spielzeugsystem“ den zentralen mathematisch-physikalischen Kern auf einfachst mögliche Elemente reduzieren. Die Vorteile liegen auf der Hand: Es handelt sich um Systeme, die mathematisch besonders einfach sind, weil sie mit zwei-dimensionalen Vektorräumen beschrieben werden können. Wenn nötig, kann sogar auf die komplexen Zahlen verzichtet werden, auch wenn dadurch die Diskussion von Phasen nur eingeschränkt möglich ist. Man braucht keine Wellenfunktion und keine Schrödingergleichung. Darüber hinaus ist der Zugang auch konzeptionell deutlich einfacher als ein „normaler“ Zugang: Es ist kein Springen zwischen Welle und Teilchen erforderlich, sondern man kann sich vollkommen auf Überlagerung, Unbestimmtheit und Messprozess (im Zusammenspiel von Indeterminismus und Wahrscheinlichkeit) konzentrieren. Damit werden die Prinzipien der Quantenphysik besonders klar sichtbar. Der Vorteile von Zwei-Zustandssystemen ist weiterhin, dass sie sich leicht geometrisch darstellen lassen (s. Abschnitt 3.3) und dass alle Eigen- (d. h. Mess)-werte diskret sind. Zudem können zahlreiche physikalische Systeme nach einer passenden Vereinfachung sehr gut als Zwei-Zustandssystem beschrieben werden (z. B. Atom im Grundzustand und Atom im angeregten Zustand).

Weitere passende Modellsysteme sind der Spin von Elektronen oder Photonen oder auch als Analogie die Polarisation von Photonen, mit deren Hilfe sich sehr gut Modellexperimente durchführen lassen (Pospiech, 1999; Pospiech, 2021). Diese vielfältige Einsetzbarkeit von Zwei-Zustandssystemen erlaubt den Lernenden eine Verknüpfung von Wissensbestandteilen aus unterschiedlichen Gebieten der Physik. Ein Beispiel aus der Elementarteilchenphysik wird im Abschnitt 3.2 knapp erläutert. Die Behandlung der Quanteninformatik, v. a. das Thema Quantencomputer lässt sich direkt mit einem Zugang über Zwei-Zustandssysteme verbinden. Außerdem vermeidet man über diesen Zugang Lernschwierigkeiten mit dem üblichen Zugang über Ort und Impuls (Sadaghiani, 2016) oder der Nutzung von Wellen- und Teilchenmodell, bei dem viel eher die Möglichkeit einer Vermengung mit klassischen Begriffen besteht oder die Quantenphysik als besonders unanschaulich empfunden wird.

3.2 Anwendung: Neutrinooszillationen

Konzepte wie Überlagerung und Unbestimmtheit sind nicht nur innerhalb der Quantenphysik selber von Bedeutung, sondern auch für andere Gebiete der Physik, wie z. B. für die Elementarteilchenphysik relevant. Die Anwendung der gleichen Konzepte in unterschiedlichen Bereichen erlaubt die Verknüpfung von Wissen, kumulatives Lernen und tieferes Verständnis, für das Lernen physikalischer Methoden (Methode des Analogieschlusses) und auch für das Lernen *über* Physik.

Konkret geht es in diesem Abschnitt um die Neutrinooszillationen, deren Beschreibung eng mit quantenmechanischen Argumenten verknüpft ist (Zuber 2015). Es gibt 3 Neutrinoarten mit unterschiedlichem Flavor: e-Neutrino, μ -Neutrino und τ -Neutrino. Diese werden als quantenmechanische Zustände einer Teilchengruppe dargestellt, d. h. sie bilden letztendlich ein 3-Zustandssystem. Damit kann eine Überlagerung von Zuständen der Neutrinos auftreten. Ferner gibt es zwei verschiedene Eigenschaften der Neutrinos, deren feste Bestimmung sich gegenseitig ausschließt: die Masse von Neutrinos und die Neutrinoart. Dies ist als gegenseitige Unbestimmtheit (Inkompatibilität) von Masse und Neutrinoart interpretierbar, d. h. Neutrinos können entweder als Masseeigenzustände oder als Flavoreigenzustände oder in den jeweiligen Überlagerungen auftreten. Zwischen diesen beiden Beschreibungen, mit der Eigenschaft „Masse“ oder der Eigenschaft „Flavor“, kann man mit der sog. Mischungsmatrix hin- und herschalten. In der mathematischen Behandlung lässt sich die Komplexität stark reduzieren, ohne die grundsätzliche Aussage zu verlieren, indem man sich auf zwei Neutrinoarten beschränkt und sich somit ein Zwei-Zustandssystem ergibt (Pospiech 2020, Zuber 2015). Dies erlaubt es, die gleichen mathematischen Methoden einzusetzen, sie damit mehrfach zu nutzen und ihre Macht zu erkennen.

3.3 Möglichkeiten der Visualisierung

Bei der Behandlung sowohl der physikalischen Konzepte wie ihrer mathematischen Beschreibung werden auch qualitative Mittel genutzt, die es Lernenden erlauben, eine Anschauung zu entwickeln und so ein intuitives Hantieren mit der mathematischen Beschreibung ermöglichen. In der Regel ergibt sich ein physikalisch vollständiges Bild erst aus dem Zusammenwirken mehrerer Repräsentationen (Ainsworth, 2008; Geyer and Kuske-Janßen, 2019). Dabei ist nicht gedacht, dass alle Repräsentationen zugleich gezeigt, sondern situationspezifisch eingesetzt werden, auch um eine kognitive Überlastung zu vermeiden.

Repräsentationen

In erster Linie geht es um die Visualisierung von Zwei-Zustandssystemen, wie beispielsweise Spin oder Polarisation. Diese lassen sich auf unterschiedlichen Abstraktionsstufen repräsentieren (s. Abb. 6). Es gibt die Präsentation als Experimentalskizze mit Stern-Gerlach-Apparat oder als Analogieexperiment mit der Polarisation mit Hilfe von Polarisationsfolien. Auch bildlich-symbolische Darstellungen der beiden möglichen Zustände als „up“ und „down“ sind möglich, die sich nahtlos in die Dirac-Notation übertragen lassen. Letztendlich gibt es auch die Darstellung auf der Blochkugel oder, fachlich reduziert, auf dem Blochkreis als geometrisch-mathematisches Modell sowie die Dirac-Notation als algebraisch-mathematisches Modell.

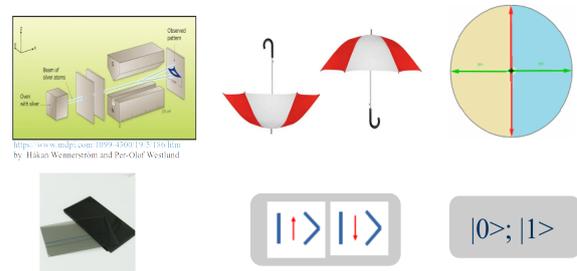


Abb. 6: Darstellungen von Zwei-Zustandssystemen von gegenständlich-bildlich bis zu abstrakt-mathematisch.

Simulationen

Neben diesen statischen Darstellungen sind auch bewegte Darstellungen wichtig, die erlauben, das Verhalten von Zwei-Zustandssystemen nachzuvollziehen. Dazu sind zum einen interaktive Bildschirmexperimente zu nennen (www.quantumlab.de) oder auch Simulationen in einer symbolischen Darstellung, die entsprechende Experimente schematisch umsetzen (www.st-andrews.ac.uk/physics/quvis/). Hierbei werden die Simulationen mit Tutorials eingebettet, die dabei unterstützen, sich mit der Simulation vertraut zu machen und systematisch mit ihr zu arbeiten (Kohnle et al., 2015; Kohnle et al., 2014). Dazu werden Aufgaben angeboten oder Parametervariationen ermöglicht. Die Simulationen der Quvis-Seite ermöglichen einen Einstieg in das Verständnis

quantenphysikalischer Konzepte mit unterschiedlichen Zugängen und auf unterschiedlichen Niveaus.

Modelle, Analogien, Metaphern

Wie überall in der Physik spielen Modelle und vor allem ihre bewusste Nutzung eine wichtige Rolle für die Beschreibung auch der quantenphysikalischen Prozesse. Gerade bei Quantenobjekten muss der Modellcharakter der Beschreibung und Interpretation zu jedem Zeitpunkt bewusst sein, da immer zwischen dem Quantenobjekt als solchem (ontologische Ebene) und dem, was man über es (aufgrund von Messprozessen) wissen kann (epistemische Ebene). Man würde also nie sagen: Das Quantenobjekt verhält sich als Teilchen oder Welle, sondern immer: Man beschreibt die beobachteten Ergebnisse mit dem Teilchenmodell oder mit dem Wellenmodell. Es werden explizit keine Aussagen über die Natur des Quantenobjekts getroffen.

Analogien sind eine spezifische Form von Modellen. Sie verfügen (innerhalb der Physik) über ähnliche physikalische oder mathematische Strukturen wie das Original. Im Zusammenhang mit Zwei-Zustandssystemen kann man die Polarisation als Analogie für den Spin verwenden. Demgemäß wird die Blochkugel resp. Blochkreis, die eigentlich für die Beschreibung der Polarisation eingeführt wurden, für die Beschreibung des Spins und des Q-Bits verwendet.

Oft findet man auch Metaphern. Diese nutzen Vergleiche aus physikfremden Bereichen und können daher zur Veranschaulichung genutzt werden, ohne Interferenzen mit klassisch-physikalischen Vorstellungen zu erzeugen. Jedoch muss man auch hier sorgfältig Nachteile des Einsatzes abwägen (Brookes and Etkina, 2007; Pospiech, 2019)

4. Erste Konzeptionen für den Unterricht

Es wurde erläutert, dass Zwei-Zustandssysteme als eine Art Spielzeugsystem geeignet sind, die wesentlichen Konzepte der Quantenphysik zu erlernen, auch weil sich mit ihnen die mathematische Komplexität auf das absolut Notwendige reduzieren lässt. Es gibt erste Hinweise, dass ein solcher Zugang sogar das Verständnis erleichtert (Sadaghiani, 2016). Für die methodische Umsetzung im Physikunterricht sind die beschriebenen Möglichkeiten zum Schaffen von inneren Bildern: der bewusste Einsatz von Modellen, die Nutzung multipler Repräsentationen sowie der Einsatz von Simulationen zu nutzen. Ferner gibt es Anknüpfungspunkte über die Quantenkryptographie zum „täglichen Leben“. Um zu überprüfen, wie dieses Thema mit der direkten Möglichkeit einer Verbindung von Anwendung und grundlegenden Begriffen als Einstieg in die Quantenphysik aufbereitet werden kann, wurden zwei kleine Studien durchgeführt, eine zur Einführung der Dirac-Notation sowie ein Kurs zur Quantenkryptographie für Schüler, die noch keinen Unterricht in Quantenphysik erhalten hatten.

4.1. Einführung der Mathematik/ Dirac-Notation

In einem ersten Schritt wurde eine Akzeptanzbefragung zur Dirac-Notation durchgeführt, da sie relevant für die Beschreibung von Zwei-Zustandssystemen und die mathematischen Vorhersagen in Bezug auf die Sicherheit der Quantenkryptographie sind (Müller, 2019). Die Befragung im Umfang von ein bis zwei Stunden umfasste:

- Einführung der Schreibweise und Rechenregeln
- Veranschaulichung mit Hilfe des Blochkreises (Verzicht auf komplexe Zahlen)
- Einführung der Wahrscheinlichkeit und ihrer Berechnung
- Besprechung des Messprozesses
- Ausblick: No-Cloning-Theorem

An der Befragung nahmen sieben Schüler aus den Klassenstufen 10-12 jeweils alleine oder zu zweit teil. Die Sitzungen wurden aufgenommen und transkribiert. Die Auswertung der Äußerungen der Schüler und ihrer Bearbeitung der gegebenen Aufgaben wurde aufgrund der Transkription durchgeführt.

Aspekt	Punktwert	Bemerkung
Handhabung der Notation	25/ 1,8	Kleinschrittiges Vorgehen notwendig
Umgang mit Kets	26/ 1,7	
Rechenfertigkeiten	17/ 1,4	
Akzeptanz der Visualisierung	22/ 2,0	
Zustand und Basis	26/ 1,7	Explizite Verbindung von Mathematik und Physik notwendig
Interpretation der Rechnungen	20/ 1,7	
Einstellung zur Quantenkryptographie	10/ 2,0	

Tab.1: Ergebnisse der Akzeptanzbefragung: Die linke Spalte enthält die Auswertungskategorien. In der zweiten Spalte ist der Punktwert aufgelistet (Beschreibung im Text). In der dritten Spalte finden sich zentrale Schlussfolgerungen.

Die Ergebnisse wurden nach vier Hauptkategorien analysiert, die deduktiv-induktiv generiert wurden. Dabei ergaben sich die Kategorien:

- technische Fertigkeiten, überhaupt mit der Notation umzugehen
- Akzeptanz der Visualisierung durch den Blochkreis
- Verständnis der physikalischen Grundlagen
- Verbindung von mathematischen Rechnungen und physikalischer Bedeutung

Zum Schluss wurde insgesamt nach der Einstellung zur Quantenkryptographie als Unterrichtsthema gefragt. Die Akzeptanz wurde mit einem Punktwert abgebildet. Der Punktwert, der in der Tabelle 1 in Spalte 2 angegeben ist, ergibt sich aus der Zahl der notwendigen Erklärungsschritte während der Befragung, bis die Schüler zufrieden waren, und dem letztendlich erreichten Niveau. Dabei wurden die Punktwerte aller Teilnehmer addiert. Die Punkte wurden dann durch die Zahl der notwendigen Erklärungsschritte dividiert. Ein hoher Punktwert und ein relativ geringer Quotient zeigen demnach, dass das

Ziel der Erklärung erreicht wurde, dass aber viele Schritte benötigt wurden, d. h. es ist ein kleinschrittiges Vorgehen angeraten. Der geringe Punktwert und kleine Quotient in der Kategorie „Rechenfertigkeiten“ ist darauf zurückzuführen, dass eigentlich erwartete Grundlagen, vor allem das Rechnen mit Klammern, fehlten. Der geringere Punktwert bei „Interpretation“ deutet daraufhin, dass hier noch Optimierungsbedarf besteht. Der geringe Punktwert und hohe Quotient in der Kategorie „Visualisierung“ bedeutet eine große Akzeptanz und insgesamt eine positive Einstellung. Dies betont, dass Visualisierungen wichtig und hilfreich sind. Vor allem die bildliche Darstellung der Zustände am Blochkreis wird gut akzeptiert. Als Hilfestellung wurde diese mit „Tankanzeige“ bezeichnet. Der Blochkreis wurde mit Darstellungen mit Hilfe von Koordinatensystemen ergänzt, die eine konkretere Vorstellung und eine Anknüpfung an die bekannten Regeln der Vektorrechnung erlaubte. Ein wichtiger Teil der Akzeptanzbefragung waren konkrete, einfache Berechnungen mit der Dirac-Notation. Die Schreibweise wurde durchweg als eingängig empfunden, jedoch erwies sich kleinschrittiges Vorgehen und Üben als notwendig. Dabei zeigte sich die Sicherstellung der mathematisch-technischen Grundlagen als wichtig, vor allem die Wiederholung des Distributivgesetzes, da die entsprechenden Regeln zum Beispiel für die Berechnung von Wahrscheinlichkeiten notwendig sind. Bemerkenswert war auch, dass Schüler:innen aus 10. Klasse der Umgang mit dem Blochkreis leichter fiel als älteren Schülern, möglicherweise, da ab der 11. Klassenstufe das Erlernen der Vektorrechnung mit der Darstellung am Blochkreis interferierte.

Die Ergebnisse der Akzeptanzbefragung deuten daraufhin, dass man auf das intuitive Handhaben der Dirac-Notation seitens der Schüler vertrauen kann. Dies ist beispielsweise vergleichbar der Einführung der Kraft in Klassenstufe 7 als Größe mit Betrag und Richtung und ihrer Darstellung mit Pfeilen. So wird eine vektorielle Größe eingeführt, ohne dass gleich die Vektorraumaxiome eingeführt werden.

4.2 Einführung Quantenkryptographie

Auf der Basis der Ergebnisse aus der Akzeptanzbefragung zur Dirac-Notation wurde ein Kurs zur Quantenkryptographie gemäß des in Abschnitt 2.2. dargestellten Ablaufs entwickelt (Neumann, 2020). Wegen der Corona-Epidemie konnte der Kurs nicht so umfangreich eingesetzt werden wie ursprünglich geplant. Daher nahmen nur 6 Schüler teil. Die Umsetzung zeigte keine Probleme mit der Mathematisierung, da hier kleinschrittig vorgegangen wurde und der Kurs sich auf die einfachsten Fälle beschränkte. Allerdings hätte man für die konzeptionelle Erarbeitung von Unbestimmtheit und Messprozess mehr Zeit einplanen müssen. Bei der Durchführung zeigte sich, dass die Schüler auch großes Interesse an der technischen Realisierung hatten.

5. Fazit und Ausblick

Die 2. Quantenrevolution ... kam auf leisen Sohlen, getrieben von Fragen nach den Grundlagen der Quantenphysik und ihrer Bedeutung für unser Weltverständnis Und (zunächst) **nicht**: weil man konkrete Anwendungen entwickeln wollte. Es wurde ausgeführt, dass es möglich ist, bei der Behandlung aktueller Themen der Quantentechnologie, wie der Quanteninformatik, auf Aspekte der Allgemeinbildung, die Grundlagen der Quantenphysik und die Unterschiede zur klassischen Physik einzugehen und damit bewusst ein breites physikalisches Weltbild der Schüler zu fördern. Die Behandlung der Quanteninformatik hat damit das Potential, (physikalische) Allgemeinbildung mit einem spezifischem Ausblick auf neue Technologien und zugehörige Berufsfelder zu verknüpfen.

Eine Herausforderung für die Physikdidaktik ist die Grundlagenforschung über das Lernen von Quantenphysik anhand von Zwei-Zustandssystemen im Schnittpunkt der verschiedenen Disziplinen, wie z. B. Informatik. Dies zieht Forschungs- und Entwicklungsaufgaben auf unterschiedlichen Ebenen nach sich, wie die theoriebasierte Entwicklung und Erprobung vielgestaltiger Angebote für unterschiedliche Zwecke (Outreach oder Schule) und Zielgruppen (Hochschule oder Schule, Spezialisierung oder Allgemeinbildung). Die Angebote können unterschiedliche Materialien, Medien und Vermittlungswege nutzen, wie Präsenz- oder online-Angebote sowie Möglichkeiten des Blended Learning. Inhaltlich reicht die Spannbreite möglicher Angebote von eher theoretischer Ausrichtung hin zu Angeboten mit Praktika. Die Kursmodule sollten sich jeweils auf individuelle inhaltliche Schwerpunkte konzentrieren.

Das Einsatzfeld der zu entwickelnden Angebote umfasst damit neben der Schule auch Studiengänge wie beispielsweise ingenieurwissenschaftliche Disziplinen, weil absehbar auch weitere Berufszweige zumindest ein Grundverständnis der in den Quantentechnologien, darunter Quanteninformatik verwendeten Prinzipien und Techniken haben sollten, um diese Entwicklung verstehen und vorantreiben zu können. Zudem erfordert das Feld der Quantentechnologien, darunter die Quanteninformatik, das Zusammenspiel zahlreicher Disziplinen wie Physik, Informatik, Ingenieurwissenschaften, Chemie, und anderen Gebieten. Auch hier besteht die Aufgabe darin, für sehr unterschiedliche Adressatengruppen passgenaue Angebote in schuldidaktischer und hochschuldidaktischer Perspektive zu entwickeln und zu evaluieren.

6. Literaturverzeichnis

- Aaronson, Scott; Arkhipov, Alex (2013): The Computational Complexity of Linear Optics. In: Theory of Computing 9, 1, 143-252.
- Ainsworth, Shaaron (2008): The Educational Value of Multiple-representations when Learning Complex Scientific Concepts. In: Visualization:

- Theory and Practice in Science Education (Dordrecht: Springer Netherlands, 2008), S. 191-208.
- Ambach, Yannic (2010): Vom klassischen Computer zum Quantencomputer. Facharbeit. S 45 ff.
- Arute, Frank et al (2019): Quantum supremacy using a programmable superconducting processor. *Nature* 574, 7779, 505-510.
- Aspect, Alain (2015): Viewpoint: Closing the Door on Einstein and Bohr's Quantum Debate. *Physics* 8, 123, URL: <http://physics.aps.org/articles/v8/123?from=singlemessage&isappinstalled;=0>
- Aspect, Alain; Grangier, Philippe; Roger, Gerard (1982): Experimental realization of Einstein-Podolsky-Rosen-Gedankenexperiment: A new violation of Bells inequalities. *Physical Review Letters* 49, 2, 91-94.
- Bell, John S. (1964): On the Einstein-Podolsky-Rosen Paradox. *Physics* 1, 195-197.
- Bouwmeester, Dirk; Ekert, Artur; Zeilinger, Anton (2001): *The Physics of Quantum Information*. Berlin Heidelberg New York: Springer Verlag.
- Bouwmeester, Dirk; Pan, Jian-Wei; Mattle, Klaus; Eibl, Manfred; Weinfurter, Harald; Zeilinger, Anton (1997): Experimental quantum teleportation. *Nature* 390, 575-579. <https://doi.org/10.1038/37539>
- Brookes, David T; Etkina, Eugenia (2007): Using conceptual metaphor and functional grammar to explore how language used in physics affects student learning. *Physical Review Special Topics-Physics Education Research* 3, 1, 010105. <https://journals.aps.org/prper/abstract/10.1103/PhysRevSTPER.3.010105>
- Geyer, Marie-Annette; Kuske-Janßen, Wiebke; (2019): *Mathematical Representations in Physics Lessons*. In: *Mathematics in Physics Education*. Cham: Springer International Publishing, S. 75-102.
- Homeister, Matthias (2018): *Quantum Computing verstehen: Grundlagen – Anwendungen – Perspektiven*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Jaeger, Lars (2018): *Die zweite Quantenrevolution: Vom Spuk im Mikrokosmos zu neuen Supertechnologien*. Berlin, Heidelberg: Springer. <http://link.springer.com/10.1007/978-3-662-57519-2>
- Kagermann, H.; Süssenguth, F.; Körner, J.; Liepold, A. (2020): *Innovationspotentiale der Quantentechnologien der zweiten Generation*, acatech Impuls. <https://www.acatech.de/publikation/innovationspotentiale-der-quantentechnologien/>
- Kohnle, Antje; Baily, Charles; Ruby, Scott (2014): Investigating the influence of visualization on student understanding of quantum superposition. arXiv preprint, <https://arxiv.org/abs/1410.0867>
- Kohnle, Antje; Baily, Charles; Campbell, Anna; Korkova, Natalia; Paetkau, Mark J. (2015): Enhancing student learning of two-level quantum systems with interactive simulations. *American Journal of Physics* 83, 6, 560--566.
- KMK (2020): *Bildungsstandards im Fach Physik für die Allgemeine Hochschulreife*. <https://www.kmk.org/themen/qualitaetssicherung-in-schulen/bildungsstandards.html#c2604>
- Montanaro, Ashley (2016): Quantum algorithms: an overview. *npj Quantum Information* 2, 1, 1--8.
- Müller, Christian (2019): *Planung einer Unterrichtseinheit zur Quantenkryptografie und Akzeptanzanalyse der Dirac-Notation*. Wissenschaftliche Hausarbeit, TU Dresden.
- Neumann, Caroline (2020): *Einstieg in die Quantenphysik über die Quantenkryptografie – Erarbeitung und Erprobung einer Unterrichtseinheit*. Wissenschaftliche Hausarbeit, TU Dresden.
- Pan, Jian-Wei; Bouwmeester, Dirk; Daniell, Matthew; Weinfurter, Harald; Zeilinger, Anton (2000): Experimental Test of Quantum Nonlocality in three-photon Greenberger-Horne-Zeilinger Entanglement. *Nature* 403, 515--519.
- Pospiech, Gesche (1999): *Quantenkryptographie. Ein elementarer Zugang zur Quantentheorie*. *Physik in der Schule* 37, 3, 201--205.
- Pospiech, Gesche (1999): Teaching the EPR paradox at high school?. *Physics Education* 34, 5, 311ff.
- Pospiech, Gesche (2019): *Pre-Service Teacher's Views on the use of Metaphors for Describing the Concepts of Uncertainty and Entanglement*. *International Journal of Physics & Chemistry Education* 11, 1, 1--5.
- Pospiech, Gesche (2020) *Neutrinoszillationen*. *Naturwissenschaften im Unterricht - Physik* 180, 21--23.
- Pospiech, Gesche (2021) *Quantencomputer & Co: Grundideen und zentrale Begriffe der Quanteninformation verständlich erklärt*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Sadaghiani, Homeyra R (2016): *Spin First vs. Position First instructional approaches to teaching introductory quantum mechanics*. In: *Physics Education Research Conference Proceedings (Compadre)*, S. 292--295.
- Shor, Peter W. (1994): *Algorithms for quantum computation: Discrete logarithms and factoring*. In: *Proceedings 35th annual symposium on foundations of computer science (IEEE, 1994)*, S. 124--134.
- Steger, Uwe (2019): *Quantencomputer "Made in Austria" kommt*. Innsbruck. <https://life-science.eu/quantencomputer-made-in-austria-kommt/>.
- Von Weizsäcker, C. F. (1985). *Aufbau der Physik*. München: Hanser.
- Wootters, William K; Zurek, Wojciech H (2009): *The No-Cloning Theorem*. *Physics Today* 62,2, 76--77.

- Zhong, Han-Sen; et al (2020): Quantum computational advantage using photons. *Science* 370, 6523,1460--1463.
- Zuber, Kai (2015): Neutrinos–die Akte X der Teilchenphysik: Ergebnisse von Oszillationsexperimenten. *Physik in unserer Zeit* 46, 1,18–26.
- Zurek, Wojciech (1991): Decoherence and the Transition from Quantum to Classical. *Physics Today*, 36–44. <https://doi.org/10.1063/1.881293>