



Dieser „Keil“ aus dem Quantenkoffer lässt sich automatisch in den Strahl fahren, um die optische Weglänge präzise einzustellen, z. B. im Hong-Ou-Mandel-Interferometer.

Quantentechnologien im Lehrplan

Welche Rolle sollten aktuelle Anwendungen der Quantenphysik in der Schule spielen?

Rainer Müller, Franziska Greinert, Malte S. Ubben und Stefan Heusler

Sollten Anwendungen von Quantentechnologien in das Schulcurriculum eingehen? Da sich dieses nur langsam ändert, kann es bei dieser Frage nicht darum gehen, bewährte Unterrichtskonzepte grundsätzlich infrage zu stellen, sondern darum, gute Brücken zu neuen Anwendungsmöglichkeiten aufzuzeigen.

Im internationalen Vergleich hat Deutschland in Bezug auf die Quantenphysik in der Schule eine sehr gute Ausgangsposition. Hier gibt es jahrzehntelange Erfahrungen in den Schulen sowie fachdidaktische Forschung zu Schülervorstellungen und zur Wirksamkeit von Unterrichtskonzepten in der Quantenphysik. So haben sich die Lehrpläne in den meisten Bundesländern inzwischen über den historischen Zugang hinaus entwickelt. Das Doppelspaltexperiment mit einzelnen Quantenobjekten und die statistische Deutung der Quantenphysik sind inzwischen meist Standard. Auch Begriffe wie Nichtlokalisierbarkeit von Quantenobjekten oder Komplementarität kommen vor allem in Leistungskursen zur Sprache.

Aber in vielen europäischen Ländern ist noch der rein historische Zugang verbreitet – wenn denn die Quantenphysik an den Schulen überhaupt ein Thema ist [1]. Dieser Zugang orientiert sich meist weniger an der tatsächlichen Ideengeschichte, sondern an einer Abfolge einiger historischer Experimente, die mit Schulmitteln nachvollziehbar sind – vom Photoeffekt über den Franck-Hertz-Versuch bis zur Elektronenbeugung. Angesichts der Bedeutung von Experimenten für den Erkenntnisfortschritt in der Physik erscheint das zunächst vernünftig. Die Fachdidaktik hat jedoch schon früh erkannt, dass im Fall der Quantenphysik Unterrichtskonzeptionen nötig sind, die darüber hinausgehen. Denn die Quantenphysik widerspricht in so hohem Maße unseren Denkgewohnheiten, dass die Lehrkräfte den Schülerinnen und Schülern weitergehende Denk- und Verständnisangebote machen müssen. Ein reflektierter Umgang mit den klassischen Modellvorstellungen sowie ein sorgfältiger Umgang mit der Sprache sind hierbei unerlässlich – denn unsere Alltagssprache eignet sich nur bedingt, um Quantenphänomene adäquat zu beschreiben.

Eine erste Unterrichtskonzeption in diese Richtung schlugen Alto Brachner und Richard Fichtner vor [2, 3]. In dem auch für damalige Verhältnisse relativ anspruchsvollen Konzept ist aus heutiger Sicht eine sprachliche Argumentationshilfe zentral. Dieses Fundamentalprinzip erläuterten die Autoren am Beispiel der Welcher-Weg-Information beim Doppelspaltexperiment: „Gibt es verschiedene Möglichkeiten (Wege) für das Eintreten eines bestimmten Ereignisses und wird durch die Versuchsanordnung nicht festgelegt, dass ausschließlich eine bestimmte Möglichkeit gewählt wurde, so tritt immer Interferenz auf. Hinterlässt dagegen jedes Ereignis an der Versuchsanordnung eindeutig ein bestimmtes Merkmal, durch das entschieden werden kann, welche der verschiedenen Möglichkeiten gewählt wurde, dann tritt nie Interferenz auf.“ Diese Idee hatte auch Richard Feynman zuvor in seinen Lectures ausgesprochen [4]. Neu ist bei Brachner und Fichtner jedoch der Ansatz, dieses Prinzip als nichtmathematische Argumentationshilfe für Schülerinnen und Schüler zu verwenden, da diesen die Mathematik der Quantenphysik nicht zur Verfügung steht.

Speziell in den 1990er-Jahren war die Quantenphysik eines der zentralen fachdidaktischen Forschungsgebiete. Die Fachdidaktik orientierte sich in dieser Zeit stark an Forschung zu Schülervorstellungen und Lernschwierigkeiten. Hierbei erwies sich die Quantenphysik als sehr fruchtbar. In verschiedenen Arbeitsgruppen entstanden Unterrichtskonzepte wie das Berliner, das Bremer und das Münchener Konzept, die in empirischen Untersuchungen teils aufwändig bezüglich ihrer Lernwirksamkeit evaluiert wurden [5]. Auch das Zeigerkonzept, in dem Wahrscheinlichkeitsverteilungen am Doppel- und Mehrfachspalt durch grafische Zeigeraddition berechnet werden, entstand in dieser Zeit.

Das Münchener Konzept „milq“ vermittelt einen Übergang zur modernen Sichtweise der Quantenphysik und konzentriert sich auf konzeptionelle Fragen [6, 7]. Schülerinnen und Schüler setzen sich dabei mit dem Weltbild der modernen Physik auseinander, welches die Quantenphysik gegenüber der klassischen Physik radikal verändert hat. Demgemäß stehen vor allem diejenigen Aspekte im Fokus, die einen radikalen Bruch mit den klassischen Konzepten

bedeuten, wie die Born'sche Wahrscheinlichkeitsinterpretation, die eine Abkehr vom klassischen Determinismus ist, und die Existenz von Superpositionszuständen, in denen sich Quantenobjekten keine klassisch wohldefinierten Eigenschaften wie Position, Bahn oder Energie zuschreiben lassen. Die empirische Evaluation des Konzepts zeigte, dass Schülerinnen und Schüler in der Lage sind, quantenmechanisch adäquate Sichtweisen zu entwickeln und klassische Vorstellungen zu überwinden [7].

Im Zusammenhang mit dem milq-Konzept wurden die „Wesenszüge der Quantenphysik“ formuliert [8]. Diese prägnanten Merksätze geben Schülerinnen und Schülern eine Orientierung über die zentralen Inhalte der Quantenphysik und ein Werkzeug, auf das sie in Diskussionen, Argumentationen und beim Lösen qualitativer Aufgaben zurückgreifen können. Die vier Wesenszüge sind:

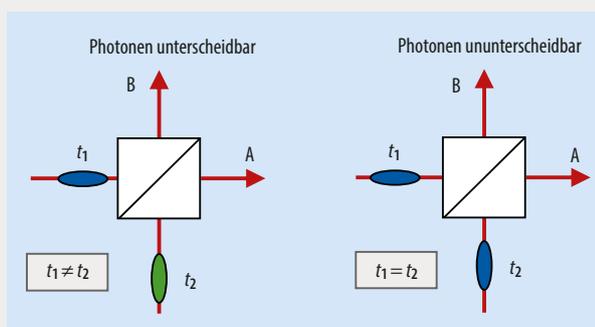
- Wesenszug 1 (Statistisches Verhalten): In der Quantenmechanik sind im Allgemeinen nur statistische Vorhersagen möglich.
- Wesenszug 2 (Fähigkeit zur Interferenz): Einzelne Quantenobjekte können zu einem Interferenzmuster beitragen, wenn es für das Versuchsergebnis mehr als eine klassisch denkbare Möglichkeit gibt. Keine dieser Möglichkeiten wird im klassischen Sinn „realisiert“.
- Wesenszug 3 (Eindeutige Messergebnisse): Auch wenn ein Quantenobjekt in einem Zustand keinen festen Wert der gemessenen Größe hat, findet man immer ein eindeutiges Messergebnis.
- Wesenszug 4 (Komplementarität): Beispielhafte Formulierungen sind: „Welcher-Weg-Information und Interferenzmuster schließen sich aus“ oder „Quantenobjekte können nicht auf Ort und Impuls gleichzeitig präpariert werden“.

Wesenszug 1 besagt, dass die Quantenphysik keine deterministische Theorie ist. Wesenszug 2 ist im Kern identisch mit dem Fundamentalprinzip von Brachner und Fichtner. Das Messpostulat in Wesenszug 3 ist als unabhängiges Axiom einzuführen. Zudem ist aus heutiger Sicht das Auftreten von Verschränkung bei Systemen aus mehreren Quantenobjekten ebenfalls „wesentlich“, obwohl dies in der formalen Quantenphysik kein unabhängiges Axiom ist.

Hong-Ou-Mandel-Interferenz

Der Strahlteilerwürfel bringt die Amplituden der einzelnen Photonen in eine Superposition in den Kanälen A und B. Sind die beiden Photonen zeitlich unterscheidbar, besitzen alle vier Endzustände (AA, AB, BA, BB) eine Wahrscheinlichkeit von 25 Prozent. Sind die Photonen in Kanal A und B allerdings ununterscheidbar, wird der Bezug von Kanal A und B zu Photon 1 und 2 im verschränkten Zustand ausgelöscht. Beide Photonen verhalten sich wie ein Objekt, sodass sie nur gemeinsam in Kanal A oder in Kanal B detektierbar sind: Sie verhalten sich zwar zufällig, aber exakt gleich, sind also korreliert.

Diese qualitative Argumentation eignet sich auch als Erklärung für die Schule. Der Formalismus führt zum selben Ergebnis: Der unkorrelierte Produktzustand $|P_1\rangle|P_2\rangle$ mit $|P_1\rangle = 1/\sqrt{2}|A_1\rangle + i/\sqrt{2}|B_1\rangle$ und $|P_2\rangle = 1/\sqrt{2}|B_2\rangle + i/\sqrt{2}|A_2\rangle$ beschreibt das Paar zeitlich unterscheidbarer Photonen. Ununterscheidbarkeit ergibt sich durch die Symmetrisierung im verschränkten Zustand $1/\sqrt{2}(|P_1\rangle|P_2\rangle + |P_2\rangle|P_1\rangle)$. Die



Amplituden für die Ereignisse (AB, BA) annullieren sich durch diese Symmetrisierung.

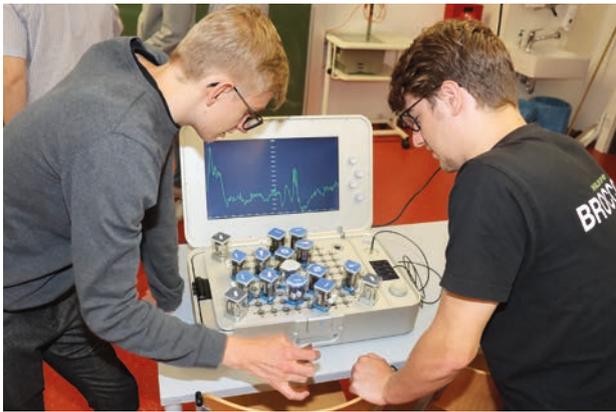


Abb. 1 Der „Quantenkoffer“ von Qutools erlaubt es beispielsweise, ein Michelson-Interferometer mit einzelnen Photonen, einen Aufbau zur Hong-Ou-Mandel-Interferenz oder eine Bell-Messung zum Nachweis von Verschränkung in der Schule zu realisieren.

Die Wesenszüge sind in der fachdidaktischen Community heute weitgehend als Mittel für qualitative quantenmechanische Argumentationen akzeptiert und haben auch die Bildungsstandards für die Oberstufe (2020) beeinflusst.

Implikationen der zweiten Quantenrevolution

Aktuell entwickeln sich die modernen Quantentechnologien enorm dynamisch: Die Kontrolle und Manipulation einzelner Qubits als technologische Ressource für Sensorik, Computing und Kommunikation wird weltweit und mit hoher staatlicher und industrieller Förderung vorangetrieben. Die kohärente Kontrolle und Manipulation von über fünfzig verschränkten Qubits gilt als realistisch.

Die neuen Quantentechnologien liefern zahlreiche Anwendungsbezüge, die auch in die Lehre Einzug finden können. Hierbei steht die Funktionsweise der Technologie im Vordergrund, zu deren Verständnis ein phänomenologischer Zugang genügt. Weder mathematische Details, welche die Grenzen der Schulmathematik sprengen, noch historische Einblicke zur Entwicklung der Quantentheorie sind dabei Voraussetzung.

Die Funktionsweise einer Transistorschaltung ist ohne tiefe Kenntnisse der Halbleiter- und Vielteilchen-Quantenphysik nachvollziehbar. Ebenso ist zum Beherrschen höherer Programmiersprachen kein physikalisches Verständnis der Hardware notwendig. Analog sind Quantenalgorithmien durch Qubits und Gatter zu beschreiben und von der grundsätzlichen Funktionsweise verständlich, ohne die physikalische Realisierung im Detail zu kennen. IBM bietet online die Möglichkeit an, einfache Quantenalgorithmien selbst zu programmieren und diese auf realen Quantencomputern auszuführen.¹⁾

Zwar fordern die Bildungsstandards von 2020 inhaltlich keine Anwendungsbezüge zu (Quanten-)Technologien, wohl aber in

Outools

den Abschnitten zur Sach- und Bewertungskompetenz. Der Bildungsbeitrag des Fachs Physik wird dadurch charakterisiert, „[...] die Grundlagen von Technologien zu verstehen und deren Nutzung im Hinblick auf das eigene Leben und die Gesellschaft zu bewerten [...]. Physikalische Erkenntnisse prägen unser Weltbild und verdeutlichen durch den Wandel, dem sie unterworfen sind, die Offenheit der Physik für Weiterentwicklung.“ Somit muss sich auch die Lehre der Quantenphysik aktuellen Anwendungen zuwenden.

Zugang über Quantentechnologie

In naher Zukunft wird die Quanteninformatik eine wichtige Rolle spielen: Mit der Vision eines Quanteninternets wird unter Hochdruck an Möglichkeiten zur Übertragung von Quantenzuständen geforscht. Das stochastische Verhalten, Ununterscheidbarkeit und Verschränkung von zwei Qubits lassen sich z. B. an der Hong-Ou-Mandel-Interferenz mit wenig technischem Aufwand diskutieren (**Infokasten**).

Solche konzeptionellen Aspekte der Quantenphysik werden für die Nutzung von Quantentechnologien relevant. Um einen Quantencomputer zu programmieren, gilt es, etwa die Wirkung von Quantengattern, den Einfluss der Nicht-Determiniertheit der Quantenphysik auf die nur statistisch interpretierbaren Ergebnisse, den Einfluss der Dekohärenz sowie von Fehlerkorrekturverfahren zu verstehen. Konzepte für die Vermittlung in der Schule müssen entwickelt, erprobt und überarbeitet werden, um die Fachkräfte von morgen an diese Themen heranzuführen.

Um Quantenphänomene praktisch erfahrbar zu machen, gibt es verschiedene Ansätze. Qutools stellt mit dem Quantenkoffer „Spielsteine“ bereit, die es im Baukastenprinzip erlauben, Experimente mit einzelnen Photonen oder verschränkten Photonenpaaren durchzuführen (**Abb. 1**).²⁾ Da die Kosten für einen Quantenkoffer ein Schulbudget übersteigen, sollen sie über Ausleihsysteme zur Verfügung gestellt werden, etwa über die WEH-Stiftung.

In der BMBF-Fördermaßnahme „Quantum Aktiv“ arbeiten zwölf Projekte daran, Unterrichtsmaterialien, Spiele oder Ausstellungsexponate zu entwickeln.³⁾ Im Projekt „Holodeck:Q“ konzipiert die TU Braunschweig mit dem Phaeno in Wolfsburg sowie Qutools ein Exponat, an dem die Verschränkung von Photonen erfahrbar wird. Mit dem TuringBus der FU Berlin und der Gesellschaft für Informatik werden Workshops zur Quanteninformatik direkt an den Schulen angeboten. Das Projekt „O3Q – Open3 Quantum“ der FH und U Münster sowie der U Hannover zielt darauf ab, kostengünstige Experimente auf Basis von NV-Zentren zu modernen Quantentechnologien zu entwickeln [9]. Auch in der Hochschuldi-



Abb. 2 In QuBIT EDU sind diejenigen fachdidaktischen Forschungsgruppen vernetzt, die curriculare Entwicklungsarbeit und empirische Forschungsprojekte zur modernen Quantenphysik realisieren.

daktik und der beruflichen Fort- und Weiterbildung gewinnen Quantentechnologien an Bedeutung. Der Bedarf an Fachkräften, die damit arbeiten, wird signifikant steigen. Diese benötigen ein grundlegendes, phänomenorientiertes Verständnis und interdisziplinäre Kenntnisse der Technologien und ihrer Anwendungen. Basierend auf empirischen Befragungen in Wissenschaft und Industrie (Delphi-Studie und Experteninterviews) wurde im Rahmen des Quantum Flagship ein Kompetenzrahmen zu Quantentechnologien entwickelt.⁴⁾ Dieser gibt einen Überblick über die Fähigkeiten und Inhalte, die für künftige Quanten-Fachkräfte relevant werden können und bietet einen Startpunkt, um Aus- und Fortbildungsprogramme oder Zertifizierungssysteme zu entwickeln.

Das Netzwerk QuBIT EDU treibt den fachdidaktischen Austausch und die Zusammenarbeit der Forschungsgruppen an aktuell elf Hochschulen voran (**Abb. 2**). Was man von einem einzelnen Qubit oder von zwei Qubits lernen kann – Superposition, stochastisches Verhalten bei Messungen, Zufall, Unbestimmtheit, Korrelation, Verschränkung – ist bereits aufgearbeitet [10–12]. Ein ausgereifter und evaluierter Lehrgang für die Schule existiert noch nicht, ist aber eines der Ziele. Am 4. und 5. Oktober wird das Netzwerk QuBIT EDU eine erste Online-Tagung zur Didaktik der modernen Quantenphysik durchführen. Zukünftig soll es jährliche Präsenztreffen zum fachlichen Austausch und zur Diskussion neuer didaktischer Ansätze geben.⁵⁾

1) quantum-computing.ibm.com/composer

2) quantenkoffer.com

3) quantentechnologien.de/forschung/foerderung/quantum-aktiv.html

4) qtedu.eu

5) Informationen und Anmeldeöglichkeiten finden sich unter www.qubit-edu.de.

Zusammenfassung und Ausblick

Anwendungen von Quantentechnologien – also der Kontrolle und Manipulation einzelner Qubits – stehen an der Schwelle zur industriellen Umsetzung. Dadurch steigt die Bedeutung von Quantenphysik als Teil der Allgemeinbildung, und zwar in einem technologiebezogenen Kontext. Dieser macht die praktische Bedeutung der Wesenszüge der Quantenphysik in Anwendungen sichtbar. Noch ist unklar, welche Kontexte aus der Quantensensorik, -kryptographie und dem -computing sich für die Lehre eignen. Hierzu sind weitere Forschungs- und Entwicklungsarbeiten in Fachphysik und Fachdidaktik von Bedeutung, die aktuell sowohl national als auch international vorangetrieben werden.

Literatur

- [1] K. Krijtenburg-Lewerissa, H. J. Pol, A. Brinkman und W. R. van Joelingen, *Int. J. Sci. Educ.* **41**, 349 (2019)
- [2] A. Brachner und R. Fichtner, *Quantenmechanik für Lehrer und Studenten*, Schroedel (1977)
- [3] A. Brachner und R. Fichtner, *Quantenmechanik*, Schroedel (1980)
- [4] R. P. Feynman, *QED: Die seltsame Theorie des Lichts und der Materie*, Piper (1992)
- [5] R. Müller und T. Wilhelm, *Quantenphysik*, in: T. Wilhelm, H. Schecker und M. Hopf (Hrsg.), *Unterrichtskonzeptionen für den Physikunterricht*, Springer (2021)
- [6] R. Müller und H. Wiesner, *Am. J. Phys.* **70**, 200 (2002)
- [7] R. Müller, *Quantenphysik in der Schule*, Logos-Verlag (2003); B. Schorn, *Quantenphysik in der Schule. Eine Unterrichtskonzeption zur Einführung in die Quantenphysik für die 10. Jahrgangsstufe*, Dissertation, TU Dresden (2014)
- [8] J. Küblbeck und R. Müller, *Die Wesenszüge der Quantenphysik: Modelle, Bilder, Experimente*, Aulis-Verlag Deubner (2002)
- [9] F. Jelezko, *Physik Journal*, August/September 2008, S. 63
- [10] W. Dür und S. Heusler, *PhyDid A* **11**, 1 (2012) und *PhyDid A* **13**, 11 (2014)
- [11] G. Pospiech, *Phys. Educ.* **34**, 311 (1999)
- [12] W. Dür, R. Lamprecht und S. Heusler, *Eur. J. Phys.* **85** (2017)

Die Autoren



Rainer Müller (FV Didaktik der Physik) ist seit 2002 Professor für Physikdidaktik an der TU Braunschweig. Ein Schwerpunkt seiner Forschung ist das Lehren und Lernen der Quantenphysik, insbesondere der neuen Quantentechnologien.

Franziska Greinert (FV Didaktik der Physik) ist seit 2019 Doktorandin an der TU Braunschweig. Sie beschäftigt sich mit der Ermittlung von Anforderungen an künftige Fachkräfte in den Quantentechnologien und Folgerungen für die Didaktik.



Malte S. Ubben (FV Didaktik der Physik) ist seit 2016 Mitarbeiter der Physikdidaktik der WWU Münster. Zu seinen Forschungsgebieten gehören Verständnis- und Modellierungsprozesse in der Quantenphysik, sowie der Einsatz digitaler Medien in der Lehre.

Stefan Heusler (FV Didaktik der Physik) ist seit 2012 Professor für Physikdidaktik an der WWU Münster. Zu seinen Forschungsgebieten gehören Visualisierungen und Modellbildung im Bereich Quantenphysik sowie der Einsatz digitaler Medien in der Lehre.



Prof. Dr. Rainer Müller und **Franziska Greinert**, Institut für Fachdidaktik der Naturwissenschaften, Technische Universität Braunschweig, Bienroder Weg 82, 38106 Braunschweig; **Dr. Malte S. Ubben** und **Prof. Dr. Stefan Heusler**, Institut für Didaktik der Physik, Westfälische Wilhelms-Universität, Wilhelm-Klemm-Str. 10, 48149 Münster