

# Quantentechnologien – ein Thema für den Physikunterricht?

*Rainer Müller, TU Braunschweig*

## 1 Quantenphysik in der Schule

In Deutschland hat die Quantenphysik – anders als in vielen anderen Ländern Europas – eine jahrzehntelange Tradition im Physikunterricht der Oberstufe. Sie ist als Unterrichtsgegenstand etabliert und es gibt einen reichen Schatz an Erfahrungen, Unterrichtskonzeptionen, Experimenten und Aufgaben. In der Anfangszeit dominierte über viele Jahre der an der historischen Entwicklung und an historischen Experimenten orientierte Quantenphysik-Unterricht. Charakteristisch dafür die die Ausrichtung an den etablierten und teilweise im Unterricht durchführbaren Experimenten, wie zum Beispiel:

- Photoeffekt,
- Elektronenbeugung,
- Franck-Hertz-Versuch,
- Compton-Effekt.

Diese Experimente zeigen einige Phänomene der Quantenphysik zwar eindrucksvoll. Sie stammen aber alle aus der Entdeckungszeit der Quantenphysik und spiegeln somit den Erkenntnisstand ihrer Zeit wieder. Modernere Entwicklungen der Quantenphysik lassen sich damit kaum verdeutlichen.

Seit den 1990er Jahren hat die fachdidaktische Forschung an Schülervorstellungen orientierte und empirisch evaluierte Unterrichtskonzepte vorgeschlagen (für einen Überblick siehe [1]). Der erste Unterrichtsvorschlag, der sich ausdrücklich auf die Untersuchung von Schülervorstellungen und Lernschwierigkeiten stützte, wurde von Fischler und Lichtfeldt entwickelt [2]–[4]. Dabei wurde eine „Minimalkonzeption“ angestrebt, die den Unterschied zwischen klassischen und Quantenphänomenen stark betont. Bezüge zur klassischen Physik (Bohrsches Atommodell) wurden weitgehend vermieden. Bereits zuvor hatten Brachner und Fichtner [5], [6] ein Curriculum vorgeschlagen, das sich in Anlehnung an die „Feynman Lectures“ [7] auf das Konzept der Wahrscheinlichkeitsamplitude konzentriert. Das „quantenmechanische Fundamentalprinzip“ wird von Brachner und Fichtner am Beispiel des Mach-Zehnder-Interferometers erläutert. Auch auf der Grundlage von Feynmans Zeigerformalismus [8] sind mehrere Unterrichtskonzepte entwickelt worden. Dieser Zugang hat Einzug in mehrere Kerncurricula für die Oberstufe gehalten (z. B. Niedersachsen). Zu einem gewissen Standard in der fachdidaktischen Community hat sich der milq-Ansatz [9] mit den „Wesenszügen der Quantenphysik“ [10] entwickelt, auf den wir weiter unten eingehen werden.

## 2 Quantentechnologien und die moderne Quantenphysik

Ein Defizit aller Unterrichtskonzeptionen zu den modernen Aspekten der Quantenphysik ist es, dass sie meist auf einem rein innerphysikalischen Niveau bleiben müssen. Bis vor kurzem gab es für die subtilen Effekte der modernen Quantenphysik keine Anwendungen in Alltag und Technik. Damit war für derartige Unterrichtskonzeptionen eine „Kontextorientierung“ von vornherein ausgeschlossen. Die Kontextorientierung wird für viele andere Teilgebiete der Physik genutzt, um den Unterricht mit Leben zu erfüllen,

Interesse zu wecken und Aufgabenstellungen zu ermöglichen, die sich an konkreten Anwendungen oder Alltagsphänomenen orientieren.

Es zeichnet sich ab, dass die Quantentechnologien im Physikunterricht die Rolle eines Anwendungskontextes für die moderne Quantenphysik übernehmen können – eine große didaktische Chance, die noch dadurch an Attraktivität gewinnt, dass die verwendeten Quantensysteme im Allgemeinen besonders einfach sind. Es soll daher ein kurzer Überblick über dieses aktuelle Thema gegeben werden, bevor wir auf seine Verwendbarkeit für den Physikunterricht eingehen. Eine ausführlichere Darstellung der Quantentechnologien mit vielen Beispielen findet sich in dem aktuellen Buch von Müller und Greinert [11].

In den Quantentechnologien wird der Ansatz verfolgt, die „merkwürdigen“ Effekte der Quantenphysik, die beim Umgang mit einzelnen Quantenobjekten auftreten und die das anschauliche Verständnis der Quantenphysik üblicherweise so erschweren, für technologische Anwendungen nutzbar zu machen. Quanteneffekte wie Superposition und Verschränkung werden ausgenutzt, um empfindliche Sensoren und leistungsfähige Computer zu bauen. Pointiert könnte man sagen, dass sich in den Quantentechnologien nicht mehr die Philosophen, sondern die Ingenieure mit Schrödingers Katze beschäftigen.

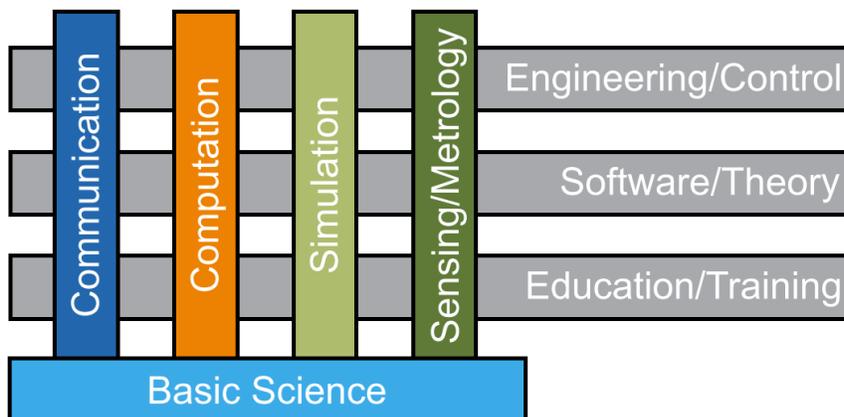


Abb. 1: Das Säulenmodell des Quantum Flagship

Üblicherweise unterscheidet man vier Teilbereiche der Quantentechnologien, zum Beispiel in dem in Abb. 1. gezeigten Säulenmodell des europäischen Quantum Flagship:

a) *Quantencomputer*. Einzelne Ionen oder supraleitende Zustände werden als *Qubits* genutzt. Anders als die Bits der klassischen Informatik, die entweder im Zustand 0 oder im Zustand 1 sein können, lassen sich Qubits in charakteristisch quantenphysikalische Zustände bringen, in denen 0 und 1 überlagert sind. Berechnungen können dann gewissermaßen parallel ausgeführt werden. Quantencomputer können allerdings nur ganz bestimmte Aufgaben besser als klassische Computer ausführen, z. B. das Faktorisieren großer Zahlen. Sie werden daher die klassischen Computer nicht ersetzen, sondern höchstens ergänzen.

b) *Quantensensoren*. In diesem Bereich werden quantenphysikalische Effekte genutzt, um Größen wie z. B. Magnetfelder viel genauer zu messen, als es heute möglich ist. Das kann man zum Beispiel für diagnostische Zwecke nutzen, etwa zur Messung von Hirnströmen.

c) *Quantenkommunikation*. Mit einzelnen Photonen (den Quanten des Lichts) kann man Protokolle entwickeln, die abhörsichere Kommunikation versprechen – ein Grund die entsprechenden Technologien weiterzuentwickeln,

d) *Quantensimulation*. Mit einer speziellen Art von Quantencomputern lassen sich quantenphysikalische Systeme viel effizienter simulieren als mit klassischen Computern. Für die Entwicklung von Medikamenten auf der Basis von Molekülsimulationen ist dies eine vielversprechende Perspektive.

### 3 Der milq-Ansatz und die modernen Quantentechnologien

Der milq-Ansatz zur Quantenphysik in der Schule ist seit Beginn der 2000er Jahre etabliert (vgl. die Webseite milq.info und [9], [12], [13]). Er wurde mit dem Ziel entwickelt, die modernen Aspekte der Quantenphysik für den Physikunterricht zu erschließen und den Schülerinnen und Schülern einen zeitgemäßen Einblick in das Weltbild der modernen Physik zu vermitteln. Daher eignet sich der milq-Ansatz sehr gut, um die Quantentechnologien im Unterricht zu behandeln

Der in milq verfolgte Ansatz konzentriert sich auf die konzeptionellen Fragen der Quantenphysik. Es ist nicht beabsichtigt, eine Kontinuität mit den Vorstellungen der klassischen Physik anzustreben. Stattdessen werden vor allem diejenigen Aspekte der Quantenphysik hervorgehoben, die einen radikalen Bruch mit der klassischen Physik bedeuten. Die prominentesten Beispiele sind die Bornsche Wahrscheinlichkeitsinterpretation, die eine Abkehr vom klassischen Determinismus mit sich bringt, und die Existenz von Superpositionszuständen, in denen Quantenobjekte keine klassisch wohldefinierten Eigenschaften wie Ort, Bahn oder Energie besitzen. Gerade der Aspekt der Superposition ist in den Quantentechnologien zentral – etwa beim Qubit im Quantencomputer, wo die Nutzung von Superpositionszuständen und das Auftreten von Interferenz entscheidend für die Funktion sind.

Zur besseren praktischen Nutzung des milq-Ansatzes wurden eine Reihe von qualitativen Regeln formuliert: die Wesenszüge der Quantenphysik [10]. Sie geben einen Überblick über die grundlegende Struktur der Quantenphysik und können in qualitativen Diskussionen über Quantenphänomene als „Argumentationswerkzeuge“ dienen. Sie ermöglichen es den Schülerinnen und Schülern, qualitative Vorhersagen über Quantenphänomene zu treffen. Die Wesenszüge können damit als eine Art „qualitative Mini-Axiomatik“ für die Quantenphysik betrachtet werden. Sie lauten wie folgt:

**Wesenszug 1 (Statistisches Verhalten):** In der Quantenphysik 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 dann im klassischen Sinn „realisiert“.

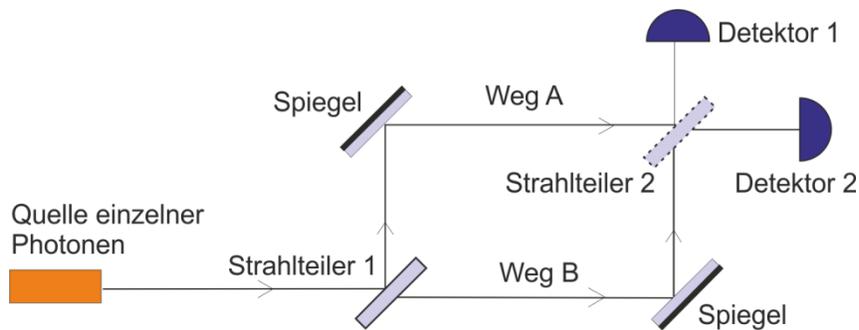


Abb. 2: Schema des Experiments von Grangier, Roger und Aspect. In der milq-Simulationssoftware werden die beiden Detektoren durch Detektionsschirme ersetzt und der Strahl wird verbreitert, um ein räumliches Interferenzmuster zu erhalten

**Wesenszug 3 (Eindeutige Messergebnisse):** Auch wenn ein Quantenobjekt in einem Zustand keinen festen Wert der gemessenen Größe hat, findet man immer ein eindeutiges Messergebnis (Messpostulat der Quantenmechanik).

**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.“

Ihrem Anspruch gemäß sind die Wesenszüge weiterführend und vollständig. Nichts davon muss zurückgenommen werden, selbst wenn man zu den kompliziertesten Sachverhalten der Quantenmechanik vorstößt. Sie sind vollständig, weil nichts wesentlich Neues hinzukommt, wie tief man auch immer vordringt.

## 4 Schlüsselexperimente

Im milq-Konzept werden die Wesenszüge anhand von zwei Schlüsselexperimenten eingeführt, in denen die nicht-klassischen Aspekte der Quantenphysik besonders deutlich werden. Damit können die Schülerinnen und Schüler die Anwendung der Regeln in realen physikalischen Situationen üben. Für beide Schlüsselexperimente werden Simulationsprogramme auf der milq-Webseite kostenlos zur Verfügung gestellt.

(1) Das erste Schlüsselexperiment ist das Doppelspaltexperiment mit einzelnen Quantenobjekten, das nach Feynman [7] „das Herz der Quantenmechanik in sich trägt“. Das quantenmechanische Doppelspalt-Experiment ist wohlbekannt und soll an dieser Stelle nicht weiter behandelt werden.

(2) Interessanter unter dem Aspekt der Quantentechnologien ist das zweite Schlüsselexperiment, das Experiment von Grangier, Roger und Aspect [14]. Historisch wurde dieses Experiment in der Gruppe von Alain Aspect direkt nach dem Experiment zur Verletzung der Bellschen Ungleichung durchgeführt, das mit dem Nobelpreis 2022 ausgezeichnet wurde. Durch das Nobelpreis-Experiment stand eine kontrollierte Quelle einzelner Photonen zur Verfügung, die nun genutzt werden konnte, um die Eigenschaften einzelner Photonen zu untersuchen.

In dem Experiment, das in Abb. 2 dargestellt ist, werden einzelne Photonen alternativ an einem einzelnen Strahlteiler oder in einem Mach-Zehnder-Interferometer mit zwei Strahlteilern untersucht. Das Experiment besteht aus zwei Teilen: (a) Wenn Strahlteiler 2 (in Abbildung 2 gestrichelt dargestellt) nicht vorhanden ist, treffen die Photonen auf einen einzelnen Strahlteiler und dahinter (nach der Umlenkung durch zwei Spiegel) auf zwei Detektoren. Die Detektoren messen die Koinzidenz einzelner Photonen, die am Strahlteiler 1 reflektiert oder durchgelassen werden. (b) Falls Strahlteiler 2 vorhanden ist, handelt es sich bei dem Experiment um ein Mach-Zehnder-Interferometer, bei dem jedes Photon einen Detektor auf zwei Wegen erreichen kann.

Veranschaulichen wir die Anwendung der Wesenszüge anhand dieses zweiten Schlüsselexperiments:

**a) Wesenszug 3 (Eindeutige Messergebnisse):** Ohne Strahlteiler 2 führen die beiden Detektoren 1 und 2 eine Orts- bzw. Wegmessung an den einzelnen Photonen durch. Nach Wesenszug 3 hat jede Ortsmessung ein eindeutiges Ergebnis. Es sollte genau einer der beiden Detektoren ansprechen, niemals beide. Wesenszug 3 sagt also perfekte Antikoinzidenz der beiden Detektoren voraus. Diese Vorhersage entspricht dem experimentellen Ergebnis von Grangier, Roger und Aspect. Bei der Messung wird ein einzelnes Photon immer an einem bestimmten Ort gefunden, nie an zwei Orten gleichzeitig. Die beiden Detektoren sprechen (abgesehen von Rauschereignissen) niemals gleichzeitig an. Damit hat das Experiment seinerzeit große Aufmerksamkeit erregt, weil diese Antikoinzidenz ein echter Beleg für die Quantennatur des Lichts ist und sich nicht mit semiklassischen Modellen erklären lässt.

**b) Wesenszug 1 (Statistisches Verhalten):** Es ist keine Vorhersage möglich, an welchem der beiden Detektoren das nächste Photon nachgewiesen wird. Es lässt sich keine physikalische Variable angeben, die bestimmt, ob das nächste Photon am Strahlteiler durchgelassen oder reflektiert wird. Allerdings ist eine statistische Vorhersage möglich: Wenn das Experiment sehr oft wiederholt wird, wird etwa die Hälfte der Photonen an Detektor 1 und die Hälfte an Detektor 2 gefunden. Die Vorhersagen der Quantenphysik sind statistischer Natur.

Auch wenn der zweite Strahlteiler vorhanden ist, findet Wesenszug 1 eine Anwendung: Trifft ein Photon auf den Schirm, dann wird seine gesamte Energie an einer bestimmten Stelle vollständig freigesetzt. An welcher Stelle das geschieht, lässt sich nicht vorhersagen. Die Verteilung, die sich ergibt, wenn viele Photonen detektiert werden, ist dagegen reproduzierbar: Es ist das aus der klassischen Optik bekannte Interferenzmuster (Abbildung 3).

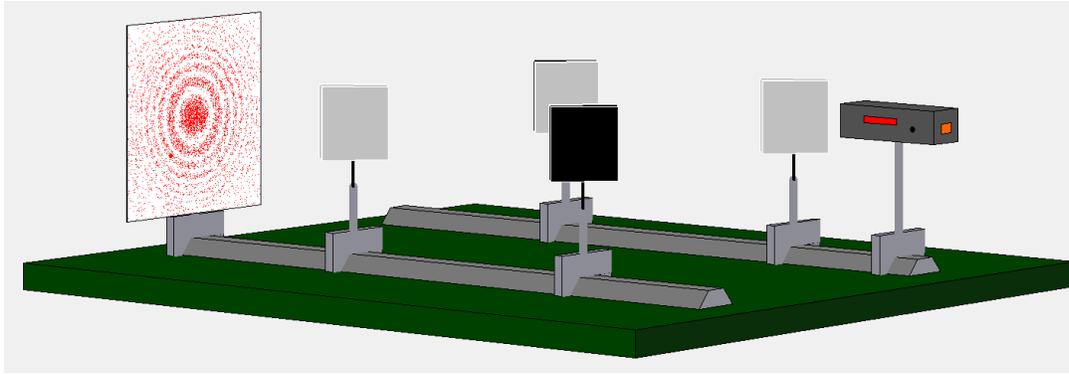


Abb. 3. Aus den Detektionsspuren vieler einzelner Photonen ergibt sich das aus der klassischen Optik bekannte Interferenzmuster. Screenshot des Mach-Zehnder-Simulationsprogramms von milq.

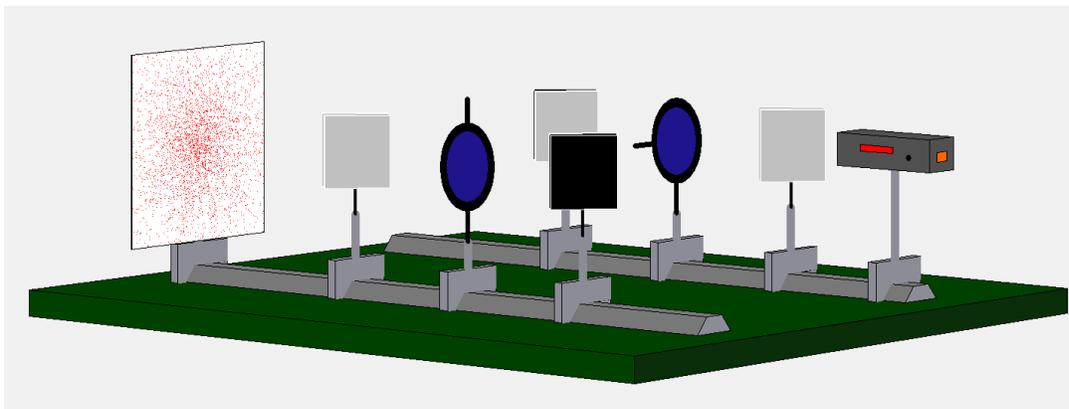


Abb. 4. Die Information über den Weg wird mit Polarisationsfiltern kodiert. Es tritt kein Interferenzmuster auf.

**c) Wesenszug 2 (Fähigkeit zur Interferenz):** Wird in Abb. 2 der Strahlteiler 2 eingesetzt, dann gibt es zwei klassische Alternativen für das Versuchsergebnis „Detektor 1 klickt“: Ein Photon kann über den Weg A oder über den Weg B von der Quelle zum Detektor gelangt sein. Nach Wesenszug 2 tritt untere diesen Umständen Interferenz auf. Diese Interferenz wurde im Experiment von Grangier, Roger und Aspect tatsächlich beobachtet, indem der Gangunterschied zwischen beiden Interferometerarmen variiert wurde. Das Simulationsprogramm geht von einem etwas anderen Mechanismus für die Interferenz aus. Es wird angenommen, dass die beiden Pfade leicht unterschiedlich lang sind und der Strahl durch eine Linse aufgeweitet wird. Das führt zu einem Interferenzmuster mit einer ringförmigen Struktur, wie in Abb. 3 dargestellt.

**d) Wesenszug 4 (Komplementarität):** Zur Demonstration von Wesenszug 4 wird das in Abb. 3 gezeigte Experiment durch Polarisationsfilter in beiden Armen erweitert. Je nach ihrer relativen Ausrichtung prägen sie den Photonen durch die Polarisation Weginformation auf. Stehen beide Polarisationsfilter parallel, wird keine Weginformation in den Polarisationsfreiheitsgrad kodiert und das Interferenzmuster erscheint auf dem Schirm. Stehen die Polarisationsfilter jedoch senkrecht zueinander, wird die Weginformation kodiert und es erscheint kein Interferenzmuster (Abb. 4). Weginformation und Interferenzmuster schließen sich gegenseitig aus – ein Beispiel für komplementäre Größen.

## 5 Mach-Zehnder-Interferometer und Quantencomputer

Auf den engen Zusammenhang zwischen dem gatterbasierten Quantencomputing und der Funktionsweise eines Mach-Zehnder-Interferometers wurde zum ersten Mal in einer Forschungsarbeit von Cleve, Ekert, Macchiavello und Mosca hingewiesen [15]. Sie schreiben:

*Quantencomputing beruht auf zwei Quantenphänomenen: Interferenz und Verschränkung. Die Verschränkung ermöglicht es, Daten in nicht-triviale Mehrteilchen-Überlagerungszustände von ausgewählten Basiszuständen zu kodieren. Die Quanteninterferenz [...] ermöglicht es, Anfangszustände (Eingänge) in Endzustände (Ausgänge) zu entwickeln, wobei die dazwischen liegenden Mehrteilchen-Überlagerungszustände auf eine ganz bestimmte Weise verändert werden. [...]*

*Es liegt nahe, Berechnungen mit einem Quantencomputer als Mehrteilchenprozesse zu betrachten (so wie klassische Berechnungen Prozesse sind, an denen mehrere „Teilchen“ oder Bits beteiligt sind). Es stellt sich heraus, dass die Auffassung von Quantenberechnungen als Mehrteilchen-Interferometrie zu einem einfachen und vereinheitlichenden Bild der bekannten Quantenalgorithmen führt. In dieser Sprache sind Quantencomputer im Grunde Mehrteilchen-Interferometer mit Phasenverschiebungen, die sich aus den Operationen einiger Quantenlogik-Gatter ergeben. Um diesen Punkt zu veranschaulichen, betrachten wir zum Beispiel ein Mach-Zehnder-Interferometer (Abb. 1a).*

Die Autoren erläutern dann, wie eines der verbreitetsten Quantengatter, das Hadamard-Gatter, durch ein Mach-Zehnder-Interferometer realisiert werden kann. Das Hadamard-Gatter ist ein Quantengatter, das Qubits aus einem der Basiszustände  $|0\rangle$  und  $|1\rangle$  in einen Superpositionszustand bringt:

$$|0\rangle \rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle) \quad \text{und} \quad |1\rangle \rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle - |1\rangle).$$

Damit ist es in seiner Wirkung einem Strahlteiler vergleichbar, der ein einlaufendes Photon in einen Superpositionszustand aus „durchgehend“ und „reflektiert“ bringt. Die Analogie ist in Abb. 5 veranschaulicht. Der von links nach rechts verlaufende Strahl in Abb. 5 a) repräsentiert in der im Quantencomputing allgemein verbreiteten Darstellungsweise den Zustand eines Qubits (von dem angenommen wird, dass es im Zustand  $|0\rangle$  initialisiert wird). Mehrere Qubits (von denen im Zitat oben die Rede ist) werden durch

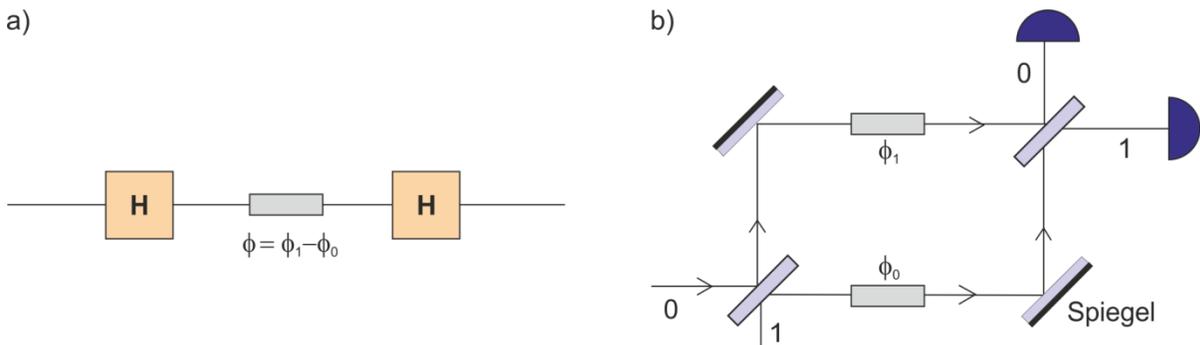


Abb. 5. Analogie zwischen Mach-Zehnder-Interferometer und Quantencomputer (Zeichnung nach [15])

mehrere parallel verlaufende horizontale Linien dargestellt. Im Interferometer in Abb. 5 b) lässt sich der horizontal einlaufende Zustand des Photons als Qubit-Zustand auffassen. Vom ersten Hadamard-Gatter H wird das Qubit in einen Superpositionszustand aus  $|0\rangle$  und  $|1\rangle$  gebracht. Entsprechend bringt der erste Spiegel in Abb. 5 b) das Photon in einen Überlagerungszustand aus Weg A und Weg B. Die beiden Wege entsprechen somit den beiden Qubit-Zuständen  $|0\rangle$  und  $|1\rangle$ . Die „Rechenoperation“ geschieht durch Hervorrufen einer Phasendifferenz  $\phi = \phi_1 - \phi_0$  zwischen den beiden Qubit-Zuständen. Beim Quantencomputer wird dies durch spezielle Phasengatter erreicht, im Interferometer wird es durch Weglängenunterschiede oder Einbringen eines Glaskeils in den Strahlengang realisiert. Das zweite Hadamard-Gatter (bzw. der zweite Strahlteiler) bringt die beiden Komponenten der Superposition wieder zusammen, so dass anschließend der Nachweis der Interferenz erfolgen kann. Im Quantencomputer geschieht das bei der Messung am Qubit, mit der jede Berechnung abgeschlossen wird.

Um die Analogie zwischen Quantencomputer und Mach-Zehnder-Interferometer für den Physikunterricht nutzbar zu machen, gibt es zwei Wege: Man kann die physikalische Realisierung eines Quantencomputers mit Photonen und interferometrischen Methoden diskutieren. Das führt zum Ansatz des optischen Quantencomputing, eine der physikalischen Realisierungsmöglichkeiten für Quantencomputer. Dies soll aber hier nicht weiter verfolgt werden.

Wir gehen (wie im Schulbuch [13] vorgeschlagen) den umgekehrten Weg und nutzen einen echten Quantencomputer, um wie in Abb. 5 a) mit Qubits und Quantengatter ein „Mach-Zehnder-Interferometer“ zu konstruieren und das Phänomen der Interferenz in Superpositionszuständen zu zeigen (vgl. Wesenszug 2). Wir nutzen dazu den unter [quantum-computing.ibm.com](https://quantum-computing.ibm.com) von der Firma IBM kostenlos zur Verfügung gestellten Zugang zu echten Quantencomputern. Abb. 6 zeigt die Benutzeroberfläche. Links sind die zur Verfügung stehenden Quantengatter dargestellt. Man kann sie durch Drag and Drop auf die horizontale Qubit-Linie in der mittleren Spalte ziehen. Dort ist in Abb. 6 das „Mach-Zehnder-Interferometer“ nach Abb. 5 a) aus Quantengattern zusammengesetzt. Man erkennt die beiden mit H bezeichneten Hadamard-Gatter und das Phasengatter P, das eine einstellbare Phasenverschiebung zwischen den beiden Komponenten der Superposition erzeugt (in der Abbildung ist die Phasenverschiebung  $0,4\pi$ ). Das letzte Quantengatter rechts stellt die abschließende Messung dar. Der rechte Teil der Abbildung

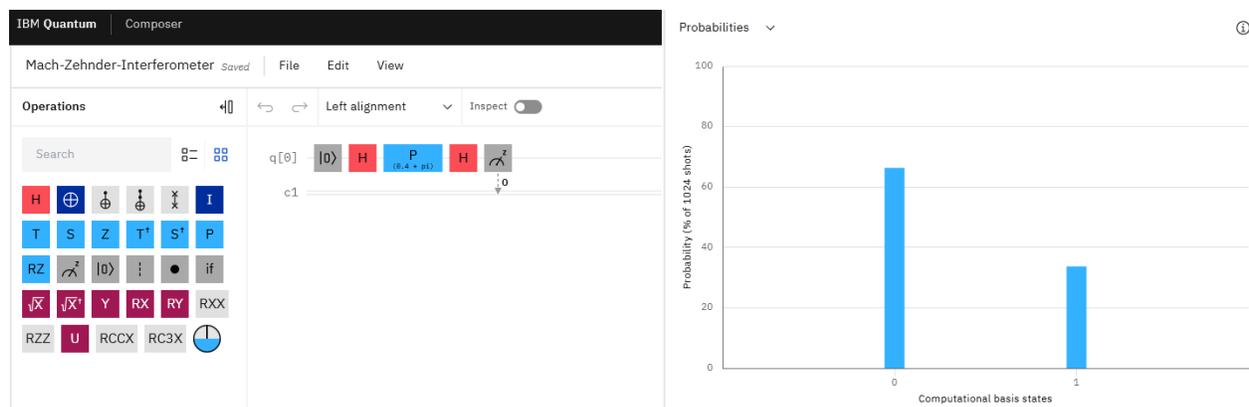


Abb. 6. Benutzeroberfläche von IBM Quantum Experience mit dem „Mach-Zehnder-Interferometer“

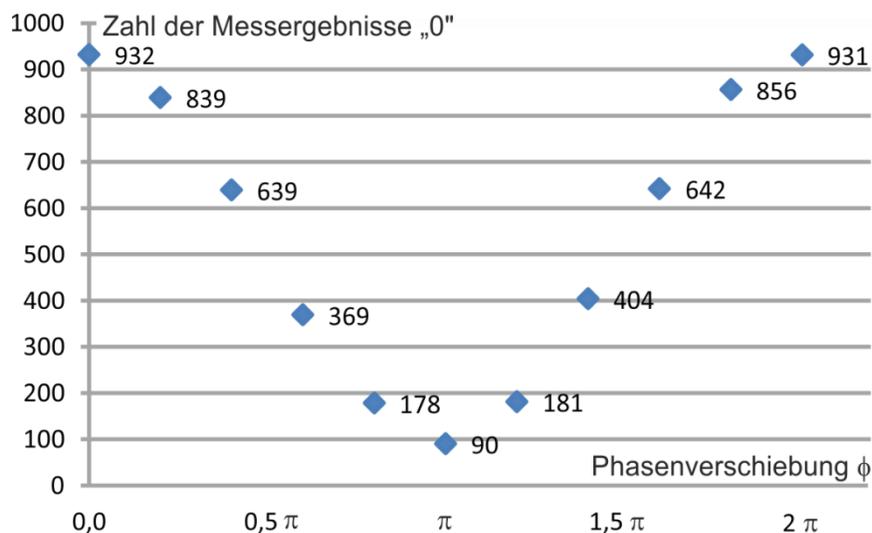


Abb. 7 Ergebnis der „Mach-Zehnder-Berechnung“ mit einem Quantencomputer für verschiedene Werte der Phasenverschiebung

stellt den jeweiligen Endzustand des Qubits dar. Nun kann man (nach Anmeldung im System) die Berechnung auf einem echten Quantencomputer durchführen. Für verschiedene Werte der Phasenverschiebung kann das zum Beispiel arbeitsteilig in verschiedenen Schülergruppen geschehen. Das Ergebnis einer Rechnung ist in Abb. 7 für verschiedene Werte der Phasenverschiebung dargestellt. Es zeigt die Häufigkeit, mit der bei 1024 Durchgängen (die vom System automatisch durchgeführt werden) bei der Messung am Qubit der Messwert 0 gefunden wird. Das Auftreten von konstruktiver und destruktiver Interferenz für die verschiedenen Werte der Phasenverschiebung ist deutlich zu erkennen, ebenso wie das Auftreten von Rauschen im realen System: die theoretischen Maximal- und Minimalwerte 1024 und 0 werden in der Realität nicht erreicht.

## 6 Quantenalgorithmen und Quantenvorteil

Mit dem beschriebenen Ansatz lassen sich die physikalische Realisierung und die Arbeitsweise eines Quantencomputers verdeutlichen. Was mit diesem Zugang nicht angesprochen werden kann ist der Vorteil, den das Rechnen mit einem Quantencomputer bietet: der Quantenvorteil. Hier kann nur eine kurssorische Übersicht gegeben werden, bei der die Wesenszüge immerhin einige Orientierung bieten können.

Zunächst kann man plausibel machen, dass ein (idealer) Quantencomputer eine ungeheure Menge an Information speichern und bearbeiten kann. Präziser ausgedrückt: Die im Zustand von  $N$  Qubits enthaltene Information skaliert mit  $2^N$ . Das kann man leicht einsehen, wenn man nach der Zahl der klassischen Bits fragt, die man braucht, um den Zustand eines  $N$ -Qubit-Systems zu beschreiben. In einer suggestiven Notation lässt sich der allgemeine Zustand eines  $N$ -Qubit-Systems durch den folgenden Überlagerungszustand ausdrücken:

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2^N}} (a_0|000 \dots 000\rangle + a_1|000 \dots 01\rangle + a_2|000 \dots 10\rangle \dots + a_{2^N-1}|111 \dots 111\rangle).$$

Zur Beschreibung dieses Zustands werden  $2^N$  komplexe Zahlen (und somit die entsprechende Zahl an klassischen Bits) benötigt. Konkret: Um den Zustand von 50 Qubits vollständig zu erfassen, sind  $2^{50} \approx 10^{15}$  Zahlen erforderlich. Zum Vergleich: Der 2020 installierte Supercomputer Juwels im Forschungszentrum Jülich hat eine Speicherkapazität von 479 TB, also etwa  $0,5 \cdot 10^{15}$  Byte. Dieses Beispiel verdeutlicht, warum die Zahl von 50 zuverlässig funktionierenden Qubits immer wieder als ungefähre Schwelle für die Quantenüberlegenheit genannt wird. Die Skalierung mit  $2^N$  bedeutet, dass sich mit Hinzufügen eines 51. Qubits die nötige klassische Speicherkapazität verdoppelt – man braucht dann also schon zwei klassische Supercomputer. Mit jedem hinzugefügten Qubit verdoppelt sich die Zahl der klassischen Supercomputer, die man braucht, um den Zustand des Qubit-Systems zu speichern.

Wenn man Berechnungen mit dem oben angegebenen Zustand durchführt, wirken die angewendeten Quantengatter auf alle Komponenten der Superposition gleichzeitig. Das bezeichnet man als Quantenparallelität. Alle Berechnungsergebnisse sind gleichzeitig im Zustand enthalten, aber – und das ist die entscheidende Hürde beim Quantencomputing – sie können nicht gleichzeitig ausgelesen werden. Nach Wesenszug 3 ergibt jede Messung ein eindeutiges Messergebnis und das ist beim Qubit entweder 0 oder 1. Mit einer Einzelmessung ist das Auslesen der vollständigen Zustandsinformation nicht möglich.

Quantenalgorithmen müssen also so beschaffen sein, dass die Antwort auf die interessierende Frage nicht nur im Zustand enthalten ist, sondern den Ergebnissen einzelner Messungen auch abgelesen werden kann. Dieses Problem ist nicht einfach zu lösen, und es erklärt, warum der „Zoo“ der Quantenalgorithmen einen doch recht geringen Umfang hat. Beim bekanntesten Quantenalgorithmus, dem Shor-Algorithmus, wird das Faktorisieren großer Zahlen auf das Aufspüren von Periodizitäten in langen Zahlenfolgen zurückgeführt (das geschieht mit einer Quantenvariante der Fouriertransformation). Die Messung gibt dann Aufschluss über die Periode, und daraus lässt sich die Faktorisierung erschließen.

Die Wesenszüge helfen auch beim Verständnis, warum Quantencomputer so schwierig zu realisieren sind. Entscheidend für das Funktionieren aller Quantenalgorithmen ist das Auftreten von Interferenz. Nach Wesenszug 2 kann Interferenz aber nur dann auftreten, wenn es für das Eintreten des gleichen Versuchsergebnisses mehr als eine klassisch denkbare Möglichkeit gibt, wenn also die beiden Alternativen ununterscheidbar sind. Falls jedoch durch eine Wechselwirkung mit der Umgebung ein Merkmal hinterlassen wird, durch das es möglich ist, zwischen den beiden klassisch denkbaren Alternativen zu unterscheiden, dann tritt keine Interferenz auf. Das Merkmal in der Umgebung kann zum Beispiel ein gestreutes Photon oder ein Gasteilchen sein, mit dem Qubit wechselgewirkt hat. Den Verlust der Interferenzfähigkeit durch Wechselwirkung mit der Umgebung nennt man Dekohärenz. Das Auftreten von Dekohärenz ist das Haupthindernis bei der praktischen Realisierung von Quantencomputern.

## **7 Quantentechnologien im Physikunterricht**

Der hier vorgestellte Zugang zum Quantencomputing ist nur eine der Möglichkeiten, Aspekte der Quantentechnologien im Physikunterricht zu thematisieren. Eine andere Möglichkeit ist das Aufzeigen einer Gewinnstrategie bei einem einfachen Spiel (Quantum Penny Flip), wenn man die Gesetze der Quantenphysik ausnutzt [16].

Nicht nur für das Quantencomputing werden derzeit didaktische Konzepte erarbeitet. Auch die Quantensensorik ist ein vielversprechendes Anwendungsgebiet, zum Beispiel der Einsatz von fluoreszierenden

Kristalldefekten (NV-Zentren) in Diamant zur empfindlichen Messung von Magnetfeldern. Hier ist die Entwicklung von Experimenten für den Einsatz im Unterricht weit fortgeschritten [17]. Weitaus unmittelbarer wird aber vermutlich die Quantenkommunikation Einzug in den Physikunterricht halten, insbesondere die Quantenkryptographie. Hier geht es um den abhörsicheren Austausch von Zufalls-Bitsequenzen, die zum Verschlüsseln von Nachrichten verwendet werden. Dafür gibt es spezielle Protokolle, die die Polarisationsfreiheitsgrade von Licht verwenden. Am einfachsten und bekanntesten ist das BB84-Protokoll. Zu diesem Protokoll wurden konkrete Unterrichtsvorschläge ausgearbeitet (z. B. [13], [18]) und Experimentierangebote entwickelt (z. B. [17], [19]). Es zeigt sich, dass das Thema Kryptographie ein Kontext ist, der bei Schülerinnen und Schülern auf großes Interesse stößt. Da sich die Unterrichtseinheit zudem in ein bis zwei Doppelstunden realisieren lässt, ist es abzusehen, dass es diese Anwendung der Quantentechnologien sein wird, die als erste Eingang in den Physikunterricht finden wird.

## Literatur

- [1] R. Berger u. a., *Unterrichtskonzeptionen für den Physikunterricht: ein Lehrbuch für Studium, Referendariat und Unterrichtspraxis*. in Lehrbuch. Berlin: Springer Spektrum, 2021.
- [2] A. Berg, H. Fischler, M. Lichtfeldt, M. Nitzsche, B. Richter, und F. Walther, *Einführung in die Quantenphysik. Ein Unterrichtsvorschlag für Grund- und Leistungskurse*. Berlin: Pädagogisches Zentrum, 1989.
- [3] H. Fischler und M. Lichtfeldt, „Quantenphysik in der Schule II: Eine neue Konzeption und ihre Evaluation.“, *Phys. Didact.*, Bd. 17, Nr. 1, S. 33–50, 1990.
- [4] H. Fischler und M. Lichtfeldt, „Ein Unterrichtskonzept zur Einführung in die Quantenphysik.“, *Phys. Sch.*, Bd. 32, Nr. 7–8, S. 276–280, 1994.
- [5] A. Brachner und R. Fichtner, *Quantenmechanik für Lehrer und Studenten*. Hannover: Schroedel, 1977.
- [6] A. Brachner und R. Fichtner, *Quantenmechanik*. in Materialien für die Sekundarstufe II Physik. Hannover: Schroedel, 1980.
- [7] R. P. Feynman, R. B. Leighton, und M. Sands, *Feynman Vorlesungen über Physik. 3. Quantenmechanik*. Oldenbourg, 2007.
- [8] R. P. Feynman, *QED: Die seltsame Theorie des Lichts und der Materie*. München: Piper, 1992.
- [9] R. Müller, *Quantenphysik in der Schule*. in Studien zum Physiklernen, no. 26. Berlin: Logos-Verlag, 2003.
- [10] J. Küblbeck und R. Müller, *Die Wesenszüge der Quantenphysik: Modelle, Bilder und Experimente*. in Praxis-Schriftenreihe Abteilung Physik, no. 60. Köln: Aulis-Verl. Deubner, 2002.
- [11] R. Müller und F. Greinert, *Quantentechnologien für Ingenieure*. in De Gruyter Studium. Boston: De Gruyter, 2023.
- [12] R. Müller und H. Wiesner, „Teaching quantum mechanics on an introductory level“, *Am. J. Phys.*, Bd. 70, Nr. 3, S. 200–209, 2002.
- [13] R. Müller, Hrsg., *Dorn Bader Physik SII. Schülerband: Gesamtband Gymnasium*, Allgemeine Ausgabe 2023. Braunschweig: Westermann Schulbuchverlag, 2023.
- [14] P. Grangier, G. Roger, und A. Aspect, „Experimental Evidence for a Photon Anticorrelation Effect on a Beam Splitter: A New Light on Single-Photon Interferences“, *Europhys. Lett. EPL*, Bd. 1, Nr. 4, S. 173–179, Feb. 1986, doi: 10.1209/0295-5075/1/4/004.
- [15] R. Cleve, A. Ekert, C. Macchiavello, und M. Mosca, „Quantum algorithms revisited“, *Proc. R. Soc. Lond. Ser. Math. Phys. Eng. Sci.*, Bd. 454, Nr. 1969, S. 339–354, Jan. 1998, doi: 10.1098/rspa.1998.0164.

- [16] R. Müller und F. Greinert, „Quantum Penny Flip – Spielen mit dem Quantencomputer“, *Plus Lucis Eingereicht*, 2023.
- [17] „Projekt O3Q“. <https://www.quantentechnologien.de/forschung/foerderung/quantum-aktiv/o3q.html>
- [18] C. Reisch und T. Franz, „Quantenkryptographie.“, *Prax. Naturwissenschaften – Phys. Sch.*, Bd. 65, Nr. 1, S. 11–16, 2016.
- [19] T. Overwin, „Konzeption und Evaluation einer Masterclass zum Thema Quantenkryptographie“, Masterarbeit, TU Braunschweig, 2022.