

Aufgabenblatt 7: Abgabe 26.05.2026

7.1 Funktionen auf $[a, b]$ mit Randbedingung

Man betrachte die stetigen komplexwertigen Funktionen f auf dem Intervall $[0, L]$, die an den Endpunkten verschwinden, d.h. $f(0) = f(L) = 0$. Diese Funktionen seien auch quadratintegabel, also Element von $L^2([0, L], \mathbb{C}, f(0) = f(L) = 0)$.

Auf dem Intervall sei ebenfalls ein Funktionensystem gegeben:

$$\langle x | u_n \rangle = u_n(x) = \sqrt{\frac{2}{L}} \sin \left[\frac{n\pi}{L} x \right] \quad , \quad n = 1, 2, \dots \quad (1)$$

- Skizzieren Sie die ersten drei Funktionen u_1, u_2, u_3 .
- Überprüfen Sie, ob die Funktionen $|u_n\rangle$ ein Orthonormalsystem bilden.
- Es liegt nahe, zu vermuten, daß die Funktionen $|u_n\rangle$ eine Basis im Vektorraum $L^2([0, L], \mathbb{C}, f(0) = f(L) = 0)$ bilden. Wie könnte man das beweisen?

7.2 Orts- und Impulsoperatoren

Man betrachte die beliebig oft differenzierbaren und quadratintegablen Funktionen f auf dem Intervall $[0, L]$, die an den Endpunkten verschwinden, d.h. $f(0) = f(L) = 0$.

Sind die Operatoren \tilde{x} und \tilde{p} auf diesem Raum hermitesch? Gehen Sie dabei von den folgenden Definitionen aus:

$$\langle f | \tilde{x} | g \rangle := \int_0^L dx f^*(x) x g(x) \quad (2)$$

und

$$\langle f | \tilde{p} | g \rangle := \int_0^L dx f^*(x) \frac{\hbar}{i} \frac{\partial}{\partial x} g(x) \quad (3)$$

7.3 *delayed choice*-Experimente

Im neuen Kernlehrplan Physik des Landes NRW kommen sogenannte *delayed choice*-Experimente vor.

Lesen Sie den bereitgestellten Artikel „Erfahrungsbasiertes Lernen in der Quantenphysik“ von Marco Seiter, Viktoria Konieczny und Heiko Krabbe aus MNU-Journal, Ausgabe 05.2025, Seite 393 ff.

Im Folgenden geht es um das in Abbildung 5 dargestellte Experiment. Die Tatsache, dass die beschriebene Quelle korrelierte Photonenpaare produziert, ist hier nicht wichtig. Das Experiment nutzt eh nur eins davon.

- a. Diskutieren Sie das Experiment mit normalem Licht, also nicht mit einzelnen Photonen. Erklären Sie das Ergebnis des *delayed choice*-Experimentes mit Ihrem Wissen über Polarisatoren und zweidimensionale Vektorräume.
- b. Was finden Sie an diesem Experiment erstaunlich?
- c. Was sind für Sie die zentralen Aussagen, die man aus diesem Experiment lernen könnte?

Zu diesem Thema gibt es ein Video von Sabine Hossenfelder. Schauen Sie doch mal rein und bilden Sie sich eine Meinung: <https://backreaction.blogspot.com/2021/10/the-delayed-choice-quantum-eraser.html>

Das Video ist populär, erklärt aber vielleicht auch nicht alles. Welche Fragen bleiben bei Ihnen offen?

Erfahrungsbasiertes Lernen in der Quantenphysik



Ein phänomenologischer Zugang durch Realexperimente

MARCO SEITER – VIKTORIA KONIECZNY – HEIKO KRABBE

Der Artikel stellt einen Zugang zur Quantenphysik dar, der von experimentellen Erfahrungen mit Einzelphotonen ausgeht. Mithilfe von Realexperimenten werden die wellen- und teilchenartigen Eigenschaften des Lichts untersucht und dabei zentrale Wesenszüge der Quantenphysik wie das stochastische Verhalten, Komplementarität und Verschränkung dargestellt.

1 Einleitung

Quantentechnologien gewinnen immer mehr an Bedeutung für den technologischen und wirtschaftlichen Fortschritt. Es ist

daher notwendig, ein Verständnis von quantenphysikalischen Grundlagen als Teil der Allgemeinbildung in der Sekundarstufe II, im Sinne des Orientierungswissens, im Schulunterricht zu vermitteln, da nur so die Möglichkeit der Schüler/innen zur gesell-

schaftlichen Teilhabe bei dem zu erwartenden technologischen Fortschritt mit entsprechenden Anwendungsmöglichkeiten besteht. Schüler/innen haben bisher aber keine Möglichkeiten, im Alltag und in der Schule quantenphysikalische Phänomene direkt (experimentell) zu erfahren.

Schüler/innen haben Vorstellungen zur Kausalität, zum Determinismus und der Deutung von Wahrscheinlichkeiten, die nicht kompatibel mit den Aussagen der Quantenphysik sind. Sie erwarten z.B. eine genaue Vorhersagbarkeit der Dinge und verbinden Wahrscheinlichkeitsaussagen mit Ungenauigkeit (MÜLLER & SCHECKER, 2018). Vorstellungen zu Teilchen und Wellen basieren auf Alltagserfahrungen, die im Physikunterricht der Oberstufe erst ausdifferenziert werden müssen, um die Besonderheiten von Quantenobjekten zu verstehen.

In den Bildungsstandards und Kernlehrplänen für die Sekundarstufe II, z.B. in NRW (MSB, 2022), findet sich im Basiskonzept „Determinismus & Zufall“ die Anforderung, das Prinzip der Komplementarität in der Quantenphysik mit dem Auftreten oder dem Ausbleiben von Interferenzmustern in Verbindung zu setzen. Im Leistungskurs wird sogar die Behandlung von Delayed-Choice-Experimenten gefordert. Um diesen Anforderungen zu entsprechen, wird hier ein phänomenologischer Zugang zur Quantenphysik vorgestellt, der die besonderen Wesenszüge der Quantenphysik schrittweise erfahrbar macht.

2 Bestehende Unterrichtskonzepte zur Quantenphysik

Die inhaltliche Komplexität der Quantenphysik hat bereits verschiedene Unterrichtskonzeptionen hervorgebracht, die unterschiedliche Aspekte in den Fokus stellen. Der traditionelle Unterricht (vgl. WILHELM et al., 2021, 342ff) beginnt mit der Behandlung des Photo- und des Compton-Effekts sowie der Elektronenbeugung als zentrale experimentelle Befunde, die aber teilweise semiklassisch gedeutet werden können. Darauf aufbauend werden der Welle-Teilchen-Dualismus und die Unbestimmtheitsrelation betrachtet. Historisch bedingt liegt ein Schwerpunkt auf der Atomphysik mit dem Bohr'schen Atommodell und der Quantisierung der Energie im Potenzialtopf (MÜLLER & WILHELM, 2021). In alternativen Unterrichtskonzeptionen, wird vor allem auf das problematische Bohr'sche Atommodell verzichtet. Der Berliner Zugang nach FISCHLER & LICHTFELDT (1994) beginnt bewusst mit dem Elektron als Quantenobjekt statt mit Photonen, um die Lernenden bei ihren mechanistischen Teilchenvorstellungen abzuholen und durch die Präsentation der Elektronenbeugung dazu zu bringen, über neuartige Erklärungsansätze nachzudenken. Die Betrachtung als Dualismus wird weitestgehend vermieden, indem eine statistische Deutung eingeführt und die Ensemble-Interpretation der Quantenmechanik verwendet wird. Das Münchener Unterrichtskonzept (MÜLLER & WIESNER, 2000) stellt die Quantenphysik im bewussten Kontrast zur klassischen Physik dar, indem ihre neuartigen Wesenszüge betont werden. Großer Wert wird auf eine klare Begriffsbildung gelegt, um die Quantenphänomene konzeptuell greifbar zu machen. Die konzeptionelle

Beschreibung wird anhand von Schlüsselexperimenten in Form von Computersimulationen eingeführt. Dies erfolgt in zwei Durchgängen erst mit Photonen und dann mit Elektronen, um aus den (vermeintlich) gleichartigen Merkmalen dieser beiden Objekte auf die Wesenszüge von Quantenobjekten generell zu verallgemeinern. Das Erlanger Unterrichtskonzept (BITZENBAUER & MEYN, 2020; BITZENBAUER, 2020) greift diese Wesenszüge auf, fokussiert dabei allerdings stärker auf bekannte Lernschwierigkeiten und bietet anstelle der Simulationen erstmals eine quantenoptische Realisierung der Schlüsselexperimente für Photonen an.

3 Phänomenologischer Zugang zur Quantenphysik

Ziel dieses Artikels ist es, einen phänomenologischen Zugang zur Quantenphysik vorzustellen. Phänomenologische Zugänge zielen nicht unmittelbar auf die Vermittlung fachlicher Konzepte ab, sondern legen den Schwerpunkt darauf, eine Beziehung zwischen dem Lernen und der Sache/dem Lerngegenstand aufzubauen. Ein Phänomen ist „eine bestimmte Art von Ereignis oder Prozess, der unter feststehenden Umständen regelmäßig eintritt“ (HACKING, 1996, 365) und durch Handeln erzeugt sowie erfahren bzw. erlebt werden kann (THEILMANN et al., 2013, 400). Das setzt eine fragende Grundhaltung voraus, in der die Lernenden eigenen Gedanken und Ideen nachgehen können (THEILMANN et al., 2013, 401) ohne frühzeitig mit vorgegebenen Fachbegriffen und Konzepten konfrontiert zu werden. Das Ziel besteht nicht darin, konformes Denken zu fördern oder falsche Standpunkte zu korrigieren, sondern in der Emanzipation des Lernenden von unreflektierten Ansichten z.B. über die Teilchennatur des Photons (THEILMANN et al., 2013, 402). Es geht nicht primär um den Nachvollzug wissenschaftlicher Erkenntniswege, sondern die Bindung der Lernprozesse an die Person des Lerner; der Lerner soll zum Augenzeugen der Naturerscheinung werden (THEILMANN et al., 2013, 402).

Ein phänomenologischer Zugang zur Quantenphysik eignet sich besonders, da sich die Quantenphysik auf das Beobachtbare, also die Observablen, beschränken muss. Nach THEILMANN et al. (2013) ist das wesentliche Merkmal eines Phänomens, dass dabei die Sache vollständig mit der Erscheinung übereinstimmt und es nichts darüber hinaus gibt. Dies entspricht einem zentralen Wesenszug der Quantenphysik, bei dem nur Aussagen über die beobachtbaren Erscheinungen gemacht werden können. Die mathematische Beschreibung in der Quantenphysik liefert lediglich Vorhersagen für die Observablen, ohne spezifische Aussagen über die Zustände eines Systems vor der Messung zu treffen. Stattdessen wird aus der sichtbaren Präparation abgeleitet, welche Zustände möglich sind. Die mathematischen Werkzeuge, wie komplexe Zahlen, Matrizen und Differentialgleichungen, sind auf dem notwendigen Niveau in der Schule oft noch nicht eingeführt oder werden von den Schüler/innen nicht ausreichend beherrscht.

Eine Herleitung von Gesetzmäßigkeiten oder Vorhersagen mittels dieser ist entsprechend im Unterricht nicht möglich, wes-

wegen die Konzepte und sich daraus ergebende Erwartungen für Experimente in einem konzeptionellen Ansatz lediglich qualitativ mitgeteilt werden können. Diese Vorhersagen werden später mittels realer Experimente geprüft oder, falls keine experimentellen Möglichkeiten bestehen, durch Simulationen visualisiert. Dabei ist zu beachten, dass Simulationen keine echten Wahrscheinlichkeiten abbilden können. Ein phänomenologischer Zugang ermöglicht es hingegen den Schüler/innen zunächst, die beobachtbaren Aspekte der Quantenphysik kennenzulernen, ohne tief in die Mathematik eintauchen zu müssen. Die Beobachtungen können anschließend im Unterricht gedeutet und später verallgemeinert werden. Der anschließenden Begriffsbildung geht somit die individuelle Bedeutungsfindung in Form empirischer Zusammenhänge und Gesetzmäßigkeiten voraus und reduziert sich auf das Beobachtbare.

Der hier vorgestellte Zugang ist für Schüler/innen der Sekundarstufe II geeignet, denen grundlegende Phänomene aus der Wellenoptik wie Interferenz oder Polarisation bereits bekannt sind. Aufgrund der geringen mathematischen Anforderungen und dem Schwerpunkt auf den eigenen Erfahrungen eignet sich der Zugang sowohl für den Grundkurs als auch für den Leistungskurs. Mit allen Experimenten umfasst der Zugang eine Dauer von ca. drei Doppelstunden. Die Experimente bauen nur teilweise aufeinander auf, so dass, z.B. aufgrund mangelnder Zeit, auch nur ausgewählte Experimente behandelt werden können.

Zur Strukturierung eines phänomenorientierten Unterrichtsangebots bieten sich die Phasen des Basismodells „Lernen durch Eigenerfahrung“ an (WACKERMANN & KRABBE, 2017), die in Tabelle 1 dargestellt sind. Die Phasen LdE 1 bis 3 entsprechen dem Predict-Observe-Explain Ansatz von WHITE & GUNSTONE (1992). Wichtig dabei ist, dass alle Schüler/innen sich vorab (schriftlich) auf eine Erwartung festlegen und diese möglichst begründen. Ebenso sollten sie ihre individuellen Beobachtungen und Deutungen aufschreiben. Der Fokus beim Erklären liegt darauf, Übereinstimmungen und Widersprüche zu den Vorhersagen und (unerwarteten) Beobachtungen bewusst zu machen, sodass die Schüler/innen ihre Vorstellungen und individuell konstruierten Erklärungen prüfen und ggf. revidieren. Lehrerklärungen (insbesondere der wissenschaftlichen Sichtweise) sollten zunächst vermieden werden.

Qualitätsmerkmal für die Durchführung des Lernprozesses nach dem Basismodell ist, dass die einzelnen Lernschritte vollständig und in der richtigen Reihenfolge durchlaufen werden (OSER & BAERISWYL, 2001). Dabei muss nicht für jedes der im Folgenden beschriebenen Experimente das Basismodell komplett durchlaufen werden. Es ist möglich z.B. für mehrere Experimente zunächst nacheinander die Phasen LdE 1 bis 3 zu durchlaufen und erst anschließend diese nach LdE 4 zusammenzufassen. Wichtig ist nur, dass im Lernprozess keine Phase des Basismodells übersprungen wird (KRABBE et. al., 2015).

4 Technische Umsetzung des Zugangs

Unter anderen mit dem Quantenkoffer der Firma Qutools (Abb. 1) und den Educational Kits von Thorlabs existieren inzwischen geeignete Aufbauten, um die hier vorgeschlagenen Experimente mit Schüler/innen durchzuführen. Die Geräte sind jedoch in der Anschaffung noch teuer und für Schulen kaum erschwinglich. In Universitäten und Schülerlaboren werden inzwischen solche Aufbauten in eingeschränkter Anzahl für schulische Lerngruppen verfügbar gemacht. So werden die hier vorgeschlagenen Experimente an der Ruhr-Universität-Bochum bereits mit Schulgruppen ausprobiert.

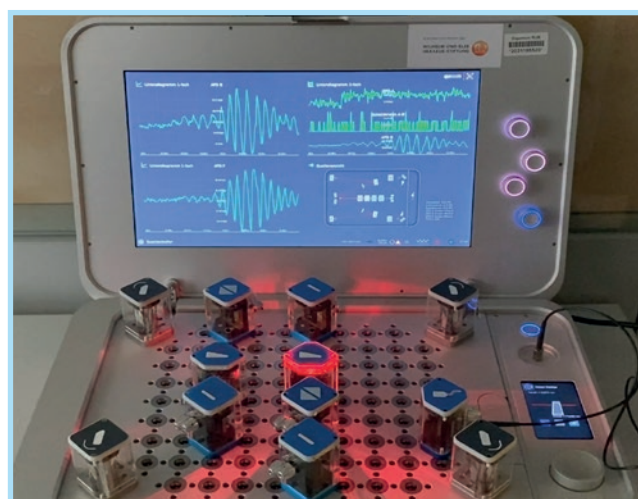


Abb. 1. Aufbau eines Mach-Zehnder-Interferometers mit dem Quantenkoffer

Phase	Umsetzung
LdE 1: Planen der Handlung	Eine leitende Fragestellung für die Untersuchung wird formuliert; relevante, unabhängige und abhängige Größen und Handlungen werden benannt; Erwartungen werden gesammelt (Predict).
LdE 2: Durchführen der Handlung	Die in LdE 1 festgelegten Handlungen werden durchgeführt und Beobachtungen festgehalten (Observe).
LdE 3: Konstruieren von Bedeutung	Verbalisierung der Beobachtungen durch die Schüler/innen; Abgleich mit den Erwartungen; erste individuelle Deutungsversuche (Explain)
LdE 4: Verallgemeinern der Erfahrungen	Aushandlung und schriftliche Fixierung einer konsensfähigen Deutung
LdE 5: Dekontextualisieren durch Reflexion ähnlicher Erfahrungen	Vergleich mit der klassischen Wellenoptik und Bewusstmachung von Unterschieden

Tab. 1. Phasen des Basismodells „Lernen durch Eigenerfahrung“ und deren Umsetzung im phänomenologischen Zugang

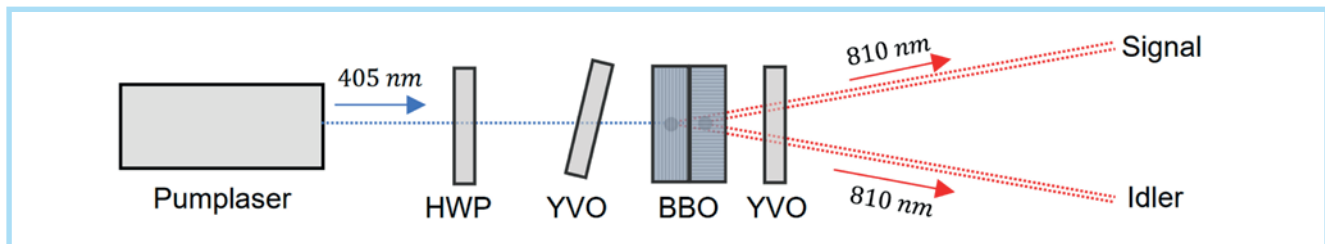


Abb. 2. Schematische Darstellung der Photonenquelle für in der Polarisation verschränkte Photonenpaare (vgl. CLEVE, 2023)

Für die Experimente wird eine nicht-klassische Lichtquelle verwendet, die Photonen in so großen zeitlichen Abständen aussendet, dass sich immer nur ein Photon gleichzeitig im Versuchsaufbau befindet. Bei einer Zählrate von $I = 150.000 \text{ counts/s}$ und c als Ausbreitungsgeschwindigkeit ergibt sich z.B. als Abschätzung mit der Annahme gleichmäßig verteilter Photonen ein Abstand zwischen zwei Photonen von $s = \frac{c}{I} = 1998 \text{ m}$. Da die Lichtwege innerhalb des Aufbaus weniger als 1 m betragen, kann daher davon ausgegangen werden, dass sich immer nur ein Photon gleichzeitig im Aufbau befindet.

Der Aufbau der Quelle ist in Abbildung 2 skizziert. Er wird in den folgenden Experimenten immer als „Blackbox“ mit der Beschriftung „Photonenpaare“ dargestellt. Mittels eines ultravioletten Pumplasers (405 nm) wird ein Beta-Bariumborat-Kristall (BBO) angeregt. Durch „Parametric Down Conversion“ (PDC) entsteht spontan unter Energie- und Impulserhaltung ein Paar von zwei roten Photonen (810 nm), welche aufgrund der Impulserhaltung räumlich auseinanderlaufen und gegenüberliegend verteilt auf einem Kegel austreten. Eines der Photonen (Signal) kann anschließend für Experimente genutzt werden, während das andere zur Ankündigung der Messung (Idler) dient (LOUDON, 2000). Dabei werden nur diejenigen Ereignisse gezählt, bei denen beide Photonen innerhalb eines vordefinierten Koinzidenzfensters (z.B. $\Delta t = 3 \text{ ns}$) registriert werden. Genutzt wird dieser Aufbau, um beispielsweise Photonen aus dem Umgebungslicht in den Messungen auszublenzen.

Darüber hinaus ist es möglich, mit der Lichtquelle polarisationsverschränkte Photonenpaare zu erzeugen. Zu diesem Zweck werden zwei senkrecht zueinanderstehende BBOs verwendet. Mit einem Halbwellenplättchen (HWP) wird die Polarisationsrichtung des Pumplasers so eingestellt, dass am ersten BBO zwei horizontal polarisierte und am zweiten BBO zwei vertikal polarisierte Photonen erzeugt werden können. Die beiden doppelbrechenden Ytterbiumvanadat-Kristalle (YVO) verschieben die Laufzeit in der vertikalen und horizontalen Polarisationsrichtung so gegeneinander, dass der Austrittskegel des vorderen BBOs mit dem des hinteren BBOs in Deckung gebracht wird. Der hintere YVO ist fest eingestellt. Der vordere YVO ist schräg dargestellt, da dieser verstellt werden kann, um den Grad der Verschränkung zu justieren. Je besser die aus beiden BBOs austretenden Kegel übereinander sind, desto größer ist der Grad der Verschränkung. Damit befinden sich die spontan erzeugten Photonenpaare in einem verschränkten Überlagerungszustand der beiden Polarisationsrichtungen.

Als Detektor für einzelne Photonen werden Avalanche-Photodioden (APD) im sogenannten Geigermodus eingesetzt. Diese

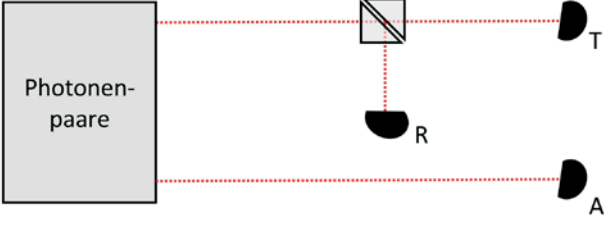
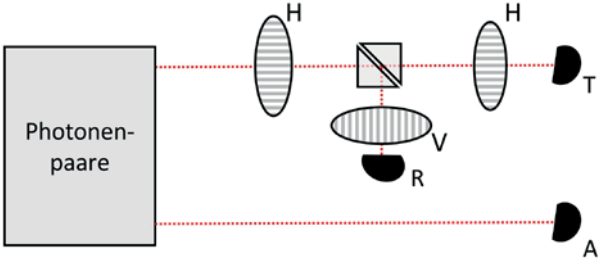
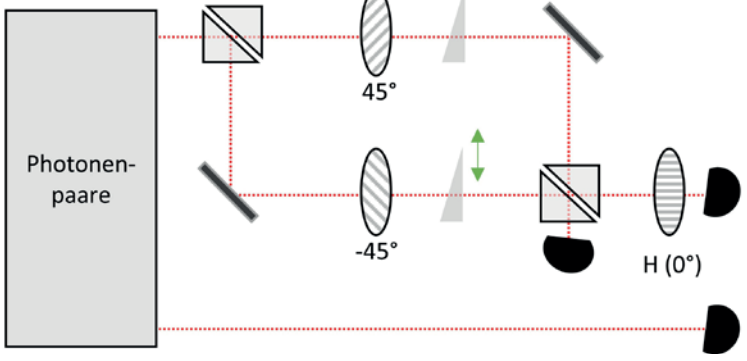
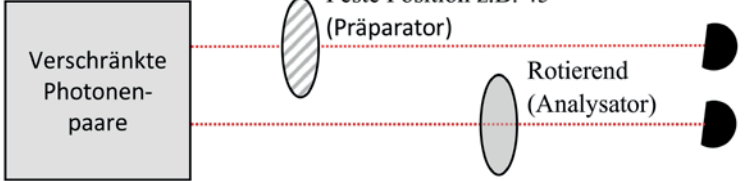
nutzen den inneren Photoeffekt in Halbleitern, wobei durch ein Photon ein Valenzelektron in das Leitungsband angehoben wird und durch eine angelegte Spannung in eine hochdotierte Multiplikationsschicht driftet, in der eine Ladungswave ausgelöst wird. Diese Ladungswellen werden gezählt.

5 Didaktische Umsetzung des Zugangs

Fachlicher Ausgangspunkt dieses Zugangs ist der Begriff der Energieportion des Lichts, wie er sich aus der Behandlung des Photoeffekts oder alternativ der Absorptionsspektren von Atomen ergibt. Wesentlich ist die Erkenntnis, dass die Energie von Licht immer nur in gequantelten Portionen absorbiert bzw. emittiert wird und nicht kontinuierlich. Die Größe der Energieportionen hängt von der Frequenz des Lichts ab, die Anzahl der Energieportionen bestimmt die Intensität des Lichts. Dies ist für den weiteren Verlauf notwendig, da die Detektoren in den Experimenten einzelne Ereignisse registrieren und keine Intensitäten, sondern Zählraten von Energieportionen angezeigt werden. Der Begriff der Energieportion wird im Folgenden bevorzugt, weil er weniger eine Teilchenvorstellung hervorruft als der Begriff Photon. In den Experimenten wird die Hypothese der Energieportionen des Lichts untersucht, um mehr über die Eigenschaften des Lichts zu erfahren und insbesondere zu klären, inwiefern die Vorstellung von Licht als elektromagnetische Welle mit der Vorstellung von lokalisierten Energieportionen zusammenpasst.

Kern des phänomenologischen Zugangs ist es, die eigenen Erkenntnisgrenzen zu reflektieren. Man kann Energieportionen des Lichts nicht direkt beobachten, sondern nur indirekt aus experimentellen Beobachtungen und Messungen auf ihre Eigenschaften und ihre mögliche Existenz schließen. Dabei muss man stets bestimmte Vorstellungen über die eingesetzten Apparate vorab akzeptieren, z.B., dass man mit Avalanche-Photodioden die Energieportionen des Lichts detektieren und zählen kann. In diesem Sinne basieren (analog zu einem Mikroskop) Beobachtungen, die mit dem Quantenkoffer hervorgebracht werden, zwar auf einer Gerätetheorie, können aber trotzdem als unmittelbare („theoriefreie“) Beobachtung gelten (HACKING, 1996).

In Kasten 1 wird ein Überblick über die einzelnen Experimente in einer empfohlenen Reihenfolge gegeben. In der linken Spalte ist dabei schematisch der Versuchsaufbau dargestellt. In der rechten Spalte finden sich die Erkenntnisse über die Energieportionen, die mit Hilfe der Experimente gewonnen werden können.

Schematische Darstellung des Aufbaus	Eigenschaften von Energieportionen
 <p>Abb. 3. Energieportionen am Strahlteiler</p>	<p>Energieportionen werden nicht gleichzeitig hinter beiden Ausgängen des Strahlteilers registriert.</p>
 <p>Abb. 4. Energieportionen und Polarisationsfilter</p>	<p>Energieportionen verhalten sich nach dem Durchlaufen eines Polarisationsfilters so, als ob sie polarisiert sind.</p>
 <p>Abb. 5. Energieportionen und Interferenz</p>	<ul style="list-style-type: none"> a) Auch bei einzelnen Energieportionen tritt in den Zählraten Interferenz auf. b) Werden die Wege durch Polarisationsfilter unterscheidbar gemacht, tritt keine Interferenz mehr auf (Komplementarität). c) Wird die Unterscheidbarkeit nachträglich aufgehoben, ist wieder Interferenz sichtbar (Delayed-Choice).
 <p>Abb. 6. Energieportionen und Verschränkung</p>	<p>Die Präparation einer Energieportionen hat unmittelbare Auswirkungen auf die andere Energieportionen.</p>

Energieportionen am Strahlteiler

Im ersten Experiment trifft das Licht der Lichtquelle auf einen Strahlteiler und wird mit drei Avalanche-Detektoren registriert (Abb. 3). Die Idee zu diesem Experiment beruht auf der Untersuchung von GRANGIER, ROGER und ASPECT (1986). Detektor (T) misst jeweils das Licht, das am Strahlteiler transmittiert wird, und ein weiterer Detektor (R) das Licht, das reflektiert wird. Detektor A dient der Ankündigung der Messung, um auszuschließen zu können, dass es sich bei detektierten Ereignissen um Umgebungslicht handelt.

Ausgangspunkt ist die Frage, wie das makroskopisch bekannte Verhalten eines Strahlteilers mit der Vorstellung von Energieportionen vereinbar ist. Als Ergebnis detektiert man in etwa gleich viele Koinzidenzen an den Detektoren T & A und R & A. Die beiden gemessenen Koinzidenzraten schwanken statistisch, sind aber für die Transmission und Reflexion immer etwa gleich groß. Alle drei Detektoren lösen allerdings so gut wie nie im vorgegebenen Koinzidenzfenster gleichzeitig aus. Transmissionen und Reflexionen treten also nicht gemeinsam auf. Es sollte aber vermieden werden, dies als Nachweis der Unteilbarkeit

der Energieportionen zu interpretieren. Das Experiment macht auch den statistischen Charakter von Quantenphänomenen deutlich. Es können nur Wahrscheinlichkeitsaussagen über die Verteilung der Ereignisse vorhergesagt werden, aber nicht, wann welche Ereignisse genau auftreten.

Energieportionen und Polarisierung

Aus der Optik ist bekannt, dass Licht polarisierbar ist. Es stellt sich daher die Frage, wie diese Welleneigenschaft mit Energieportionen vereinbar ist. Dafür wird der Lichtstrahl vor dem Strahlteiler mit einem Polarisationsfilter präpariert und dahinter mit weiteren Polarisationsfiltern analysiert (Abb. 4).

Entsprechend der Filtereinstellungen in Abbildung 4 würde man bei einer klassischen Lichtquelle an Detektor T eine hohe und bei Detektor R eine sehr niedrige Zählrate erwarten, da hier die Polarisationsfilter genau um 90° versetzt zueinander sind.

Tatsächlich wird für die Koinzidenz T & A eine hohe Zählrate (etwas niedriger als beim einfachen Strahlteiler) registriert, wogegen die andere Koinzidenz R & A auf nahezu 0 sinkt. Stellt man den Polarisationsfilter vor dem Strahlteiler vertikal, misst man nur für R & A Koinzidenzen, stellt man ihn auf 45° treten beide Koinzidenzen in etwa gleich häufig auf. Dreifach-Koinzidenzen (T & R & A) gibt es weiterhin so gut wie nie. Dies entspricht dem erwarteten Verhalten von polarisiertem Licht, wobei transmittierte und reflektierte Ereignisse weiterhin nicht gleichzeitig auftreten. In diesem Sinne zeigt das Licht zugleich einen wellenartigen und teilchenartigen Charakter.

Bei der Besprechung des Experiments sollte vermieden werden, den Energieportionen zu bestimmten Zeitpunkten eine Polarisationsrichtung zuzuschreiben. Es kann lediglich festgestellt werden, welchen Einfluss die Polarisationsfilter auf die Messung der Energieportionen in den Detektoren hat. Die Polarisationsfilter selbst bewirken (noch) keine Messung der Energieportionen und legen keine Polarisation der Energieportionen (endgültig) fest.

Energieportionen und Interferenz

Um dem scheinbaren Doppelcharakter des Lichts weiter nachzugehen, wird nun das Interferenzverhalten untersucht. Dabei stellt sich die Frage, wie sich die vermeintliche Unteilbarkeit der einzelnen Energieportionen mit der Überlagerung (Superposition) verschiedener Lichtwege verträgt.

Für den Aufbau wird das Strahlteilerexperiment mit zwei Spiegeln und einem weiteren Strahlteiler zu einem Mach-Zehnder-Interferometer erweitert (Abb. 5 ohne Polarisationsfilter). Zwei Glaskeile werden verwendet, um die Laufzeiten des Lichts entlang der beiden Wege zu variieren. Verändert man in einem der beiden Wege die Laufzeit, beobachtet man zeitlich aufgelöst in den Zählraten ein Interferenzmuster, d. h. einen Wechsel zwischen hohen und niedrigen Zählraten. Die Maxima und Minima in den beiden Detektoren sind (aufgrund der Energieerhaltung) gegenläufig. Dies darf nicht mit der Tatsache verwechselt werden, dass die Ereignisse in beiden Detektoren weiterhin nicht gleichzeitig auftreten. Auch in diesem Experiment zeigt

Licht demnach gleichzeitig mit der Interferenz Wellencharakter und andererseits mit der Antikorrelation der Energieportionen Teilchencharakter auf. Zudem beobachtet man das Interferenzmuster nur auf einem begrenzten Intervall der Laufzeitunterschiede zwischen den beiden Wegen. Bedenkt man aufgrund des räumlichen Abstands der Energieportionen der Lichtquelle, dass sich im Interferometer immer nur einzelne Energieportionen befinden, kann das ein Hinweis auf die begrenzte räumliche Ausdehnung der Energieportionen sein, die sich daraus abschätzen ließe.

Der Aufbau kann um zwei Polarisationsfilter in beiden Wegen erweitert werden. Zunächst kann gezeigt werden, dass das Einstellen einer gleichen Polarisationsrichtung in beiden Wegen keinen Einfluss auf die Interferenz hat. Dann wird ein Polarisationsfilter um 90° verdreht und der bekannte Bereich für das Interferenzmuster wieder abgefahren. Das Interferenzmuster lässt sich nicht mehr beobachten. Weitere Messungen zeigen, dass das Interferenzmuster immer dann vollständig verschwindet, wenn die Polarisationsfilter um 90° versetzt sind, z.B. 45° auf -45° . Das Interferenzmuster erscheint wieder, sobald es eine gemeinsame Komponente der Polarisationsfilter gibt, die Wege hinsichtlich der Polarisation also nicht mehr klar unterscheidbar sind. Die Unvereinbarkeit der Unterscheidbarkeit der Wege und der Interferenz wird als Komplementarität bezeichnet.

Nun stellt sich die Frage was passiert, wenn ein weiterer Polarisationsfilter hinter dem Interferometer eingebaut wird, um die zunächst unterscheidbaren Wege wieder ununterscheidbar zu machen (Abb. 5). Führt man das Experiment durch, tritt hinter dem zusätzlichen Polarisationsfilter wieder Interferenz auf. An dem anderen Detektor ohne Polarisationsfilter zeigt sich dagegen weiterhin keine Interferenz. Die Möglichkeit dieser späten Entscheidung (delayed choice) zwischen Interferenz und keiner Interferenz widerspricht unserer Alltagsvorstellung, dass vorher feststehen sollte, welche Wege des Interferometers die Energieportionen durchlaufen oder nicht durchlaufen haben. Da es anscheinend möglich ist, zuvor präparierte Eigenschaften nachträglich aufzuheben, bezeichnet man dieses Experiment als „Quantenradierer“. Damit wird generell die Frage aufgeworfen, welche Aussagen man über die Eigenschaften (Zustände) einzelner Energieportionen vor einer Messung machen kann. Es kann festgehalten werden, dass offenbar nur kausale Vorhersagen über die Häufigkeitsverteilungen an den Detektoren gemacht werden können, aber nichts über das Wesen der Energieportionen (Welle-Teilchen-Dualismus) ausgesagt werden kann. Die Frage, ob man sich Licht als Welle oder Teilchen vorstellen sollte, ist damit hinfällig. Nach dieser Klärung ist es nun möglich, auch die Bezeichnung Photon für die Energieportionen zu verwenden.

Energieportionen und Verschränkung

Zum Abschluss wird mit der Verschränkung ein neuartiges Phänomen der Quantenphysik thematisiert, welches die Grundlage für moderne Quantentechnologien (z.B. Kryptologie und Quantencomputer) bildet und den Aspekt der Kausalität in der Quantenphysik vertieft. Die Fragestellung ist nun, wie sich die Ver-

schränkung zweier Photonen in Beobachtungen zeigt. Mit der Lichtquelle werden polarisationsverschränkte Photonenpaare erzeugt. Zunächst können zwei Polarisationsfilter in den gleichen Strahlengang eingebaut werden. Der erste Polarisationsfilter (Präparator) wird auf einen festen Winkel φ_P gestellt und der zweite Polarisationsfilter (Analysator) kontinuierlich in Rotation versetzt. Die Koinzidenzrate der beiden Detektoren wird in Abhängigkeit vom Winkel des rotierenden Polarisationsfilters φ_A in einem Polardiagramm aufgetragen (Abb. 7). Der Abstand vom Ursprung ist proportional zur Koinzidenzrate. Die Koinzidenzen werden maximal, wenn die Orientierung des Analysators mit der des Präparators (hier 45° bzw. 225°) übereinstimmt, und werden null, wenn diese orthogonal zueinander stehen. So entsteht das Bild einer „Acht“ (Abb. 7), die um den Winkel des Präparators φ_P verdreht ist. Dies entspricht dem klassischen Gesetz von MALUS, wonach die durchgelassene Lichtintensität durch zwei Polarisationsfilter durch $I(\varphi_P, \varphi_A) = I_0 \cdot \cos^2(\varphi_A - \varphi_P)$ gegeben ist. Verändert man den Winkel des Präparators, so dreht sich die Orientierung der „Acht“ entsprechend.

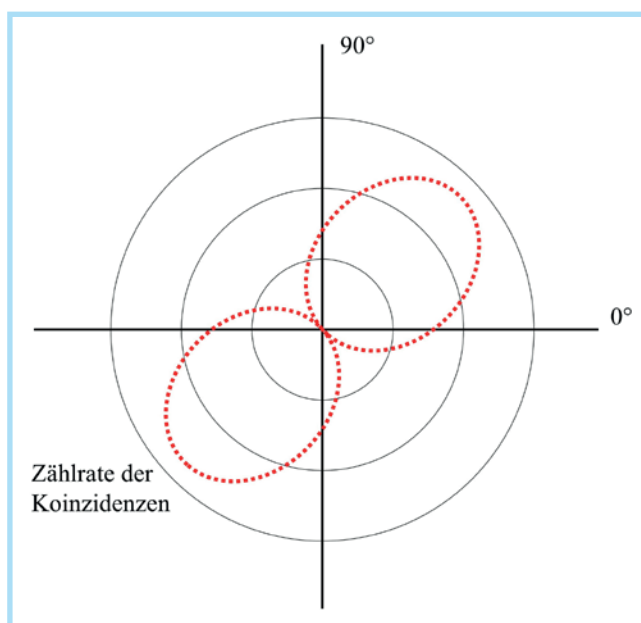


Abb. 7. Polardiagramm zum Experiment mit verschränkten Photonen

Anschließend werden die beiden Polarisationsfilter getrennt in die beiden Strahlgänge der verschränkten Photonen eingebaut (Abb. 6). Der präparierende Polarisationsfilter wird wieder festgehalten, der analysierende kontinuierlich rotiert und die Koinzidenzrate der beiden Detektoren in Abhängigkeit vom Winkel des rotierenden Polarisationsfilters in einem Polardiagramm aufgetragen.

Klassisch würde man für unpolarisiertes Licht im Polardiagramm einen Kreis erwarten, da die beiden Polarisationsfilter in keiner Verbindung miteinander stehen und die Strahlengänge unabhängig sind. Tatsächlich zeigt sich im Polardiagramm aber wieder das Bild einer „Acht“, deren Orientierung sich verändert, wenn man den oberen Polarisationsfilter verdreht.

Solange nur die Koinzidenzen betrachtet werden, können beide Polarisationsfilter entlang der Strahlengänge beliebig verschoben und vertauscht werden, ohne das Ergebnis zu verändern. Offensichtlich gibt es eine „Fernwirkung“ zwischen den Photonen der beiden Strahlengänge, die man als Verschränkung bezeichnet.

Weiterführende Überlegungen hinsichtlich des Informationsaustausches zwischen den verschränkten Photonen (Nicht-Lokalität, Informationsübertragung mit Überlichtgeschwindigkeit) können sich anschließen, entziehen sich jedoch den experimentellen Möglichkeiten des hier vorgestellten phänomenologischen Zugangs.

6 Abschließende Diskussion

Der hier vorgestellte phänomenologische Zugang bietet den Schüler/innen über Experimente mit Photonen unmittelbare Erfahrungen zu Phänomenen und Wesenszügen der Quantenphysik. Dabei wird Fragen nach der Vereinbarkeit von Wellen- und Teilcheneigenschaften des Lichts nachgegangen, die zu der Erkenntnis führen, dass Aussagen über das Wesen der Photonen (Welle-Teilchen-Dualismus) nicht zweckmäßig sind und man sich auf die beobachtbaren Phänomene beschränken muss. Die Experimente verdeutlichen auch, dass es in der Quantenphysik nur eine stochastische (d.h. nicht-deterministische) Kausalität gibt.

Für die Strukturierung des Lernprozesses bietet sich das Basismodell „Lernen durch Eigenerfahrung“ an. Durch das Planen der Handlung sollen den nachfolgenden Handlungen im Vorfeld Sinn und Zweck gegeben und die Beobachtungen entsprechend fokussiert werden. In der Phase der Konstruktion von Bedeutung erhalten die Schüler/innen die Möglichkeit, das Beobachtete mit eigenen Worten zu formulieren und diese Formulierungen dann gemeinsam kritisch zu reflektieren. Dabei kommt es darauf an, Formulierungen, die über das Erfahrbare hinaus gehen, möglichst zu vermeiden, etwa welchen Weg die Photonen nehmen.

Quantenphysikalische Phänomene entziehen sich einer direkten sensitiven Wahrnehmung und sind nur indirekt über Messgeräte erfassbar. Die Lernenden müssen akzeptieren, dass das Licht der eingesetzten Lichtquelle nicht als Lichtstrahl sichtbar ist, aber seine Energieportionen mit den Detektoren gezählt werden können. Aufgrund der hohen Anschaffungskosten können derartige Experimente i.d.R. nur in Schülerlaboren durchgeführt werden, in denen auch nur ein Aufbau zur Verfügung steht. Dabei tritt anstelle der individuellen Exploration somit eine gemeinschaftliche Durchführung, der jedoch eine Planung und Auswertung in Kleingruppen vorausgehen bzw. nachfolgen kann. Sowohl die direkte sensitive Wahrnehmung als auch das individuelle Explorieren sind aber keine zwingende Voraussetzung für einen phänomenologischen Zugang (THEILMANN et al., 2013). Der zentrale Ansatz eines phänomenologischen Zugangs ist, dass die Sache nur das Erfahrbare selbst ist und darüber hinaus nichts gesagt werden kann.

Literatur

BITZENBAUER, P. (2020). *Quantenoptik an Schulen*. Logos Verlag.

BITZENBAUER, P. & MEYN, J.-P. (2020). A new teaching concept on quantum physics in secondary schools. *Physics Education*, 55(5), 055031. DOI: 10.1088/1361-6552/aba208.

CLEVE, J.-N. (2023). *Die Wesenszüge der Quantenphysik qualitativ und quantitativ – Entwicklung eines Lehrgangs zu Experimenten mit dem Quantenkoffer*. Masterarbeit an der Ruhr-Universität Bochum.

FISCHLER, H. & LICHTFELDT, M. (1994). Ein Unterrichtskonzept zur Einführung in die Quantenphysik. *Physik in der Schule*, 32(7/8), 276–280.

GRANGIER, P.; ROGER, G. & ASPECT, A. (1986). Experimental Evidence for a Photon Anticorrelation Effect on a Beam Splitter: A New Light on Single-Photon Interferences. *Europhysics Letters*, 1(4), 173–179.

HACKING, I. (1996) *Einführung in die Philosophie der Naturwissenschaften*. Reclam.

LOUDON, R. (2000). *The quantum theory of light*. OUP-Oxford.

Ministerium für Schule und Bildung des Landes Nordrhein-Westfalen (2022). *Kernlehrplan für die Sekundarstufe II Gymnasium / Gesamtschule in Nordrhein-Westfalen. Physik*. 1. Aufl., Düsseldorf (4721).

MÜLLER, R. & SCHECKER H. (2018). *Schülervorstellungen zur Quanten- und Atomphysik*. In H. SCHECKER, T. WILHELM, M. HOPF & R. DUIT (Hg.), *Schülervorstellungen und Physikunterricht* (S. 209–224). Springer.

MÜLLER, R. & WIESNER, H. (2000). Das Münchener Unterrichtskonzept zur Quantenmechanik. *Physik in der Schule*, 38(2), 126–134.

MÜLLER, R. & WILHELM, T. (2021). *Unterrichtskonzeptionen zur Quantenphysik*. In T. WILHELM, H. SCHECKER & M. HOPF (Hg.), *Unterrichtskonzeptionen für den Physikunterricht. Ein Lehrbuch für Studium, Referendariat und Unterrichtspraxis* (S. 335–368). Springer Spektrum. https://doi.org/10.1007/978-3-662-63053-2_11.

OSER, F. & BAERISWYL, F. (2001). Choreographies of teaching: bridging instruction to learning. In: V. RICHARDSON (Ed.), *AERA's handbook of research on teaching* (4th Ed.), American Educational Research Association, 1031–1065.

RODE, M. (2017). Falsche Freunde. *Unterricht Physik*, 28(162), 15–19.

THEILMANN, F., BUCK, P., MURMANN, L., ØSTERGAARD, E., HUGO, A., DAHLIN, B., AESCHLIMANN, U. & RITTERSBACHER, C. (2013). Phänomenologische Naturwissenschaftsdidaktik: Erkenntnis- und wissenschafts-theoretische Positionierung und erziehungswissenschaftliche Folgerungen. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 19, 397–416.

V. AUFSCHNAITER, C. & ROGGE, C. (2010). Wie lassen sich Verläufe der Entwicklung von Kompetenz modellieren. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 16, 95–114.

WACKERMANN, R. & KRABBE, H. (2017). Die Basismodelle des Lehrens und Lernens. Ein Analysewerkzeug zur Aus- und Weiterbildung von Physiklehrkräften. *MNU Journal*, 70(2), 122–129.

WHITE, R., & GUNSTONE, R. (1992). *Probing understanding*. New York: The Falmer Press.

WILHELM, T., SCHECKER, H., & HOPF, M. (2021). *Unterrichtskonzeptionen für den Physikunterricht*. Springer.

DR. MARCO SEITER, marco.seiter@rub.de ist akademischer Rat in der Didaktik der Physik an der Ruhr-Universität Bochum, Universitätsstraße 150, 44801 Bochum.

VIKTORIA KONIECZNY, viktoria.konieczny@rubd.de ist wiss. Mitarbeiterin in der Didaktik der Physik an der Ruhr-Universität Bochum, Universitätsstraße 150, 44801 Bochum.

Prof. DR. HEIKO KRABBE, heiko.krabbe@rub.de, ist Professor für Didaktik der Physik an der Ruhr-Universität Bochum, Universitätsstraße 150, 44801 Bochum. ■