

Heiko Krabbe¹
 Marco Seiter¹
 Viktoria Konieczny¹

¹Ruhr-Universität Bochum

Phänomenologischer Zugang zur Quantenphysik

Motivation

Die Quantenphysik und damit verbundene Technologien haben eine große Zukunftsbedeutung und sollten daher Teil des Allgemeinwissens zukünftiger Generationen von SchülerInnen sein. Eine adäquate quantenphysikalische Bildung wird daher bereits in den Bildungsstandards und Kompetenzanforderungen der Bundesländer gefordert (z.B. MSB NRW, 2022).

In der Schule und im Alltag der SchülerInnen existieren wenig Berührungspunkte mit quantenphysikalischen Phänomenen, weshalb die SchülerInnen im Gegensatz zur klassischen Physik wenig Möglichkeiten zur Anbindung an eigene Vorerfahrungen haben. Dies kann zu Lernschwierigkeiten führen, da SchülerInnen aus der klassischen Physik z.B. Vorstellungen von Kausalität, Determinismus und Wahrscheinlichkeiten haben, die nicht mit den Prinzipien der Quantenphysik übereinstimmen. Sie erwarten beispielsweise eine genaue Vorhersagbarkeit und verbinden Wahrscheinlichkeitsaussagen mit Ungenauigkeit (Müller & Schecker, 2018).

Bisherige Ansätze zur Vermittlung quantenphysikalischer Inhalte in der Schule verfolgen meist einen konzeptionellen Zugang. So verwenden Müller und Wiesner (2000) sowie Bitzenbauer (2020) Simulationen und Experimente hauptsächlich zur Bestätigung der als Wesenszüge der Quantenphysik eingeführten Konzepte. Diese methodische Herangehensweise hat jedoch den Nachteil, dass sie den Lernenden wenig Raum für eigenständige Überlegungen und authentische experimentelle Erfahrungen lässt. Aus diesem Grund wird in diesem Beitrag ein phänomenologischer Zugang zur Quantenphysik vorgestellt.

Grundideen des Zugangs

Der phänomenologische Zugang stellt das exploratives Erfahrungslernen vor das Konzeptlernen (Krabbe, Zander & Fischer, 2015), um authentische experimentelle Erfahrungen zu ermöglichen. Die Lernenden sollen aus einem intuitiv-regelbasierten Vorgehen eigenständige Konzeptvorstellungen entwickeln, die dann zu fachlichen Konzepten weiter ausgebaut werden können (v. Aufschnaiter & Rogge, 2010).

Die Quantenoptik bietet hierzu ein breites Spektrum an möglichen Experimenten an, in denen der Frage nachgegangen werden kann, wie sich die Wellenvorstellung des Lichts mit dem Teilchencharakter von Photonen vereinbaren lässt.

Ausgangspunkt für den Lernenden bilden die Welleneigenschaften von Licht. In der klassischen Physik wird Licht als elektromagnetische Welle beschrieben, die durch ihre Wellenlänge, Frequenz und Amplitude charakterisiert wird. Mit Hilfe dieser Beschreibung lassen sich Phänomene wie Beugung, Brechung und Interferenz beschreiben und erklären. Auch sollten die Lernenden bereits über eine Vorstellung zur Polarisierung von Licht als Ausprägung der Schwingungsrichtung einer elektromagnetischen Welle bekannt sein. Zusätzlich zur Welleneigenschaft benötigen die Lernenden eine Vorstellung von Licht als quantisierte Energieportionen. Diese Vorstellung kann z.B. durch den Photoeffekt motiviert werden. Die Ergebnisse aus dem Experiment zum Photoeffekt können so interpretiert werden, dass Licht Energie nur in diskreten Portionen überträgt, was sich durch die klassische Wellentheorie nicht

erklären lässt und somit einer Erweiterung darstellt. Hierbei ist zu betonen, dass der Photoeffekt kein Nachweis für die Existenz von Photonen ist, da auch eine halbklassische Erklärung ohne die Annahme von Energiequanten möglich ist (Rode, 2017). Für den phänomenologischen Zugang reicht aber eine erste Vorstellung von Licht bestehend aus einzelnen Energieportionen.

Realisierung

Die hier vorgestellten Experimente können z.B. mit dem Quantenkoffer der Firma Qutools realisiert werden. Die Erzeugung der Photonenpaare erfolgt über „Parametric Down Conversion“ an einem Beta-Bariumborat (BBO) Kristall. Durch die Anregung mit einem Pumplaser (405 nm) entstehen unter Energie- und Impulserhaltung zwei „rote“ Photonen (810 nm). Die Lichtquelle weist eine Sub-Poisson-Verteilung auf, d. h. das einzelne Photonenpaare in so großen zeitlichen Abständen ausgesendet werden, dass sich immer nur ein Photonenpaar gleichzeitig im Aufbau befindet. Eines der Photonen (Signal) kann anschließend für Experimente genutzt werden, das andere dient z.B. der Ankündigung (Idler). Verwendet man zwei BBO-Kristall in bestimmter Weise, kann das Photonenpaar sogar in der Polarisation verschränkt werden (Bitzenbauer, 2020). Abbildung 1 zeigt exemplarisch den Aufbau des Experiments zur Verschränkung. In den vorderen und hinteren Strahlengang ist jeweils ein Polarisationsfilter eingebaut. Einer der Polarisationsfilter wird auf eine feste Position (z.B. 45°) eingestellt und der andere in Rotation versetzt. Anhand der Koinzidenzzählraten kann anschließend Verschränkung beobachtet werden, da diese immer maximal wird, wenn beide Polarisationsfilter die gleiche Orientierung haben und minimal, wenn diese um 90° versetzt sind.

Neben den in diesem Beitrag vorgestellten Experimenten bietet der Koffer einen flexiblen Aufbau weiterer Versuche, da die einzelnen Bausteine auf dem Steckbrett beliebig angeordnet werden können. Somit können z.B. als Erweiterung eigene Ideen der Lernenden zur weiteren Exploration der Quantenoptik aufgebaut und untersucht werden.

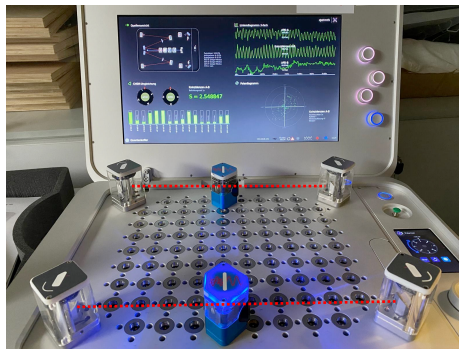


Abb. 1 Experiment zur Verschränkung am Quantenkoffer (QuTools)

Aufbau des Lehrgangs

Das übergeordnete Ziel der Experimente besteht darin, naive Vorstellungen von Photonen als einfache Teilchen, beispielsweise in Form von kugelförmigen Objekten, zu hinterfragen und weiter auszudifferenzieren. Die Experimente dienen dazu, überraschende Phänomene aufzuzeigen, die nicht mit dieser vereinfachten Vorstellung von Teilchen in Einklang stehen. Ein

zentraler Aspekt ist die Frage, wie sich bekannte Eigenschaften von Licht als Welle wie Polarisation und Interferenz mit der Vorstellung von Energieportionen als Teilchen vereinbaren lassen. Der Erkenntnisweg verfolgt eine möglichst theoriefreie Beschreibung der Befunde, zunächst auch ohne Erklärungen.

Experiment 1: Energieportionen am Strahlteiler

Im ersten Experiment trifft ein Strahl aus einzelnen Photonen (Signal) auf einen Strahlteiler. Ein Detektor misst das Licht, das am Strahlteiler transmittiert wird, indem er die eingehenden Energieportionen registriert, während ein anderer das reflektierte Licht registriert. Um sicherzustellen, dass es sich bei den detektierten Ereignissen nicht um Umgebungslicht handelt, kann zur Ankündigung das Idler-Photon detektiert werden. Die Messungen zeigen, dass Transmissionen und Reflexionen nicht gleichzeitig auftreten, die Energieportionen also offenbar nicht aufgeteilt werden.

Experiment 2: Energieportionen und Polarisation

Im zweiten Experiment wird der Photonenstrahl vor dem Strahlteiler mit einem Polarisationsfilter präpariert und dahinter mit weiteren Polarisationsfiltern analysiert. Die Messungen zeigen, dass sich die Energieportionen so verhalten, als wären sie polarisiert, aber immer noch einzeln an einem der beiden Detektoren erfasst werden. Licht zeigt somit gleichzeitig Welleneigenschaften in Form der Polarisation und Teilchencharakter bei der Unteilbarkeit der Energieportionen.

Experiment 3: Energieportionen und Interferenz

Ein Interferometer (z.B. Mach-Zehnder) wird verwendet, um das Interferenzverhalten des Lichts zu untersuchen. Der Photonenstrahl wird in zwei Wege aufgeteilt und anschließend durch Spiegel und einen weiteren Strahlteiler wieder zusammengeführt. Durch Variation der Laufzeit in einem der beiden Wege kann ein Interferenzmuster beobachtet werden. Wieder zeigt sich gleichzeitig Interferenz und die Unteilbarkeit der Energieportionen des Lichts.

Experiment 4: Interferenz und Weginformationen

Als Erweiterung des Interferometers werden Polarisationsfilter in die beiden Wege eingebaut, um diese unterscheidbar zu machen. Wenn die Polarisationsfilter um 90° versetzt sind, verschwindet das Interferenzmuster. Dies verdeutlicht den Gegensatz zwischen der Unterscheidbarkeit der Wege und der Interferenz, bekannt als Komplementarität.

Experiment 5: Verzögerte Entscheidungen im Quantenradierer

Ein zusätzlicher Polarisationsfilter mit 45° wird hinter dem Interferometer eingebaut, um die zuvor unterscheidbaren Wege wieder ununterscheidbar zu machen. Das Interferenzmuster tritt dann wieder auf. Die Möglichkeit dieser späten Entscheidung (delayed choice) zwischen Interferenz und keiner Interferenz zeigt, dass zuvor präparierte Eigenschaften nachträglich aufgehoben werden können, solange noch keine Messung stattgefunden hat.

Experiment 6: Verschränkung von Photonen

Mit einer Lichtquelle werden polarisationsverschränkte Photonenpaare erzeugt. In beide Strahlengänge des Photonenpaares werden Polarisationsfilter eingebaut. Der erste Polarisationsfilter wird auf einen festen Winkel gestellt und der zweite kontinuierlich in Rotation versetzt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Koinzidenzen maximal sind, wenn die Orientierung

der beiden Polarisationsfilter übereinstimmt, und null sind, wenn diese orthogonal zueinander stehen.

Literatur

- Bitzenbauer, P. (2020). *Quantenoptik an Schulen. Studie im Mixed-Methods Design zur Evaluation des Erlanger Unterrichtskonzepts zur Quantenoptik*. Logos Verlag Berlin.
- 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.
- Krabbe, H., Zander, S. & Fischer, H. E. (2015). *Lernprozessorientierte Gestaltung von Physikunterricht. Materialien zur Lehrerfortbildung*. Waxmann.
- Ministerium für Schule und Bildung des Landes Nordrhein-Westfalen (2022). *Kernlehrplan für die Sekundarstufe II Gymnasium / Gesamtschule in Nordrhein-Westfalen. Physik*. 1. Aufl. Düsseldorf.
- Müller, R. & Wiesner, H. (2000). Das Münchener Unterrichtskonzept zur Quantenmechanik. *Physik in der Schule*, 38(2), 126–134.
- Rode, M. (2017). *Falsche Freunde*. Unterricht Physik, 28(162), 15–19.
- v. Aufschnaiter, C. & Rogge, C. (2010). Wie lassen sich Verläufe der Entwicklung von Kompetenz modellieren. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 16, 95–114.