

Praxisorientiertes Fortbildungskonzept für Lehrkräfte mit Selbstlernseinheiten zur Quantenphysik

- Fokus auf dem Nachweis der Quantennatur des Lichts und der Erzeugung einzelner Photonen -

Kim Kappl*, Stefan Aehle†, Philipp Scheiger*

*Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 57, 70569 Stuttgart †Friedrich-Schiller-Universität Jena, August-Bebel-Straße 4, 07743 Jena
kkappl@pi5.physik.uni-stuttgart.de

Kurzfassung

Anknüpfend an einen gleichnamigen Vortrag werden hier Ergebnisse der Kooperation zweier Arbeitsgruppen der Universität Stuttgart und Friedrich-Schiller-Universität Jena vorgestellt, die daran arbeiten, einen Teil des hohen Bedarfs an Lehrerfortbildungen zur Quantenphysik zu decken. In diesem Beitrag wird ein didaktisches Konzept rund um die Eigenschaften einzelner Photonen näher erläutert. So wird beispielsweise in einem interaktiven, aktivierenden Moodle-Kurs die Erzeugung einzelner Photonen basierend auf Grundlage der Spontaneous Parametric Down Conversion (SPDC) vorgestellt.

1. Motivation

Durch die Einführung der neuen Bildungsstandards der Kultusministerkonferenz aus dem Jahr 2020 [1] wurden die Fachinhalte aus dem Bereich der Quantenphysik und Materie zunehmend gestärkt. Teilweise wurden neue Begriffe, wie beispielsweise das „quantenmechanische Weltbild hinsichtlich der Begriffe Realität, Lokalität, Kausalität und Determinismus“ oder die „Koinzidenzmethode zum Nachweis einzelner Photonen“ in die Bildungsstandards übernommen, obwohl nur sehr wenige Lehrkräfte unter diesen Begriffen etwas verstehen.

Aus diesem Grund wurde eine Kooperation zwischen den Arbeitsgruppen „Physik und ihre Didaktik“ der Universität Stuttgart und der „AG Fachdidaktik der Physik und Astronomie“ der Friedrich-Schiller-Universität Jena ins Leben gerufen, welche einem möglichen Fortbildungsbedarf zu den neuen (und alten) Themen der Quantenphysik und Materie gerecht werden soll.

Im Laufe dieses Artikels wird zunächst das grobe Konzept der geplanten Fortbildung erläutert. Im Anschluss folgt eine detailliertere Analyse des Teils zur Koinzidenzmethode zum Nachweis einzelner Photonen. Hier werden die einzelnen Kurse näher erläutert. Daran anknüpfend werden Experimente zum vertieften Verständnis der theoretischen Fachinhalte vorgestellt.

2. Fortbildungskonzept

Die geplante Fortbildung besteht aus insgesamt drei Teilen: der Selbststudiums-, der Online- und der Präsenzphase.

In der Selbststudiumsphase bekommen die Lehrkräfte die Möglichkeit, sich die Fachinhalte mithilfe eines Moodle-Kurses eigenständig zu erarbeiten. Der

Moodle-Kurs ist in die folgenden vier Teile gegliedert (vgl. Abbildung 1):

- Fachinhalte Quantenphysik (Kurse Q1 bis Q7),
- Fachinhalte Atomphysik und Materie (Kurse A1 bis A8),
- Unterrichtsmaterialien,
- Weiterführende Links und Verweise.

Unter den jeweiligen Fachinhalten sind mehrere Einzelkurse zu finden, in denen die physikalischen Inhalte in Form von interaktiven H5P-Dateien aufgearbeitet sind. Diese dienen den Lehrkräften zur eigenständigen Erarbeitung der Fachinhalte. In der Kategorie „Unterrichtsmaterialien“ sind Bilder, Videos, Tafelbilder, Übungsaufgaben, etc. zu finden, welche die Lehrkräfte zu ihrer freien Verfügung für ihren Unterricht einsetzen dürfen und sollen.

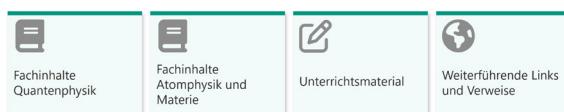


Abb. 1: Screenshot der Aufteilung der Inhalte im Moodle-Kurs. Eigene Abbildung.

Nach der Selbststudiumsphase folgt eine Online-Sitzung, in welcher die jeweiligen Inhalte nochmal besprochen werden können und Raum für etwaige Fragen gegeben wird. Des Weiteren können hier mögliche Ideen für Unterrichtsumsetzungen diskutiert werden.

Zuletzt folgt eine Präsenzveranstaltung, um die in der Theorie erlernten Inhalte in der Praxis zu sehen. Die Präsenzveranstaltung dient also zur Demonstration aufwändiger Experimente, aber auch zur Inspiration neu entwickelter Schulexperimente.

Eine ausführlichere Darstellung der geplanten Fortbildung ist in einem gleichnamigen Beitrag zu finden [2]. Im Laufe dieses Artikels wird jedoch genauer auf einen Kurs eingegangen, und zwar auf den Kurs aus dem Bereich „Fachinhalte Quantenphysik“ mit dem Titel „Q1: Die Koinzidenzmethode zum Nachweis einzelner Photonen“.

3. Kurs Q1: Die Koinzidenzmethode zum Nachweis einzelner Photonen

Der Kurs Q1 zur Koinzidenzmethode zum Nachweis einzelner Photonen ist in insgesamt drei kleinere Kurse unterteilt:

3.1. Kurs Q1.1: Das Hanbury-Brown-Twiss-Experiment

In diesem Kurs wird zunächst das grundlegende Experiment zum Nachweis einzelner Photonen dargestellt: Das Hanbury-Brown-Twiss-Experiment, bestehend aus lediglich einem Strahlteiler, zwei Einzelphotonendetektoren und einem TimeTagger, welcher die Koinzidenzen zwischen den Signalen der beiden Detektoren zählt. Nach der Beleuchtung der einzelnen Komponenten wird eine Überlegung angeführt, was passieren würde, wenn in den Versuchsbau eine klassische elektromagnetische Welle einfallen würde, im Vergleich zu einem einzelnen, unteilbaren Teilchen. Dies führt zur Unterscheidung zwischen der Messung von Koinzidenzen im Falle einer einfallenden elektromagnetischen Welle und der Messung von Anti-Koinzidenzen im Falle eines unteilbaren Teilchens. Da sich Letzteres im Jahr 1977 erstmals durch H. J. Kimble et al. experimentell bestätigen ließ [3], bietet das Hanbury-Brown-Twiss-Experiment (im Gegensatz zum in der Schule eher weit verbreiteten fotoelektrischen Effekt) einen direkten Beweis für die Quantennatur des Lichts.

Dieser Kurs ist als absolutes Grundwissen zum Thema der Koinzidenzmessung anzusehen, welches zum Unterrichten in der Schule relevant ist. Alle weiteren Kurse (Q1.2, Q1.3 und Q6) stellen Vertiefungsthemen dar und sind im Moodle-Raum auch explizit als solche gekennzeichnet.

3.2. Kurs Q1.2: Einzelphotonendetektion

In diesem Kurs wird die Funktionsweise einer sogenannten Avalanche-Photodiode, welche heutzutage in der Regel zur Detektion einzelner Photonen eingesetzt wird, erklärt. Dabei wird ebenfalls auf etwaige Störfaktoren, wie beispielsweise das Afterpulsing (Nachpulsen), die Dark Counts (Dunkelrauschen) und die Totzeit der Detektoren eingegangen. Ein beispielhafter Auszug aus der zu diesem Thema erstellten H5P-Datei ist in Abbildung 2 zu sehen.

3.3. Kurs Q1.3: Photonenstatistik

In diesem letzten Kurs wird die Koinzidenzmessung im Rahmen der Photonenstatistik detailliert erläutert. Dabei wird die sogenannte Korrelationsfunktion 2. Ordnung (kurz: $g^{(2)}$ -Funktion) hergeleitet, da sie im

Probleme bei der Einzelphotonendetektion durch Detektoreigenschaften

1. "Afterpulsing"

Nachdem nun die Funktionsweise einer Avalanche-Photodiode bekannt ist, wollen wir die etwaigen Probleme bei der Detektion einzelner Photonen näher beleuchten.

Im Allgemeinen lassen sich alle Probleme auf die folgenden drei Punkte eindampfen:

1. "Afterpulsing" (Nachpulsen)
2. "Dark counts" (Dunkelrauschen)
3. Totzeit

Manchmal kann es vorkommen, dass ein Elektron auf dem Weg zur n-Seite "hängen bleibt" und sich erst verzögert weiterbewegt. Dabei löst es natürlich wieder weitere Elektronen aus, was zu einer verspäteten Elektronenlawine führt, was zu einem vermeintlichen Photonenignal führt, obwohl kein Photon auf dem Halbleitermaterial aufgetroffen ist. Dieser Effekt ist daher unter dem Begriff *Afterpulsing* (Nachpulsen) bekannt.

Abb. 2: Exemplarischer Auszug aus der H5P-Datei „Q1.2: Einzelphotonendetektion“ des Moodle-Kurses. Eigene Abbildung.

Rahmen statistischer Betrachtungen verschiedener Lichtquellen eine tragende Rolle spielt. Durch den Einsatz mehrerer interaktiver Aufgaben sollen die Lernenden zum Mitdenken angeregt werden.

Zum Abschluss werden die drei unterschiedlichen Arten von Lichtquellen (Einzelphotonenquelle, kohärente und thermische Lichtquelle) näher erläutert und graphisch dargestellt. Das Erlernte wird im Anschluss daran in einem abschließenden Quiz auf spielerische Weise abgeprüft. In Abbildung 3 ist ein Auszug aus dem Moodle-Kurs zu sehen.

Obwohl diese Inhalte nicht direkt schulrelevant sind, stellen sie dennoch einen maßgeblichen Teil zum vertieften Verständnis des Messmechanismus bei Einzelphotonenquellen dar und bieten daher einen Mehrwert für interessierte Lehrkräfte.

Die Koinzidenzmessung

Zunächst betrachten wir den Fall, dass die Signale der Detektoren A und B nicht zeitverschoben sind ($\tau = 0$). Im späteren Verlauf müssen nämlich die Signale A und B für unterschiedliche zeitliche Verschiebungen $\tau \neq 0$ miteinander verglichen werden. Dazu später aber mehr.

Wir legen uns nun also ein (sinnvoll gewähltes) Koinzidenzfenster der Breite Δt fest und verschieben es entlang des zeitlichen Verlaufs t der Messung. Jedes Mal, wenn sowohl ein Klick von Detektor A als auch ein Klick von Detektor B innerhalb des Koinzidenzfensters liegen, notieren wir uns dies in einem gesonderten Graphen (Signal A&B).

Trage die fehlende Zahl ein!

In diesem Beispiel lassen sich $N_{AB} = \boxed{ } \text{ Koinzidenzen}$ zählen.

Überprüfen

Abb. 3: Exemplarischer Auszug aus der H5P-Datei „Q1.3: Photonenstatistik“ des Moodle-Kurses. Eigene Abbildung.

4. Kurs Q6: Weiterführende Inhalte

Der Kurs Q6 ist speziell an Lehrkräfte gerichtet, welche nach einer deutlichen Vertiefung der vorangegangenen Kurse Q1 bis Q5 suchen. Bisher besteht der Kurs lediglich aus dem Unterkurs „Q6.1: Methoden zur Erzeugung einzelner Photonen – SPDC“. Dies soll im Laufe der Entwicklung des gesamten Online-Kurses noch um weitere Themen, wie beispielsweise verschiedene Quantentechnologien, wie das Quantencomputing, die Quantenkryptografie oder die Quantensensorik erweitert werden. Im weiteren Verlauf dieses Beitrags wird jedoch lediglich auf den bereits bestehenden Kurs zur Parametrischen Fluoreszenz (englisch: spontaneous parametric down conversion, kurz: SPDC) eingegangen werden.

4.1. Kurs Q6.1: Methoden zur Erzeugung einzelner Photonen – SPDC

Selbstverständlich gibt es mehrere vielversprechende Kandidaten für mögliche Einzelphotonenquellen. So beispielsweise NV-Zentren [4], Quantenpunkte [5] oder andere künstliche Atome. Im Rahmen dieses Online-Kurses wurde sich bisher jedoch lediglich auf die Erzeugung einzelner Photonen basierend auf dem Prinzip der Parametrischen Fluoreszenz fokussiert, da sich dies vergleichsweise einfach experimentell umsetzen lässt und wohl am anschlussfähigsten für die Schule ist.

Im Laufe des Kurses erarbeiten sich die Teilnehmenden, welche Komponenten zur Erzeugung einzelner Photonenpaare notwendig sind und welche Bedingungen vorherrschen müssen, damit diese erzeugt werden können. Eingebaute interaktive Aufgaben (vgl. Abbildung 4) sollen das Verständnis der Fachinhalte fördern und auf die experimentelle Umsetzung in der Präsenzveranstaltung vorbereiten. Mehr hierzu folgt im nächsten Abschnitt.

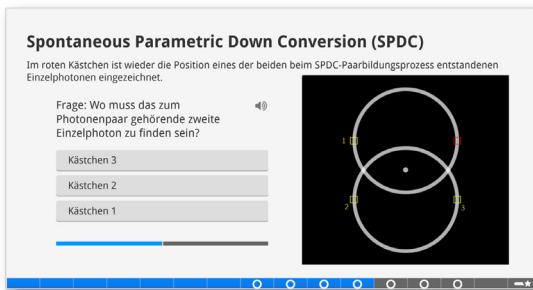


Abb. 4: Exemplarischer Auszug aus der H5P-Datei „Q6.1: Methoden zur Erzeugung einzelner Photonen – SPDC“ des Moodle-Kurses. Eigene Abbildung.

5. Umsetzung in der Präsenzveranstaltung

Um die im Laufe des Online-Kurses angeeigneten Fachinhalte auf einer experimentellen Ebene nachvollziehen zu können, sowie in Austausch mit anderen Lehrkräften zu treten, wird am Ende des Fortbildungskurses eine Präsenzveranstaltung angeboten.

Die im Rahmen dieser Veranstaltung präsentierten Experimente werden im folgenden Verlauf näher beleuchtet.

5.1. Einzelphotonenexperimente mit dem Quantenoptik-Kit von Thorlabs

Das vor wenigen Jahren erschienene Quantenoptik-Kit aus der Linie der Educational Kits der Firma Thorlabs bietet einen einmaligen Zugang zur Erzeugung und dem Nachweis einer angekündigten Einzelphotonenquelle unter Einsatz eines nichtlinearen BBO-Kristalls [6].

Der Einsatz dieses Experiments im Rahmen der Lehrerfortbildung erlaubt die Demonstration quantenphysikalischer Effekte mit echten einzelnen Photonen. So lässt sich beispielsweise die Fähigkeit zur

Interferenz einzelner Photonen mithilfe eines Michelson-Interferometers und dessen Erweiterung zu einem Einzelphotonen-Quantenradierer realisieren.

Da solche Experimente im Schulunterricht lediglich über Analogieexperimente mit klassischem Licht oder Simulationen realisiert werden können, bietet dieses Demonstrationsexperiment einen echten Mehrwert für die Teilnehmenden.

5.2. Experimente zur Photonenstatistik

Um die drei in Kurs Q1.3 erwähnten Arten von Lichtquellen nachzuweisen, eignet sich das Quantenoptik-Kit von Thorlabs ebenfalls sehr gut. Mit dem Aufbau nach Grangier, Roger und Aspect [7] lässt sich die Dreifach-Koinzidenz einer Einzelphotonenquelle messen und die $g^{(2)}$ -Funktion bestimmen.

Ein abgeschwächter Laser bietet sich in einem simplen HBT-Setup an, um ein Beispiel einer kohärenten Lichtquelle anzuführen.

Zuletzt wurde vor kurzem ein Experiment entworfen, mithilfe dessen der Bunching-Charakter einer thermischen Lichtquelle nachgewiesen werden kann. Dies rundet die Experimentierreihe zur Photonenstatistik ab.

5.3. Anwendungsmöglichkeiten von Einzelphotonenquellen: Quantenschlüsselaustausch mit dem BB84-Protokoll

Um den Lehrkräften eine Motivation dafür zu geben, wofür die Erzeugung einzelner Photonen überhaupt notwendig ist, wird der Quantenschlüsselaustausch basierend auf dem BB84-Protokoll anhand eines Analogieexperiments näher erläutert.

Das BB84-Protokoll bietet sich in diesem Kontext insbesondere deshalb an, da es zum größten Teil mit grundlegenden quantenphysikalischen Prinzipien, welche in der Schule unterrichtet werden, erklärbar ist.

Im Rahmen der Präsenzveranstaltung wird ein selbst entwickelter Aufbau mithilfe von Materialien der Firma Thorlabs präsentiert, mithilfe dessen der Quantenschlüsselaustausch durchgeführt werden kann. Ein Foto des hier verwendeten Versuchsaufbaus ist in Abbildung 5 zu sehen.

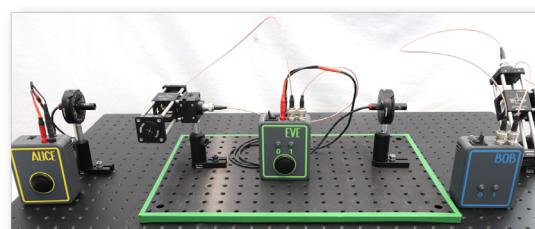


Abb. 5: Fotografie des Versuchsaufbaus des Analogieexperiments zum Quantenschlüsselaustausch basierend auf dem BB84-Protokoll. Eigene Fotografie.

Zusätzlich bietet es sich an, im Rahmen der Lehrerfortbildung eine Low-Cost-Variante für die

Schule vorzustellen. So eignet sich beispielsweise das modulare Set der Projekts O3Q, welches unmittelbar in der Schule als Schülerexperiment eingesetzt werden kann [8].

6. Ausblick

Die im Rahmen dieses Beitrags vorgestellten Fortbildungsinhalte wurden bereits mehrfach an unterschiedlichen Lehrkräften in Thüringen und Baden-Württemberg getestet und daraufhin optimiert. Weitere Erprobungen sind im Verlauf dieses Jahres geplant und werden zeitnah umgesetzt.

Die Weiterentwicklung und Verbesserung des Online-Kurses auf der Lernplattform Moodle steht dabei an oberster Stelle. Der Online-Kurs wird planmäßig im Herbst 2025 auf der Online-Plattform „MINT Campus“ des Stifterverbands [9] deutschlandweit öffentlich zugänglich sein, sodass eine möglichst breite Masse an Lehrkräften angesprochen wird und Zugang zu den Inhalten hat.

7. Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurde zunächst ein neues Fortbildungskonzept im Blended-Learning-Ansatz vorgestellt, welches durch Selbststudiums-, Online- und Präsenzphasen geprägt ist. Materialien für das Selbststudium wurde in Form von interaktiven H5P-Daten in einem Moodle-Kurs aufbereitet. In diesem Moodle-Kurs sind auch Unterrichtsmaterialien bereitgestellt, welche von den Lehrkräften unmittelbar für ihren eigenen Unterricht eingesetzt werden dürfen.

Der Fokus dieses Beitrags lag auf der Entwicklung von Materialien rund um das Thema der Koinzidenzmethode und der Erzeugung einzelner Photonen. So wurden Moodle-Kurse zu den Themen der Koinzidenzmethode, Einzelphotonendetektion, Photonenstatistik und Erzeugung einzelner Photonen vorgestellt. Die Umsetzung dieser Themen in der Präsenzveranstaltung wurde ebenfalls thematisiert. So werden hier Experimente mit echten Einzelphotonen gezeigt, sowie eine Anwendungsmöglichkeit von einzelnen Photonen basierend auf dem Quantenschlüsselaustausch mit dem BB84-Protokoll vorgestellt.

Das Fortbildungskonzept wird im Laufe des Jahres erprobt werden und der Moodle-Kurs soll im Herbst auf der Website des „MINT-Campus“ des Stifterverbands publiziert werden.

8. Literatur

- [1] Bildungsstandards im Fach Physik für die allgemeine Hochschulreife. Beschluss der Kultusministerkonferenz vom 18.06.2020:
https://www.kmk.org/fileadmin/veroeffentlichungen_beschluesse/2020/2020_06_18-BildungsstandardsAHR_Physik.pdf
 (Stand: 4/2025)

- [2] Aehle, S.; Kappl, K.; Scheiger, P. (2025): Praxisorientiertes Fortbildungskonzept mit Selbstlerninheiten zur Quantenphysik – Fokus auf die Wesenszüge der Quantenphysik und Analogiemodelle. In: PhyDid B, Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung, 1 (2025)
- [3] Kimble, H. J.; Dagenais, M.; Mandel, L. (1977): Photon Antibunching in Resonance Fluorescence. In: Phys. Rev. Lett., 39, S. 691-695, Url: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.39.691>
 (Stand 4/2025)
- [4] Kurtsiefer, C.; Mayer, S.; Zarda, P.; Weinfurter, H. (2000): Stable Solid-State Source of Single Photons. In: Phys. Rev. Lett., 85, S. 290-293, Url: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.85.290>
 (Stand: 4/2025)
- [5] Michler, P.; Kiraz, A.; Becher, C.; Schoenfeld, W. V.; Petroff, P. M.; Zhang, L.; Hu, E.; Imamoglu, A. (2000): A Quantum Dot Single-Photon Turnstile Device. In: Science, 290, S. 2282-2285, Url: <https://www.science.org/doi/epdf/10.1126/science.290.5500.2282>
 (Stand: 4/2025)
- [6] Quantenoptik-Kit der Firma Thorlabs:
https://www.thorlabs.com/newgroupage9.cfm?object_group_id=15827
 (Stand: 4/2025)
- [7] Grangier, P.; Roger, G.; Aspect, A. (1985): Experimental Evidence for a Photon Anticorrelation Effect on a Beam Splitter: A New Light on Single-Photon Interferences. In: Europhysics Letters, 1, S. 173-179, Url: <https://iopscience.iop.org/article/10.1209/0295-5075/1/4/004/pdf>
 (Stand: 4/2025)
- [8] Modulares System von O3Q zum BB84-Protokoll: <https://o3q.de/bb84/>
 (Stand: 5/2025)
- [9] Website des MINT-Campus des Stifterverbands: <https://mintcampus.org/>
 (Stand: 5/2025)