

Entwicklung einer Versuchsanleitung zu Interferenz-Experimenten mit Einzel-Photonen im Rahmen eines Quantenoptik-Praktikums

Felipe Laumen*, Sebastian Nell*, Ralf Detemple*, Heidrun Heinke*

*I. Physikalisches Institut IA, RWTH Aachen University
Sommerfeldstraße 16, 52074 Aachen
felipe.laumen@rwth-aachen.de

Kurzfassung

Das vorgestellte Projekt beschäftigt sich mit der Entwicklung einer Versuchsanleitung, mit der Schülerinnen und Schüler der Oberstufe Einzel-Photonen-Interferenz und darauf aufbauend den Quantenradierer unter Verwendung eines Quantenoptik-Kits der Firma Thorlabs® im Rahmen eines Praktikums erkunden können. Der wiederholte Vergleich von klassischen und quantenmechanischen Beschreibungen macht auf Gemeinsamkeiten sowie Unterschiede aufmerksam und kann helfen, Schülervorstellungen zu überwinden. Dieser Beitrag beschreibt die experimentelle Umsetzung und Überlegungen, die bei der Entwicklung der Versuchsanleitung zu den Experimenten eingeflossen sind. Das eröffnet Einblicke in die laufende Entwicklungsarbeit eines Quantenoptik-Praktikums an der RWTH Aachen.

1. Motivation

Quantenphysik ist nicht nur in Nachrichten, Literatur und Unterhaltung inzwischen omnipräsent, sondern auch fester Bestandteil der Curricula im Physikunterricht. Phänomene wie Interferenz und Superposition von Quantenobjekten sind Teil der KMK-Bildungsstandards (vgl. KMK, 2020). Auch im Kernlehrplan des Landes NRW finden quantenmechanische Eigenschaften von Photonen ebenso Erwähnung, wie „Welcher-Weg“-Informationen zur Begründung von Interferenzphänomenen (vgl. Ministerium für Schule und Bildung NRW, 2022).

Von Lehrenden wird der Unterricht zu Experimenten aus diesem Themenbereich wie beispielsweise der Quantenradierer aber als herausfordernd empfunden (vgl. Weber et al., 2020). Auch ist das Equipment verglichen mit Aufbauten für klassische Experimente hochpreisig (vgl. Thorlabs, 2024, Leybold 2025). Ein Praktikum für SuS¹ soll die Möglichkeit eröffnen, mithilfe von auf die Zielgruppe angepassten Materialien die Interferenz von Einzelphotonen und darauf aufbauend den Quantenradierer experimentell zu beobachten und einen Zugang zu den physikalischen Inhalten zu finden.

2. Umsetzung

In der experimentellen Umsetzung wurde auf die Detektion durch die Koinzidenzmethode gesetzt. Das Prinzip ist in Abbildung 1 zu sehen. Die Photonen einer Lichtquelle treffen auf einen Strahlteiler. Aus den mittleren Zählraten der Detektoren R_T und R_B lässt sich mithilfe der Koinzidenz-Elektronik die mittlere

Koinzidenzraten R_{TB} zwischen den Detektoren für ein Zeitintervall Δt bestimmen (vgl. Thorlabs, 2023).

Aus diesen Daten kann man zusätzlich den Wert der Korrelationsfunktion zweiter Ordnung $g^{(2)}$ berech-

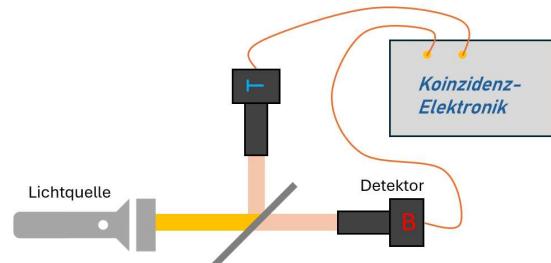


Abb. 1: Schematischer Aufbau eines Hanbury-Brown-Twiss-Experiments als Beispielexperiment für den Einsatz der Koinzidenzmethode (Eigene Darstellung).

nen und je nach Ergebnis (vgl. Tabelle 1) die vorliegende Statistik des Lichtes verifizieren (vgl. Fox, 2006, LaPierre, 2022, Thorlabs, 2023).

$$g^{(2)} = \frac{R_{TB}}{R_T R_B \Delta t} \quad \{1\}$$

Für Experimente mit Einzel-Photonen sollte der Wert < 1 sein.

2.1. Das “Quantum Optics Educational Kit”

Für Interferenzexperimente mit Einzel-Photonen braucht es einen geeigneten Aufbau. Dazu wurde das „Quantum Optics Educational Kit“ von Thorlabs verwendet, welches auf didaktisch optimierte Experimentiermaterialien setzt (vgl. Thorlabs, 2024). Eine Skizze des Aufbaus ist in Abbildung 2 zu sehen.

¹ SuS – Schülerinnen und Schüler

Tab. 1: Verschiedene quantenmechanische Zustände des Lichts. Für die Experimente mit Einzel-Photonen ist von Interesse, dass eine Sub-Poisson-Verteilung vorliegt (vgl. Fox, 2006, Thorlabs, 2023, LaPierre, 2022).

	antikorriert	unkorriert	korriert
Photonenstrom
$g^{(2)}$	< 1	1	> 1
Zustand	Fock	kohärent	thermisch
Verteilung	Sub-Poisson	Poisson	Super-Poisson

Laserlicht der Wellenlänge 405 nm wird über zwei Spiegel auf einen Bariumborat-Kristall gelenkt (grün). Durch eine nichtlineare Wechselwirkung kommt es zur Emission eines Photonenpaares der Wellenlänge 810 nm (violett). Der Öffnungswinkel zwischen den Photonen von 6° ermöglicht es, dass auf Detektor T zulaufende Photon als „signaler“ für die Koinzidenzmessung zu nutzen. Das „idler“-Photon läuft auf den Strahlteiler zu und kann so in das Michelson-Interferometer gelangen. Der Time-Tagger vergleicht, ob innerhalb eines Zeitfensters von 20 ns das zweite Photon an Detektor B (oder A) detektiert wird und es sich somit um eine Koinzidenz handelt (vgl. Thorlabs, 2023).

Im Interferometer ist ein Spiegel auf einem Piezo-Tisch montiert, der sich über einen Computer mit der entsprechenden Software bewegen lässt. In beide Arme des Interferometers können Polarisatoren eingesetzt werden (in Abbildung 2 mit eingezeichnet), die für den Versuch zum Quantenradierer benötigt

werden, ebenso der gestrichelt umrandete Polarisator vor Detektor B.

Alle optischen Komponenten sind mit ihrer Bezeichnung beschriftet und die Software, mit der die Messung gestartet und gestoppt wird, ist an das Experimentieren mit SuS angepasst. So gibt es zu verschiedenen Versuchen jeweils Tabs, in denen die relevanten Größen auch graphisch dargestellt werden und der Aufbau zum Experiment skizzenhaft zu sehen ist².

3. Entwicklung einer Versuchsanleitung

In dem Versuchsaufbau wird ein Laser der Klasse 3B zur Erzeugung der Photonenpaare verwendet. Deshalb beginnt die Anleitung auf der ersten Seite mit Warnhinweisen. Darauf folgen die Kapitel zu den Experimenten „Einzelphotonen-Michelson-Interferometer“, „Analogieversuch zum Quantenradierer“ und der „Quantenradierer“, die jeweils in die Unterkapitel „Versuchsgegenstand“, „Aufbau und Justage“ und „Durchführung und Aufgaben“ gegliedert sind.

Da die Versuchsanleitung sich an SuS der Oberstufe richtet, spielte das Prinzip der didaktischen Reduktion eine wichtige Rolle. Die Auswahl wesentlicher Elemente ist insbesondere bei der theoretischen Beschreibung eine Herausforderung, für die es in der Physikdidaktik keine eindeutige Lösung gibt (vgl. Hopf et al., 2022). Bei der Entwicklung einer Anleitung wurden unter anderem folgende Punkte berücksichtigt:

- Fehlvorstellungen zur Interferenz eines Photons. Wie in Abschnitt 3.1 erörtert wird, ist eine falsche Vorstellung nicht unwahrscheinlich. Die letzte

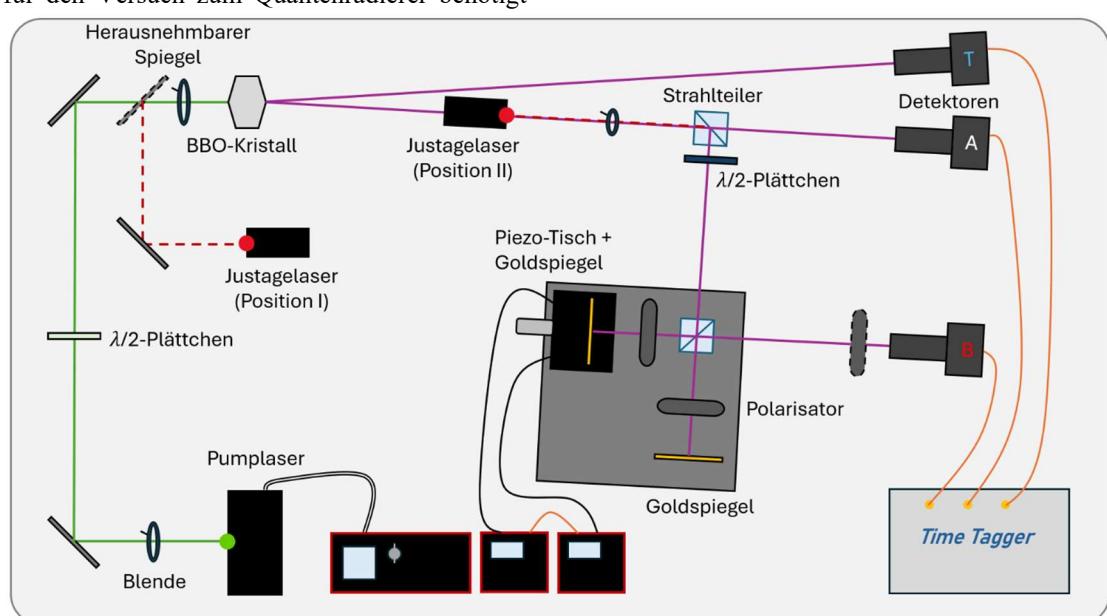


Abb. 2: Skizze vom Versuchsaufbau des Quantum Optics Educational Kit von Thorlabs (Eigene Darstellung nach Thorlabs, 2023, S.93, Abbildung 92)

² Mit dem Kit sind noch weitere Versuche möglich, auf die in diesem Beitrag nicht näher eingegangen wird.

Aufgabe zum Interferenz-Versuch soll einen kognitiven Konflikt erzeugen. Die Interferenz ist tatsächlich zu beobachten, aber es sind durchschnittlich nicht genug Photonen im Aufbau, damit zwei oder mehrere miteinander interferieren können. Außerdem liegt der Wert der Korrelationsfunktion zweiter Ordnung deutlich unter 1 und nahezu bei 0, was auch für Einzel-Photonen spricht. Im Kapitel zum Quantenradierer wird dies dann mit dem Superpositionsprinzip und Zuständen erklärt.

- b) Darstellung quantenmechanischer Beschreibungen. Für SuS ist der Umgang mit der Braket-Notation unbekannt. Auch das Rechnen mit linearen Formen (abgesehen von Spezialfällen wie dem Standardskalarprodukt) oder Operatoren geht über die Schulmathematik und -physik hinaus. Das Phänomen kann aber auch erklärt und verstanden werden, ohne die Ergebnisse mathematisch herzuleiten. Daher wurde auf eine qualitative Beschreibung gesetzt. So wird beispielsweise aus

$$\frac{1}{\sqrt{2}} (|1_1, 0_2, 45^\circ\rangle + |0_1, 1_2, 45^\circ\rangle) \quad \{2\}$$

diese Verbalisierung:

„Das Photon ist um 45° zur Tischemebene polarisiert. Am Strahlteiler ergibt sich eine Superposition:

- Das Photon ist in Arm 1 reflektiert worden.
- Das Photon ist in Arm 2 transmittiert.“³

- c) Unterstützende Darstellungsformen. Skizzen der Aufbauten helfen dabei, einen Überblick zu bekommen und im Text erwähnte Bauteile wiederzuerkennen. Beispielsweise wird Abbildung 2 im Abschnitt zum Quantenradierer verwendet. Für die Justage des Interferometers wurde ein Video erstellt. Neben der Erklärung des nächsten Schrittes ist so direkt auch das beteiligte Gerät zu erkennen. So muss sich der SuS nicht fragen, wie zum Beispiel eine Justierhilfe aussieht. Andere Bilder erfüllen durch eine symbolische und logische Darstellung den Zweck, einen physikalischen Vorgang oder Zustand, der visuell nicht wahrnehmbar wäre (vgl. Kircher, 2015), aufzuzeigen. Ein Beispiel ist das Flussdiagramm (vgl. Abbildung 3) zur Änderung der Polarisationsrichtung eines Photons beim Durchlaufen des Aufbaus.

- d) Gezielte Wahl der Aufgaben. Experimente können vielfältige Beiträge zum Physikunterricht leisten, darunter Vermittlung von Fachwissen, Konzeptentwicklung, naturwissenschaftliches Arbeiten oder Interesse anzuregen (vgl. Hopf et al., 2022). Die richtige Wahl der Aufgaben kann die Wirkung des Experiments unterstützen. Fachwissen wird vermittelt, indem physikalische

Gesetze und daraus resultierende Vorhersagen überprüft werden. Das jeweilige Kapitel liefert

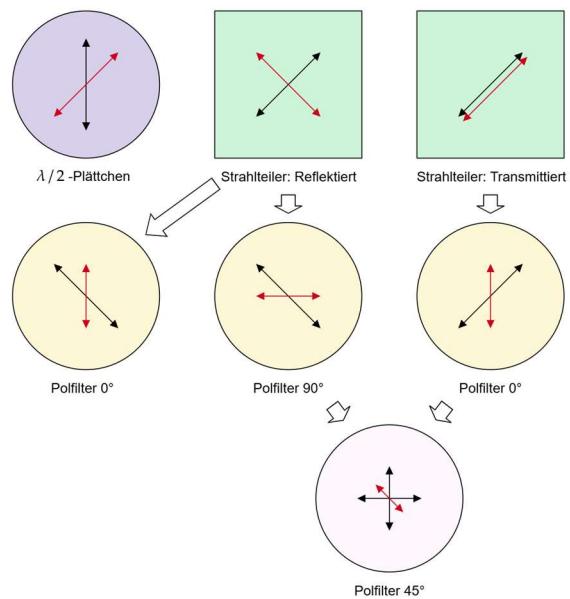


Abb. 3: Überblick über die Änderungen der Polarisierung. In dieser Ansicht kommt das Licht „aus dem Blatt heraus“. Man schaut also von hinten durch das Bauteil. Der rote Doppelpfeil ist die Polarisationsrichtung nach, der schwarze vor dem Durchlaufen des Elements (Eigene Darstellung).

aufgrund der angeführten Gesetzmäßigkeiten eine Vorhersage zum Experiment. Die Aufgabe der SuS besteht darin, dies zu überprüfen.

Zur Konzeptentwicklung kann auch gehören, einen Konflikt zu erzeugen (vgl. Hopf et al., 2022). Sollte ein SuS die Vorstellung entwickeln, es würden mehrere einzelne Photonen miteinander interferieren, ergibt sich mit der letzten Aufgabe des ersten Versuchs ein Konflikt: Im Durchschnitt befinden sich zu wenig Photonen im Interferometer. Die Versuchsplanung, Durchführung und Auswertung helfen, experimentelle Fähigkeiten zu erwerben und so naturwissenschaftliches Arbeiten zu erfahren. Dadurch, dass das Experiment keinen Alltagsbezug hat, also etwas völlig Unbekanntes ist und durch den Radiereffekt ein bisher unerklärliches Phänomen auftritt, kann Interesse angeregt werden.

3.1. Einzelphotonen-Michelson-Interferometer

Im Kapitel zum Versuchsgegenstand wird zunächst die Interferenz im Wellenbild erklärt. Interferenz ist zwar Teil des Kernlehrplans (vgl. Ministerium für Schule und Bildung NRW, 2022), aber auch ein zentraler Gegenstand des Versuchs. Im Anschluss wird darauf hingewiesen, dass einzelne Photonen auch Interferenz zeigen. Zuletzt wird erklärt, wie aus dem Messergebnis die Wellenlänge der Photonen bestimmt werden kann.

³ Arm 1 ist der Arm, der auf den verstellbaren Piezotisch zuläuft (vgl. Abbildung 2).

Im nächsten Unterkapitel wird der Aufbau des Experiments beschrieben. Es wird auf ein Video verwiesen, in dem Schritt für Schritt das Interferometer justiert wird. Da geplant ist, das Experiment in Gruppen durchzuführen, sind die Erklärungen durch Untertitel gegeben. So kann man das Video schauen, ohne andere Teilnehmer zu stören. In der Anleitung ist zusätzlich eine Skizze aus der Vogelperspektive abgebildet, die die wichtigsten Komponenten des fertigen Aufbaus zeigt.

Zu Beginn der Durchführung wird noch einmal auf die Gefahren hingewiesen. Darauf folgen eine Beschreibung zur Durchführung der Messung und anschließend die Messaufgaben. Zwei haben vorgegebene Parameter, während für die dritte eine eigene Wahl für ein optimales, aber nicht zu zeitintensives Ergebnis getroffen werden soll. Mit den drei Messreihen lässt sich ein Mittelwert mit Abweichung für die Wellenlänge der Einzel-Photonen bilden. Um Messfehler oder eine Dejustage zuverlässiger zu erkennen, sind Beispiele zur Qualität der Messung gegeben. Zuletzt soll die durchschnittliche Photonenzahl bestimmt werden. Da die vorliegende Photonenstatistik bei jeder Messung verifiziert wird und die Interferenz beobachtet wurde, soll so die unvermeidbare Schlussfolgerung sein, dass das Photon mit sich selbst interferiert.

SuS lernen im Physikunterricht, dass Photonen eine Wellenlänge zugeordnet werden kann (vgl. Ministerium für Schule und Bildung NRW, 2022). Die Vorstellung, dass ein einzelnes Photon mit sich selbst interferiert, entspricht jedoch keiner bekannten Vorstellung eines realen Objektes. Alltagsvorstellungen sind für SuS aber besonders relevant im Lernprozess (vgl. Kircher, 2015). Deshalb kann sich heimlich entweder die Vorstellung eines Teilchens oder einer Welle einstellen. Eine solche Vorstellung zu ändern, ist herausfordernd (vgl. ebd.). Dass die Interferenz eines einzelnen Photons real ist, erfahren die SuS in diesem Versuch. Diese kontraintuitive Beobachtung kann damit Teil ihrer eigenen Realität werden.

3.2. Analogieversuch zum Quantenradierer

Auch Polarisation ist Teil des Lehrplans Physik in der gymnasialen Oberstufe (vgl. Ministerium für Schule und Bildung NRW, 2022), wird aber aus demselben Grund wie die Interferenz beim vorigen Versuch noch einmal erörtert. Es wird darauf hingewiesen, dass Interferenz ebener Wellen bei senkrechter Polarisation zueinander verschwindet (vgl. Feld, 2014). Für diesen Versuch kann der Justagelaser verwendet werden, was das Risiko einer Gefährdung durch Laserlicht reduziert. Eine auf das Interferometer beschränkte Skizze ist in Abbildung 4 zu sehen. In das Interferometer sollen jetzt die Polarisatoren, zueinander gekreuzt, eingesetzt werden und ein Schirm am Ausgang des Interferometers positioniert werden. Da in jedem Arm einer der Polarisatoren steht, ist kein Interferenzbild zu sehen. Mit einem dritten Polarisator, der um 45° zu den beiden anderen verdreht ist, wird

die Interferenz wiederhergestellt. Dieser Versuch soll den SuS helfen, Gemeinsamkeiten und Unterschiede zum Quantenradierer herauszustellen.

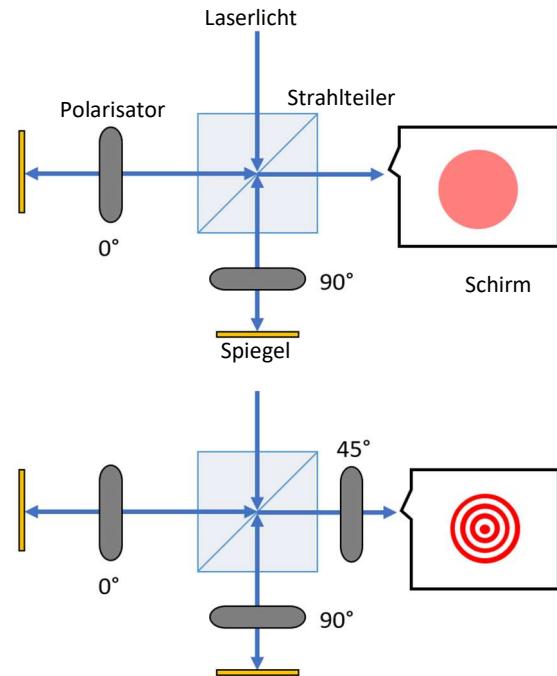


Abb. 4: Analogieversuch zum Quantenradierer. Oben: Werden Polarisatoren eingesetzt, die gekreuzt zueinanderstehen, verschwindet das Interferenzbild. Unten: Durch Einsetzen eines dritten Polarisators in 45° -Stellung kann es wiederhergestellt werden (Eigene Darstellung).

3.3. Der Quantenradierer

Im Kapitel zum Versuchsgegenstand wird darauf hingewiesen, dass auch einzelne Photonen eine Polarisation besitzen, wobei nicht näher darauf eingegangen wird, wie dies zu begründen ist, da Konzepte wie der Spin unbekannt sind und eine weitere Erklärung nicht notwendig ist, um das Ergebnis zu verstehen. Die SuS werden schrittweise durch die Zustände geleitet, die vor und nach einem Bauteil vorliegen.

Die Durchführung beinhaltet wieder die Warnhinweise zum Laser und drei Messungen, die durchgeführt werden sollen. Dies sind Messungen mit (i) gleich ausgerichteten Polarisatoren, (ii) gekreuzten Polarisatoren und (iii) gekreuzten Polarisatoren mit Einsetzen des dritten Polarisators am Interferometer-Ausgang in 45° -Stellung. Eine Beispilmessung ist in Abbildung 5 zu sehen. Die letzte Aufgabe soll dazu motivieren, eine Vermutung für die geringere Zählrate bei der dritten Messung aufzustellen.

Durch die Wiederherstellung der Interferenz soll in Verbindung mit den Erkenntnissen aus den vorherigen Versuchen den SuS nicht nur zugänglich gemacht werden, dass die Interferenz einzelner Photonen möglich ist und von der Polarisation beeinflusst wird, sondern es sollen auch Fehlvorstellungen experimentell widerlegt werden. Hierzu gehört die Vorstellung,

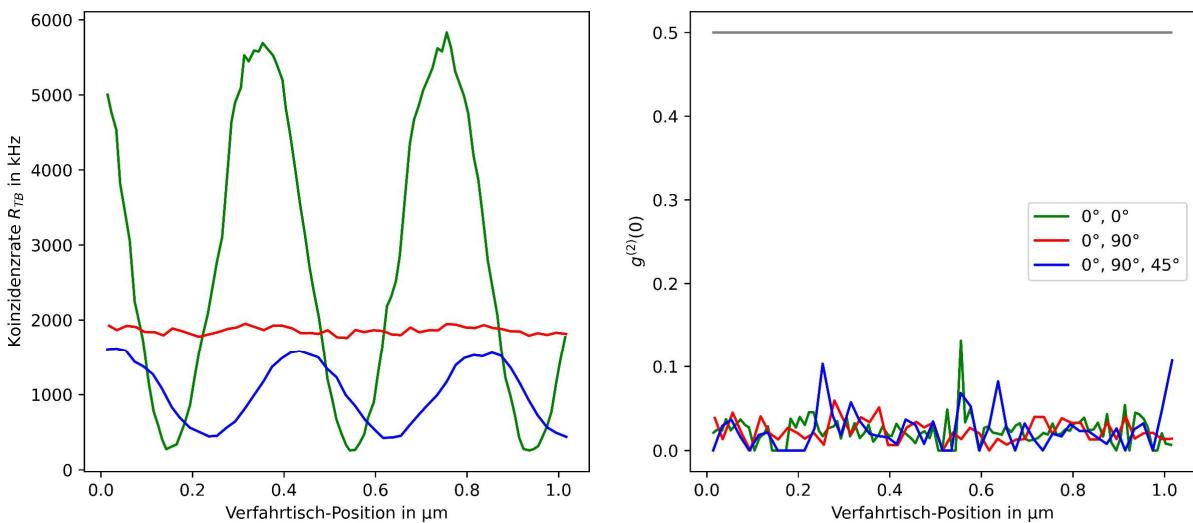


Abb. 5: Beispieldmessung zum Quantenradierer. Die Polarisatoren werden wie im Analogieversuch eingesetzt. Links zeigt die Abbildung in grün das Interferenzbild für die Polarisatorstellung 0° in beiden Armen, in rot eine annähernd konstante Intensität für die Stellungen 0° und 90° und in blau die wiederhergestellte Interferenz mit geringerer Intensität durch einen dritten Polarisator bei 45° . Rechts ist zu sehen, dass die Korrelationsfunktion in allen Fällen deutlich unter 1 bleibt (Eigene Darstellung).

dass Photonen sich für einen Weg entscheiden müssen.

4. Ausblick

Der nächste Entwicklungsschritt ist ein Test der Anleitung, sowohl mit Studierenden als auch mit SuS. Es ist zu untersuchen, ob Formulierungen verständlich sind, das Konzept insgesamt übersichtlich ist und ob noch andere Hilfestellungen gebraucht werden. Darauf wird dann die Planung und Erprobung von Versuchstagen für SuS-Gruppen folgen. Entsprechend der Ergebnisse können dann Ergänzungsmaterialien für die SuS entwickelt werden. Sollten sich die SuS zum Beispiel für eine Videoanleitung aussprechen, wie sie im ersten Versuch zur Verfügung steht, könnte eine solche zum Aufbau des Quantenradierers entwickelt werden.

Außerdem ließe sich mit dem vorhandenen Material der Pool möglicher Versuche und damit auch die Versuchsanleitung erweitern. So ist es möglich, die Kohärenzlänge der Photonen zu bestimmen und Grundzüge des Quantencomputings auf optische Weise zu erfahren.

5. Literatur

- Feld, L. (2014): Experimentalphysik III: Optik und Quantenphysik, Aachen.
- Fox, A. M. (2006): Quantum optics: an introduction. New York: Oxford University Press.
- Hopf, M; Schecker, H. und Wiesner, H. (2022): Physikdidaktik kompakt. 1. vollständig neu bearbeitete Auflage. Hannover: Aulis Verlag in Friedrich Verlag.
- Kircher, E. (2015): Methoden im Physikunterricht, in: Physikdidaktik Theorie und Praxis. 3. Aufl. Berlin: Springer.
- Kultusministerkonferenz (2020): Bildungsstandards im Fach Physik für die Allgemeine

Hochschulreife. Berlin: Sekretariat der Ständigen Konferenz der Kultusminister der Länder in der Bundesrepublik Deutschland.

LaPierre, R. (2022): Getting Started in Quantum Optics. Cham: Springer Nature.

Leybold (2025): Bestimmung der Wellenlänge eines He-Ne-Lasers mit einem Michelson-Interferometer. Abgerufen am 15.05.2025 von <https://www.leybold-shop.de/physik/versuchssek-ii-universitaet/optik/wellenoptik/michelson-interferometer/bestimmung-der-wellenlaenge-eines-he-ne-lasers-mit-einem-michelson-interferometer/vp5-3-4-2.html>

Ministerium für Schule und Bildung des Landes Nordrhein-Westfalen (2022): Kernlehrplan für die Sekundarstufe II Gymnasium in Nordrhein-Westfalen Physik.

Thorlabs (2023): EDU-QOP1/(M) Quantenoptik-Kit Benutzerhandbuch.

Thorlabs (2024): Quantenoptik-Kit. Abgerufen am 18.09.2024 von www.thorlabs.com/newgroupage9.cfm?object_group_id=15827&pn=EDU-QOP1/M

Weber, K. A.; Friege, G.; Scholz, R. (2020): „Quantenphysik in der Schule – Was benötigen Lehrkräfte? Ergebnisse einer Delphi-Studie.“ In: Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften 26, S. 173-190.