

Quantenoptische Experimente für den Hörsaal

Andreas Strunz* und Jan-Peter Meyn*

*Didaktik der Physik, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen, andreas.strunz@physik.uni-erlangen.de und jan-peter.meyn@physik.uni-erlangen.de

Kurzfassung

Verschränkung und Zufall sind faszinierende Merkmale der Quantenphysik. Für Praktika sind seit geraumer Zeit quantenoptische Experimentiersysteme [1] kommerziell erhältlich.

Durch technische Weiterentwicklung haben wir ein modulares System konzipiert, das auch im Hörsaal und im Klassenzimmer eingesetzt werden kann. Eine einfache Bikonvexlinse bildet die Fluoreszenz des PDC Kristalls auf die Einzel-Photonen-Detektoren ab. Komponenten wie Glasfasern und zugehörige Fasereinkopplungen werden entbehrlich und der Aufbau dadurch weniger komplex.

Das System besteht aus einer optischen Tischplatte (45×90 cm, 20 kg) und einem Werkzeugkoffer (40×30×21 cm, 9 kg), der alle weiteren optischen Komponenten wie Laser, Detektoren oder Spiegel enthält.

Erste Erfahrungen mit Schülern zeigen, dass Aufbau und Justage eines Koinzidenzexperimentes ohne weiteres möglich ist.

1. Einleitung

Experimente mit einzelnen Photonen sind hervorragend geeignet, faszinierende Eigenschaften der Quantenphysik aufzuzeigen. Quantenoptische Experimente wurden im Laufe des letzten Jahrzehnts zunehmend für die Lehre zugänglich [2–4].

Universitäten bieten in ihren Physikpraktika und vor allem in den USA in sogenannten „undergraduate labs“ Versuche mit einzelnen Photonen an [5–8]. Als kommerzielle Lösung gibt es seit geraumer Zeit den „quTools Entanglement Demonstrator“ [1]. Interaktive Bildschirmexperimente [9] mit Realdaten sind im Internet verfügbar.

Für den Einsatz in der Lehre stellen bisweilen die umständliche Transportabilität der Experimente, die Notwendigkeit der Raumabdunklung und eine aufwändige Justage große Hürden dar.

2. Optimierung für Demonstrationsexperiment – Modulares System

Wir haben ein modulares System durch technische Vereinfachung und Weiterentwicklung konzipiert, dessen Entwicklung folgende Kriterien berücksichtigte:

- Laserleistung von maximal 5 mW. Wünschenswert kleiner 1 mW, damit Schüler mit diesen Lasern im Unterricht unter Aufsicht arbeiten dürfen [10].
- Robuste Detektoren, die keine bauseitigen Vorsichtsmaßnahmen zur Abwendung von Überbelichtung benötigen.

- Durchführung des Experimentes bei Raumbeleuchtung.
- Reduktion der Bauteile nur auf die notwendigen Elemente.

Das resultierende System besteht aus einer optischen Tischplatte (45×90 cm, 20 kg) und einem Werkzeugkoffer (40×30×21 cm, 9 kg) (Abb. 1), in dem alle weiteren Komponenten wie Laser, Detektoren und optische Bauteile Platz finden.



Abb. 1: Verwendeter Werkzeugkoffer der Firma Fe stool [11]

3. Verwendete Komponenten

3.1. Tubussystem und optische Abbildung

Die Grundidee, die hinter der verwendeten optischen Abbildung steckt, ist ein Fotoapparat mit einem einzigen Pixel. Im Experiment wird die Zwillingsphotonenquelle mittels einer Bikonvexlinse auf Lawinen-

photodioden (APD) abgebildet. Die Linse ist zusammen mit allen weiteren optischen Komponenten wie einem Bandpassfilter, einer XY-Verschiebeeinheit, einer Irisblende und einer Lochblende in einem optischen 1"-Tubussystem (Abb. 2) untergebracht und direkt an das Detektorgehäuse montiert. Kompatible Bauteile können von verschiedenen Optikherstellern bezogen werden [12–15].

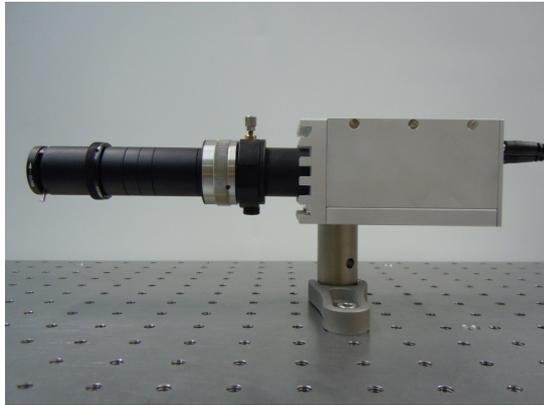


Abb. 2: Detektor mit Tubussystem

3.2. Laser

Abbildung 3 zeigt den verwendeten Laser im Aluminiumgehäuse mit Standfuß zur Befestigung auf dem optischen Tisch. Die Ansteuerung der Laserdiode erfolgt mit einer eigens entwickelten Elektronik, die die Laserleistung auf zwei verschiedene Arten stabilisieren kann. Verfügt die Laserdiode über eine eingebaute Photodiode, so wird über deren Rückmeldung die Laserleistung geregelt (Automatic Power Control, APC) andernfalls kommt eine Konstantstromquelle (Automatic Current Control, ACC) für die Regelung der Laserleistung zum Einsatz. Alle Blue-Ray-Laserdioden mit einer maximalen Stromstärke von 100 mA und einer Flussspannung von maximal 6 V können an dieser Steuerung verwendet werden.

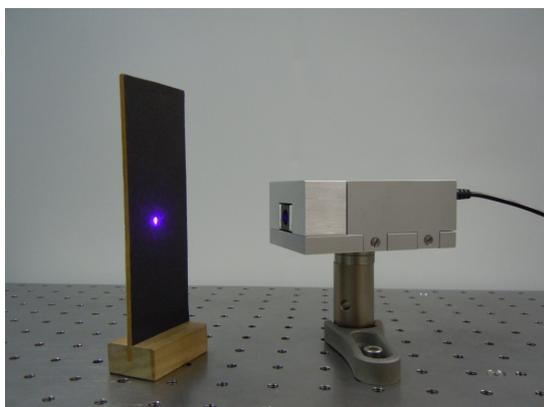


Abb. 3: Laser im Gehäuse

Die Wellenlänge eines Diodenlasers variiert stark mit der Temperatur der Diode [16]. Da die Phasen Anpassung der Zwillingsphotonenquelle für eine feste Wellenlänge eingestellt wird, erfolgt die Steuerung der

Laserdiodentemperatur durch eine Peltierkühlung mit PID-Regeler, um eine Dejustage des Experimentes zu verhindern.

Der eingesetzte Lasers ist wie folgt spezifiziert:

- Sony 405 nm 50 mW mit PD (SLD3135)
- 5 mW optische Leistung
- Temperatur der Laserdiode konstant bei 20 °C

3.3. Einzel-Photonen-Detektoren

Zur Detektion einzelner Photonen werden sogenannte Lawinenphotodioden (Avalanche-Photodiodes, APD) eingesetzt. Diese besitzen im Wellenlängenbereich der verwendeten Zwillingsphotonenquelle (780 nm bis 820 nm) eine höhere Quanteneffizienz als Photomultiplier.

Die APD wird durch Hochspannung in einen metastabilen Zustand oberhalb der Durchbruchspannung gebracht (Geiger-Modus). Ein einzelnes Photon kann in diesem Betriebszustand ein Auslöser einer Elektronenlawine sein. Zur Visualisierung könnte diese als Spannungspuls über einen Widerstand auf einem Oszilloskop angezeigt werden.

Um die thermische Zerstörung der Diode durch den Stromfluss zu verhindern, muss die Elektronenlawine so schnell wie möglich ausgelöscht (engl. *quenched*) werden. Hierfür existieren zwei Grundschaltungen [17]. Zum einen das Passive Quenching (Abb. 4), zum anderen das Aktive Quenching (Abb. 5), die jeweils ihre Vorzüge besitzen.

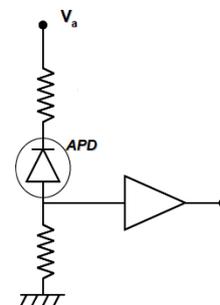


Abb. 4: Passive-Quenching-Schaltung

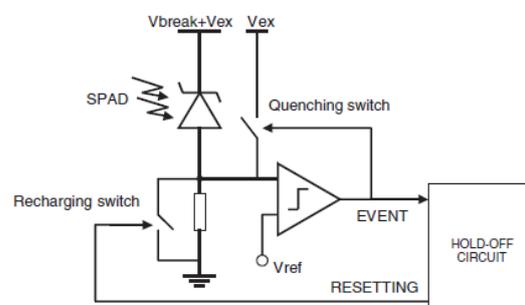


Abb. 5: Aktive-Quenching-Schaltung

Bei passiv gequenchten Detektoren kommt die Elektronenlawine von selbst zum Erliegen, jedoch existiert eine lange (ca. 1 μ s) und zeitlich variable Totzeit.

Aktiv gequenchte Detektoren dagegen weisen kurze konstante Totzeiten (ca. 50 ns) auf, wodurch höhere Zählraten ermöglicht werden. Hier besteht die Gefahr einer Zerstörung der Diode infolge zu hohen Lichteinfalls.

Aufgrund der Anforderung an einen robusten Detektor scheidet eine aktiv gequenchte Schaltung aus, da diese durch hohen Lichteinfall, zum Beispiel bei Unachtsamkeit unter Raumbelichtung, die APD des Detektors zerstören kann. Eine passiv gequenchte Schaltung könnte grundsätzlich eingesetzt werden. Die daraus resultierende niedrigere Koinzidenzrate kann über eine höhere Pumplaserleistung ausgeglichen werden.

Die Lösung ist eine sogenannte „Mixed Quenching Schaltung“, die Vorteile beider vorgestellter Schaltungen vereint und gleichzeitig deren Nachteile eliminiert.

Die entwickelte Detektorelektronik basiert auf einem Schaltungsentwurf von Dhulla [18] mit variabler Einstellung der Reset- und Quenchzeit. Weitere Eigenschaften sind eine Temperaturregelung, die eine APD mit eingebauten Peltierkühler auf bis zu $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ kühlen kann, was thermisch ausgelöste Elektronenlawinen (Dunkelzählrate) verringert.

Für den Wellenlängenbereich von 780 nm bis 820 nm sind derzeit zwei verschiedene Geiger Mode APDs verfügbar, die beide mit der Elektronik verwendet werden können. Dabei handelt es sich um das Modell C30902 [19] der Firma Excelitas und SAP500 [20] von LaserComponents.

3.4. Koinzidenzelektronik

Zur Auswertung der Experimente wird ein Koinzidenzzähler [21] (Abb. 6) von Branning und Beck eingesetzt. Diese Elektronik wurde speziell für den Einsatz in „undergraduate labs“ entworfen und kostet ca. 200 €.



Abb. 6: Koinzidenzelektronik

Vier TTL-Eingänge können mittels eines Schaltfeldes flexibel acht Koinzidenzzählern zugeordnet werden. Je nach Experiment ermöglicht dies eine variable Beschaltung der Koinzidenzzähler mit den Einzelzählraten eines oder den Koinzidenzzählraten von

zwei bis vier Eingangssignalen.

Die Koinzidenzzeitfensterbreite kann auf 12 ns, 14 ns, 21 ns oder die Eingangssignalleitbreite bei einer maximalen Zählrate von 84 MHz festgelegt werden. Als Koinzidenzzeitfenster bezeichnet man die Zeit, die zwischen mindestens zwei Eingangssignalen maximal verstreichen darf, um als Koinzidenz erkannt zu werden.

Das Modul kann mit der USB-Schnittstelle an einem PC mit LabView oder an einem RaspberryPi [22], einem kreditkartengroßen Einplatinen-Computer ausgelesen werden.

4. Experiment

Der Aufbau eines Koinzidenzexperimentes (Abb. 7) ist mit diesem System ohne weiteres möglich. Der 405 nm Laser regt dabei einen Fluoreszenzkristall (BBO-Kristall) an, welcher Photonenpaare mit einer Wellenlänge von 810 nm in einem Emissionskegel von $\pm 3^{\circ}$ emittiert. Die Detektoren werden so platziert, dass der BBO-Kristall auf die APD des Detektors abgebildet wird.

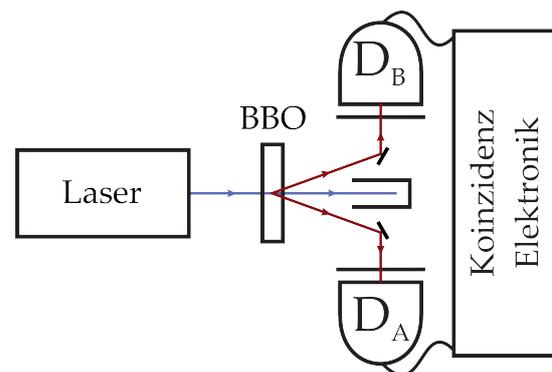


Abb. 7: Schema Koinzidenzexperiment

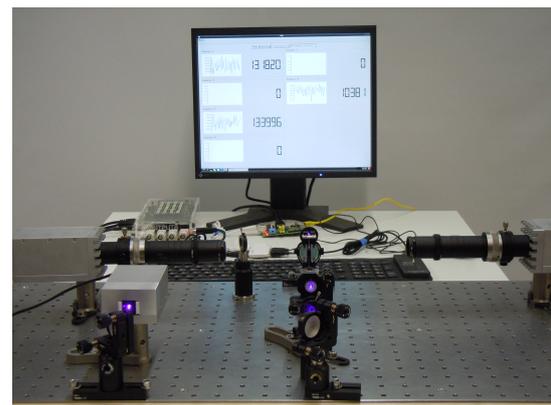


Abb. 8: Koinzidenzexperiment

Nach Feinjustage des Experimentes mit der XY-Justierung des Detektors sind Koinzidenzraten von bis zu 12 kHz bei Einzelzählraten von 130 kHz möglich, vgl. Abbildung 8. Wird der Laserstrahl vor dem Kristall geblockt, gehen die Einzelzählraten bei normaler Raumbelichtung auf ca. 20 kHz zurück, während sich die Koinzidenzrate um 1 Hz einpendelt.

5. Schülerpraktikum

Bei einem Besuch der 12. Jahrgangsstufe der Freien Waldorfschule Weimar im Schülerlabor „Photonik macht Schule“ [23] wurde mit diesem System eine Experimentierstation ausgestattet. Alle Schülerinnen und Schüler konnten erfolgreich ein Koinzidenzexperiment aufbauen.

Abbildung 9 zeigt eine Schülerin bei der Justage des zweiten Detektors.

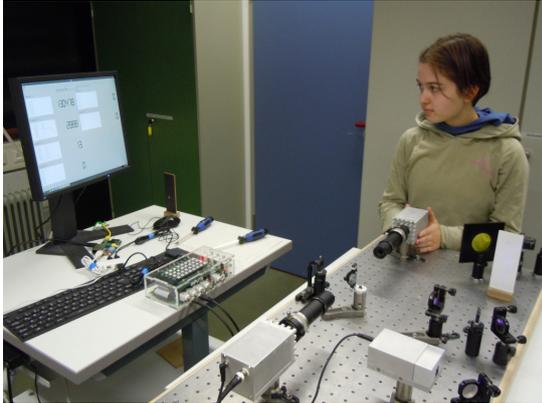


Abb. 9: Schülerin bei der Justage

6. Ausblick

Mit dem Aufbau eines Verschränkungsexperiments soll das Phänomen der Nichtlokalität demonstriert werden.

Weiter ist die Messung des $g^2(0)$ -Faktors geplant. Mit Hilfe dieser Korrelationsfunktion [24] kann abgegrenzt werden, ob es sich im Experiment um klassisches oder nicht-klassisches Licht handelt. Darauf aufbauend kann nach Grangier und Aspect [25] der $g^2(0)$ -Faktor und Einzel-Photonen-Interferenz gleichzeitig in einem einzigen Versuch gezeigt werden.

7. Zusammenfassung

Wir stellen ein modulares System für quantenoptische Experimente vor. Die Einsatzgebiete liegen in Vorlesungen, in Praktika und in Schulen. Die flexible und transportable Zusammenstellung ermöglicht es, die Experimente an jedem Ort und selbst bei Raumbeleuchtung aufzubauen und durchzuführen. Der Verzicht auf entbehrliche Bauteile wie Glasfasern verringert die Komplexität, wodurch Aufbau, Justage und Durchführung des Experiments durch Schülerinnen und Schüler möglich gemacht wird.

8. Literatur

- [1] qutools GmbH, 81371 München, <http://www.qutools.com>
- [2] Dehlinger, D.; Mitchell, M. W.: Entangled photon apparatus for the undergraduate laboratory. In: *Am. J. Phys.*, 70(2002) 9, p. 898-902
- [3] Thorn, J. J.; et al.: Observing the quantum behavior of light in an undergraduate laboratory. In: *Am. J. Phys.*, 72(2004) 9, p. 1210-1219
- [4] Galvez, E. J.; et al.: Interference with correlated photons: Five quantum mechanics experiments

- for undergraduates. In: *Am. J. Phys.*, 73(2005) 2, p. 127-140
- [5] Verschränkte Photonen, Physikpraktikum für Vorgerückte (VP), <http://www.phys.ethz.ch/vp>, ETH Zürich
- [6] Beck Lab, Whitman College, <http://people.whitman.edu/~beckmk/QM/>
- [7] Lab for a Quantum Mechanics Course, Colgate University, http://departments.colgate.edu/physics/research/Photon/root/photon_quantum_mechanics.htm
- [8] Quantum Optics and Quantum Information Laboratory, University of Rochester, <http://www.optics.rochester.edu/workgroups/lukishova/QuantumOpticsLab/>
- [9] QuantumLab, Universität Erlangen, <http://www.QuantumLab.de>
- [10] Richtlinien zur Sicherheit im Unterricht (RiSU), Beschluss der KMK vom 28. März 2003
- [11] SYSTAINER, TTS Tooltechnic Systems AG, 73240 Wendlingen, <http://www.festool.de>
- [12] Thorlabs GmbH, 85221 Dachau, <http://www.Thorlabs.de>
- [13] Linos/Qioptiq GmbH, 37081 Göttingen, <http://www.qioptiq.de>
- [14] Edmund Optics GmbH, 76227 Karlsruhe, <http://www.edmundoptics.de>
- [15] Newport GmbH, 64291 Darmstadt, <http://www.newport.com>
- [16] Nakamura, S.: GaN-based blue/green semiconductor laser. In: *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 3(1997) 2, p. 435-442
- [17] Cova, S.; et al.: Avalanche photodiodes and quenching circuits for single-photon detection. In: *Appl. Opt.*, 35(1996) 12, p. 1956-1976
- [18] Dhulla, Vinit H.: Single Photon Counting for Ultra-weak Fluorescence Detection: System Design, Characterization and Application to DNA-sequencing. Stony Brook University, 2007
- [19] Datenblatt C30902, Excelitas GmbH, 65199 Wiesbaden, <http://www.excelitas.de>
- [20] Datenblatt SAP500, LaserComponents GmbH, 82140 Olching, <http://www.lasercomponents.de>
- [21] Branning, D.; et al.: An FPGA-based module for multiphoton coincidence counting. In: *SPIE Proceedings*, 8375(2012)
- [22] Farnell GmbH, 82041 Oberhaching, <http://www.farnell.de>
- [23] Vetter, Andreas; et al.: Photonik macht Schule - Ein Schülerlabor zur modernen Optik und Quantenoptik. In: *PdN-PhiS*, 59(2010) 8, S. 17-19
- [24] Beck, M.: Comparing measurements of $g^2(0)$ performed with different coincidence detection techniques. In: *J. Opt. Soc. Am. B*, 24(2007) 12, p. 2972-2978
- [25] Grangier, P.; et al.: Experimental Evidence for a Photon Anticorrelation Effect on a Beam Splitter: A New Light on Single-Photon Interferences. In: *Europhysics Letters*, 1(1986) 4, p. 173-179