

Die photonenzählende Kamera als Einstieg in die Quantenphysik

Vielfältige fachdidaktische Forschungs- und Entwicklungsarbeiten der letzten Jahre zielen auf einen adäquaten, schülergerechten Zugang zur Quantenphysik. Im Zusammenhang mit dem Konzept *milq* (Müller, Wiesner, 2000 & Müller, Dammaschke, Strahl, 2015) wurden grundlegende Phänomene der Quantenphysik strukturiert, begrifflich eingeordnet und daran u.a. folgende Wesenszüge abgeleitet: die stochastische Vorhersagbarkeit, die Fähigkeit zur Interferenz und die Komplementarität (Küblbeck, Müller, 2007). Als Medien kommen bei *milq* neben Fachtexten und Bildern vor allem Simulationen zum Einsatz. Mit *QuVis* entsteht aktuell ein weiteres Online-Portal, das eine Vielzahl an Simulationen zur Verfügung stellt (Kohnle, 2015). Neben weiteren Videos, Simulationen und IBEs werden zunehmend auch Realexperimente zum Einstieg in die Quantenphysik eingesetzt.

Einzelphotonenexperimente besitzen dabei den Vorteil der großen Nähe zum aktuellen Forschungsfeld der Quanteninformation. Ihr Aufbau ist allerdings sehr komplex und ihre hohen Kosten sind für Schulen praktisch nicht tragbar. Beispielsweise bietet Teachspin aktuell für mehr als 7000€ ein Doppelspaltexperiment an, bei dem ein Photomultipliermodul als Punktdetektor das Interferenzmuster des Doppelspalts zeilenweise abfährt (vgl. Weis, Wynands, 2003 & Teachspin, 2015). Flächendetektoren mit ultrasensitiven CCD-Sensoren, die einzelne Photonen detektieren können, liegen mit über 10.000€ jenseits des für Schulen möglichen Budgets. Wirkliche Einzelphotonenmessungen werden häufig mit Punktdetektoren durchgeführt, da sie sich mit Avalanchedioden und Pulselektronik kostengünstig realisieren lassen. Im Erlanger Schülerlabor *Quantumlab* kommen solche Einzelphotonenexperimente zum Einsatz (Bronner et al. 2009).

Neben dem Doppelspaltversuch wird häufig das Mach-Zehnder-Interferometer als Einstieg in die Quantenphysik empfohlen, da im Interferometer die beiden Lichtwege deutlich voneinander getrennt sind. Mithilfe von Photomultipliern als Punktdetektoren lassen sich mit diesem Aufbau quantenphysikalische Phänomene veranschaulichen (Dimitrova, Weis, 2008 & Leutner, Scholz, Friege, 2010).

Ziel unserer Arbeit ist es, die Wesenszüge der Quantenphysik mit kostengünstigen Realexperimenten am Doppelspalt und Mach-Zehnder-Interferometer zu veranschaulichen. Dazu haben wir eine photonenzählende Kamera entwickelt, die mit einem Flächendetektor in der Lage ist, die stochastische Vorhersagbarkeit auf Schulniveau in einer modernen Umsetzung des Taylorexperiments (Taylor, 1909) zu demonstrieren.

Funktionsweise der photonenzählenden Kamera

Einige quantenoptische Phänomene, wie die stochastische Vorhersagbarkeit, werden erst bei der Betrachtung weniger Photonen bzw. weniger Events pro Zeit sichtbar. Wir nutzen zwei wesentliche Verfahren, um die Anzahl der zu beobachtenden Events zu verringern, das Einbringen von Neutraldichtefiltern und das Setzen eines unteren Schwellenwertes:

Aus didaktischen Gründen halten wir das Einbringen von Neutraldichtefiltern in den Lichtweg und das Herausnehmen dieser für die wichtigste Möglichkeit die Lichtintensität zu variieren, da diese Handlung die Intensitätsreduktion für Schülerinnen und Schüler auf haptische Weise veranschaulicht und damit einen Zugang zu der Betrachtung von Licht sehr geringer Intensität ermöglicht.

Eine alleinige Reduktion durch Neutraldichtefilter auf wenige Photonen pro Sekunde hätte eine kostenintensive Messapparatur zur Folge, um die Events vor einem Hintergrundrauschen darstellen zu können. Aus diesem Grund betrachten wir etwas mehr Events und reduzieren zusätzlich durch die Wahl einer unteren Schranke des Graustufenwertes unserer Detektorkamera. Damit ist es möglich, die Detektion kostengünstiger zu gestalten.

Im Experiment wird monochromatisches Licht hoher Kohärenz eines Lasers durch Neutraldichtefilter in seiner Intensität reduziert. Das Herzstück der photonenzählenden Kamera bildet ein Restlichtverstärker der Generation 2 aus Nachtsichtgeräten, der ein genügend geringes Hintergrundrauschen aufweist und kostengünstig erworben werden kann (vgl. Abb. 1). Dieser verstärkt eintreffendes Licht, indem über den inneren Photoeffekt an einer Halbleiterschicht Elektronen herausgelöst und dann durch ein elektrisches Feld auf einen Phosphorschirm beschleunigt werden. Diese physikalischen Effekte sind bereits im Schulunterricht curricular verankert, so dass die Funktionsweise des Restlichtverstärkers in der Schule behandelt werden kann und dieser nicht als Black-Box eingeführt werden muss.



Abb. 1 Explosionszeichnung der photonenzählenden Kamera

Eine Abbildungslinse bildet die Leuchterscheinung des Phosphorschirms auf den Sensor einer CMOS-Kamera ab. Zum Schutz des Restlichtverstärkers vor zu hohem Lichteinfall befinden sich weitere Neutraldichtefilter in der Kamera. Für ein geringeres Rauschen sorgt ein Breitbandfilter, der lediglich die Laserwellenlänge von (635 ± 2) nm hindurchlässt.

Die CMOS-Kamera sendet ein Livevideo über einen USB-Anschluss an einen Computer, der über eine mit *Labview* erstellte Software die Einzelbilder des Livevideos zeitlich integriert darstellt. So lässt sich der Wesenszug der stochastischen Vorhersagbarkeit visualisieren, denn in den Einzelbildern scheinen die Photonen willkürlich über die Sensorfläche verstreut detektiert zu werden. Erst nach Integration über viele Einzelbilder wird ein Interferenzbild und damit eine Wahrscheinlichkeitsverteilung sichtbar (s. Abb. 2). Damit das Phänomen der stochastischen Vorhersagbarkeit gut zu beobachten ist, muss das Hintergrundrauschen am CMOS-Sensor möglichst minimiert werden. Dazu lässt sich ein unterer Schwellenwert in *Labview* setzen, um den Graustufenbereich der eintreffenden Events am CMOS-Sensor einzuschränken.

Mit dem unteren Schwellenwert und einer Variation der Neutraldichtefilter kann die Visualisierung des Interferenzphänomens beliebig beschleunigt werden, so dass der Versuch vielfältig im Unterricht eingesetzt werden kann: Die Interferenzerscheinung lässt sich für ein schnelles Demonstrationsexperiment innerhalb von zwei Minuten, aber auch unterrichtsbegleitend innerhalb von 90 Minuten realisieren. Für eine feinere Einstellung der eintreffenden Events pro Zeit gibt es auch die Möglichkeit, die Leistung des Lasers oder die Sensitivität des Restlichtverstärkers zu variieren.

Insgesamt kann die hier vorgestellte Kamera den Wesenszug der stochastischen Vorhersagbarkeit phänomenologisch mitsamt der Intensitätsverteilung anschaulich über einen Flächendetektor darstellen und ist dabei mit einem Preis von ca. 1300€ vergleichsweise kostengünstig.

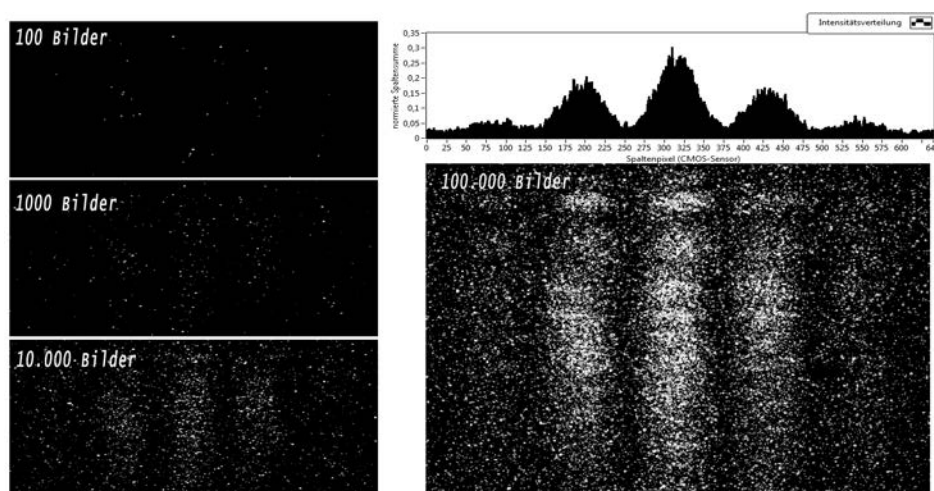


Abb. 2 Stochastische Verteilung von Laserlicht geringer Intensität am Doppelspalt.

Ausblick

Für einen experimentellen Zugang zu den weiteren Wesenszügen zur Quantenphysik planen wir die Konstruktion eines Doppelspalts mit Wegmarkierung durch veränderbare Polarisationsfilter vor beiden Spalten, der einen geringeren Spaltabstand aufweist, als der von MüRoFräser vertriebene (www.muero-fraeser.de, 2015). Dieses Vorhaben ist bereits für einen fixierten Polarisationsfilter realisiert worden (vgl. Rueckner und Peidle, 2013).

Inwieweit die hier vorgestellte photonenzählende Kamera geeignet ist, im Rahmen von Schülerexperimenten ein Verständnis für die Wesenszüge der Quantenphysik aufzubauen, soll in einer explorativen Studie untersucht werden. Zudem wird die photonenzählende Kamera für den Einsatz beim Mach-Zehnder-Interferometer optimiert, um Realexperimente am Doppelspalt und Mach-Zehnder-Interferometer hinsichtlich ihrer Lernwirksamkeit vergleichen zu können.

Danksagung

Die Autoren danken Frank Vewinger vom IAP Bonn für seine Ideen und seine intensive Unterstützung im Rahmen der Entwicklung der photonenzählenden Kamera.

Literatur

- Bronner, P. et al. (2009): Interactive screen experiments with single photons. *Eur. J. Phys.* 30, S. 345–353
- Dimitrova, T., Weis, A. (2008): The wave-particle duality of light: A demonstration experiment. *American Journal of Physics*, 76 (137)
- Kohlme, A. (2015) Online-Portal QuVis. <http://www.st-andrews.ac.uk/physics/quvis/> Universität St. Andrews
- Küblbeck, J., Müller, R. (2007): *Die Wesenszüge der Quantenphysik – Modelle, Bilder und Experimente.* Köln: Aulis Verlag Deubner
- Leutner, S., Scholz, R., Friege, G. (2010): Einsatz eines Mach-Zehnder-Interferometers mit abgeschwächter Lichtquelle für einen experimentellen Einstieg in die Quantenmechanik. *Didaktik der Physik Frühjahrstagung, Hannover*
- Müller, R., Wiesner, H. (2000): Das Münchener Unterrichtskonzept zur Quantenmechanik. *Physik in der Schule* 38, S. 126
- Müller, R., Strahl, A., Dammaschke, T. (2015): www.milq-physik.de
- Rueckner, W., Peidle, J. (2013): Young's double-slit experiment with single photons and quantum eraser. *American Journal of Physics*, 81 (951)
- Taylor, G.I. (1909): Interference Fringes with Feeble Light. *Proc. Cambridge Phil. Soc.* 15, S. 114-115
- Teachspin (2015): <http://www.teachspin.com> (Stand: 10.10.2015)
- Weis, A., Wynands, R. (2003): Three demonstration experiments on the wave and particle nature of light *PhyDid* 1/2,S.67-73