

## Der Photonendetektor für die Schule als Einstieg in die Quantenphysik

Andreas Kral, Christian Theis, Heidrun Heinke

I. Physikalisches Institut IA, RWTH Aachen  
Sommerfeldstr. 14, 52074 Aachen

[kral@physik.rwth-aachen.de](mailto:kral@physik.rwth-aachen.de), [christian.theis@rwth-aachen.de](mailto:christian.theis@rwth-aachen.de), [heinke@physik.rwth-aachen.de](mailto:heinke@physik.rwth-aachen.de)

### Kurzfassung

Vielfältige fachdidaktische Forschungs- und Entwicklungsarbeiten der letzten Jahre zielen auf einen adäquaten, schülergerechten Zugang zur Quantenphysik. Beispielsweise fokussiert das in München entwickelte Konzept *milq* auf grundlegende Phänomene der Quantenphysik und damit verbundene Deutungsfragen, wobei für den Einstieg in die Quantenphysik hier vor allem Simulationen und Videos verwendet werden. In Ergänzung dieses Ansatzes haben wir einen Flächendetektor zum Nachweis geringer Lichtintensitäten entwickelt, um darauf aufbauend in schulpraxistauglichen Realexperimenten grundlegende Phänomene der Quantenphysik am Doppelspaltexperiment zu visualisieren. Unter Verwendung eines Lasers als Lichtquelle wird mit dem Detektor ein Demonstrationsexperiment aufgebaut, das auf jüngeren fachdidaktischen Entwicklungsarbeiten verschiedener Gruppen basiert und zielorientiert für einen praxistauglichen Schuleinsatz angepasst wurde.

### 1. Einleitung

Die Quantenphysik beschreibt Phänomene in atomaren und subatomaren Systemen, die nicht mehr im Rahmen der sog. klassischen Physik zu erklären sind. Dieses wichtige Gebiet der Physik hat nicht nur unser grundlegendes Wissenschaftsverständnis verändert, sondern bildet auch die wissenschaftliche Basis vieler moderner Technologien wie der Halbleiter- und Lasertechnik (vgl. [1]). Zusätzlich eröffnen neue Quantentechnologien, die auf die Beeinflussung individueller Quantensysteme abzielen, neue faszinierende Forschungsfelder und erschließen gleichzeitig über neue technische Bereiche wie das Quantencomputing oder die Quantenkryptografie ein immenses wirtschaftliches Potential (vgl. [1] und [2]). In Konsequenz dieser vielfältigen Bedeutung der Quantenphysik wird diese als ein Themenschwerpunkt in nahezu allen Curricula für den Physikunterricht der Sekundarstufe II behandelt (vgl. z.B. [3]).

Bisher gibt es vielfältige Vorschläge für einen Einstieg in quantenphysikalische Phänomene. Beim Berliner Konzept (vgl. [4], [5]) wurde ein Unterrichtsgang entwickelt, der auf Lernschwierigkeiten und Schülervorstellungen eingeht und durch eine Umstrukturierung der Teilthemen neue Akzente setzt. Das Bremer Konzept dagegen zielt auf ein tieferes Verständnis eines Atommodells nach Schrödinger und rückt damit die Anwendung der Quantenphysik in der Festkörperphysik in den Fokus (vgl. [6]). Beim *milq*-Konzept wiederum stehen Deutungsfragen der Quantenphysik im Zentrum. Grundlegende Phänomene der Quantenphysik wurden von Müller und Wiesner [7] strukturiert, begrifflich eingeordnet und u.a. folgende Wesenszüge abgeleitet: die stochastische Vorhersagbarkeit, die Fähigkeit zur Interferenz und die Komplementarität. Als Medien kommen bei

*milq* neben Fachtexten und Bildern vor allem Simulationen und Videos zum Einsatz.

Die hier vorgestellten Arbeiten zielen auf eine Ergänzung des *milq*-Ansatzes um die Möglichkeit schulpraxistaugliche Realexperimente zur Vermittlung grundlegender quantenphysikalischer Phänomene einzusetzen. Ausgewählte Simulationen sollen durch geeignete Realexperimente im *milq*-Konzept ersetzt werden, um die vielfältigen Vorteile realer Experimente auch für den Einstieg in die Quantenphysik nutzbar zu machen. Dadurch soll gleichzeitig eine praxistaugliche Möglichkeit geschaffen werden, das *milq*-Konzept vielseitiger in der Schule umzusetzen.

Deshalb wurde ein Flächendetektor für die Visualisierung einer sich zeitlich aufbauenden Photondichte z.B. im bekannten Doppelspaltexperiment mit geringen Lichtintensitäten entwickelt. Da mit dem verwendeten experimentellen Aufbau keine Einzelphotonenereignisse detektiert werden können, handelt es sich um die praktische Umsetzung einer experimentellen Analogie.

Das dabei entstandene Demonstrationsexperiment wurde unter den vielfältigen Gesichtspunkten der Schulpraxis für eine überzeugende Darstellung grundlegender quantenphysikalischer Phänomene für den Einstieg in die Quantenphysik optimiert. Hierzu wurde ein allgemeiner Kriterienkatalog für die Entwicklung komplexer Realexperimente erstellt (s. Abb. 1), der grundsätzliche Anforderungen für deren Einsatz im Unterricht aus der Lehrerperspektive beinhaltet. Gleichzeitig baut die Entwicklung des Experiments auf jüngere fachdidaktische Vorarbeiten verschiedener Gruppen auf (vgl. [8], [9], [10], [11] und [12]), die in Abschnitt 3 erläutert werden.

## 2. Kriterien für die Entwicklung komplexer Experimente für die Schulpraxis

In vielseitigen physikdidaktischen Veröffentlichungen werden unterschiedliche Anforderungen an Experimente beschrieben (vgl. [13] und [14]). Aus lernpsychologischer Sicht sollte auf eine angemessene Strukturierung der Lerninhalte, aber auch auf eine Anknüpfung an das Vorwissen von Schülerinnen und Schülern geachtet werden. Empfehlungen aus der Wahrnehmungs- und Motivationspsychologie beinhalten, dass alle wesentlichen Versuchsobjekte gut sichtbar und deutlich beschriftet sind und der Ablauf des Experiments in einer klaren Struktur gegliedert sowie mit einem Fokus auf das Wesentliche interessant gestaltet ist (vgl. [14]). Die meisten Anforderungen orientieren sich an den Schülerinnen und Schülern als Klienten dieser Experimente.

### Schulpraktische Kriterien zur Entwicklung von Realexperimenten

#### *Einsatz im Unterricht: notwendige Kriterien*

- Curriculare Verankerung
- Sicherheit
- Durchführbarkeit (Abhängigkeit von Umgebungslicht, Wetter, Luftfeuchtigkeit)
- Reliabilität / Reproduzierbarkeit
- Stabilität (robust und langlebig)

#### *Einsatz im Unterricht: Praktikabilität*

- Variable Versuchsdauer
- Mobilität
- Flexibilität: Demonstrations- oder Schülerexperiment
- Zeitrahmen: Aufbau – Justage – Abbau

#### *Schulinterne Rahmenbedingungen:*

- Anschaffungskosten
- Ausstattung der Sammlung
- Lagerung (der Experimente)

#### *Lernpsychologische Sicht:*

- Angemessene Strukturierung der Lerninhalte
- Verknüpfung mit dem Vorwissen

#### *Wahrnehmungspsychologie:*

- Wesentliche Versuchsobjekte sind gut sichtbar und deutlich beschriftet
- Diskriminierungsfähigkeit (z.B. Abstrahieren von zweitrangigen Begleiterscheinungen)

#### *Motivationspsychologie:*

- Ablauf und klare Struktur des Experiments
- Fokus auf das Wesentliche
- Interessante Gestaltung vgl. [14]

Abb. 1: Kriterienkatalog zur Entwicklung praxistauglicher Realexperimente aus der Lehrerperspektive.

Für die Entwicklung von Realexperimenten gibt es noch weitere Kriterien, die aus Sicht der Lehrkraft für die Vorbereitung, Planung und Gestaltung von Physikunterricht eine Rolle spielen. Einige Kriterien sind in einem Kriterienkatalog in Abb. 1 zusammengefasst.

Im konkreten Fall des Doppelspaltexperiments mit Photonen bei geringer Lichtintensität erfordert der Einsatz eines entsprechenden Realexperiments in der Schule vor allem ein robustes und zuverlässiges Experiment, das nicht nur im vollständig abgedunkelten Raum zum Einsatz kommen kann. Gleichzeitig sind unter dem Blickwinkel der Praxistauglichkeit die Zeitskalen, auf denen überzeugende Effekte beobachtbar werden, ebenso zu berücksichtigen wie preisliche Aspekte. Im folgenden Abschnitt geben wir zunächst eine Übersicht über bisherige Realexperimente in dem thematischen Umfeld und stellen daran anschließend unseren experimentellen Ansatz vor.

## 3. Realexperimente für die Schule als Einstieg in die Quantenphysik

Realexperimente zur Veranschaulichung quantenphysikalischer Phänomene lassen sich mit Licht auf vielfältige Art und Weise realisieren.

Zu nennen sind hier zunächst Einzelphotonenexperimente. Sie besitzen den Vorteil der großen Nähe zum aktuellen Forschungsfeld der Quanteninformation und sind aus fachlicher Sicht voll anschlussfähig an weitere quantenphysikalische Konzepte, da sie korrekte Zusammenhänge im Realexperiment nachweisen. Im Erlanger Schülerlabor *Quantumlab* kommen Einzelphotonenexperimente im Rahmen von Koinzidenzmessungen zum Einsatz (vgl. [15] und [16]). Für den Nachweis von Einzelphotonen werden hier Photonpaarquellen verwendet. Damit lässt sich beispielsweise die Unteilbarkeit von Photonen experimentell bestätigen. Deutliche Nachteile dieser Experimente mit Blick auf einen potentiellen Einsatz in der Schule sind aber die hohe Komplexität des experimentellen Aufbaus und die (zumindest aktuell) hohen Anschaffungskosten. Beide Gründe verhindern einen breiten Einsatz solcher Experimente in der Schulpraxis. Folglich sind auch die Lernwirksamkeit von Einzelphotonenexperimenten im schulischen Einsatz oder die Entwicklung von Schülervorstellungen unter Verwendung solcher Experimente bislang noch nicht umfassender untersucht worden.

Alternativ gibt es vielfältige Vorschläge für einen experimentellen Einstieg in die Quantenphysik, bei denen Detektoren zum Einsatz kommen, die zwar einzelne Photonen detektieren können, aber keinen expliziten Nachweis für das Auftreten der Einzelphotonen liefern. So werden Avalanche-Detektoren oder Photomultiplier-Module als sog. Punktdetektoren häufig dazu verwendet, um das Fernfeld abgeschwächten Laserlichts beim Doppelspaltexperiment (vgl. [8], [9] und [10]) oder beim Mach-Zehnder-Interferometer (vgl. [8], [11] und [12]) lokal aufzuzeichnen. Über eine Verschiebung der Punktdetektoren

ren in der Detektorebene senkrecht zur Spaltausrichtung lässt sich die entsprechende ortsabhängige Intensitätsverteilung bestimmen und somit ein Interferenzmuster nachweisen. Der Prozess der sukzessiven Datenaufzeichnung nach einer Verschiebung eines Punktdetektors ist allerdings zeitlich aufwändig. Zudem erfordert die korrekte Interpretation der Daten bereits ein Verständnis der stochastischen Verteilung der zu detektierenden Photonen hinter dem Doppelspalt und Vorkenntnisse der zeitlich integrierten Intensitätsverteilung.

Werden statt der Punktdetektoren Detektorzeilen eingesetzt, dann liefert das Auslesen der Zeile wesentlich schneller die Ergebnisse, die sonst nur durch den aufwändigen Prozess der Verschiebung eines Punktdetektors gewonnen werden. Allerdings bleiben die vorher diskutierten Nachteile bei der Interpretation der zeitlichen Entwicklung des Messergebnisses weitgehend bestehen.

Deshalb erscheint es sinnvoll einen Flächendetektor zum Nachweis geringer Lichtintensitäten für Einstiegsexperimente in Phänomene der Quantenphysik zu verwenden. Damit wird die zeitliche Entwicklung der örtlichen, zeitlich integrierten Photonverteilung hinter dem Doppelspalt unmittelbar und damit anschaulich zugänglich. Dies sollte es deutlich erleichtern, die Ermittlung der ortsabhängigen Intensitätsverteilung nachzuvollziehen.

Ein Vorschlag für die Verwendung von ultrasensitiven CCD-Flächendetektoren für Lehrzwecke kommt von Rueckner und Peidle [8], die mithilfe verschiedener Lichtquellen die *Welcher-Weg-Information* und *Komplementarität* am Doppelspalt demonstrieren. Einen expliziten Nachweis für Einzelphotonen liefern sie nicht, gehen aber darauf ein, wie sich mit dem verwendeten Detektor Ereignisse von wenigen Photonen sauber vor einem Hintergrundrauschen messen lassen. Die Anschaffung von ultrasensitiven CCD-Sensoren ist aber mit hohen Kosten verbunden, die mit mehr als 10.000 € deutlich jenseits des für Schulen realistischen Budgets liegen.

Ein kostengünstiges Experiment, bei dem ein CCD-Flächendetektor bei Licht höherer Intensität zur Veranschaulichung der *Welcher-Weg-Information* zum Einsatz kommt, wird von Schneider und LaPuma beschrieben [11]. Allerdings kann der Lerner in diesem Experiment den Aufbau des Bildes in seinem zeitlichen Verlauf nicht verfolgen, so dass eine Visualisierung des stochastischen Charakters quantenphysikalischer Phänomene damit nicht möglich ist. Deshalb zielte die vorliegende Arbeit auf die Realisierung eines für die Schulpraxis tauglichen Flächendetektors zum Nachweis geringer Lichtintensitäten zur Veranschaulichung grundlegender quantenphysikalischer Phänomene, der den Schülern zugleich Zugang zur zeitlichen Entwicklung der Verteilung der detektierten Ereignisse eröffnet.

Als Lichtquellen wurden bei den oben genannten Experimenten häufig Laserdioden verwendet (vgl. z.B. [8] und [11]), da deren monochromatisches Licht hoher Kohärenz bei höheren Intensitäten deutliche Interferenzmuster zeigt und damit für eine Justage im Vorfeld genutzt werden kann. Es kommen aber auch

andere Lichtquellen zum Einsatz. Rueckner und Peidle haben verschiedene Lichtquellen beim Doppelspaltexperiment genauer untersucht und dabei eine Natriumdampf-Niederdruck-Lampe, verschiedene LEDs, eine Laserdiode und ein Glühbirnchen miteinander verglichen. Im Ergebnis empfehlen sie die Verwendung einer blauen LED in Kombination mit einem 5  $\mu\text{m}$  schmalen Kohärenzspalt [8].

Aus physikdidaktischer Sicht erscheint der Einsatz eines Kohärenzspalts zur Abschwächung der Lichtintensität in einem einführenden Versuch, wie er hier entwickelt werden sollte, allerdings als problematisch. Beispielsweise könnte die Hintereinanderschaltung der beiden Spalte (erst Kohärenzspalt, dann Doppelspalt) verwirren. Stattdessen dürfte für viele Lerner die Verwendung von Neutraldichtefiltern zur Variation der Lichtintensität deutlich eingängiger sein, da die Reduktion der Lichtintensität bei Neutraldichtefiltern durch eine Durchsicht simpel nachvollzogen werden kann und das Einbringen solcher Filter in den Lichtweg sowie ihr Herausnehmen im haptischen Prozess nachvollziehbar erfahren werden können.

In den vorliegenden Versuchen werden Neutraldichtefilter mit einer optischen Dichte von 7 in Kombination mit einer Laserdiode mit einer Wellenlänge von 635 nm und ein Doppelspalt mit einer Spaltbreite von 0,1 mm und einem Spaltabstand von 0,25 mm verwendet [17].

#### 4. Funktionsweise des Photonendetektors

Der entwickelte Photonendetektor besteht aus einem lichtempfindlichen Flächendetektor, der über eine mit *Labview* entwickelte Software ausgelesen wird. Beide Komponenten tragen einen Teil zur Umsetzung einer schulpraxistauglichen Detektion von wenig Licht bei und werden im Folgenden erläutert.

##### 4.1. Lichtempfindlicher Flächendetektor

Das Herzstück des hier verwendeten Flächendetektors bildet ein Restlichtverstärker der Generation 2+, der typischerweise in Nachtsichtgeräten zum Einsatz kommt und im Prinzip aus vielen kleinen Photomultipliern besteht. Darin lösen eintreffende Photonen an einer Photokathode Elektronen heraus, die durch ein angelegtes elektrisches Feld in sehr kleinen Glasfaserkanälen beschleunigt werden. Diese Elektronen lösen an der hochohmigen Innenwand dieser Mikrokanäle weitere Elektronen heraus, die nach einer weiteren Beschleunigung auf den Phosphorschirm dort als grüner Leuchtpunkt wahrzunehmen sind [18]. Durch die Verwendung dieser Mikrokanäle kann die Lichtintensität verstärkt und gleichzeitig die zweidimensionale Bildinformation in ihrer Charakteristik beibehalten werden. Die Funktionsweise von Restlichtverstärkern lässt sich qualitativ mit der Schulphysik behandeln, denn der *Photoeffekt*, *beschleunigte Ladungen im elektrischen Feld* und *Wechselwirkungen von Licht mit Materie* sind bundesweit im

Schulcurriculum des Physikunterrichts verankert (vgl. z.B. [3]). Damit könnte der Restlichtverstärker im Kontext von Nachtsichtgeräten in der Schule behandelt werden und muss nicht als Black-Box betrachtet werden.

Restlichtverstärker sind genauso wie Photomultiplier sehr sensible Bauteile, die für eine längere Verwendung ausschließlich bei sehr geringen Lichtintensitäten betrieben werden sollten. Für einen alltagstauglichen Einsatz im Schulunterricht erscheint es daher sinnvoll Neutralsichtfilter mit einer optischen Dichte von 7 fest vor den Restlichtverstärker zu montieren. Damit wird statistisch nur jedes zehnmillionste Photon zum Restlichtverstärker hindurchgelassen, so dass auch ein Einsatz bei geringem Tageslicht realisiert werden kann.

Ein Bandpassfilter sorgt außerdem für ein geringeres Rauschen am Restlichtverstärker, da er auf den verwendeten Laser angepasst lediglich Licht einer Wellenlänge von  $(635 \pm 2)$  nm passieren lässt (vgl. [19]).

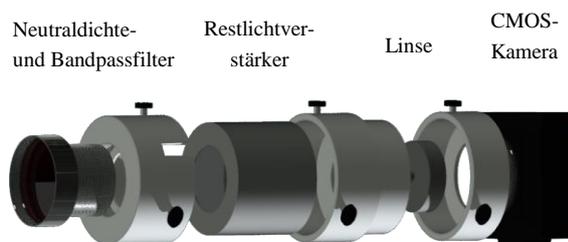


Abb. 2: Explosionszeichnung des Flächendetektors.

Eine Linse ( $f = 20$  mm) bildet die Fläche des Phosphorschirms mit den leuchtenden Punkten auf den Sensor einer CMOS-Kamera [20] ab.

Die Rohdaten der Kamera werden dann in einem Livevideo an einen Computer via USB gesendet. Die Kamera wird dabei mithilfe der für die CMOS-Kamera implementierten *Labview*-Module angesteuert. Weitere Details zur Software werden im folgenden Kapitel dargestellt.

#### 4.2. *Labview*-Software

Die mit *Labview* entwickelte Software ist u.a. in der Lage

- die Rohdaten der CMOS-Kamera als Live-Video anzuzeigen (kann zur Kalibrierung genutzt werden),
- die Einzelbilder des Livevideos über die Zeit zu integrieren und das entstandene integrierte Bild darzustellen,

- die zeitlich integrierte ortsabhängige Intensitätsverteilung, die sich als Spaltensumme der jeweiligen Bilder aus b) ergibt, zu ermitteln und grafisch darzustellen.

Damit lässt sich der Wesenszug der *stochastischen Vorhersagbarkeit* visualisieren: Einerseits wird in den Einzelbildern deutlich, dass sich nicht vorhersagen lässt, an welcher Stelle die nächsten Photonen detektiert werden. Andererseits ergibt sich nach vielen Wiederholungen eine reproduzierbare Verteilung, mit der sich prognostizieren lässt, wie wahrscheinlich es ist, dass ein Photon in einem bestimmten Bereich detektiert wird.

Damit das Phänomen der stochastischen Vorhersagbarkeit zu beobachten ist, muss das Hintergrundrauschen am CMOS-Sensor möglichst minimiert werden. Dazu lässt sich ein unterer Schwellenwert als untere Grenze des Graustufenbereichs 0 (schwarz) bis 255 (weiß) festlegen, so dass in jedem Einzelbild des Livevideos nur diejenigen Pixelwerte in das integrierte Bild übertragen werden, für welche der entsprechende Graustufenwert den eingestellten Schwellenwert überschritten hat. Die freie Wahl eines unteren Schwellenwertes der zu berücksichtigenden Messdaten in der Mess-Software verdeutlicht den hier verfolgten Ansatz der Entwicklung eines schulpraxistauglichen Analogieexperiments für den Einstieg in die Quantenphysik. Das Experiment bietet damit auch eine für die Schulpraxis hilfreiche Flexibilität, um die Experimentierzeit variabel an den Unterrichtsgang anzupassen. Solche Software-gestützten Verfahren, die das Signal-Rausch-Verhältnis verbessern, sind bereits in einem ähnlichen fachlichen Umfeld verwendet worden. So setzten Rückner und Peidle ein Binning-Verfahren ein, um einzelne Photonen quantifizieren zu können [8].

Die Software bietet außerdem die Möglichkeit verschiedene Parameter zur Einstellung der CMOS-Kamera zu variieren. So lassen sich die Belichtungszeit, die Helligkeit, ein Schwarzwert, aber auch ein Gammawert manuell einstellen. Für jede Messung lässt sich angeben, wie viele Einzelbilder integriert werden sollen und welcher untere Schwellenwert dabei verwendet werden soll. Darüber hinaus lässt sich eine eingebaute Filter-Automatik zur Reduktion der sog. Hotpixel des CMOS-Sensors anwenden. Dadurch werden Pixel mit permanent zu hohen Graustufenwerten durch eine Mittelwertbildung der Nachbarpixel ersetzt.

Damit der Versuchsaufbau vor der Durchführung einfach und schnell justiert werden kann, lassen sich in einem separaten Kalibrierungsfenster die Rohdaten in einem Livevideo darstellen. Für die Justage muss allerdings die Lichtintensität etwas erhöht werden, um über die Live-Darstellung des Interferenzbildes die Apparatur korrekt auszurichten. Außerdem besteht auch die Möglichkeit, nur einen bestimmten Bereich des CMOS-Sensors für eine Messung auszuwählen.

## 5. Ergebnisse

Der für die Schulpraxis entwickelte Flächendetektor ist in der Lage ein sichtbares Bild langsam aus einzelnen Bildpunkten entstehen zu lassen. Beispielsweise lässt sich das Interferenzbild beim Doppelspalt langsam aufbauen. Im Vergleich zu Experimenten, in denen eine hohe Lichtintensität direkt detektiert wird, lässt sich mit diesem Versuch der Prozess des Bildaufbaus zeitlich ausdehnen und damit möglicher-

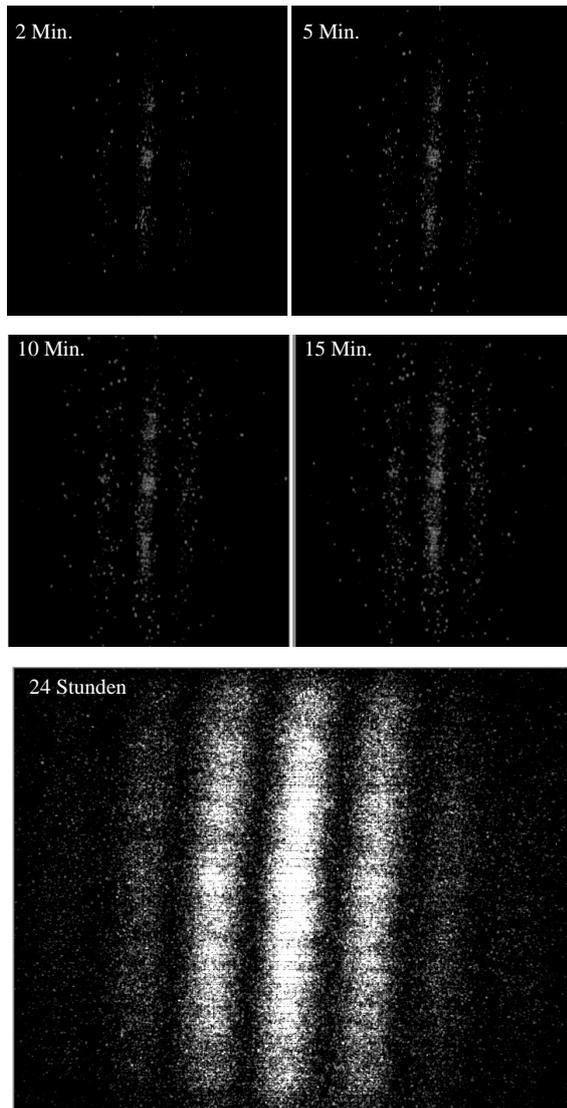


Abb. 3: Normierte Spaltensummen einer Doppelspaltinterferenz in Abhängigkeit von der Messdauer bei geringem Umgebungslicht.

weise für die Schülerinnen und Schüler im Unterrichtsgang ein inhaltlicher Spannungsbogen aufbauen. Dieser Prozess lässt sich durch eine geeignete Wahl von Neutraldichtefiltern und des unteren Schwellenwertes realisieren.

Der Versuch kann so kalibriert werden, dass etwa alle zwei Sekunden ein einzelner Pixel aufleuchtet und damit das Interferenzbild erst nach mehreren

Minuten sichtbar wird. In den ersten Sekunden scheinen die detektierten Ereignisse willkürlich zu sein, doch bereits nach wenigen Minuten zeichnet sich ein Interferenzbild ab (vgl. Abb. 3). Dabei ist es nicht möglich den Ort für das nächste Ereignis vorherzusagen. Allerdings wird über das Bild sehr schnell deutlich, dass in bestimmten Bereichen mehr Ereignisse detektiert werden. Damit ist man in der Lage den Wesenszug der stochastischen Vorhersagbarkeit im Realexperiment bildlich ohne eine Darstellung der Intensitätsverteilung darzustellen.

Der Prozess der Beobachtung einzelner Ereignisse lässt sich im dargestellten Versuch durch das Einbringen weiterer Neutraldichtefilter und das Festlegen eines größeren Schwellenwertes verlangsamen. Damit kann der sukzessive Aufbau des Interferenzbildes je nach Einsatz im Unterricht wahlweise schnell in wenigen Minuten, aber auch über eine gesamte Schulstunde hinweg verfolgt und visualisiert werden, so dass eine variable Nutzung des Experiments im Unterricht ermöglicht wird.

Im Folgenden wird für einige ausgewählte Aspekte gezeigt, inwieweit die Anforderungen aus Abb. 1 mit den Experimenten am Doppelspalt unter Einsatz des Photonendetektors erfüllt sind.

Der Einfluss des Umgebungslichts auf das Experiment ist hoch, wenn man eine schnelle Messung innerhalb von wenigen Minuten durchführen möchte, da sich in den kurzen Zeitspannen eine Intensitätsverteilung noch nicht deutlich vom Rauschen abzeichnet. Die Messergebnisse aus

Abb. 3 und Abb. 4 sind aus einer Messreihe und bei geringem Umgebungslicht aufgenommen. So war die Raumverdunkelung 30 cm geöffnet, es schien aber keine direkte Sonne in den Raum. Das Licht reichte aber vollständig aus, um alle Gegenstände im Raum ohne Beeinträchtigung zu sehen. Für eine deutliche Reduktion des Rauschens wurde der Raum zwischen dem Doppelspalt und dem Photonendetektor durch eine Röhre aus lichtdichtem Kunststoff abgedunkelt.

Der Restlichtverstärker ist ein sehr empfindliches Bauteil. Bereits bei geringem Umgebungslicht kann diese Komponente Schaden nehmen. Daher ist es wichtig, den Restlichtverstärker mithilfe von Neutraldichtefiltern und einem Breitbandfilter vor direktem Lichteinfall zu schützen. Im Unterrichtsalltag weiß man nie, ob nicht vielleicht doch irgendjemand versehentlich den Lichtschalter betätigt. Wenn man nicht die Neutraldichtefilter direkt vor dem Restlichtverstärker installiert, müsste man, wie in einem experimentellen Aufbau des Herstellers Teach-Spin (vgl. [21]), alle Komponenten fest verbauen. Dies würde aus fachdidaktischer Perspektive zu erheblichen Einschränkungen führen, ohne dadurch den Restlichtverstärker vollständig vor zu hoher Lichtintensität schützen zu können.

Der gesamte Versuchsaufbau ist bis auf den Laptop/PC mit Beamer handlich und mobil. Laser sowie

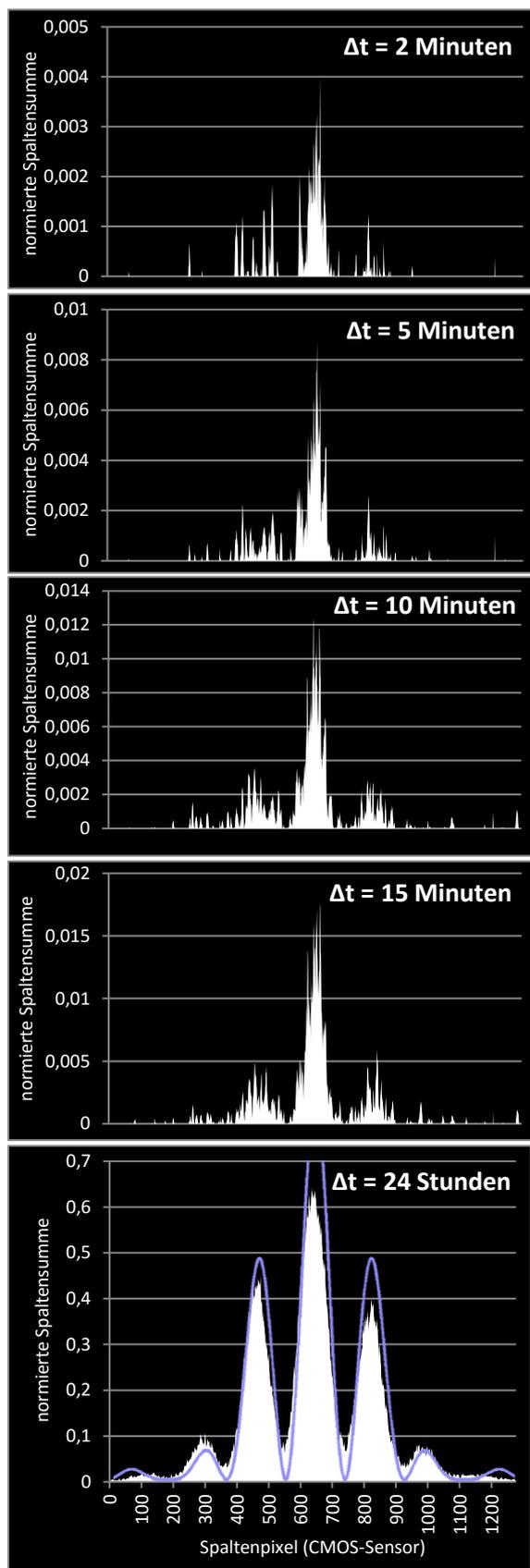


Abb. 4: Stochastische Verteilung von Laserlicht geringer Intensität hinter einem Doppelspalt mit erwarteter Intensitätsverteilung (blau) bei einer Messdauer von 24 Stunden.

Restlichtverstärker lassen sich vollständig mit Batterien betreiben, so dass man bei Bedarf auch komplett unabhängig von einer Spannungsversorgung über Steckdosen arbeiten kann. Der Versuch ist sowohl als Demonstrationsversuch als auch für kleine Schülergruppen als Schülerversuch geeignet. Unsere Messungen zeigen, dass sich nach längeren Messzeiten reproduzierbare Intensitätsverteilungen ergeben.

Die Darstellung der normierten Spaltensumme in der Mess-Software sorgt dafür, dass zu Beginn der Messung einzeln gemessene Pixel erkannt werden können. Im weiteren Verlauf entsteht für den Betrachter der Eindruck, dass sich im zeitlichen Verlauf der Messung die Intensitätsverteilung ausschärft, so dass nach sehr vielen Messungen eine statistische Verteilung sichtbar wird (vgl. Abb. 4). Die Langzeitmessung über 24 Stunden zeigt neben den im Realexperiment aufgenommenen Messwerten auch die erwartete Intensitätsverteilung an. Der Vergleich dieser beiden Verteilungen zeigt kleinere Abweichungen, die in weiteren Untersuchungen noch genauer analysiert werden müssen.

## 6. Fazit & Ausblick

Es wurde ein Flächendetektor zum Nachweis geringer Lichtintensitäten für den Einsatz in schulpraxistauglichen Experimenten zur Visualisierung der stochastischen Vorhersagbarkeit quantenphysikalischer Phänomene entwickelt und dessen Nutzbarkeit am Beispiel des Doppelspaltexperiments mit wenig Licht erfolgreich demonstriert. Dabei wurden bei der Entwicklung des Experiments die vielfältigen Anforderungen, die sich aus dem Einsatz des Experiments in der Schule im Rahmen des Einführungsunterrichts in die Quantenphysik ergeben, von Anfang an berücksichtigt. Durch diesen Ansatz wurde eine gute Passung des Experiments zu den Anforderungen der Schulpraxis erreicht. Somit zeigt sich der Flächendetektor als Herzstück des Experiments robust und alltagstauglich sowie flexibel einsetzbar. Die Kosten für das Experiment wurden durch die Verwendung kostengünstigerer C-Ware für die Restlichtverstärker möglichst geringgehalten und liegen unter 1500 €.

Die Nutzbarkeit als schulpraxistaugliches Demonstrationsexperiment wird auch wesentlich durch die Mess-Software gewährleistet, mit der durch die Wahl von Messparametern Untermengen der Messdaten für die Schülerinnen und Schüler visualisiert werden. Weitere Untersuchungen müssen sicherstellen, dass dieses Vorgehen zu keinen gravierenden Abweichungen von den theoretisch erwarteten Intensitätsverteilungen führt. Zudem steht die Prüfung der Lernwirksamkeit des Demonstrationsexperiments aus. Hierzu wird in einer explorativen Studie untersucht, welche Vorstellungen über die Wesenszüge der Quantenphysik durch den Einsatz des Demonstrationsexperiments bei Schülerinnen und Schülern aufgebaut werden und inwiefern diese anschlussfähig an weiterfüh-

rende quantenphysikalische Betrachtungen einschließlich der Interpretation von Einzelphotonexperimenten sind.

## 7. Literatur

- [1] Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina, acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, Union der deutschen Akademien der Wissenschaften (Hrsg) (2015), *Perspektiven der Quantentechnologien*. Halle (Saale), 64 Seiten.  
[http://www.leopoldina.org/uploads/tx\\_leopublication/2015\\_Quantentechnologien\\_LF\\_DE\\_korr.pdf](http://www.leopoldina.org/uploads/tx_leopublication/2015_Quantentechnologien_LF_DE_korr.pdf) (Stand 5/2016)
- [2] QuantumManifesto May 2016, <http://qurope.eu/manifesto> (Stand 5/2016)
- [3] Ministerium für Schule und Weiterbildung des Landes Nordrhein-Westfalen: *Kernlehrplan für die Sekundarstufe II Gymnasium/Gesamtschule in Nordrhein-Westfalen Physik* (1. Auflage 2014) [http://www.schulentwicklung.nrw.de/lehrplaene/upload/klp\\_SII/ph/KLP\\_GOSt\\_Physik.pdf](http://www.schulentwicklung.nrw.de/lehrplaene/upload/klp_SII/ph/KLP_GOSt_Physik.pdf) (Stand 5/2016)
- [4] Berg, A. et al. (1989). *Einführung in die Quantenphysik. Ein Unterrichtsvorschlag für Grund- und Leistungskurse*. Pädagogisches Zentrum Berlin.
- [5] Fischler, H. & Lichtfeldt, M. (1994). *Ein Unterrichtskonzept zur Einführung in die Quantenphysik*. Physik in der Schule, 32 (7/8), 276–280.
- [6] Niedderer, H. (1992). *Atomphysik mit anschaulichem Atommodell*. – In: Fischler, H. (Hrsg): *Quantenphysik in der Schule*. – Kiel: IPN, S. 88–113.
- [7] Müller, R. & Wiesner, H. (2002). *Teaching quantum mechanics on an introductory level*. Am. J. Phys. 70 (3), 200–209.
- [8] Rueckner & Peidle, (2013). *A lecture demonstration of single photon interference*. Am. J. Phys 81(12), 951-958.
- [9] Dimitrova, T. L., Weis, A. (2008). *The wave-particle duality of light: A demonstration experiment*. Am. J. Phys. 76, 137.
- [10] Weis, A. & Wynands, R. (2003). *Three demonstration experiments on the wave and particle nature of light*. Physik und Didaktik in Schule und Hochschule. PhyDid 1/2. S.67-73
- [11] Schneider, M. & LaPuma, I. (2002). *A simple experiment for discussion of quantum interference and which-way measurement*. Am. J. Phys. 70 (3), 266-271.
- [12] Leutner et al., 2010. *Einsatz eines Mach-Zehnder-Interferometers mit abgeschwächter Lichtquelle für einen experimentellen Einstieg in die Quantenmechanik*. Didaktik der Physik Frühjahrstagung. Hannover.
- [13] Heinicke, S. & Peters, S. (2016). *Was ist Experimentieren? Moderne Sichtweisen unter der Lupe*. NiU Physik, 144, 10-13.
- [14] Kircher, E. et al (2009). *Physikdidaktik – Theorie und Praxis. Zweite Auflage*. Heidelberg: Springer-Verlag. S. 244- 264.
- [15] Bronner et al. 2009 <http://www.didaktik.physik.uni-erlangen.de/quantumlab/> (Stand 5/2016)
- [16] Bronner, P. et al. (2009). *Interactive screen experiments with single photons*. Eur. J. Phys. 30, S. 345–353.
- [17] Blende mit 3 Doppelspalten, LD Didactic.
- [18] Schaumburg, H. et al. (1995). *Sensoranwendungen*. Stuttgart: Teubner.
- [19] Bandpassfilter: Thorlabs Informationen und Dokumente. <https://www.thorlabs.de/thorproduct.cfm?partnumber=FL635-10> (Stand 5/2016)
- [20] CMOS-Kamera: Thorlabs : DCC1554M-Manual, <https://www.thorlabs.de/thorproduct.cfm?partnumber=DCC1545M> (Stand 8/2016)
- [21] Teachspin: Teachspin Doppelspalt. <http://www.teachspin.com/two-slit-interference--one-photon-at-a-time.html> (Stand 8/2016)

## Danksagung

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