

Abb. 2. Schematische Darstellung der Photonenquelle für in der Polarisation verschränkte Photonenpaare (vgl. CLEVE, 2023)

Für die Experimente wird eine nicht-klassische Lichtquelle verwendet, die Photonen in so großen zeitlichen Abständen aussendet, dass sich immer nur ein Photon gleichzeitig im Versuchsaufbau befindet. Bei einer Zählrate von  $I = 150.000 \text{ counts/s}$  und  $c$  als Ausbreitungsgeschwindigkeit ergibt sich z.B. als Abschätzung mit der Annahme gleichmäßig verteilter Photonen ein Abstand zwischen zwei Photonen von  $s = \frac{c}{I} = 1998 \text{ m}$ . Da die Lichtwege innerhalb des Aufbaus weniger als 1 m betragen, kann daher davon ausgegangen werden, dass sich immer nur ein Photon gleichzeitig im Aufbau befindet.

Der Aufbau der Quelle ist in Abbildung 2 skizziert. Er wird in den folgenden Experimenten immer als „Blackbox“ mit der Beschriftung „Photonenpaare“ dargestellt. Mittels eines ultravioletten Pumplasers (405 nm) wird ein Beta-Bariumborat-Kristall (BBO) angeregt. Durch „Parametric Down Conversion“ (PDC) entsteht spontan unter Energie- und Impulserhaltung ein Paar von zwei roten Photonen (810 nm), welche aufgrund der Impulserhaltung räumlich auseinanderlaufen und gegenüberliegend verteilt auf einem Kegel austreten. Eines der Photonen (Signal) kann anschließend für Experimente genutzt werden, während das andere zur Ankündigung der Messung (Idler) dient (LOUDON, 2000). Dabei werden nur diejenigen Ereignisse gezählt, bei denen beide Photonen innerhalb eines vordefinierten Koinzidenzfensters (z.B.  $\Delta t = 3 \text{ ns}$ ) registriert werden. Genutzt wird dieser Aufbau, um beispielsweise Photonen aus dem Umgebungslicht in den Messungen auszublenken.

Darüber hinaus ist es möglich, mit der Lichtquelle polarisationsverschränkte Photonenpaare zu erzeugen. Zu diesem Zweck werden zwei senkrecht zueinanderstehende BBOs verwendet. Mit einem Halbwellenplättchen (HWP) wird die Polarisationsrichtung des Pumplasers so eingestellt, dass am ersten BBO zwei horizontal polarisierte und am zweiten BBO zwei vertikal polarisierte Photonen erzeugt werden können. Die beiden doppelbrechenden Ytterbiumvanadat-Kristalle (YVO) verschieben die Laufzeit in der vertikalen und horizontalen Polarisationsrichtung so gegeneinander, dass der Austrittskegel des vorderen BBOs mit dem des hinteren BBOs in Deckung gebracht wird. Der hintere YVO ist fest eingestellt. Der vordere YVO ist schräg dargestellt, da dieser verstellt werden kann, um den Grad der Verschränkung zu justieren. Je besser die aus beiden BBOs austretenden Kegel übereinander sind, desto größer ist der Grad der Verschränkung. Damit befinden sich die spontan erzeugten Photonenpaare in einem verschränkten Überlagerungszustand der beiden Polarisationsrichtungen.

Als Detektor für einzelne Photonen werden Avalanche-Photodioden (APD) im sogenannten Geigermodus eingesetzt. Diese

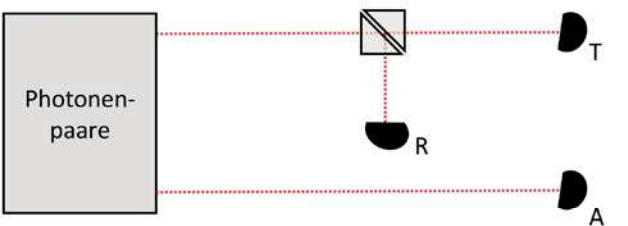
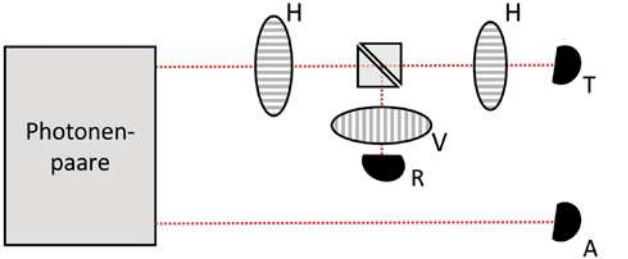
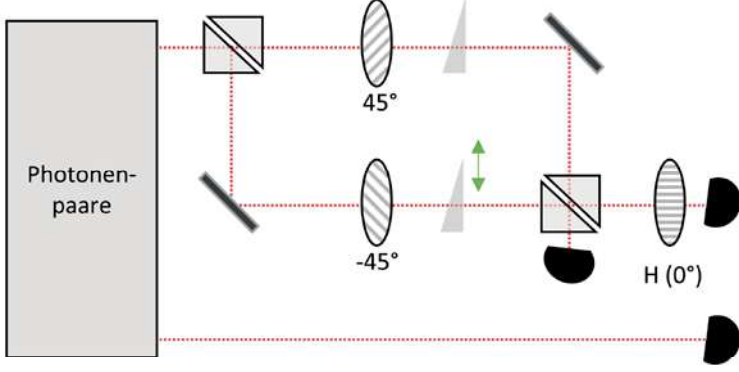
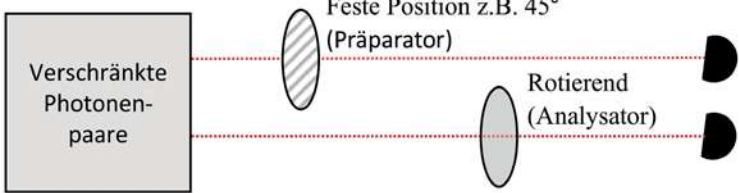
nutzen den inneren Photoeffekt in Halbleitern, wobei durch ein Photon ein Valenzelektron in das Leitungsband angehoben wird und durch eine angelegte Spannung in eine hochdotierte Multiplikationsschicht driftet, in der eine Ladungswave ausgelöst wird. Diese Ladungswaves werden gezählt.

## 5 Didaktische Umsetzung des Zugangs

Fachlicher Ausgangspunkt dieses Zugangs ist der Begriff der Energieportion des Lichts, wie er sich aus der Behandlung des Photoeffekts oder alternativ der Absorptionsspektren von Atomen ergibt. Wesentlich ist die Erkenntnis, dass die Energie von Licht immer nur in gequantelten Portionen absorbiert bzw. emittiert wird und nicht kontinuierlich. Die Größe der Energieportionen hängt von der Frequenz des Lichts ab, die Anzahl der Energieportionen bestimmt die Intensität des Lichts. Dies ist für den weiteren Verlauf notwendig, da die Detektoren in den Experimenten einzelne Ereignisse registrieren und keine Intensitäten, sondern Zählraten von Energieportionen angezeigt werden. Der Begriff der Energieportion wird im Folgenden bevorzugt, weil er weniger eine Teilchenvorstellung hervorruft als der Begriff Photon. In den Experimenten wird die Hypothese der Energieportionen des Lichts untersucht, um mehr über die Eigenschaften des Lichts zu erfahren und insbesondere zu klären, inwiefern die Vorstellung von Licht als elektromagnetische Welle mit der Vorstellung von lokalisierten Energieportionen zusammenpasst.

Kern des phänomenologischen Zugangs ist es, die eigenen Erkenntnisgrenzen zu reflektieren. Man kann Energieportionen des Lichts nicht direkt beobachten, sondern nur indirekt aus experimentellen Beobachtungen und Messungen auf ihre Eigenschaften und ihre mögliche Existenz schließen. Dabei muss man stets bestimmte Vorstellungen über die eingesetzten Apparate vorab akzeptieren, z.B., dass man mit Avalanche-Photodioden die Energieportionen des Lichts detektieren und zählen kann. In diesem Sinne basieren (analog zu einem Mikroskop) Beobachtungen, die mit dem Quantenkoffer hervorgebracht werden, zwar auf einer Gerätetheorie, können aber trotzdem als unmittelbare („theoriefreie“) Beobachtung gelten (HACKING, 1996).

In Kasten 1 wird ein Überblick über die einzelnen Experimente in einer empfohlenen Reihenfolge gegeben. In der linken Spalte ist dabei schematisch der Versuchsaufbau dargestellt. In der rechten Spalte finden sich die Erkenntnisse über die Energieportionen, die mit Hilfe der Experimente gewonnen werden können.

Schematische Darstellung des Aufbaus	Eigenschaften von Energieportionen
 <p>Abb. 3. Energieportionen am Strahlteiler</p>	<p>Energieportionen werden nicht gleichzeitig hinter beiden Ausgängen des Strahlteilers registriert.</p>
 <p>Abb. 4. Energieportionen und Polarisationsfilter</p>	<p>Energieportionen verhalten sich nach dem Durchlaufen eines Polarisationsfilters so, als ob sie polarisiert sind.</p>
 <p>Abb. 5. Energieportionen und Interferenz</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>a) Auch bei einzelnen Energieportionen tritt in den Zählraten Interferenz auf.</li> <li>b) Werden die Wege durch Polarisationsfilter unterscheidbar gemacht, tritt keine Interferenz mehr auf (Komplementarität).</li> <li>c) Wird die Unterscheidbarkeit nachträglich aufgehoben, ist wieder Interferenz sichtbar (Delayed-Choice).</li> </ul>
 <p>Abb. 6. Energieportionen und Verschränkung</p>	<p>Die Präparation einer Energieportionen hat unmittelbare Auswirkungen auf die andere Energieportionen.</p>

**Energieportionen am Strahlteiler**

Im ersten Experiment trifft das Licht der Lichtquelle auf einen Strahlteiler und wird mit drei Avalanche-Detektoren registriert (Abb. 3). Die Idee zu diesem Experiment beruht auf der Untersuchung von GRANGIER, ROGER und ASPECT (1986). Detektor (T) misst jeweils das Licht, das am Strahlteiler transmittiert wird, und ein weiterer Detektor (R) das Licht, das reflektiert wird. Detektor A dient der Ankündigung der Messung, um auszuschließen zu können, dass es sich bei detektierten Ereignissen um Umgebungslicht handelt.

Ausgangspunkt ist die Frage, wie das makroskopisch bekannte Verhalten eines Strahlteilers mit der Vorstellung von Energieportionen vereinbar ist. Als Ergebnis detektiert man in etwa gleich viele Koinzidenzen an den Detektoren T & A und R & A. Die beiden gemessenen Koinzidenzraten schwanken statistisch, sind aber für die Transmission und Reflexion immer etwa gleich groß. Alle drei Detektoren lösen allerdings so gut wie nie im vorgegebenen Koinzidenzfenster gleichzeitig aus. Transmissionen und Reflexionen treten also nicht gemeinsam auf. Es sollte aber vermieden werden, dies als Nachweis der Unteilbarkeit

der Energieportionen zu interpretieren. Das Experiment macht auch den statistischen Charakter von Quantenphänomenen deutlich. Es können nur Wahrscheinlichkeitsaussagen über die Verteilung der Ereignisse vorhergesagt werden, aber nicht, wann welche Ereignisse genau auftreten.

### Energieportionen und Polarisierung

Aus der Optik ist bekannt, dass Licht polarisierbar ist. Es stellt sich daher die Frage, wie diese Welleneigenschaft mit Energieportionen vereinbar ist. Dafür wird der Lichtstrahl vor dem Strahlteiler mit einem Polarisationsfilter präpariert und dahinter mit weiteren Polarisationsfiltern analysiert (Abb. 4).

Entsprechend der Filtereinstellungen in Abbildung 4 würde man bei einer klassischen Lichtquelle an Detektor T eine hohe und bei Detektor R eine sehr niedrige Zählrate erwarten, da hier die Polarisationsfilter genau um  $90^\circ$  versetzt zueinander sind.

Tatsächlich wird für die Koinzidenz T & A eine hohe Zählrate (etwas niedriger als beim einfachen Strahlteiler) registriert, wogegen die andere Koinzidenz R & A auf nahezu 0 sinkt. Stellt man den Polarisationsfilter vor dem Strahlteiler vertikal, misst man nur für R & A Koinzidenzen, stellt man ihn auf  $45^\circ$  treten beide Koinzidenzen in etwa gleich häufig auf. Dreifach-Koinzidenzen (T & R & A) gibt es weiterhin so gut wie nie. Dies entspricht dem erwarteten Verhalten von polarisiertem Licht, wobei transmittierte und reflektierte Ereignisse weiterhin nicht gleichzeitig auftreten. In diesem Sinne zeigt das Licht zugleich einen wellenartigen und teilchenartigen Charakter.

Bei der Besprechung des Experiments sollte vermieden werden, den Energieportionen zu bestimmten Zeitpunkten eine Polarisationsrichtung zuzuschreiben. Es kann lediglich festgestellt werden, welchen Einfluss die Polarisationsfilter auf die Messung der Energieportionen in den Detektoren hat. Die Polarisationsfilter selbst bewirken (noch) keine Messung der Energieportionen und legen keine Polarisierung der Energieportionen (endgültig) fest.

### Energieportionen und Interferenz

Um dem scheinbaren Doppelcharakter des Lichts weiter nachzugehen, wird nun das Interferenzverhalten untersucht. Dabei stellt sich die Frage, wie sich die vermeintliche Unteilbarkeit der einzelnen Energieportionen mit der Überlagerung (Superposition) verschiedener Lichtwege verträgt.

Für den Aufbau wird das Strahlteilerexperiment mit zwei Spiegeln und einem weiteren Strahlteiler zu einem Mach-Zehnder-Interferometer erweitert (Abb. 5 ohne Polarisationsfilter). Zwei Glaskeile werden verwendet, um die Laufzeiten des Lichts entlang der beiden Wege zu variieren. Verändert man in einem der beiden Wege die Laufzeit, beobachtet man zeitlich aufgelöst in den Zählraten ein Interferenzmuster, d. h. einen Wechsel zwischen hohen und niedrigen Zählraten. Die Maxima und Minima in den beiden Detektoren sind (aufgrund der Energieerhaltung) gegenläufig. Dies darf nicht mit der Tatsache verwechselt werden, dass die Ereignisse in beiden Detektoren weiterhin nicht gleichzeitig auftreten. Auch in diesem Experiment zeigt

Licht demnach gleichzeitig mit der Interferenz Wellencharakter und andererseits mit der Antikorrelation der Energieportionen Teilchencharakter auf. Zudem beobachtet man das Interferenzmuster nur auf einem begrenzten Intervall der Laufzeitunterschiede zwischen den beiden Wegen. Bedenkt man aufgrund des räumlichen Abstands der Energieportionen der Lichtquelle, dass sich im Interferometer immer nur einzelne Energieportionen befinden, kann das ein Hinweis auf die begrenzte räumliche Ausdehnung der Energieportionen sein, die sich daraus abschätzen ließe.

Der Aufbau kann um zwei Polarisationsfilter in beiden Wegen erweitert werden. Zunächst kann gezeigt werden, dass das Einstellen einer gleichen Polarisationsrichtung in beiden Wegen keinen Einfluss auf die Interferenz hat. Dann wird ein Polarisationsfilter um  $90^\circ$  verdreht und der bekannte Bereich für das Interferenzmuster wieder abgefahren. Das Interferenzmuster lässt sich nicht mehr beobachten. Weitere Messungen zeigen, dass das Interferenzmuster immer dann vollständig verschwindet, wenn die Polarisationsfilter um  $90^\circ$  versetzt sind, z.B.  $45^\circ$  auf  $-45^\circ$ . Das Interferenzmuster erscheint wieder, sobald es eine gemeinsame Komponente der Polarisationsfilter gibt, die Wege hinsichtlich der Polarisierung also nicht mehr klar unterscheidbar sind. Die Unvereinbarkeit der Unterscheidbarkeit der Wege und der Interferenz wird als Komplementarität bezeichnet.

Nun stellt sich die Frage was passiert, wenn ein weiterer Polarisationsfilter hinter dem Interferometer eingebaut wird, um die zunächst unterscheidbaren Wege wieder ununterscheidbar zu machen (Abb. 5). Führt man das Experiment durch, tritt hinter dem zusätzlichen Polarisationsfilter wieder Interferenz auf. An dem anderen Detektor ohne Polarisationsfilter zeigt sich dagegen weiterhin keine Interferenz. Die Möglichkeit dieser späten Entscheidung (delayed choice) zwischen Interferenz und keiner Interferenz widerspricht unserer Alltagsvorstellung, dass vorher feststehen sollte, welche Wege des Interferometers die Energieportionen durchlaufen oder nicht durchlaufen haben. Da es anscheinend möglich ist, zuvor präparierte Eigenschaften nachträglich aufzuheben, bezeichnet man dieses Experiment als „Quantenradierer“. Damit wird generell die Frage aufgeworfen, welche Aussagen man über die Eigenschaften (Zustände) einzelner Energieportionen vor einer Messung machen kann. Es kann festgehalten werden, dass offenbar nur kausale Vorhersagen über die Häufigkeitsverteilungen an den Detektoren gemacht werden können, aber nichts über das Wesen der Energieportionen (Welle-Teilchen-Dualismus) ausgesagt werden kann. Die Frage, ob man sich Licht als Welle oder Teilchen vorstellen sollte, ist damit hinfällig. Nach dieser Klärung ist es nun möglich, auch die Bezeichnung Photon für die Energieportionen zu verwenden.

### Energieportionen und Verschränkung

Zum Abschluss wird mit der Verschränkung ein neuartiges Phänomen der Quantenphysik thematisiert, welches die Grundlage für moderne Quantentechnologien (z.B. Kryptologie und Quantencomputer) bildet und den Aspekt der Kausalität in der Quantenphysik vertieft. Die Fragestellung ist nun, wie sich die Ver-

schränkung zweier Photonen in Beobachtungen zeigt. Mit der Lichtquelle werden polarisationsverschränkte Photonenpaare erzeugt. Zunächst können zwei Polarisationsfilter in den gleichen Strahlengang eingebaut werden. Der erste Polarisationsfilter (Präparator) wird auf einen festen Winkel  $\varphi_P$  gestellt und der zweite Polarisationsfilter (Analysator) kontinuierlich in Rotation versetzt. Die Koinzidenzrate der beiden Detektoren wird in Abhängigkeit vom Winkel des rotierenden Polarisationsfilters  $\varphi_A$  in einem Polardiagramm aufgetragen (Abb. 7). Der Abstand vom Ursprung ist proportional zur Koinzidenzrate. Die Koinzidenzen werden maximal, wenn die Orientierung des Analysators mit der des Präparators (hier  $45^\circ$  bzw.  $225^\circ$ ) übereinstimmt, und werden null, wenn diese orthogonal zueinander stehen. So entsteht das Bild einer „Acht“ (Abb. 7), die um den Winkel des Präparators  $\varphi_P$  verdreht ist. Dies entspricht dem klassischen Gesetz von MALUS, wonach die durchgelassene Lichtintensität durch zwei Polarisationsfilter durch  $I(\varphi_P, \varphi_A) = I_0 \cdot \cos^2(\varphi_A - \varphi_P)$  gegeben ist. Verändert man den Winkel des Präparators, so dreht sich die Orientierung der „Acht“ entsprechend.

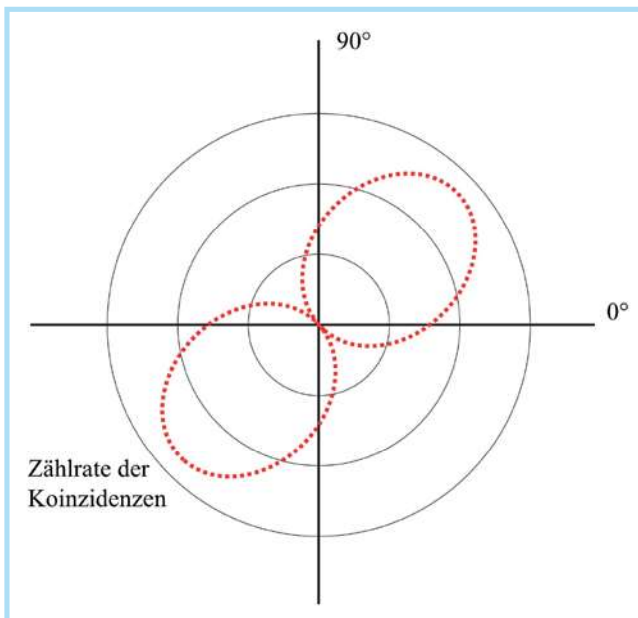


Abb. 7. Polardiagramm zum Experiment mit verschränkten Photonen

Anschließend werden die beiden Polarisationsfilter getrennt in die beiden Strahlgänge der verschränkten Photonen eingebaut (Abb. 6). Der präparierende Polarisationsfilter wird wieder festgehalten, der analysierende kontinuierlich rotiert und die Koinzidenzrate der beiden Detektoren in Abhängigkeit vom Winkel des rotierenden Polarisationsfilters in einem Polardiagramm aufgetragen.

Klassisch würde man für unpolarisiertes Licht im Polardiagramm einen Kreis erwarten, da die beiden Polarisationsfilter in keiner Verbindung miteinander stehen und die Strahlengänge unabhängig sind. Tatsächlich zeigt sich im Polardiagramm aber wieder das Bild einer „Acht“, deren Orientierung sich verändert, wenn man den oberen Polarisationsfilter verdreht.

Solange nur die Koinzidenzen betrachtet werden, können beide Polarisationsfilter entlang der Strahlengänge beliebig verschoben und vertauscht werden, ohne das Ergebnis zu verändern. Offensichtlich gibt es eine „Fernwirkung“ zwischen den Photonen der beiden Strahlengänge, die man als Verschränkung bezeichnet.

Weiterführende Überlegungen hinsichtlich des Informationsaustausches zwischen den verschränkten Photonen (Nicht-Lokalität, Informationsübertragung mit Überlichtgeschwindigkeit) können sich anschließen, entziehen sich jedoch den experimentellen Möglichkeiten des hier vorgestellten phänomenologischen Zugangs.

## 6 Abschließende Diskussion

Der hier vorgestellte phänomenologische Zugang bietet den Schüler/innen über Experimente mit Photonen unmittelbare Erfahrungen zu Phänomenen und Wesenszügen der Quantenphysik. Dabei wird Fragen nach der Vereinbarkeit von Wellen- und Teilcheneigenschaften des Lichts nachgegangen, die zu der Erkenntnis führen, dass Aussagen über das Wesen der Photonen (Welle-Teilchen-Dualismus) nicht zweckmäßig sind und man sich auf die beobachtbaren Phänomene beschränken muss. Die Experimente verdeutlichen auch, dass es in der Quantenphysik nur eine stochastische (d.h. nicht-deterministische) Kausalität gibt.

Für die Strukturierung des Lernprozesses bietet sich das Basismodell „Lernen durch Eigenerfahrung“ an. Durch das Planen der Handlung sollen den nachfolgenden Handlungen im Vorfeld Sinn und Zweck gegeben und die Beobachtungen entsprechend fokussiert werden. In der Phase der Konstruktion von Bedeutung erhalten die Schüler/innen die Möglichkeit, das Beobachtete mit eigenen Worten zu formulieren und diese Formulierungen dann gemeinsam kritisch zu reflektieren. Dabei kommt es darauf an, Formulierungen, die über das Erfahrbare hinaus gehen, möglichst zu vermeiden, etwa welchen Weg die Photonen nehmen.

Quantenphysikalische Phänomene entziehen sich einer direkten sensitiven Wahrnehmung und sind nur indirekt über Messgeräte erfassbar. Die Lernenden müssen akzeptieren, dass das Licht der eingesetzten Lichtquelle nicht als Lichtstrahl sichtbar ist, aber seine Energieportionen mit den Detektoren gezählt werden können. Aufgrund der hohen Anschaffungskosten können derartige Experimente i.d.R. nur in Schülerlaboren durchgeführt werden, in denen auch nur ein Aufbau zur Verfügung steht. Dabei tritt anstelle der individuellen Exploration somit eine gemeinschaftliche Durchführung, der jedoch eine Planung und Auswertung in Kleingruppen vorausgehen bzw. nachfolgen kann. Sowohl die direkte sensitive Wahrnehmung als auch das individuelle Explorieren sind aber keine zwingende Voraussetzung für einen phänomenologischen Zugang (THEILMANN et al., 2013). Der zentrale Ansatz eines phänomenologischen Zugangs ist, dass die Sache nur das Erfahrbare selbst ist und darüber hinaus nichts gesagt werden kann.