

Markus Standfuß

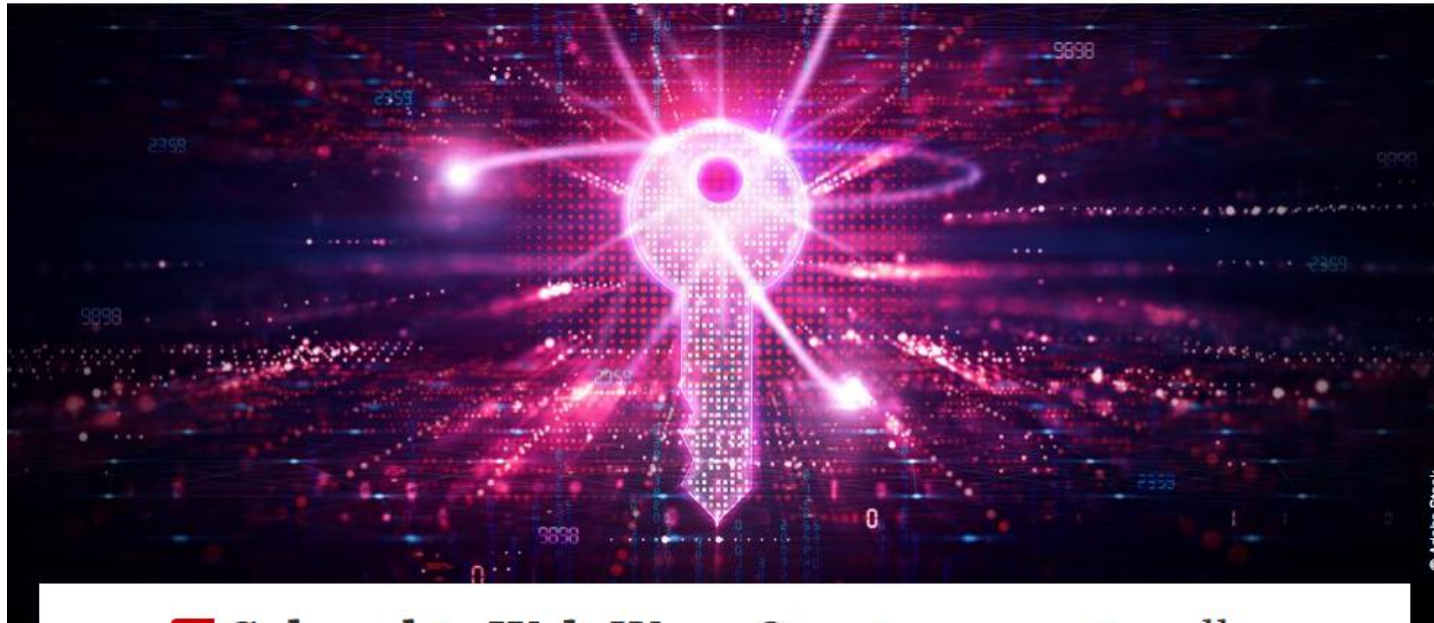
Technische Universität Dresden

Quantenphysik

Koinzidenzmethode und Interferometer-Experimente

Dresden, 2024





© Adobe Stock

T+ Geknackte Welt Wenn Quantencomputer alles entschlüsseln

Sensible Daten sind im Internet sicher verschlüsselt, doch womöglich nicht mehr lange. Wieso heutige Verschlüsselung schutzlos gegen Quanten-Hacker ist und wie wir uns schützen können.

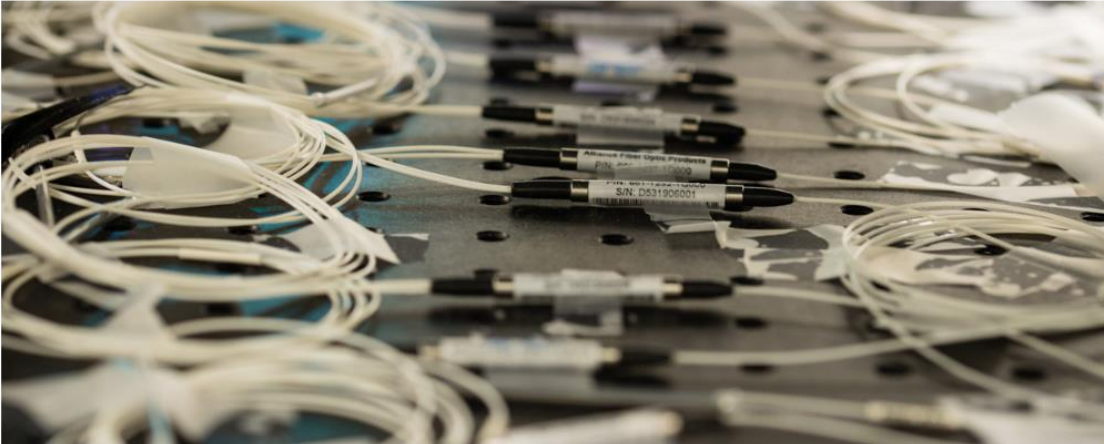
Von Sabrina Patsch
11.09.2023, 21:13 Uhr

[1]

12.12.2018

QUANTENKRYPTOGRAPHIE IST BEREIT FÜR DAS NETZ

Wiener Quantenforscher der ÖAW realisierten in Zusammenarbeit mit dem AIT erstmals ein quantenphysikalisch verschlüsseltes Netzwerk zwischen vier aktiven Teilnehmern. Diesen wissenschaftlichen Durchbruch würdigt das Fachjournal „Nature“ nun mit einer Cover-Story.



Neue Architektur für Quantennetzwerk

Den Ausweg aus dieser Einschränkung fanden die Wiener Forscher nun, indem sie eine neue Netzwerkarchitektur entwarfen und in einem Experiment auf den Prüfstand stellten: Sie verbanden vier Teilnehmer in einem Quantennetzwerk und versorgten diese aus einer einzelnen Quelle mit einzelnen Lichtteilchen. Bereits an der Quelle wurden die Photonen jeweils paarweise mit einer unbekannten – jedoch identischen Polarisierung (Polarisation bezeichnet die Schwingungsrichtung der Photonen), erzeugt.

[2]

KRYPTOGRAPHIE

Europa plant 2024 eigenen Quantenkryptografie-Satelliten

Eagle-1 soll für Europa tun, was China bereits 2016 tat. Ein Experiment für Quantenverschlüsselung, deren Vorteile aber teils fraglich sind.



17. Oktober 2022, 15:40 Uhr, Frank Wunderlich-Pfeiffer

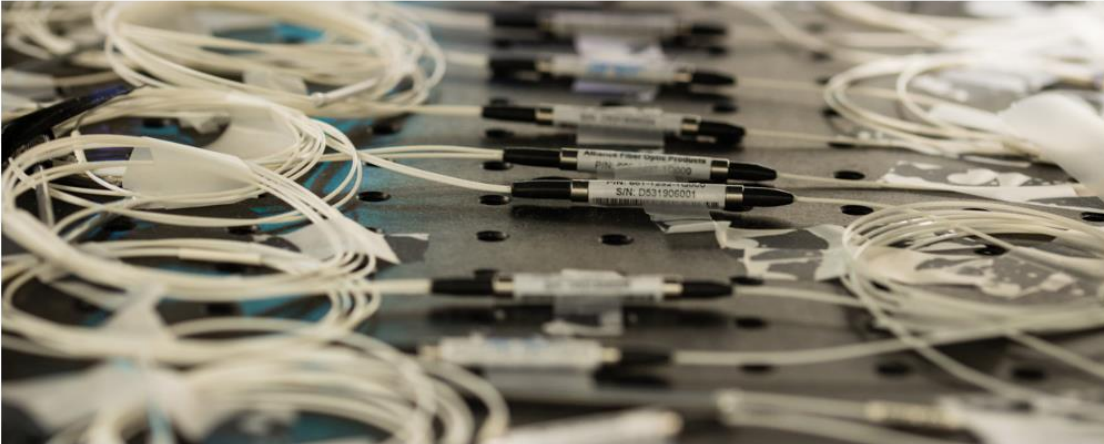
Neu ist nur die Erzeugung des One-Time-Pads mithilfe der Quanteneigenschaften der verschränkten Photonen. Dazu beobachten Sender und Empfänger den Satelliten mit einem Teleskop und messen die Polarisierung der ankommenden Photonen in einem bestimmten Winkel relativ zur Lage des Satelliten und erhalten zufällige Bits als Messergebnisse. Dabei wählen sie zufällig aus, in welchem Winkel gemessen wird.

[3]

12.12.2018

QUANTENKRYPTOGRAPHIE IST BEREIT FÜR DAS NETZ

Wiener Quantenforscher der ÖAW realisierten in Zusammenarbeit mit dem AIT erstmals ein quantenphysikalisch verschlüsseltes Netzwerk zwischen vier aktiven Teilnehmern. Diesen wissenschaftlichen Durchbruch würdigt das Fachjournal „Nature“ nun mit einer Cover-Story.



Neue Architektur für Quantennetzwerk

Den Ausweg aus dieser Einschränkung fanden die Wiener Forscher nun, indem sie eine neue Netzwerkarchitektur entwarfen und in einem Experiment auf den Prüfstand stellten: Sie verbanden vier Teilnehmer in einem Quantennetzwerk und versorgten diese aus einer einzelnen Quelle mit einzelnen Lichtteilchen. Bereits an der Quelle wurden die Photonen jeweils paarweise mit einer unbekannten – jedoch identischen Polarisation (Polarisation bezeichnet die Schwingungsrichtung der Photonen), erzeugt.

[2]

KRYPTOGRAPHIE

Europa plant 2024 eigenen Quantenkryptografie-Satelliten

Eagle-1 soll für Europa tun, was China bereits 2016 tat. Ein Experiment für Quantenverschlüsselung, deren Vorteile aber teils fraglich sind.

in Pocket speichern

merken



17. Oktober 2022, 15:40 Uhr, Frank Wunderlich-Pfeiffer

Neu ist nur die Erzeugung des One-Time-Pads mithilfe der Quanteneigenschaften der verschränkten Photonen. Dazu beobachten Sender und Empfänger den Satelliten mit einem Teleskop und messen die Polarisation der ankommenden Photonen in einem bestimmten Winkel relativ zur Lage des Satelliten und erhalten zufällige Bits als Messergebnisse. Dabei wählen sie zufällig aus, in welchem Winkel gemessen wird.

[3]

Einführung

Vorläufige Definition:

Photonen sind Energieportionen

Leitfrage 1:

Wie können Photonen detektiert werden?

Detektoren

Aufgabe 1:

Ergänze die Tabelle zu den Detektoren mithilfe des Videos und der Schneelawinen-Analogie.

Lawinen-Diode	Schneelawine
Ladungen auf hohem elektrischem Potential	Ansammlung von Schnee auf Hügel
	Schneemasse wird durch kleine mechanische Störung in Bewegung versetzt
Freigesetzte Elektronen setzen wiederum Elektronen frei	
	spontaner, kleinerer Schneeabgang

[8]

Detektoren

Aufgabe 1:

Ergänze die Tabelle zu den Detektoren mithilfe des Videos und der Schneelawinen-Analogie.

Lawinen-Diode	Schneelawine
Ladungen auf hohem elektrischem Potential	Ansammlung von Schnee auf Hügel
Ein in den Detektor fallendes Photon setzt Elektronen frei	Schneemasse wird durch kleine mechanische Störung in Bewegung versetzt
Freigesetzte Elektronen setzen wiederum Elektronen frei	Lawine nimmt auf dem Weg hinunter immer mehr Schnee mit
Dunkelzählereignis	spontaner, kleinerer Schneeabgang

[8]

Detektoren

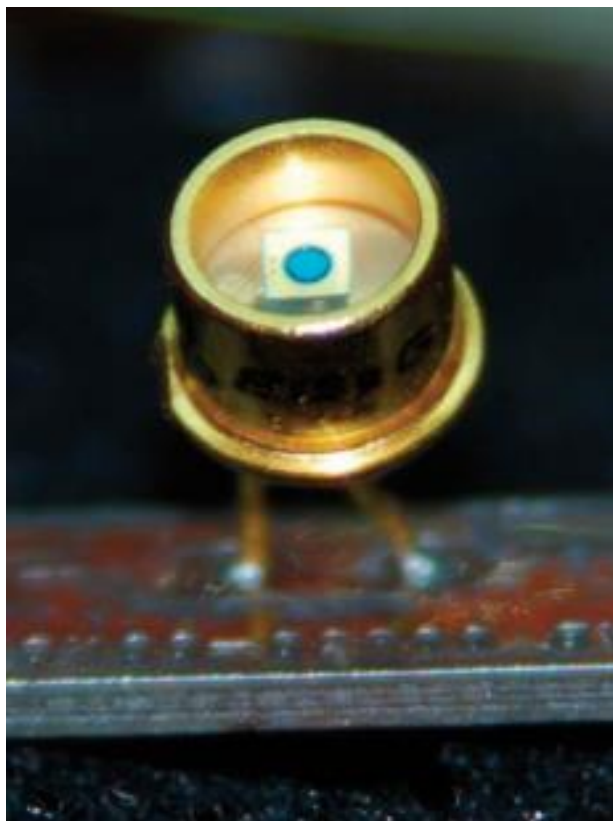
Aufgabe 1:

Ergänze die Tabelle zu den Detektoren mithilfe des Videos und der Schneelawinen-Analogie.

Lawinen-Diode	Schneelawine
Ladungen auf hohem elektrischem Potential	Ansammlung von Schnee auf Hügel
Ein in den Detektor fallendes Photon setzt Elektronen frei	Schneemasse wird durch kleine mechanische Störung in Bewegung versetzt
Freigesetzte Elektronen setzen wiederum Elektronen frei	Lawine nimmt auf dem Weg hinunter immer mehr Schnee mit
Dunkelzählereignis	spontaner, kleinerer Schneeabgang

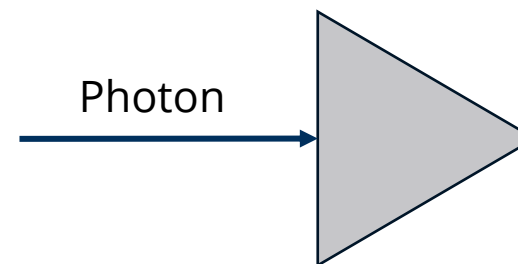
[8]

Pro bestimmten Strom klickt ein Detektor. Photonen sind also Energieportionen, die im Detektor als Klicks registriert werden.



[5]

Lawinen-Diode



Detektor-Symbol

Detektoren

Aufgabe 2:

Formuliere mittels des Videos eine Erklärung, wieso Detektoren auch klicken, obwohl gar keine Photonen vorhanden sind.

Detektoren

Aufgabe 2:

Formuliere mittels des Videos eine Erklärung, wieso Detektoren auch klicken, obwohl gar keine Photonen vorhanden sind.

Einzelne Elektronen können sich auch lösen, obwohl keine Photonen auf den Detektor treffen. Dadurch werden auch Klicks erzeugt, obwohl gar keine Photonen registriert werden. Diese nennt man Dunkelzählereignisse. Durch eine gute Kühlung kann das minimiert werden, aber nicht vollständig verhindert werden.

Ergänze den Merksatz selbstständig auf dem Arbeitsblatt.

Detektoren

Merksatz:

In Detektoren wird ein Lawinenprozess von Elektronen ausgelöst, wenn ein Photon aufgenommen wird. Diesen Strom kann man messen. Allerdings klickt ein Detektor teilweise auch, wenn keine Photonen vorhanden sind. Diese Klicks nennt man Dunkelzählereignisse.

Leitfrage 1: Wie können Photonen detektiert werden?



Detektoren

Merksatz:

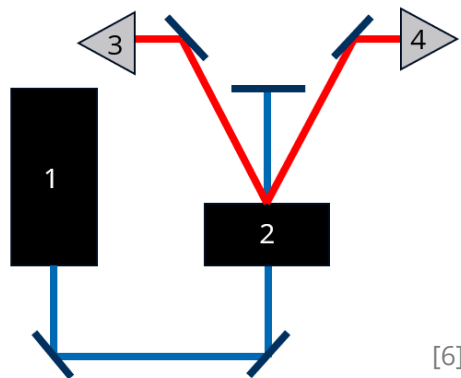
In Detektoren wird ein Lawinenprozess von Elektronen ausgelöst, wenn ein Photon aufgenommen wird. Diesen Strom kann man messen. Allerdings klickt ein Detektor teilweise auch, wenn keine Photonen vorhanden sind. Diese Klicks nennt man Dunkelzählereignisse.

Leitfrage 2: Wie können Photonen erzeugt und nachgewiesen werden?

Parametrische Fluoreszenz

Aufgabe 1:

Lies selbstständig den Text zur Funktionsweise des speziellen Kristalls und der parametrischen Fluoreszenz. Formuliere die wichtigsten Punkte zu der Methode und halte sie stichpunktartig fest. Beschrifte die Bauteile mittels der Nummern in der Skizze.



Parametrische Fluoreszenz

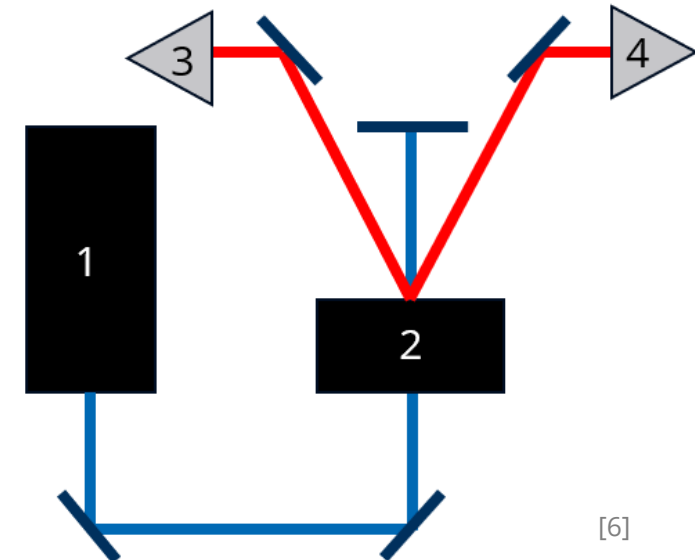
Aufgabe 1:

Lies selbstständig den Text zur Funktionsweise des speziellen Kristalls und der parametrischen Fluoreszenz. Formuliere die wichtigsten Punkte zu der Methode und halte sie stichpunktartig fest. Beschrifte die Bauteile mittels der Nummern in der Skizze.

- Laser trifft auf speziellen Kristall
- dieser absorbiert Energie und wird angeregt
- Kristall gibt Energie ab in Form von genau zwei Photonen
- diese Photonen verlassen Kristall in bestimmten Winkel abweichend zur optischen Achse
- → Photonen kommen gleichzeitig am Detektor an

Dieser Prozess heißt parametrische Fluoreszenz.

1: Laser; 2: Kristall; 3: Detektor 1; 4: Detektor 2

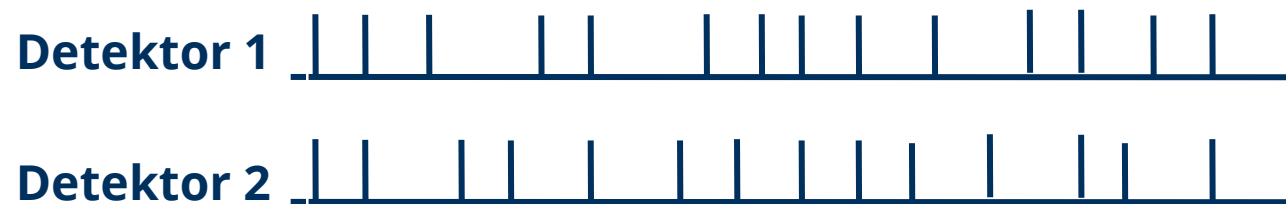


Koinzidenzmethode

Aufgabe 1:

Dargestellt sind die Messungen von zwei Detektoren, eine sogenannte Koinzidenzmessung. Untersuche die beiden Messungen auf Gemeinsamkeiten und Unterschiede.

Hinweis: Dabei steht ein vertikaler Strich für ein Klick des jeweiligen Detektors, die horizontale Achse gibt den Zeitverlauf an.

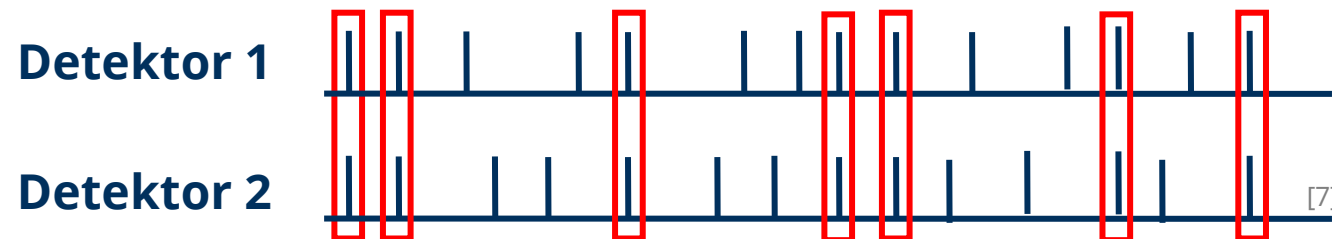


[7]

Koinzidenzmethode

Aufgabe 1:

Dargestellt sind die Messungen von zwei Detektoren, eine sogenannte Koinzidenzmessung. Untersuche die beiden Messungen auf Gemeinsamkeiten und Unterschiede.



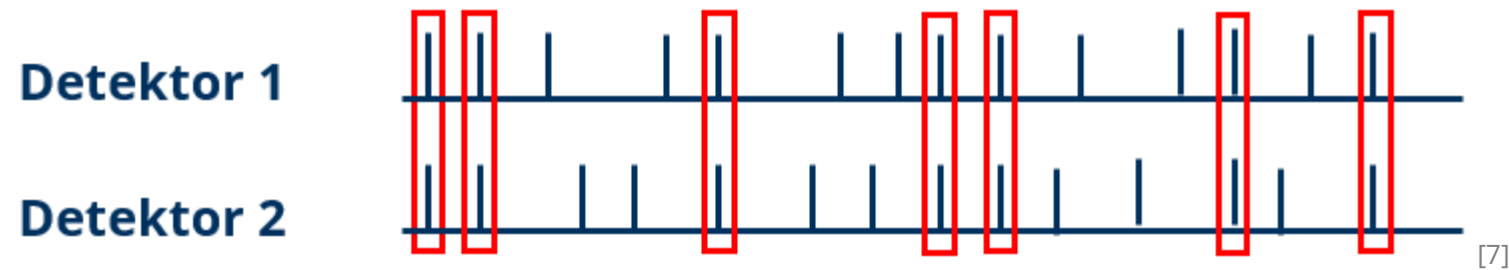
Die einzelnen Klicks der Detektoren sind zufällig verteilt und folgen keinem Muster.

Allerdings liegen einige Klicks der Detektoren genau übereinander, das bedeutet, das hier gleichzeitig beide Detektoren geklickt haben. Markiere diese in der Abbildung.

Koinzidenzmethode

Aufgabe 2:

Schlussfolgere, wie diese Methode dir helfen kann, mit einzelnen Photonen zu experimentieren!



Koinzidenzmethode

Aufgabe 1:

Die einzelnen Klicks der Detektoren sind zufällig verteilt und folgen keinem Muster.

Allerdings liegen einige Klicks der Detektoren genau übereinander, das bedeutet, das hier gleichzeitig beide Detektoren geklickt haben.

Aufgabe 2:

Die Fälle, wo beide Detektoren gleichzeitig klicken, entsprechen also dem Ergebnis wie bei der parametrischen Fluoreszenz, wo auch zwei Photonen gleichzeitig emittiert wurden. Alle anderen Klicks der Detektoren sind Dunkelzählereignisse, so können wir exakt sagen, welche Klicks Photonen und welche Dunkelzählereignisse sind!

Der Koinzidenzaufbau ist immer vor jedes Experiment mit Photonen geschaltet, man betrachtet ihn aber nicht immer explizit mit.

Koinzidenzmethode

Aufgabe 3:

Vervollständige nun den Lückentext und ergänze den Merksatz.

Koinzidenzmethode

Koinzidenzmessungen

Jeder senkrechte Strich auf dem Zettel entspricht einem **Klick** des jeweiligen Detektors. Dabei sind die einzelnen Klicks der Detektoren **zufällig** verteilt. Allerdings liegen teilweise auch Striche direkt **übereinander**. Das heißt, dass hier beide Detektoren **gleichzeitig** geklickt haben. Dieses gleichzeitige Klicken nennt man „Koinzidenz“. Eine Koinzidenz weist also zwei gleichzeitige Photonen nach, welche zum Beispiel mittels **parametrischer Fluoreszenz** erzeugt wurden. Deshalb wird diese Methode Koinzidenzmethode genannt. Mithilfe dieser lassen sich **Dunkelzählereignisse** der Detektoren herausfiltern. Man sagt, Photonen werden aus dem Laserlicht herauspräpariert.

Koinzidenzmethode

Merksatz:

Photonen sind Energieportionen, die mithilfe von parametrischer Fluoreszenz erzeugt und mit der Koinzidenzmethode nachgewiesen werden können.

Der Koinzidenzaufbau ist immer Teil eines Experiments mit Photonen, wird allerdings nicht immer mitgezeichnet.

Leitfrage 2: Wie können Photonen erzeugt und nachgewiesen werden?



Zusammenfassung

Leitfrage 1: Wie können Photonen detektiert werden?



Leitfrage 2: Wie können Photonen erzeugt und nachgewiesen werden?



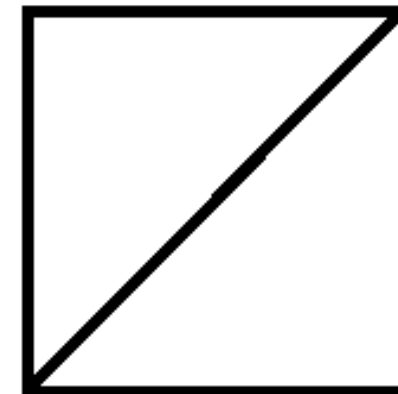
Leitfrage 3:

Was kann man beobachten, wenn man optische Experimente mit Photonen durchführt?

Strahlteiler

Zuerst an **Strahlteilern**

- bestehen aus zwei miteinander verklebten Glasprismen
- Funktionsweise ähnlich einer Glasscheibe: Teil des Lichts wird reflektiert, der andere Teil transmittiert (hier genau 50-50)
- Reflexion aufgrund von Totalreflexion

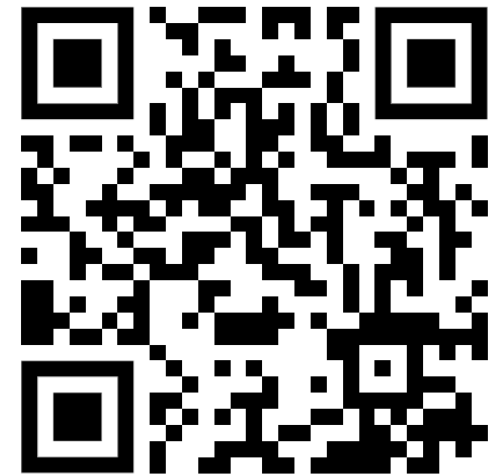


Symbol des Strahlteilers

Strahlteiler

Aufgabe 1:

Führe den Versuch mit klassischem Licht am Strahlteiler durch und zeichne in die Skizze den Strahlengang ein. Vervollständige den Lückentext.



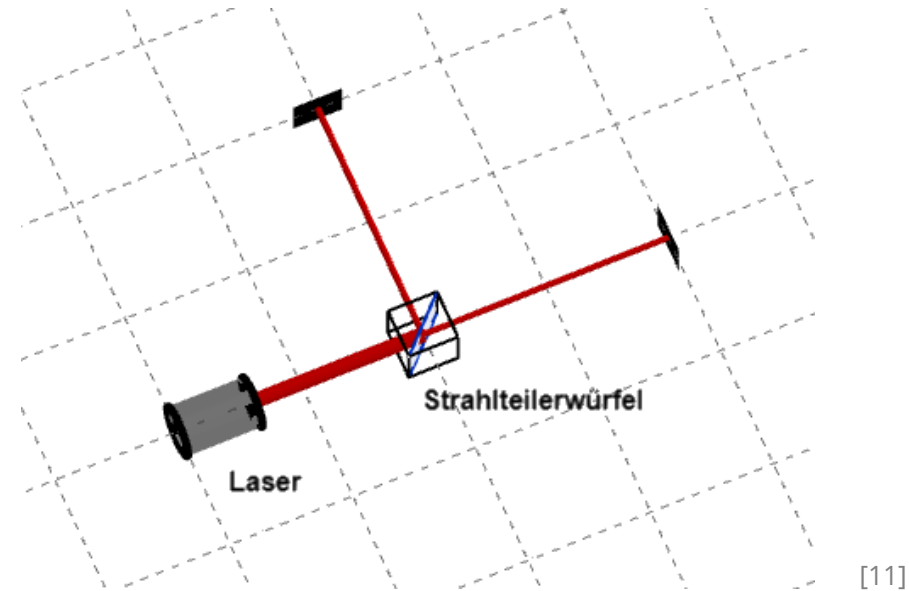
strahlteiler.quantensimulation.de

Strahlteiler

Strahlteiler bestehen aus zwei **Prismen** und teilen das einfallende Licht in einen **reflektierten** Anteil und einen **transmittierten** Anteil, hier im Verhältnis 50/50.



[10]



[11]

Wissenstest

Wissenstest

Beschreibe, was in einem Detektor passiert, wenn ein Photon auf diesen trifft.

Wissenstest

Wenn ein Detektor klickt, was wissen wir dann?

Wissenstest

Worin liegt der große Nutzen der Koinzidenzmethode?

Quellen

- [1]: Sabrina Patsch (2019): Geknackte Welt: Wenn Quantencomputer alles entschlüsseln, [online] <https://www.tagesspiegel.de/wissen/geknackte-welt-wenn-quantencomputer-alles-entschlusseln-10448962.html> [abgerufen am 18.6.2024]
- [2]: unbekannter Autor (2018): Quantenkryptographie ist bereit für das Netz, [online] <https://www.oeaw.ac.at/oeaw/presse/nachrichten/quantenkryptographie> [abgerufen am 18.6.2024]
- [3]: Frank Wunderlich-Pfeiffer (2022): Europa plant 2024 eigenen Quantenkryptografie-Satelliten, [online] <https://www.golem.de/news/kryptographie-europa-plant-2024-eigenen-quantenkryptographie-satelliten-2210-169000.html> [abgerufen am 18.6.2024]
- [6]: eigene Erstellung, nach Idee aus Physik am Friedrich-Gymnasium Freiburg (2023): Quantenphysik: Koinzidenz - Präparation eines einzelnen Photons. YouTube. https://www.youtube.com/watch?v=TLc7_czd01M&t=250s
- [5]: Rainer Müller; Franziska Greinert (2023): Quantentechnologien. Berlin, Boston: De Gruyter Studium, S. 18
- [7]: nach Idee aus Phillip Bitzenbauer (2020): Quantenoptik an Schulen. Studie im Mixed-Methods Design zur Evaluation des Erlanger Unterrichtskonzepts zur Quantenoptik. Berlin: Logos Verlag, S. 286
- [8]: Phillip Bitzenbauer (2020): Quantenoptik an Schulen. Studie im Mixed-Methods Design zur Evaluation des Erlanger Unterrichtskonzepts zur Quantenoptik. Berlin: Logos Verlag, S. 284
- [9]: Phillip Bitzenbauer (2020): Quantenoptik an Schulen. Studie im Mixed-Methods Design zur Evaluation des Erlanger Unterrichtskonzepts zur Quantenoptik. Berlin: Logos Verlag, S. 285; von Standfuß adaptiert und ergänzt
- [10]: eigene Aufnahme
- [11]: Screenshot aus Simulation