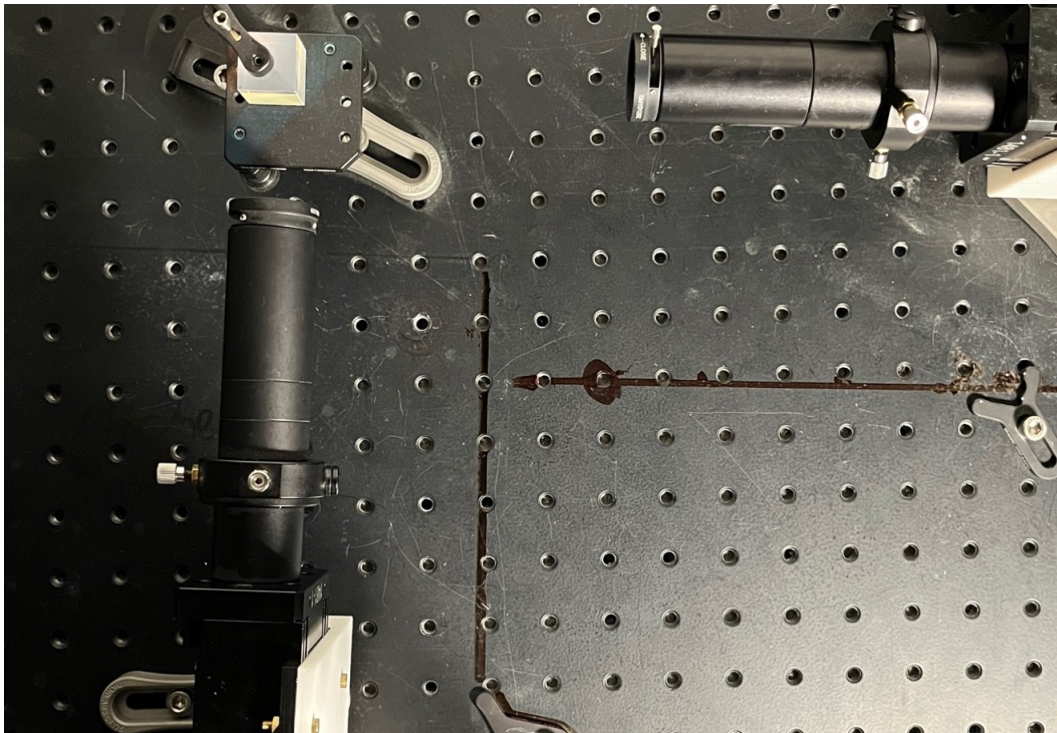


# Hintergrund zur Koinzidenzmethode



*Schülerlabor foeXlab*

*Dr. Moritz Waitzmann*

*2023*

## Vorwort

Der Begriff der Koinzidenzmethode ist uneindeutig belegt und kann die Messtechnik der Koinzidenzmessung, eine Methode zur Erzeugung von Einzelphotonenzuständen oder einen experimentellen Nachweis von Lichtquanten am optischen Strahlteiler meinen. Letzteres ist begründeterweise zum Unterrichtsgegenstand ausgewählt worden. Das vorliegende Dokument soll einen fachlichen Einblick in die Messtechnik der Koinzidenzmessung sowie die Erzeugung von Photonennpaaren durch die parametrische Fluoreszenz geben.

## Literaturhinweise

Die Grundlagen dieser Zusammenschrift lassen sich in den folgenden Quellen finden:

Bachor, H.-A., & Ralph, T. C. (2019). *A guide to experiments in quantum optics* (Third edition). <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9783527695805>

Couteau, C. (2018). Spontaneous parametric down-conversion. *Contemporary Physics*, 59(3), 291–304. <https://doi.org/10.1080/00107514.2018.1488463>

Weber, K.-A. (2018). *Quantenoptik in der Lehrerfortbildung: Ein bedarfsgeprägtes Fortbildungskonzept zum Quantenobjekt Photon mit Realexperimenten*: Dissertation: Bd. Band 269. Logos-Verl.

## Detektion von Licht

Elektrische Lichtdetektoren wandeln grundsätzlich die einfallende Lichtenergie in elektrische Energie um. Es entsteht ein elektrischer Strom. Für die Detektion einzelner Photonen werden binäre Detektoren verwendet. Deren Prozess der Umwandlung von Lichtenergie in ein elektrisches Signal ist genau wie bei einem Geiger-Müller Zählrohr:

- Fällt ein Photon in die lichtempfindliche Schicht des Detektors, wird hier ein nicht-messbares Signal erzeugt.
- Auf Grund einer angelegten Hochspannung wird dieses Signal durch Ladungsvervielfachung verstärkt und es entsteht ein messbarer Strom, welcher über einen elektrischen Widerstand abfließt. Die angelegte Hochspannung fällt gemäß des Ohmschen Gesetzes über den Widerstand ab und der Stromfluss bricht zusammen.
- Der mit dem Stromfluss verbundene Spannungsabfall über den elektrischen Widerstand ist das eigentliche Messsignal. Da der Stromfluss nur für kurze Zeit aufrecht gehalten wird, fällt keine kontinuierliche Spannung über den Widerstand ab, sondern lediglich ein Spannungspuls.
- Mittels Lautsprecher könnten die Spannungspulse als Klicks hörbar gemacht werden. Daher wird auch im Kontext der Lichtdetektion von Klicks gesprochen.
- Die Klicks sind abzählbar und es gilt: Je höher die Zahl der Klicks pro Zeitintervall ist, desto höher ist die Intensität des einfallenden Lichtes. Dieser Zusammenhang gilt jedoch nur bis zu einer bestimmten Intensität, da der Detektor eine Totzeit besitzt. Während dieser wird ein einfallendes Photon nicht in einen Spannungspuls umgewandelt.

Die konkrete technische Realisierung des Umwandlungsprozesses ist jedoch abhängig vom verwendeten Detektor. Typische Detektoren sind Photomultiplier oder Avalanche Photodioden.

## Photomultiplier

Photomultiplier oder auch Photoelektronenvervielfacher sind spezielle Elektronenröhren. In der lichtempfindlichen Photokathode wird bei Absorption eines Photons durch den äußeren Photoeffekt ein Elektron aus der Oberfläche gelöst. Dieses wird dann durch Kaskaden von Dynoden verstärkt. Dynoden sind Anode und Kathode zugleich, das bedeutet, dass sie einerseits Elektronen beschleunigen und andererseits beim Auftreffen eines Elektrons mehrere Elektronen emittieren. Die Zahl der Elektronen nimmt daher mit jeder Dynode exponentiell zu, sodass schlussendlich ein messbarer Strom entsteht. Auch wenn es sich bei Photomultipliern um stark verbreitete Detektoren handelt, ist ihre Effizienz nicht nur abhängig von der Wellenlänge des einfallenden Lichtes sondern auch sehr variabel. Im roten / infraroten Wellenlängenbereich beträgt sie gerade einmal wenige Prozent. Somit wird nur ein geringer Bruchteil der einfallenden Photonen in ein Signal umgewandelt.

## Avalanche Photodioden

Deutlich empfindlicher für den roten / infraroten Wellenlängenbereich sind Avalanche Photodioden (Avalanche: dt. Lawine). Diese sind Halbleiterdetektoren, bei denen die Photonenabsorption und Ladungsvervielfachung in der Halbleiterdiode stattfindet. Der Prozess der Ladungsvervielfachung verläuft bei Avalanche Photodioden ähnlich wie beim Geiger-Müller Zählrohr durch Stoßionisation, die Lawinentladung. Allerdings wird dabei kein Edelgas ionisiert, sondern die Atome innerhalb des Halbleiters.

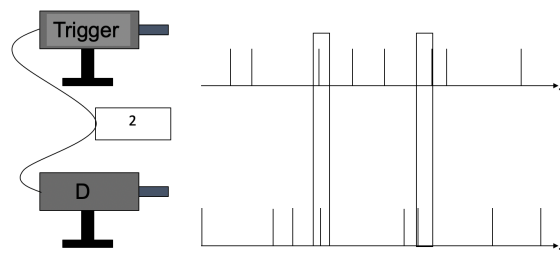
Auf Grund der hohen Empfindlichkeit werden in diesem Experiment Avalanche Photodioden verwendet. Für die konkret im Experiment verwendeten Detektoren beträgt die Effizienz 65%, d. h. nur 65% der einfallenden Photonen können detektiert werden.

## Koinzidenzmessungen und Hintergrundrauschen

Auch wenn binäre Photodetektoren prinzipiell dafür geeignet sind einzelne Photonen zu detektieren, ist eine zweifelsfreie Detektion einzelner Photonen damit nicht direkt möglich. Der Grund ist, dass die Detektoren ebenfalls Klicks erzeugen, wenn sie nicht mit Licht bestrahlt werden, da bspw. auch Infrarotstrahlung aus der Umgebung Klicks

erzeugt. Dieses Verhalten wird als *Dunkelzählrate* bezeichnet. Dieser Prozess ist völlig zufällig und macht ein Messsignal ununterscheidbar vom Störsignal.

Eine Methode dieses Störsignal vom zu messenden Signal zu unterscheiden sind sogenannte *Koinzidenzmessungen*. Dabei werden die Signale zweier Detektoren innerhalb eines sehr kurzen Zeitintervalls (im Experiment 5 ns), dem *Koinzidenzfenster* verglichen. Die Idee hinter dieser Methode beruht auf der Zufälligkeit der Dunkelzählrate.



**Abb. 1:** Messung von zufälligen Koinzidenzen im Dunkelrauschen.

Die Prozesse innerhalb eines Detektors sind bei der Dunkelzählrate statistisch unabhängig von den Vorgängen im anderen Detektor. Wird nun, wie in der obigen Darstellung gezeigt, das Signal eines Detektors mit einem weiteren Detektor, der als *Triggerdetektor* bezeichnet wird, verglichen, kann das störende Dunkelrauschen nahezu unterdrückt werden. Mathematisch lässt sich dies durch eine stochastische Überlegung plausibel machen:

Dazu werden zwei Detektoren A und B betrachtet, wobei jeder der Detektoren mit einer Wahrscheinlichkeit  $P(A)$  bzw.  $P(B)$  klickt. Ebenso lässt sich eine Wahrscheinlichkeit  $P(A \cap B)$  für das Ereignis, dass die Detektoren A und B zusammen klicken, formulieren.

Weil die Dunkelzählrate der beiden Detektoren statistisch unabhängig ist, kann die Wahrscheinlichkeit für das koinzidente Ereignis

$$P(A \cap B) = P(A) \cdot P(B)$$

als Produkt der Wahrscheinlichkeiten der Einzelereignisse geschrieben werden. Da die Wahrscheinlichkeiten der Einzelereignisse kleiner 1 sind, ist das Produkt der Wahr-

scheinlichkeiten kleiner als die Wahrscheinlichkeiten der Einzelereignisse.

Dennoch wird auch klar, dass die Zahl der Koinzidenzen bei hinreichend langer Messzeit nicht 0 ist, sodass nach wie vor einige, wenn auch wenige Koinzidenzen gemessen werden können. Dies ist in Abb. 1 exemplarisch illustriert. Die Ursache für diese Koinzidenzen ist rein zufällig, weshalb sie als *zufällige Koinzidenzen* bezeichnet werden<sup>1</sup>. Tab. 1 zeigt die Mittelwerte und relativen Häufigkeiten einer Beispielmessung. Die Messzeit betrug 1 s und es wurden 1000 Messwerte aufgenommen. Der Blick auf die Mittelwer-

**Tab. 1:** Beispiel Betrachtung der Dunkelzählrate der Detektoren A, B und C sowie der Koinzidenzen AB und AC. Messzeit: 1 s, Anzahl der aufgenommenen Messwerte: 1000

Größe	A	B	C	AB	AC
Mittelwert	561,189	593,689	901,170	0	0,003
relative Häufigkeit	27,295%	28,875%	43,830%	0%	0%

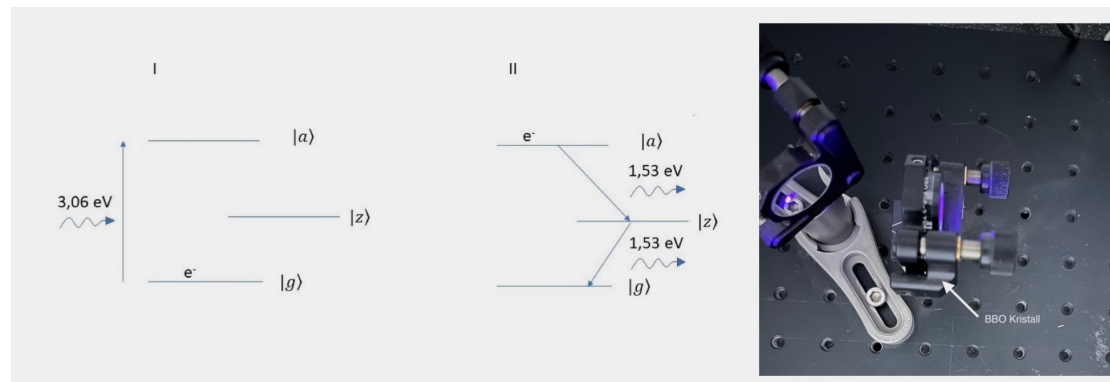
te der Dunkelzählraten der einzelnen Zählraten ist für die Detektoren A und B in etwa gleich. Für den Detektor C ist die Dunkelzählrate nahezu doppelt so groß. Werden nun die koinzidenten Dunkelzählraten, das heißt die zufälligen Koinzidenzen betrachtet, so zeigt sich, dass der Mittelwert für die Detektorkombination AB 0 ist. Für AC lassen sich jedoch, auf Grund der hohen Dunkelzählrate von C, einige wenige zufällige Koinzidenzen finden. Der Blick auf die relativen Häufigkeiten bestärkt hingegen die Methode der Koinzidenzmessung: Die relative Häufigkeit ist für beide Detektorkombinationen gerundet 0% der Gesamtklickzahl.

## Die Methode angekündigter Photonen

Wird nun das Detektorenpaar mit Paaren von Photonen, die ebenfalls nahezu zeitgleich entstanden sind, bestrahlt, wird die Wahrscheinlichkeit für Koinzidenzen systematisch erhöht. Die Anzahl echter, das heißt nicht-zufälliger Koinzidenz überwiegt gegenüber den zufälligen Koinzidenzen.

---

<sup>1</sup>Würde man das Signal eines Detektors in Hannover mit dem eines Detektors in New York mittels Elektronik vergleichen, ließen sich auch hier zufällige Koinzidenzen finden.



**Abb. 2:** Links: Schematische Darstellung der parametrischen Fluoreszenz des BBO-Kristalls. Rechts: BBO-Kristall im Experiment. Gut sichtbar, dass einfallende, violette Licht.

Derartige Photonenpaare lassen sich beispielsweise mittels parametrischer Fluoreszenz in einem doppelbrechenden beta-Bariumoxid Kristall (BBO) erzeugen. Links in Abb. 2 sind die atomaren Vorgänge schematisch dargestellt. Ein Photon der Wellenlänge  $\lambda = 405 \text{ nm}$  ( $E = 3,06 \text{ eV}$ ) wird absorbiert und hebt ein Elektron vom Grundzustand  $|g\rangle$  auf den angeregten Zustand  $|a\rangle$  (Abb. 2 zeigt das einfallende violette Licht). Der Rückfall in den Grundzustand findet über einen Zwischenzustand  $|z\rangle$  statt. Dabei werden zwei Photonen der doppelten Wellenlänge  $\lambda = 810 \text{ nm}$  emittiert. Der Blick auf die Wellenlängen zeigt, dass die Energie erhalten bleibt.

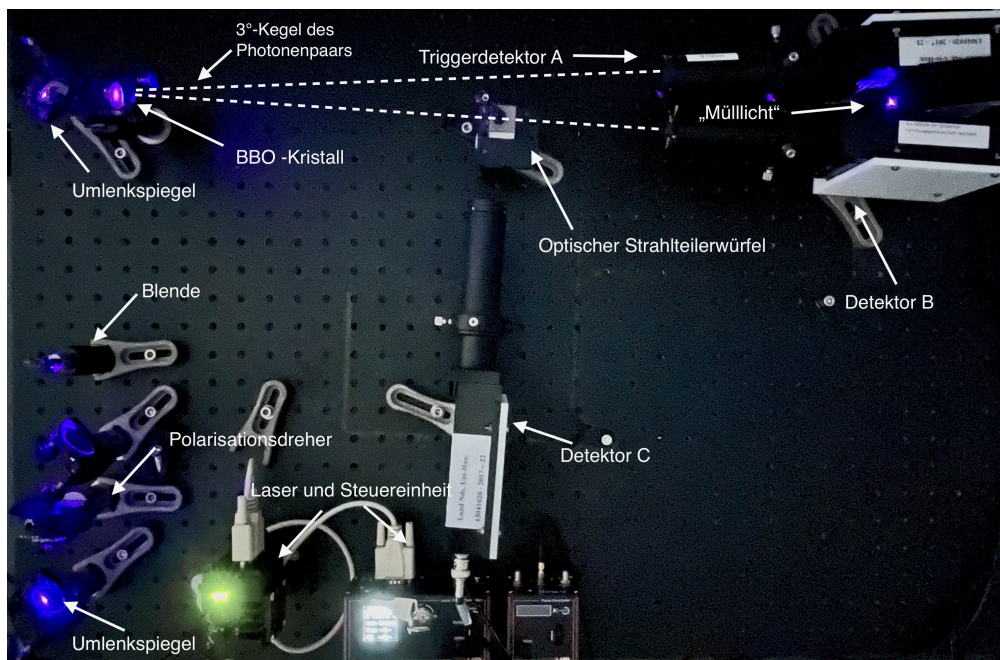
Insgesamt ist der Prozess der parametrischen Fluoreszenz jedoch sehr ineffektiv, sodass ein Photon mit einer Wahrscheinlichkeit von  $P = 10^{-5}$  bis  $P = 10^{-12}$  in ein Photonenpaar konvertiert wird. Diese Wahrscheinlichkeit kann durch die einstrahlende Laserleistung sowie die Kristalllänge beeinflusst werden. Kristalllänge und Laserleistung sind so gewählt, dass sicher gestellt ist, dass tatsächlich immer nur einzelne Photonenpaare emittiert werden. Der Großteil der eingestrahlenen Photonen durchstrahlt jedoch den BBO-Kristall lediglich und wird am Ende als „Mülllicht“ in einem Strahlenblocker aufgefangen.

Um die Impulserhaltung

$$\vec{k}_{\text{in}} = \vec{k}_1 + \vec{k}_2$$

zu gewährleisten, werden die beiden Photonen auf einem Kegelmantel mit einem Öffnungswinkel von  $3^\circ$  emittiert. Somit werden die Photonen räumlich voneinander getrennt, koinzident detektiert.

Um nun Experimente mit einzelnen Photonen durchzuführen, wird das eine Photon mit Hilfe eines Triggerdetektors A detektiert und es wird in der Zählelektronik ein 5 ns Zeitintervall gestartet. Das andere Photon wird für das Strahlteilerexperiment, genutzt. Klickt nun einer der Detektoren (B im transmittierten Ausgang o. C im reflektierten Ausgang) des Experiments innerhalb des 5 ns Zeitintervall koinzident mit dem Triggerdetektor, wird dieses Zählereignis (AB oder AC) als Einzelphoton gewertet. Daher werden im Experiment ausschließlich die mit dem Triggerdetektor A koinzidenten Zählraten AB, AC und ABC betrachtet. Somit kann das Messsignal vom Hintergrundrauschen getrennt werden, da zum Hintergrundrauschen kein koinzidentes Signal vom Triggerdetektor A gehört. Der Gesamtaufbau des Experiments ist in Abb. 3 dargestellt.



**Abb. 3:** Übersicht über den realen Versuchsaufbau zur Koinzidenzmessung.