



FAKULTÄT FÜR PHYSIK

**PHYSIKALISCHES PRAKTIKUM FÜR FORTGESCHRITTENE
PRAKTIKUM MODERNE PHYSIK**

Gruppe Nr. 166

Kurs: Mo1 Mo2 Mo3
zutreffendes bitte ankreuzen

WS 23/24

aktuelles Semester angeben

Versuch: Quantenoptik

Namen: Gostner Philipp, Groß Lukas

Assistent: _____

durchgeführt am: 13.12.2023

Protokollabgabe am: 02.01.2024

vom Betreuer auszufüllen

Note gesamt + 0 -

Anerkannt: _____
(Datum Unterschrift)

Datum Rückgabe: _____

Bemerkung:

Quantenoptik

Lukas Groß, Philipp Gostner

December 2023

Inhaltsverzeichnis

1	Theoretische Grundlagen	2
1.1	Licht in der Quantenmechanik	2
1.2	Fock Zustände	3
1.3	Kohärente Zustände	3
1.4	Thermische Zustände	4
1.5	Korrelationsfunktion	5
2	Versuchsvorbereitung	5
2.1	Photonenpaarquelle	5
2.2	HBT-Experiment mit einem Arm der Photonenpaarquelle	6
2.3	Grangier-Roger-Aspect-Experiment	6
2.4	GRA Experiment mit klassischem Licht	7
2.5	Malus' Gesetz für einzelne Photonen	7
3	Durchführung und Auswertung	8
3.1	Photonenpaarquelle	8
3.2	HBT-Experiment	8
3.3	GRA	8
3.4	GRA mit klassischem Licht	9
3.5	Malus	9

1 Theoretische Grundlagen

1.1 Licht in der Quantenmechanik

In der klassischen Elektrodynamik gibt es keine Quantisierung der Felder, was bedeutet, dass das Strahlungsfeld beliebig kleine Energien annehmen kann. In der Quantenmechanik stellt sich heraus, dass dies nicht ganz korrekt ist und es generell eine kleinste Energieeinheit gibt. Diese kleinste Energieeinheit ist das Photon. Bei der Quantenmechanischen Betrachtung wird angenommen, dass jede Mode des Elektromagnetischen Feldes einem quantenmechanischen harmonischen Oszillator

$$\hat{H} = \hbar\omega \left(\hat{n} + \frac{1}{2} \right)$$

entspricht. Das Elektromagnetische Feld wird also als quantisierte Anregung von Energiepaketen mit Energie $\hbar\omega$ behandelt. Diese Pakete sind die Photonen.

1.2 Fock Zustände

Fockzustände sind die Eigenzustände des Hamilton- und Besetzungszahloperators, sie sind die fundamentale Anregung des Elektromagnetischen Feldes. Bei einer idealen Einzelphotonenquelle sollte das Licht mit einem solchen Fockzustand beschrieben werden können.

Der Erwartungswert

$$\langle n | \hat{n} | n \rangle = n$$

mit der Varianz

$$\langle n | \hat{n}^2 | n \rangle - \langle n | \hat{n} | n \rangle^2 = n^2 - n^2 = 0$$

beschreibt die Anzahl von Photonen einer Feldmode.

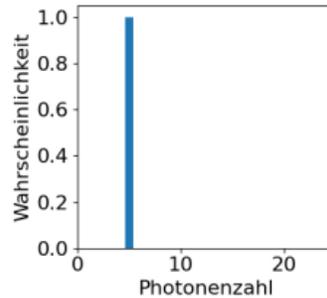


Abbildung 1: Fock-Zustand

1.3 Kohärente Zustände

Kohärentes Laserlicht und auch andere ebene Wellen werden nicht durch Fockzustände sondern Kohärente Zustände beschrieben. Kohärente Zustände sind lineare Kombinationen von Fockzuständen:

$$|\alpha\rangle = e^{-\frac{|\alpha|^2}{2}} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\alpha^n}{\sqrt{n!}} |n\rangle$$

Die Anzahl an Photonen, also der Erwartungswert des Besetzungszahloperators $\hat{n} = \hat{a}^\dagger \hat{a}$ ist hier:

$$\langle \alpha | \hat{n} | \alpha \rangle = |\alpha|^2$$

Diesmal ergibt die Varianz

$$\langle \alpha | \hat{n}^2 | \alpha \rangle - \langle \alpha | \hat{n} | \alpha \rangle^2 = |\alpha|^2$$

was auf eine Poissonverteilung der Photonenzahl hindeutet. Hier ist auch zu beachten, dass sich prinzipiell diese Verteilung bei niedrigen Intensitäten nicht ändert. Deswegen ist es auch nicht möglich eine Einzelphotonenquelle aus einer kohärenten Quelle durch Abschwächung der Intensität zu erzeugen.

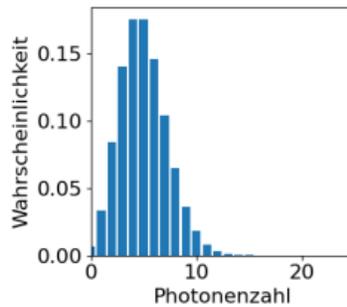


Abbildung 2: Kohärenter-Zustand

1.4 Thermische Zustände

Thermische Licht, wie z.B. bei Schwarzkörperstrahlung, ist chaotischer natur und wird deshalb als statistische Mischung von reinen Zuständen charakterisiert. Die Dichtematrix hierfür ist:

$$\hat{\rho} = \left(1 - e^{-\frac{\hbar\omega}{k_b T}}\right) e^{-\frac{\hbar\omega \hat{n}}{k_b T}}$$

Mit der Boltzmann-Konstante k_b und Temperatur T . Für die Varianz von n ergibt sich damit:

$$\Delta n^2 = \langle n^2 \rangle - \langle n \rangle^2 = \langle n \rangle^2 + \langle n \rangle$$

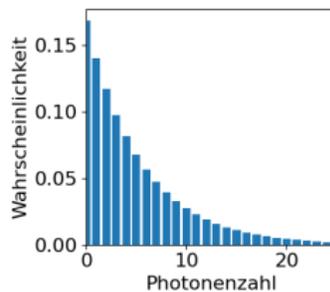


Abbildung 3: Thermischer-Zustand

1.5 Korrelationsfunktion

Um den Zusammenhang zwischen zwei Einzelphotonendetektoren zu untersuchen ist es sinnvoll die Korrelationsfunktion zweiter Ordnung zu betrachten, welche wie folgt definiert ist:

$$g^{(2)}(\tau) = \frac{\langle I_A(t + \tau) \cdot I_B(t) \rangle}{\langle I_A(t + \tau) \rangle \cdot \langle I_B(t) \rangle}$$

Wobei I_A und I_B jeweils die (zeitabhängigen) Intensitäten der Detektoren A und B sind. Relevant ist hier vor allem der Wert bei $\tau = 0$ s:

$$g^{(2)}(0) = \frac{\langle I_A \cdot I_B \rangle}{\langle I_A \rangle \cdot \langle I_B \rangle}$$

Dieser Wert gibt die Korrelation der Photonen, die an den Detektoren gemessen werden an. Ein Wert von $g^{(2)}(0) = 1$ bedeutet hierbei keine Korrelation. $g^{(2)}(0) > 1$ steht für Korrelation, also dass es übermäßig häufig vorkommt, dass Photonen bei A und B gleichzeitig detektiert werden. Ein Wert mit $g^{(2)}(0) < 1$ bedeutet Antikorrelation, also dass es äußerst selten vorkommt dass zwei Photonen gleichzeitig detektiert werden.

2 Versuchsvorbereitung

2.1 Photonenpaarquelle

Es soll getestet werden ob der verwendete Kristall tatsächlich verschränkte Photonenpaare aussendet.

Dazu gibt es zwei Pfade, an deren Enden sich Einzelphotonendetektoren befinden und die Zählrate R der auftreffenden Photonen messen.

Bei gewöhnlichem Licht wird erwartet dass die Zählraten nichts miteinander zutun haben und zufällig unterschiedlich sind.

Bei verschränktem Licht ist jedoch eine Korrelation der beiden Zählraten zu erwarten, die sich mit folgender Formel berechnet:

$$g_{ps}^{(2)}(0) = \frac{R_{TA}}{R_T \cdot R_A \cdot \Delta t}$$

Die beiden Detektorarme sind mit T und A bezeichnet und dementsprechend R_T und R_A ihre Einzelzählraten. R_{TA} ist die Koinzidenzzählrate, die gleichzeitig auftreffende Teilchen zählt. Δt ist das Zeitintervall innerhalb dessen ein Auftreffen von Teilchen in Detektor A und T als gleichzeitig gilt.

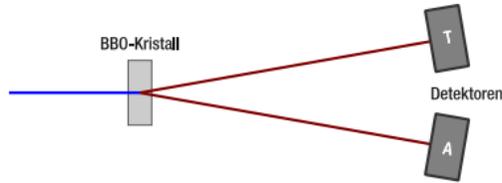


Abbildung 4: Versuchsaufbau Photonenpaarquelle [Quelle: Vorbereitungshilfe]

2.2 HBT-Experiment mit einem Arm der Photonenpaarquelle

Ziel dieser Aufgabe ist herauszufinden ob ein Arm der Paarquelle als Einzelphotonenquelle funktioniert.

Hierzu wird einer der Pfade blockiert und am Anderen ein Strahlteiler angebracht. An beiden Ausgängen des Strahlteilers werden die Detektoren aufgebaut und wieder die Korrelation der Zählraten ermittelt.

$$g_{HBT}^{(2)} = \frac{R_{AB}}{R_A \cdot R_B \cdot Dt}$$

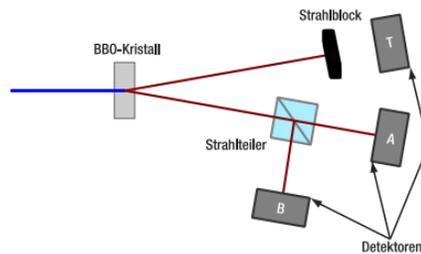


Abbildung 5: Versuchsaufbau HBT [Quelle: Vorbereitungshilfe]

2.3 Grangier-Roger-Aspect-Experiment

Nun soll festgestellt werden ob die Paarquelle eine Einzelelektronenquelle ist, wenn die Zählungen nur in Koinzidenz mit dem Triggerdetektor gemessen werden.

$$g_{GRA}^{(2)} = \frac{R_{T,AB} \cdot R_T}{R_{TA} \cdot R_{T,B}}$$

Also A und B zählen nur, wenn auf T gleichzeitig etwas gemessen wird. Dann ist eine Antikorrelation zwischen A und B zu erwarten, da ein Photonenpaar immer zwischen $T - A$ oder $T - B$ ist. Das mit dem Photon am Detektor

T verschränkte kommt durch den Strahlteiler entweder zu A oder zu B . Ein Signal auf A korreliert dann immer mit einem Signal von Null auf B .

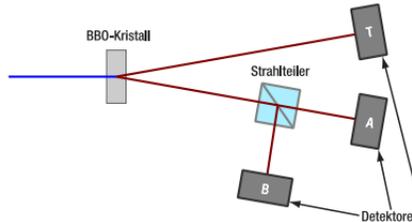


Abbildung 6: Versuchsaufbau GRA [Quelle: Vorbereitungshilfe]

2.4 GRA Experiment mit klassischem Licht

Das vorherige Experiment wird nun mit klassischem Licht durchgeführt. Hier wird keinerlei Korrelation erwartet, da das durch den Fluoreszierenden Filter entstehende Licht rein zufällig verteilt ist.

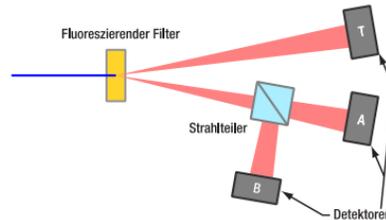


Abbildung 7: Versuchsaufbau GRA-klassisch [Quelle: Vorbereitungshilfe]

2.5 Malus' Gesetz für einzelne Photonen

Die Polarisations-eigenschaften einzelner Photonen sollen getestet werden. Der Aufbau gleicht (4) nur dass zwischen dem Strahlteiler und Detektor B nun ein Polarisationsfilter steht der jede Messung in 10° schritten variiert wird. Damit soll gezeigt werden, dass einzelne Photonen eine Polarisation aufweisen und ihre Übergangswahrscheinlichkeit (Koinzidenzzählrate) sich analog zum Malus Gesetz für klassisches Licht ($\propto \cos^2 \varphi$) verhält.

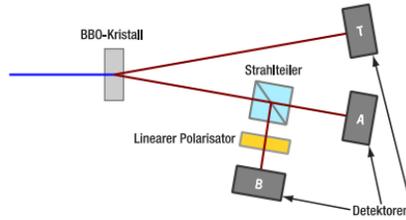


Abbildung 8: Versuchsaufbau Malus [Quelle: Vorbereitungshilfe]

3 Durchführung und Auswertung

3.1 Photonenpaarquelle

Hier sollte untersucht werden ob der BBO-Kristall tatsächlich Photonenpaare erzeugt. Dazu wurden zwei Einzelphotonendetektoren hinter dem Kristall aufgestellt und die Korrelationsfunktion der Zählraten bestimmt. Gemessen wurde hier mit einem Koinzidenzintervall von 5 ns. Dabei hat sich

$$g_{TA}^{(2)}(0) = 101.2 \pm 2.2$$

ergeben. Das Ergebnis ist deutlich größer als 1, es gibt also eine eindeutige Korrelation der beiden Signale, womit bestätigt ist, dass der BBO-Kristall Photonenpaare erzeugt.

3.2 HBT-Experiment

Hier wurde untersucht ob ein Arm der Photonenpaarquelle sich wie eine Einzelphotonenquelle verhält. Dazu wurden 10 Messungen mit einer Dauer von jeweils 10 s durchgeführt. Dabei hat sich für die Korrelation von A und B ergeben:

$$g_{AB}^{(2)}(0) = 1.01 \pm 0.10$$

Das Ergebnis ist ziemlich genau 1, was bedeutet, dass es keine Korrelation zwischen A und B gibt. Damit ist ein Arm der Paarphotonenquelle keine Einzelphotonenquelle.

3.3 GRA

Wir nehmen Daten um herauszufinden ob die Paarquelle eine Einzelelektronenquelle ist. Wie in Kapitel 2 beschrieben wird hier ein antikorrelativer Zusammenhang erwartet. Aus den Messwerten lässt sich:

$$g_{gra}^{(2)}(0) = 0.0114 \pm 0.0026$$

berechnen, was kleiner 1 ist und damit einer Antikorrelation entspricht.

3.4 GRA mit klassischem Licht

Hier sollten 10 Messungen mit einer Dauer von jeweils 10 s durchgeführt werden. Dabei hat sich ein Wert von

$$g_{\text{gra}}^{(2)}(0) = 0.595 \pm 0.484$$

ergeben. dieser Wert ist mit einer sehr großen Unsicherheit behaftet da es pro Messung zwischen keiner bis 3 Koinzidenzen gab. Dabei schwankte der Wert für $g_{\text{gra}}^{(2)}(0)$ von 0 bis 1.4.

Hier wäre es nötig gewesen entweder die Messzeit oder die Laserleistung zu erhöhen, dass es zu mehr Koinzidenzen kommt. Deshalb entschieden wir uns eine weitere Messung über eine Zeit von 60 s durchzuführen wobei sich

$$g_{\text{gra}}^{(2)}(0) = 1.1232$$

ergeben hat. Ein Wert von 1 bedeutet dass es keine Korrelation gibt, was genau das Ergebnis ist, das für klassisches Licht zu erwarten ist.

Das wiederum würde bestätigen, dass das vorherige Ergebnis kein Resultat des Aufbaus der Photonendetektoren ist, sondern das der Paarbildung im BBO Kristall und deren Quantenmechanischen Effekte.

3.5 Malus

Die Koinzidenzrate kann für alle Datenpunkte ($+10^\circ$ am Polfilter) berechnet und gegen den Winkel aufgetragen werden. Der nach dem Malus Gesetz erwartete $\propto \cos^2 \varphi$ Zusammenhang lässt sich sehr gut erkennen.

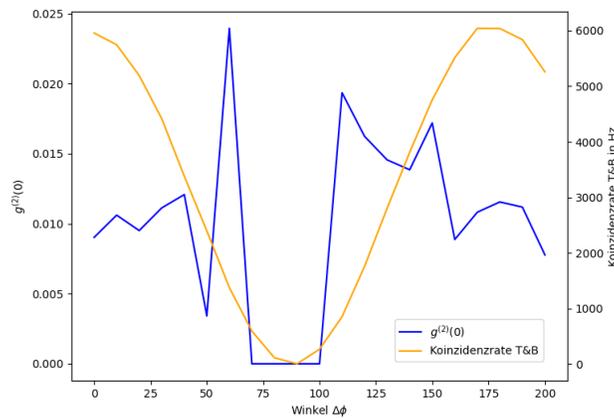


Abbildung 9: Gesetz von Malus

Ausserdem ist für alle Messungen $g^{(2)}(0) \ll 1$ zu erkennen, was -wie in 3.3 erläutert- für eine Einzelphotonenquelle spricht. Wir sehen also dass Einzelphotonen lineare Polarisation besitzen können und die Wahrscheinlichkeit dass sie den Polarisator durchdringen, sich verhält wie das Verhalten einer klassischen EM-Welle.