

# Messprotokoll Experiment "Beweis der Existenz des Photons"

7. August 2008

Das Dokument enthält die Auswertung des Experimentes "Beweis der Existenz des Photons als unteilbares Quantenobjekt". Die Auswertung erfolgt über drei Zugänge: Beim ersten Zugang werden nur die Zählraten betrachtet. Der zweite Zugang erfolgt über die Korrelationsfunktion zweiter Ordnung. Im dritten Zugang werden Photonenzustände betrachtet. Als Anwendung des Grundlagenexperimentes werden schließlich Quantenzufallszahlen erläutert. Die Daten für die Auswertung stammen aus der Datei Daten.txt (Messung 2). Für die Auswertung des Experimentes wurden insgesamt 30 Messungen zu je 60 Sekunden aufgenommen. Die Laserleistung betrug  $500\mu\text{W}$ . Der Laser emittierte 16 Millionen Pulse pro Sekunde mit 100ps Länge. Der Versuchsaufbau kann der Abbildung 1 entnommen werden.

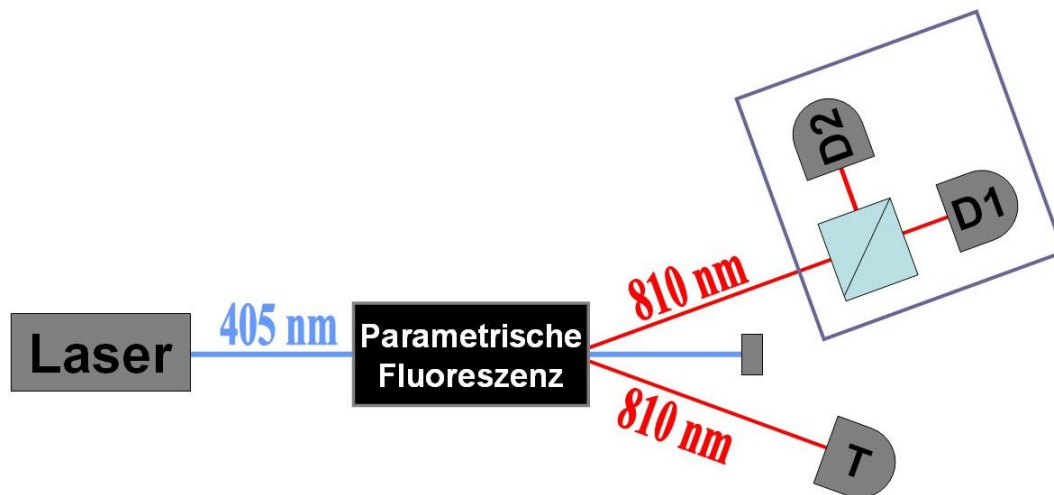


Abbildung 1: Skizze des Experimentes

# 1 Betrachtung der Zählraten

Wenn die Zählraten in Tab. 1 betrachtet werden, so fällt auf, dass im getriggerten Fall am Strahlteiler insgesamt 223.059 Einzelereignisse und 784 gemeinsame Ereignisse gemessen wurden. Ein einzelnes Photon teilt sich somit am Strahlteiler nicht auf. Die gemeinsamen Ereignisse sind keine Messfehler sondern Mehrphotonenereignisse.

Detektor	Mittelwert	Standardabweichung
T	2.270.792,8	4.131,7
A&T	221.116,3	713,4
B&T	221.075,6	628,0
A&B&T	783,8	40,9

**Tabelle 1:** Zählraten der Detektoren: Mittelwert und Standardabweichung

# 2 Korrelationsfunktion zweiter Ordnung

Ein etwas physikalischer Zugang zur Existenz des Photons als Quantenobjekt ist das Konzept zur Bündelung von einzelnen Lichtportionen (Bunching). Mathematisch darstellbar ist die Bündelung bzw. Nichtbündelung (Antibunching) über über die Korrelationsfunktion zweiter Ordnung  $g^{(2)}(0)$ . Für das Licht einer Glühlampe (thermisches Licht) ist die Funktion  $g^{(2)}(0) = 2$ . Für das Licht eines Lasers (kohärentes Licht) ist die Funktion  $g^{(2)}(0) = 1$ . Dies entspricht dem Wert für eine monochromatische elektromagnetische Welle. Erst wenn die Funktion  $g^{(2)}(0) < 1$  ist, kann zur Erklärung nur noch die Quantennatur des Lichts genutzt werden. Die Messergebnisse können Tabell eftar:g2 entnommen werden

Für die Detektoren am Strahlteiler ohne Triggerung lautet die Korrelationsfunktion zweiter Ordnung:

$$g^{(2)}(0) = \frac{(D1\&D2) \text{ Messzeit}}{(D1) \cdot (D2) \text{ Pulszeit}}$$

Mit der Triggerung lautet die Korrelationsfunktion zweiter Ordnung:

$$g^{(2)}(0) = \frac{(T\&D1\&D2) \cdot (T)}{(T\&D1) \cdot (T\&D2)}$$

Messung	$g^{(2)}(0)$	$g^{(2)}(0) = 1$
Ohne Trigger	$1,0068 \pm 0,0308$	-0 fache Abweichung
Mit Trigger	$0,0182 \pm 0,0010$	972 fache Abweichung

**Tabelle 2:** Korrelationsfunktion zweiter Ordnung

### 3 Betrachtung der Photonenstatistik

Ein visueller Zugang um den Unterschied zwischen der getriggerte Messung und der ungetriggerte Messung zu erkennen ist die Darstellung der Photonenstatistik. Die reale Photonenstatistik kann jedoch nicht direkt bestimmt werden, da im Experiment Verluste ( $\eta$ ) von einzelnen Photonen auftreten. Diese Verluste kommen durch die Effizienz der Detektoren, die mangelnde Justierung und die Streuung von Photonen zustande. Mit einem virtuellen Strahlteiler können alle Verluste modellhaft zusammengefasst werden. In diesem Verlustmodell transmittiert der virtuelle Strahlteiler  $\eta=19,5\%$  aller Photonen, die anschließend zu 100% nachgewiesen werden. Die restlichen 80,5% der Photonen werden im virtuellen Strahlteiler reflektiert, die zu 0 % nachgewiesen werden. Der Strahlteiler ist mathematisch ein Bernoulli-Experiment mit zwei möglichen Ereignissen. Der Ausgang eines Bernoulli-Experiment lässt sich für das Experiment mit einer Verlustmatrix beschreiben. Wenn die tatsächliche Photonenstatistik bekannt ist, kann mit der Verlustmatrix die gemessene Photonenstatistik berechnet werden (Formel 1). Im Experiment ist die gemessene Photonenstatistik bekannt und die tatsächliche Photonenstatistik muss ermittelt werden. Dazu wird die Gleichung 1 invertiert (Formel 2). Die gemessenen Photonenstatistiken sind in Abb. 2(a) und in Abb. 2(b) dargestellt. Zwei Photonen haben am Strahlteiler vier Möglichkeiten, diesen wieder zu verlassen. Nachgewiesen werden können nur zwei Möglichkeiten. Die gemessenen Anzahl an Photonen mit  $n=2$  muss deshalb verdoppelt werden. Die tatsächliche Photonenstatistik ist für den ungetriggerten Fall in Abb. 3(a) und für den getriggerten Fall in Abb. 3(b) dargestellt. Die genauen Zahlenwerte können Tabelle 3 entnommen werden. Es ist deutlich zu erkennen, dass im getriggerten Fall nur einzelne Photonen nachgewiesen werden. Im ungetriggerten Fall beträgt die durchschnittliche Photonenzahl 0,010432 Photonen pro Laserpuls. Zur Optimierung wurde die Effizienz von  $\eta=19,47\%$  zu  $\eta=19,29\%$  korrigiert.

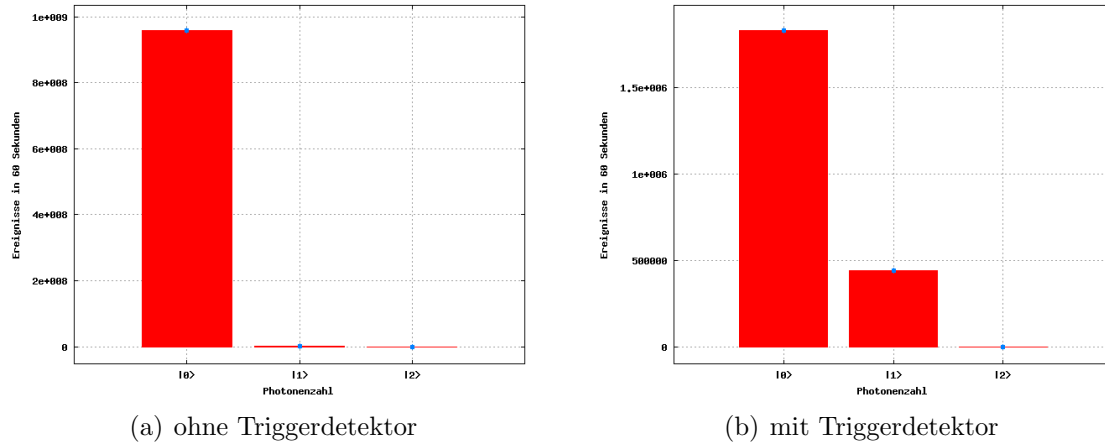
Die Auflösung der Photonenzahl ist bei diesem Experiment nur bis  $n=2$  möglich. Um ganz genau zu sein müsste man schreiben  $n \geq 2$ . Die Anteile mit  $n > 2$  kommen bei der im Experiment verwendeten Zwillingsphotonenquelle (BBO-Kristall) fast nicht vor. Andere experimentelle Möglichkeiten wie z. B. der "Time-Multiplexing-Detektor" können Photonenzahlen bis  $n=8$  auflösen.

$$\begin{pmatrix} |0\rangle_{\text{gemessen}} \\ |1\rangle_{\text{gemessen}} \\ |2\rangle_{\text{gemessen}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1-\eta & (-1+\eta)^2 \\ 0 & \eta & -2(-1+\eta)\eta \\ 0 & 0 & \eta^2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} |0\rangle_{\text{tatsaechlich}} \\ |1\rangle_{\text{tatsaechlich}} \\ |2\rangle_{\text{tatsaechlich}} \end{pmatrix} \quad (1)$$

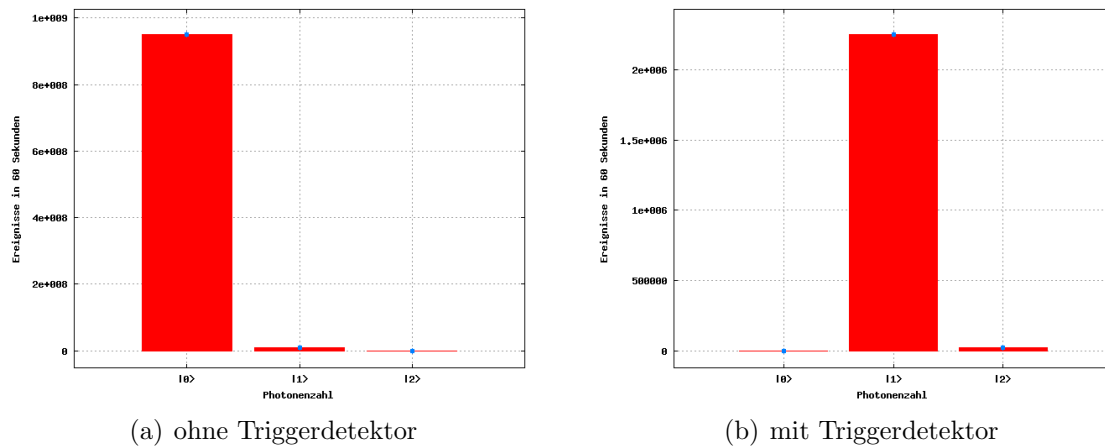
$$\begin{pmatrix} |0\rangle_{\text{tatsaechlich}} \\ |1\rangle_{\text{tatsaechlich}} \\ |2\rangle_{\text{tatsaechlich}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & (\eta-1)/\eta & (\eta-1)^2/\eta^2 \\ 0 & 1/\eta & 2(-1+\eta)\eta^2 \\ 0 & 0 & 1/\eta^2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} |0\rangle_{\text{gemessen}} \\ |1\rangle_{\text{gemessen}} \\ |2\rangle_{\text{gemessen}} \end{pmatrix} \quad (2)$$

Messung	$ 0\rangle$	$ 1\rangle$	$ 2\rangle$
Mit Trigger: Rohdaten	$1.829.384,7 \pm 4.239,8$	$440.624,3 \pm 953,9$	$783,8 \pm 40,9$
Mit Trigger: Berechnet	$0,1 \pm 6.756,5$	$2.249.737,7 \pm 6.197,7$	$21.055,0 \pm 1.100,2$
Ohne Trigger: Rohdaten	$958.065.759,5 \pm 2.416,8$	$1.928.413,7 \pm 2.419,0$	$1.942,3 \pm 59,2$
Ohne Trigger: Berechnet	$950.033.332,1 \pm 18.094,9$	$9.910.608,8 \pm 19.425,0$	$52.174,6 \pm 1.597,1$

**Tabelle 3:** Photonenstatistiken



**Abbildung 2:** Gemessene Photonenstatistik



**Abbildung 3:** Tatsächliche Photonenstatistik

## 4 Quantenzufallszahlen

Im Experiment kann nicht vorhergesagt werden, ob das einzelne Photon am Strahlteiler transmittiert oder reflektiert wird. Es liegt hier ein Einzelphotonen-Zufallsprozess vor. Wird das Photon am Strahlteiler transmittiert, so ist dies die binäre 1, wird das Photon am Strahlteiler reflektiert, so ist dies die binäre 0. Während der Messzeit wurden mit dem Experiment im Mittel 442.192 einzelne Bits erzeugt. Das Strahlteilverhältnis betrug 50,0%.