

# *Hong-Ou-Mandel Interferenz*

Julia Lemmé

Universität Ulm

10. Juli 2009

**Measurement of Subpicosecond Time Intervals between Two Photons by Interference**

C. K. Hong, Z. Y. Ou, and L. Mandel

*Department of Physics and Astronomy, University of Rochester, Rochester, New York 14627*

(Received 10 July 1987)

A fourth-order interference technique has been used to measure the time intervals between two photons, and by implication the length of the photon wave packet, produced in the process of parametric down-conversion. The width of the time-interval distribution, which is largely determined by an interference filter, is found to be about 100 fs, with an accuracy that could, in principle, be less than 1 fs.

PACS numbers: 42.50.Bs, 42.65.Re

**Measurement of Subpicosecond Time Intervals between Two Photons by Interference**

C. K. Hong, Z. Y. Ou, and L. Mandel

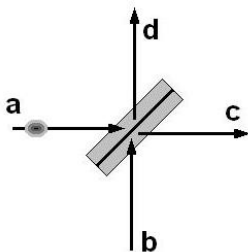
*Department of Physics and Astronomy, University of Rochester, Rochester, New York 14627*

(Received 10 July 1987)

A fourth-order interference technique has been used to measure the time intervals between two photons, and by implication the length of the photon wave packet, produced in the process of parametric down-conversion. The width of the time-interval distribution, which is largely determined by an interference filter, is found to be about 100 fs, with an accuracy that could, in principle, be less than 1 fs.

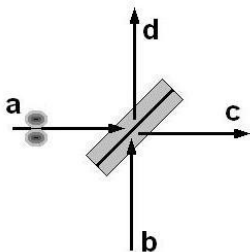
PACS numbers: 42.50.Bs, 42.65.Re

- Zwei-Photonen-Interferenz
- Das Hong-Ou-Mandel Experiment
  - Voraussetzungen
  - Durchführung
  - Auswertung
- Anwendungen
- Anhang



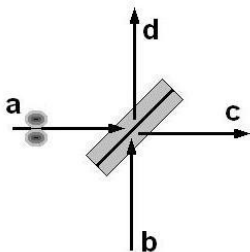
Ein Photon am Beamsplitter

$$|a\rangle \rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}} (|c\rangle + i |d\rangle)$$



Zwei Photonen am Beamsplitter

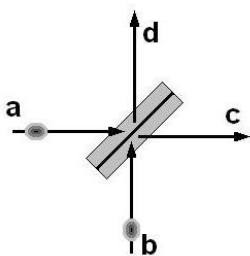
$$|a\rangle_1 |a\rangle_2 \rightarrow \frac{1}{2} (|c\rangle_1 + i |d\rangle_1) (|c\rangle_2 + i |d\rangle_2)$$



Zwei Photonen am Beamsplitter

$$|a\rangle_1 |a\rangle_2 \rightarrow \frac{1}{2} (|c\rangle_1 + i |d\rangle_1) (|c\rangle_2 + i |d\rangle_2)$$

$$\frac{1}{2} (|c\rangle_1 |c\rangle_2 + i |c\rangle_1 |d\rangle_2 + i |d\rangle_1 |c\rangle_2 - |d\rangle_1 |d\rangle_2)$$



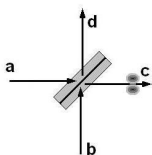
Zwei Teilchen am Beamsplitter

$$|\Psi\rangle_{\text{Boson}} = \frac{1}{\sqrt{2}} (|a\rangle_1 |b\rangle_2 + |b\rangle_1 |a\rangle_2)$$

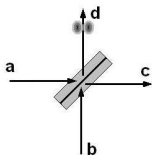
$$|\Psi\rangle_{\text{Fermion}} = \frac{1}{\sqrt{2}} (|a\rangle_1 |b\rangle_2 - |b\rangle_1 |a\rangle_2)$$



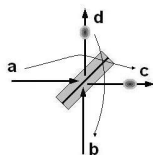
## Möglichkeiten nach Beamsplitter:



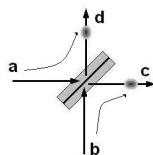
Beide Teilchen am  
Ausgang c



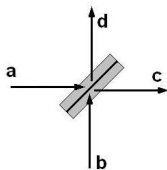
Beide Teilchen am  
Ausgang d



Beide Teilchen  
transmittiert



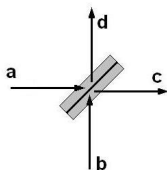
Beide Teilchen  
reflektiert



Beamsplitter

$$|\Psi\rangle_{Boson} = \frac{1}{\sqrt{2}} (|a\rangle_1 |b\rangle_2 + |b\rangle_1 |a\rangle_2)$$

$$|\Psi\rangle_{Fermion} = \frac{1}{\sqrt{2}} (|a\rangle_1 |b\rangle_2 - |b\rangle_1 |a\rangle_2)$$



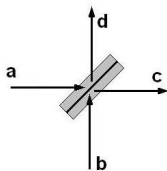
Beamsplitter

$$|\Psi\rangle_{Boson} = \frac{1}{\sqrt{2}} (|a\rangle_1 |b\rangle_2 + |b\rangle_1 |a\rangle_2)$$

$$|\Psi\rangle_{Fermion} = \frac{1}{\sqrt{2}} (|a\rangle_1 |b\rangle_2 - |b\rangle_1 |a\rangle_2)$$

$$|a\rangle \rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}} (|c\rangle + i |d\rangle)$$

$$|b\rangle \rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}} (i |c\rangle + |d\rangle)$$

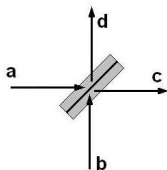


Beamsplitter

$$|\Psi\rangle_{Boson} = \frac{1}{\sqrt{2}} (|a\rangle_1 |b\rangle_2 + |b\rangle_1 |a\rangle_2)$$

$$|a\rangle \rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}} (|c\rangle + i |d\rangle)$$

$$|b\rangle \rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}} (i |c\rangle + |d\rangle)$$



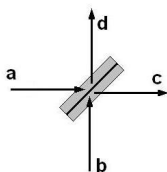
Beamsplitter

$$|\Psi\rangle_{Boson} = \frac{1}{\sqrt{2}} (|a\rangle_1 |b\rangle_2 + |b\rangle_1 |a\rangle_2)$$

$$|a\rangle \rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}} (|c\rangle + i|d\rangle)$$

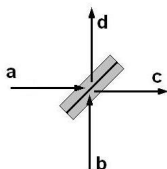
$$|b\rangle \rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}} (i|c\rangle + |d\rangle)$$

$$|\Psi\rangle_{Boson} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left( \frac{1}{\sqrt{2}} (|c\rangle_1 + i|d\rangle_1) \frac{1}{\sqrt{2}} (i|c\rangle_2 + |d\rangle_2) + \frac{1}{\sqrt{2}} (i|c\rangle_1 + |d\rangle_1) \frac{1}{\sqrt{2}} (|c\rangle_2 + i|d\rangle_2) \right)$$



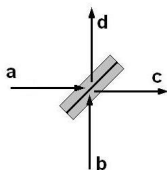
Beamsplitter

$$|\Psi\rangle_{Boson} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left( \frac{1}{\sqrt{2}} (|c\rangle_1 + i|d\rangle_1) \frac{1}{\sqrt{2}} (i|c\rangle_2 + |d\rangle_2) + \frac{1}{\sqrt{2}} (i|c\rangle_1 + |d\rangle_1) \frac{1}{\sqrt{2}} (|c\rangle_2 + i|d\rangle_2) \right)$$



Beamsplitter

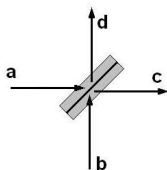
$$\begin{aligned}
 |\Psi\rangle_{\text{Boson}} &= \frac{1}{\sqrt{2}} \left( \frac{1}{\sqrt{2}} (|c\rangle_1 + i|d\rangle_1) \frac{1}{\sqrt{2}} (i|c\rangle_2 + |d\rangle_2) \right. \\
 &\quad \left. + \frac{1}{\sqrt{2}} (i|c\rangle_1 + |d\rangle_1) \frac{1}{\sqrt{2}} (|c\rangle_2 + i|d\rangle_2) \right) \\
 &= \frac{1}{\sqrt{2}} \left( \frac{i}{2} |c\rangle_1 |c\rangle_2 + \frac{1}{2} |c\rangle_1 |d\rangle_2 - \frac{1}{2} |d\rangle_1 |c\rangle_2 + \frac{i}{2} |d\rangle_1 |d\rangle_2 \right. \\
 &\quad \left. + \frac{i}{2} |c\rangle_1 |c\rangle_2 + \frac{1}{2} |d\rangle_1 |c\rangle_2 - \frac{1}{2} |c\rangle_1 |d\rangle_2 + \frac{i}{2} |d\rangle_1 |d\rangle_2 \right)
 \end{aligned}$$



Beamsplitter

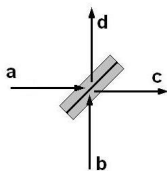
$$\begin{aligned}
 |\Psi\rangle_{\text{Boson}} &= \frac{1}{\sqrt{2}} \left( \frac{1}{\sqrt{2}} (|c\rangle_1 + i|d\rangle_1) \frac{1}{\sqrt{2}} (i|c\rangle_2 + |d\rangle_2) \right. \\
 &\quad \left. + \frac{1}{\sqrt{2}} (i|c\rangle_1 + |d\rangle_1) \frac{1}{\sqrt{2}} (|c\rangle_2 + i|d\rangle_2) \right) \\
 &= \frac{1}{\sqrt{2}} \left( \frac{i}{2} |c\rangle_1 |c\rangle_2 + \frac{1}{2} |c\rangle_1 |d\rangle_2 - \frac{1}{2} |d\rangle_1 |c\rangle_2 + \frac{i}{2} |d\rangle_1 |d\rangle_2 \right. \\
 &\quad \left. + \frac{i}{2} |c\rangle_1 |c\rangle_2 + \frac{1}{2} |d\rangle_1 |c\rangle_2 - \frac{1}{2} |c\rangle_1 |d\rangle_2 + \frac{i}{2} |d\rangle_1 |d\rangle_2 \right)
 \end{aligned}$$





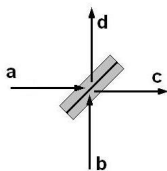
Beamsplitter

$$\begin{aligned}
 |\Psi\rangle_{\text{Boson}} &= \frac{1}{\sqrt{2}} \left( \frac{1}{\sqrt{2}} (|c\rangle_1 + i|d\rangle_1) \frac{1}{\sqrt{2}} (i|c\rangle_2 + |d\rangle_2) \right. \\
 &\quad \left. + \frac{1}{\sqrt{2}} (i|c\rangle_1 + |d\rangle_1) \frac{1}{\sqrt{2}} (|c\rangle_2 + i|d\rangle_2) \right) \\
 &= \frac{1}{\sqrt{2}} \left( \frac{i}{2} |c\rangle_1 |c\rangle_2 + \frac{1}{2} |c\rangle_1 |d\rangle_2 - \frac{1}{2} |d\rangle_1 |c\rangle_2 + \frac{i}{2} |d\rangle_1 |d\rangle_2 \right. \\
 &\quad \left. + \frac{i}{2} |c\rangle_1 |c\rangle_2 + \frac{1}{2} |d\rangle_1 |c\rangle_2 - \frac{1}{2} |c\rangle_1 |d\rangle_2 + \frac{i}{2} |d\rangle_1 |d\rangle_2 \right)
 \end{aligned}$$



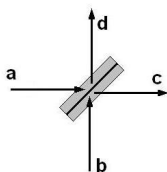
Beamsplitter

$$\begin{aligned}
 |\Psi\rangle_{\text{Boson}} &= \frac{1}{\sqrt{2}} \left( \frac{1}{\sqrt{2}} (|c\rangle_1 + i|d\rangle_1) \frac{1}{\sqrt{2}} (i|c\rangle_2 + |d\rangle_2) \right. \\
 &\quad \left. + \frac{1}{\sqrt{2}} (i|c\rangle_1 + |d\rangle_1) \frac{1}{\sqrt{2}} (|c\rangle_2 + i|d\rangle_2) \right) \\
 &= \frac{1}{\sqrt{2}} \left( \frac{i}{2} |c\rangle_1 |c\rangle_2 + \frac{1}{2} |c\rangle_1 |d\rangle_2 - \frac{1}{2} |d\rangle_1 |c\rangle_2 + \frac{i}{2} |d\rangle_1 |d\rangle_2 \right. \\
 &\quad \left. + \frac{i}{2} |c\rangle_1 |c\rangle_2 + \frac{1}{2} |d\rangle_1 |c\rangle_2 - \frac{1}{2} |c\rangle_1 |d\rangle_2 + \frac{i}{2} |d\rangle_1 |d\rangle_2 \right)
 \end{aligned}$$



Beamsplitter

$$\begin{aligned}
 |\Psi\rangle_{\text{Boson}} &= \frac{1}{\sqrt{2}} \left( \frac{1}{\sqrt{2}} (|c\rangle_1 + i|d\rangle_1) \frac{1}{\sqrt{2}} (i|c\rangle_2 + |d\rangle_2) \right. \\
 &\quad \left. + \frac{1}{\sqrt{2}} (i|c\rangle_1 + |d\rangle_1) \frac{1}{\sqrt{2}} (|c\rangle_2 + i|d\rangle_2) \right) \\
 &= \frac{1}{\sqrt{2}} \left( \frac{i}{2} |c\rangle_1 |c\rangle_2 + \frac{1}{2} |c\rangle_1 |d\rangle_2 - \frac{1}{2} |d\rangle_1 |c\rangle_2 + \frac{i}{2} |d\rangle_1 |d\rangle_2 \right. \\
 &\quad \left. + \frac{i}{2} |c\rangle_1 |c\rangle_2 + \frac{1}{2} |d\rangle_1 |c\rangle_2 - \frac{1}{2} |c\rangle_1 |d\rangle_2 + \frac{i}{2} |d\rangle_1 |d\rangle_2 \right)
 \end{aligned}$$



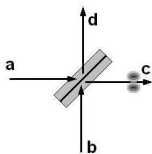
Beamsplitter

$$\begin{aligned}
 |\Psi\rangle_{\text{Boson}} &= \frac{1}{\sqrt{2}} \left( \frac{1}{\sqrt{2}} (|c\rangle_1 + i|d\rangle_1) \frac{1}{\sqrt{2}} (i|c\rangle_2 + |d\rangle_2) \right. \\
 &\quad \left. + \frac{1}{\sqrt{2}} (i|c\rangle_1 + |d\rangle_1) \frac{1}{\sqrt{2}} (|c\rangle_2 + i|d\rangle_2) \right) \\
 &= \frac{1}{\sqrt{2}} \left( \frac{i}{2} |c\rangle_1 |c\rangle_2 + \frac{1}{2} |c\rangle_1 |d\rangle_2 - \frac{1}{2} |d\rangle_1 |c\rangle_2 + \frac{i}{2} |d\rangle_1 |d\rangle_2 \right. \\
 &\quad \left. + \frac{i}{2} |c\rangle_1 |c\rangle_2 + \frac{1}{2} |d\rangle_1 |c\rangle_2 - \frac{1}{2} |c\rangle_1 |d\rangle_2 + \frac{i}{2} |d\rangle_1 |d\rangle_2 \right) \\
 &= \frac{i}{\sqrt{2}} (|c\rangle_1 |c\rangle_2 + |d\rangle_1 |d\rangle_2)
 \end{aligned}$$

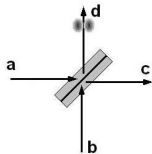
$$|\Psi\rangle_{Boson} = \frac{i}{\sqrt{2}} (|c\rangle_1 |c\rangle_2 + |d\rangle_1 |d\rangle_2)$$

$$|\Psi\rangle_{Fermion} = \frac{1}{\sqrt{2}} (|c\rangle_1 |d\rangle_2 - |d\rangle_1 |c\rangle_2)$$

$$|\Psi\rangle_{Boson} = \frac{i}{\sqrt{2}} (|c\rangle_1 |c\rangle_2 + |d\rangle_1 |d\rangle_2)$$



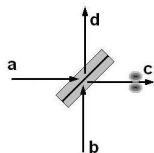
Beide Teilchen am Ausgang c



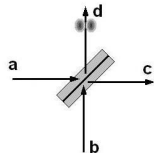
Beide Teilchen am Ausgang d

$$|\Psi\rangle_{Fermion} = \frac{1}{\sqrt{2}} (|c\rangle_1 |d\rangle_2 - |d\rangle_1 |c\rangle_2)$$

$$|\Psi\rangle_{Boson} = \frac{i}{\sqrt{2}} (|c\rangle_1 |c\rangle_2 + |d\rangle_1 |d\rangle_2)$$

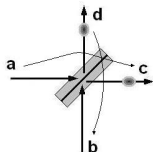


Beide Teilchen am Ausgang c

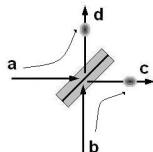


Beide Teilchen am Ausgang d

$$|\Psi\rangle_{Fermion} = \frac{1}{\sqrt{2}} (|c\rangle_1 |d\rangle_2 - |d\rangle_1 |c\rangle_2)$$



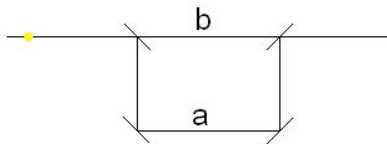
Beide Teilchen transmittiert



Beide Teilchen reflektiert

Gegenüberstellung:

## Ein-Photonen-Interferenz

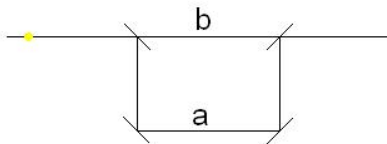


## Zwei-Photonen-Interferenz

- *Keine* Interferenz von jedem Photon mit sich selber
- *Keine* Interferenz zwischen beiden Photonen
- *Sondern* Interferenz eines Zwei-Photonen-Zustands mit sich selber



Gegenüberstellung:

**Ein-Photonen-Interferenz****Zwei-Photonen-Interferenz**

- *Keine* Interferenz von jedem Photon mit sich selber
- *Keine* Interferenz zwischen beiden Photonen
- *Sondern* Interferenz eines Zwei-Photonen-Zustands mit sich selber

Ein-Photonen-Zustand:

$$|\Psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (e^{i\varphi} |a\rangle + |b\rangle)$$

Zwei-Photonen-Zustand:

$$|\Psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|a\rangle_1 |b\rangle_2 + |b\rangle_1 |a\rangle_2)$$

# Voraussetzungen

Damit das Experiment funktioniert müssen die Photonen ununterscheidbar sein, also in

- Polarisaton
- Wellenlänge
- Ankunftszeit am BS

# Voraussetzungen

Damit das Experiment funktioniert müssen die Photonen ununterscheidbar sein, also in

- Polarisation  
Mit Hilfe von  $\frac{\lambda}{2}$ -Plättchen werden die Polarisationsrichtungen angepasst.
- Wellenlänge
- Ankunftszeit am BS

# Voraussetzungen

Damit das Experiment funktioniert müssen die Photonen ununterscheidbar sein, also in

- Polarisation
- Wellenlänge  
Mit einem Interferenz-Filter kann Licht von nur einer Wellenlänge extrahiert werden.
- Ankunftszeit am BS

## Voraussetzungen

Damit das Experiment funktioniert müssen die Photonen ununterscheidbar sein, also in

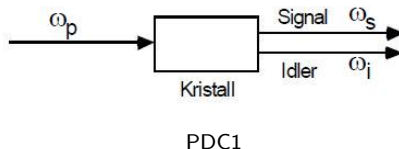
- Polarisierung
- Wellenlänge

- Ankunftszeit am BS

Um dies zu gewährleisten ist der Beamsplitter beweglich gelagert. In manchen Experimenten werden aufeinanderfolgende Photonen auch mit Hilfe unterschiedlicher Wegstrecken einander angepasst.

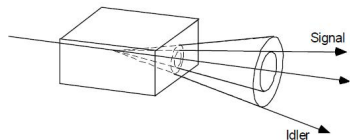
# Voraussetzungen

Diese Voraussetzungen sind mit Parametric Down Conversion (PDC) relativ gut zu realisieren:

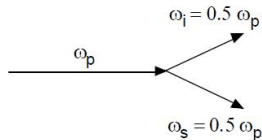


# Voraussetzungen

Parametric Down Conversion (PDC):

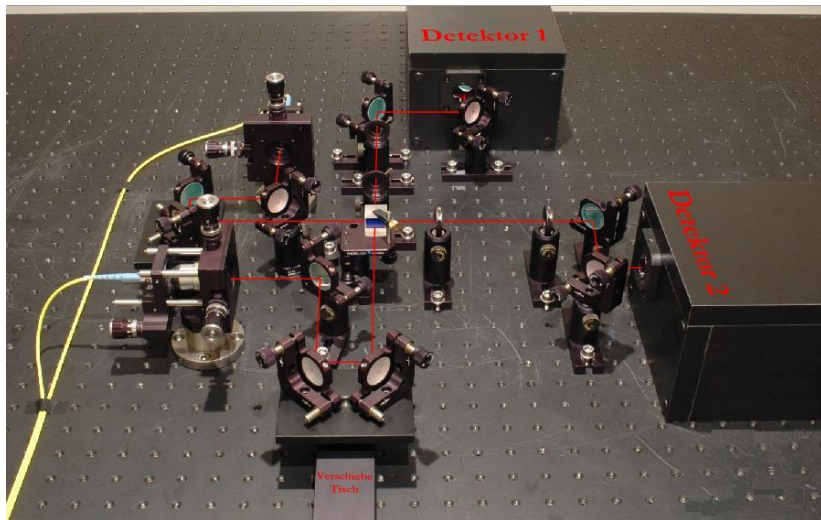


PDC2



PDC3

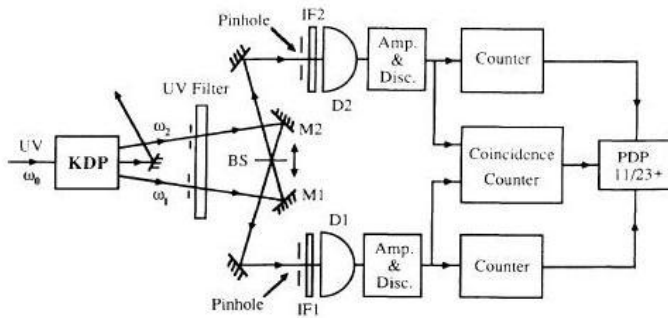
# Durchführung



Aufbau

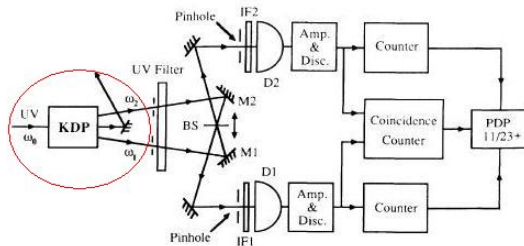


## Durchführung



Aufbau des Experiments

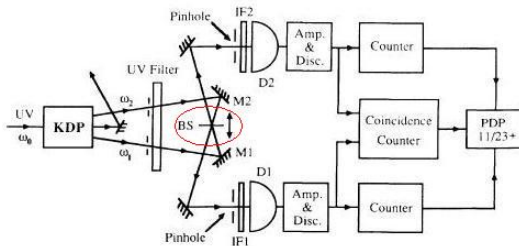
# Durchführung



Aufbau des Experiments

○ Parametric-Down-Conversion

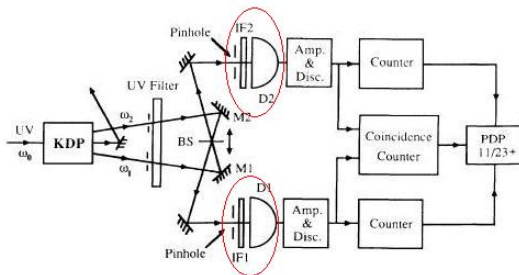
## Durchführung



Aufbau des Experiments

○ beweglicher Beam-Splitter

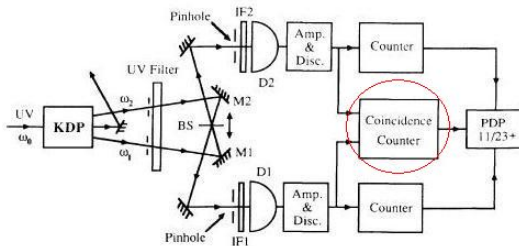
# Durchführung



Aufbau des Experiments

○ Interferenz-Filter

# Durchführung

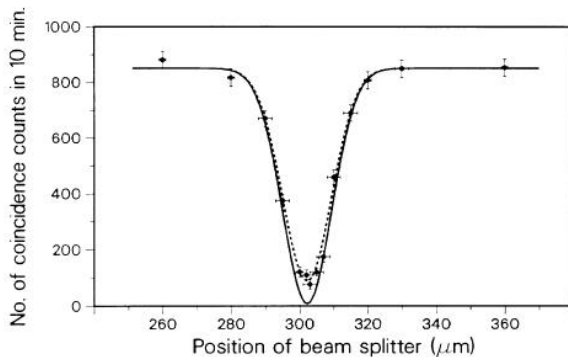


Aufbau des Experiments

- Koinzidenz-Zähler: Misst Anzahl des Auftreffens eines Photons in *jedem* Detektor.

# Auswertung

## Der „Hong-Ou-Mandel-Dip“



HOM-Dip

**Measurement of Subpicosecond Time Intervals between Two Photons by Interference**

C. K. Hong, Z. Y. Ou, and L. Mandel

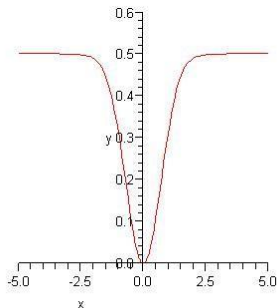
*Department of Physics and Astronomy, University of Rochester, Rochester, New York 14627*

(Received 10 July 1987)

A fourth-order interference technique has been used to measure the time intervals between two photons, and by implication the length of the photon wave packet, produced in the process of parametric down-conversion. The width of the time-interval distribution, which is largely determined by an interference filter, is found to be about 100 fs, with an accuracy that could, in principle, be less than 1 fs.

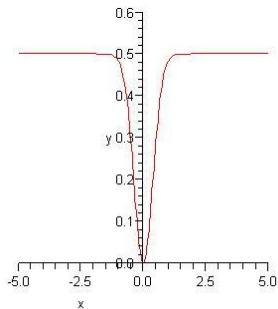
PACS numbers: 42.50.Bs, 42.65.Re

Messung des Zeitintervalls zwischen zwei Photonen:  
Das Zeitintervall hängt direkt mit dem Dip, also dem Ausgang des Experiments zusammen.

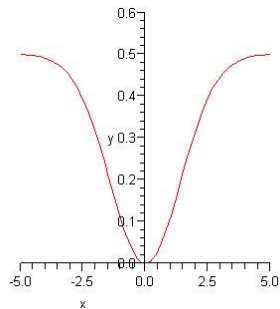
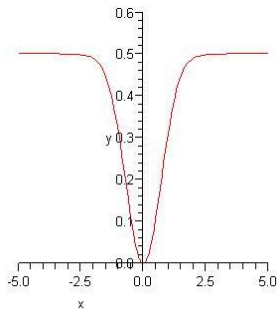




Messung des Zeitintervalls zwischen zwei Photonen:  
 Das Zeitintervall hängt direkt mit dem Dip, also dem Ausgang des Experiments zusammen.

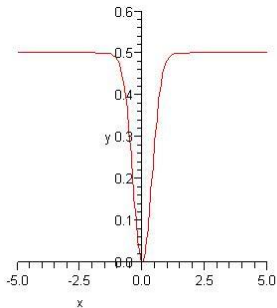


kurzes Wellenpaket

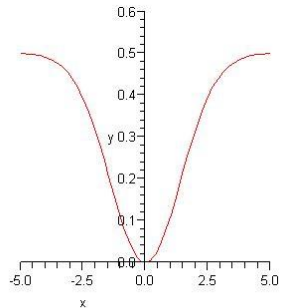
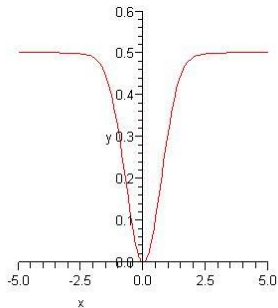


langes Wellenpaket

Messung des Zeitintervalls zwischen zwei Photonen:  
 Das Zeitintervall hängt direkt mit dem Dip, also dem Ausgang des Experiments zusammen.



kurzes Wellenpaket



langes Wellenpaket

Messung der Länge des Wellenpakets:  
 Umso länger das Wellenpaket, desto breiter der Dip.

Test auf Ununterscheidbarkeit:

Sind die Photonen nicht ununterscheidbar, kommt kein Dip zustande.

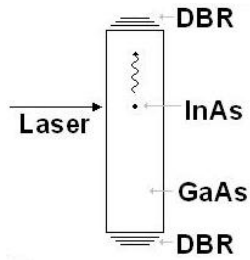
## Test auf Ununterscheidbarkeit:

Sind die Photonen nicht ununterscheidbar, kommt kein Dip zustande.

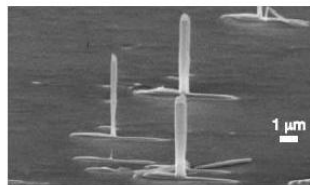
## Mögliche Photonen-Quellen:

- Parametric Down Conversion (PDC)
- Einzel Photonen Quelle
- Emittiert von zwei 'gefangenen' Atomen / Ionen

## Einzel-Photonen Quelle

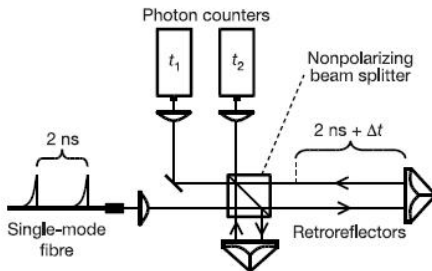


Aufbau der Falle



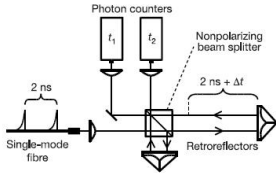
Pillars

## Einzel-Photonen Quelle

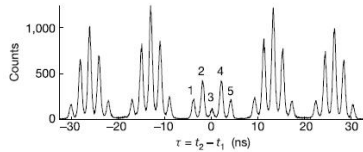


Aufbau des Experiments

## Einzel-Photonen Quelle

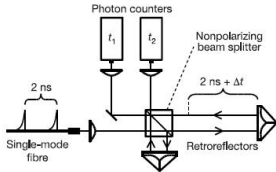


Aufbau des Experiments

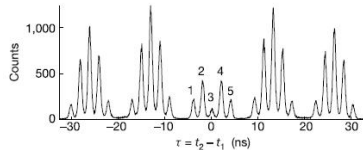


Histogramm

## Einzel-Photonen Quelle



Aufbau des Experiments



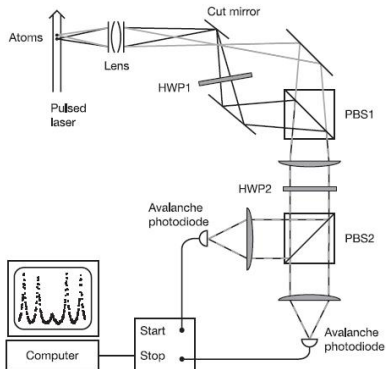
Histogramm

- 1 & 5: 1. Photon geht kurzen Weg und 2. Photon geht langen Weg
- 2 & 4: Beide Photonen gehen den gleichen Weg
- 3: 1. Photon geht langen Weg und 2. Photon geht kurzen Weg



Emittiert von zwei 'gefangenen' Atomen:

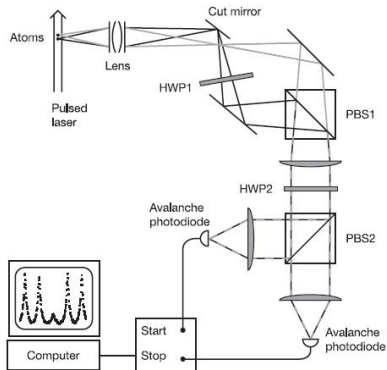
- Zwei noch unterscheidbare Photonen werden hervorgerufen durch einen Laser-Puls von den Atomen ausgesandt.



Photonen aus Atomen

Emittiert von zwei 'gefangenen' Atomen:

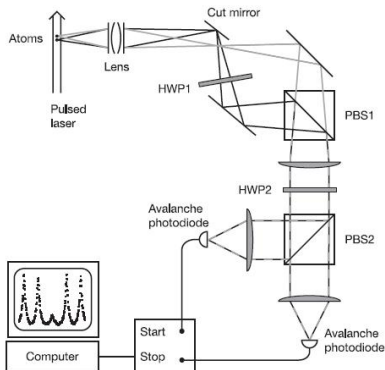
- Die Wege der beiden Photonen werden aufgespalten und von unterschiedlichen Seiten durch einen Polarisations-Beam-Splitter geschickt.



Photonen aus Atomen

Emittiert von zwei 'gefangenen' Atomen:

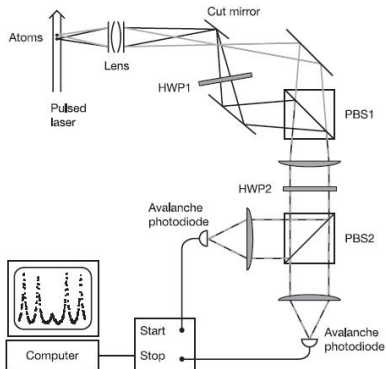
- Um zu garantieren, dass beide Photonen an der gleichen Seite des PBS austreten wird auf dem einen Weg das Photon durch ein  $\frac{\lambda}{2}$ -Plättchen geschickt.



Photonen aus Atomen

Emittiert von zwei 'gefangenen' Atomen:

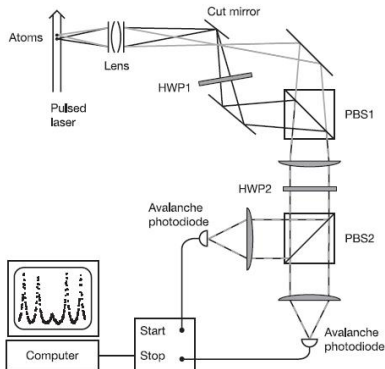
- Nun sind die Photonen ununterscheidbar.



Photonen aus Atomen

Emittiert von zwei 'gefangenen' Atomen:

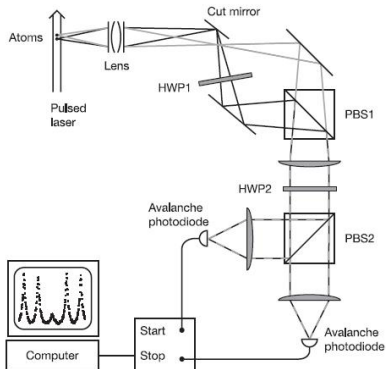
- Der eigentliche BS, PBS2, soll ein 50:50 BS sein, deshalb befindet sich vor ihm noch ein  $\frac{\lambda}{2}$ -Plättchen.



Photonen aus Atomen

Emittiert von zwei 'gefangenen' Atomen:

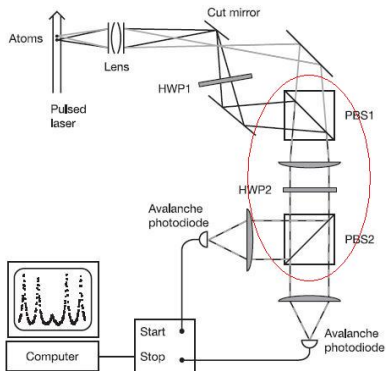
- Abschließend werden die Koinzidenzen gemessen.



Photonen aus Atomen

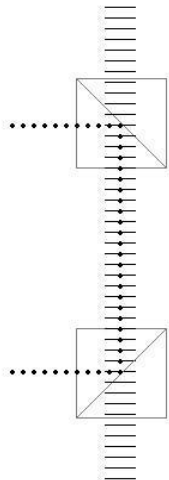
Emittiert von zwei 'gefangenen' Atomen:

- Abschließend werden die Koinzidenzen gemessen.

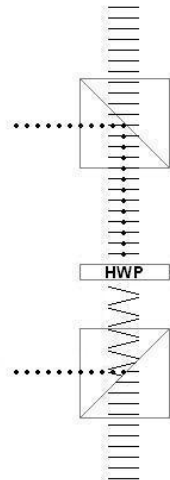


Photonen aus Atomen

Emittiert von zwei 'gefangenen' Atomen:



beam-separator  
configuration

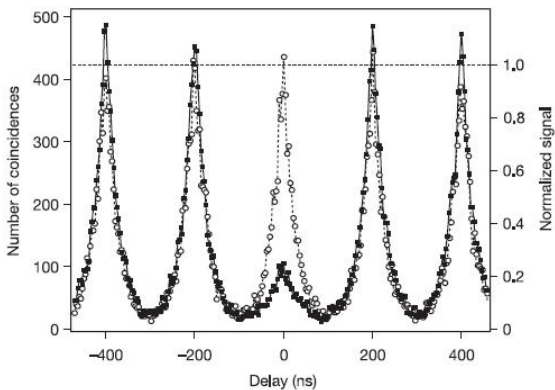


50:50 beam-splitter  
configuration

- Durch das HWP wird der untere PBS zu einem 50:50 Beamsplitter.



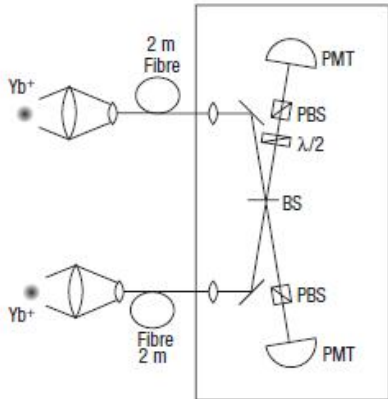
Emittiert von zwei 'gefangenen' Atomen:



Auswertung

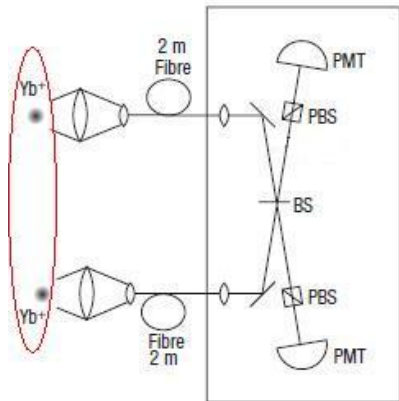
- beam-separator configuration
- 50:50 beam-splitter configuration

## Versuch mit Ionen:



Aufbau

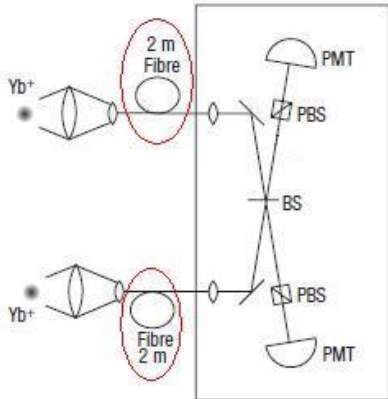
## Versuch mit Ionen:



Aufbau

- Zwei Ytterbium-Ionen in Paulfallen

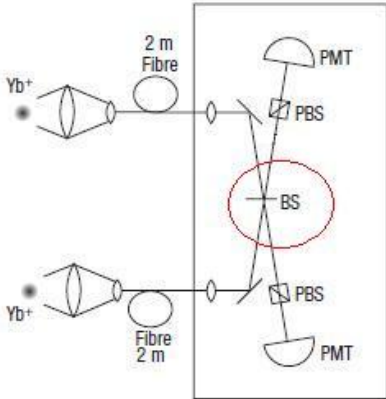
## Versuch mit Ionen:



Aufbau

- Single-Mode-Fasern um je eine räumliche Phase rauszugreifen

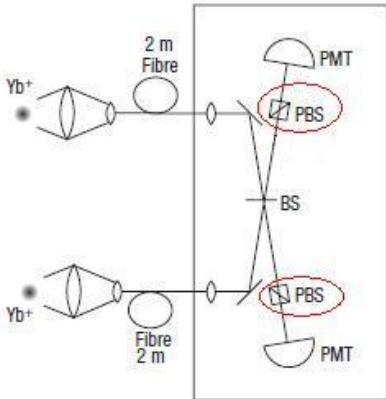
## Versuch mit Ionen:



Aufbau

- Beamsplitter

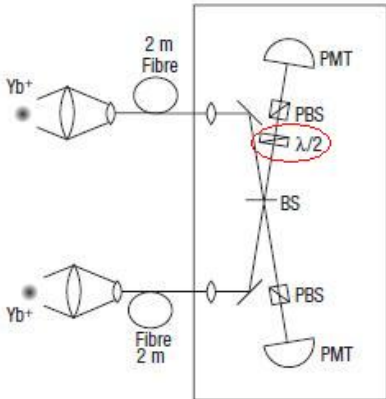
## Versuch mit Ionen:



Aufbau

- PBS um nur parallel polarisierte (ununterscheidbare) Photonen zu detektieren.

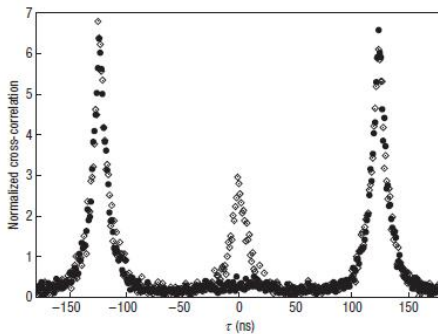
## Versuch mit Ionen:



Aufbau

- Zusätzlich eingefügtes HWP um senkrecht polarisierte (unterscheidbare) Photonen zu detektieren.

## Versuch mit Ionen:



Auswertung



Worin unterscheiden sich die genannten Photonenquellen?

- Parametric Down Conversion (PDC)
- Einzel Photonen Quelle (EPQ)
- Emittiert von zwei 'gefangenen' Atomen (PA) / Ionen (PI)

Worin unterscheiden sich die genannten Photonenquellen?

---

PDC   EPQ   PA   PI

Worin unterscheiden sich die genannten Photonenquellen?

	PDC	EPQ	PA	PI
Polarisation	HWP	gleich	gleich	, $\perp$

Worin unterscheiden sich die genannten Photonenquellen?

	PDC	EPQ	PA	PI
Polarisation	HWP	gleich	gleich	, $\perp$
Wellenlänge	IF	gleich	gleich	gleich

Worin unterscheiden sich die genannten Photonenquellen?

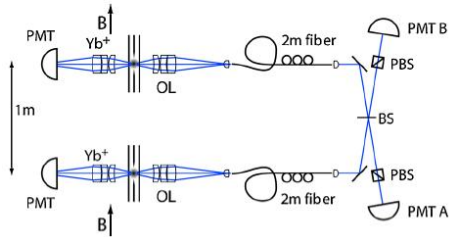
	PDC	EPQ	PA	PI
Polarisation	HWP	gleich	gleich	, $\perp$
Wellenlänge	IF	gleich	gleich	gleich
$\Delta t$	gleich	variabel	ungefähr	gleich

Wofür braucht man Quellen, die ununterscheidbare Photonen liefern?

- Quanten-Teleportation
- Quanten-Kryptographie
- Ionenverschränkung

Wofür braucht man Quellen, die ununterscheidbare Photonen liefern?

- Quanten-Teleportation
- Quanten-Kryptographie
- Ionenverschränkung



Aufbau

▶ Anhang



**Vielen Dank für die Aufmerksamkeit**

## Literaturverzeichnis

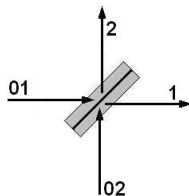
- „Photon statistics at beam splitter: an essential tool in quantum information and teleportation“ von Gregor Weihs and Anton Zeilinger  
URL: <http://www.univie.ac.at/qfp/publications3/pdf/files/2001-13.pdf>
- Phys. Rev. Lett. 59, 2044 (1987)  
URL: [http://prola.aps.org/pdf/PRL/v59/i18/p2044\\_1](http://prola.aps.org/pdf/PRL/v59/i18/p2044_1)
- C. Santori et al. Nature 419, 594 (2002)  
URL: <http://www.nature.com/nature/journal/v419/n6907/pdf/nature01086.pdf>
- J. Beugnon et al., Nature 440, 779 (2006)  
URL: <http://www.nature.com/nature/journal/v440/n7085/pdf/nature04628.pdf>
- E. Knill, R. Laflamme, and G. J. Milburn, Nature 409, 46 (2001)  
URL: <http://www.nature.com/nature/journal/v409/n6816/pdf/409046a0.pdf>
- Quantum interference of photon pairs from two remote trapped atomic ions  
URL: <http://www.nature.com/nphys/journal/v3/n8/pdf/nphys644.pdf>
- Hong-Ou-Mandel Interferenz  
URL: <http://www.didaktik.physik.uni-erlangen.de/quantumlab/Hong/index.html>
- Phys. Rev. Lett. 102, 250502 (2009)  
URL: <http://scitation.aip.org/getpdf/servlet/GetPDFServlet?filetype=pdf&id=PRLTAO000102000025250502000001&idtype=cvips&prog=normal>

Theorie:

Fock-Zustand nach PDC:

$$|1_{01}, 1_{02}\rangle$$

Fock-Zustand nach Durchgang durch BS:



Fock

$$|\Psi_{out}\rangle = (R - T) |1_1, 1_2\rangle + i(2RT)^{1/2} |2_1, 0_2\rangle + i(2RT)^{1/2} |0_1, 2_2\rangle$$

Praxis:

Photonen haben nicht genau gleiche Wellenlänge  $\Rightarrow$

Fock-Zustand nach PDC:

$$|\Psi\rangle = \int \phi(\omega_1, \omega_0 - \omega_1) |\omega_1, \omega_0 - \omega_1\rangle d\omega$$

Praxis:

Photonen haben nicht genau gleiche Wellenlänge  $\Rightarrow$

Fock-Zustand nach PDC:

$$|\Psi\rangle = \int \phi(\omega_1, \omega_0 - \omega_1) |\omega_1, \omega_0 - \omega_1\rangle d\omega$$

Anzahl des Auftreffens eines Photons in jedem Detektor, abhängig von der BS-Stellung:

$$N_c = C \left[ R^2 + T^2 - 2RT \frac{\int_{-\infty}^{\infty} g(\tau) g(\tau - 2\delta\tau) d\tau}{\int_{-\infty}^{\infty} g^2(\tau) d\tau} \right]$$

Praxis:

Anzahl des Auftreffens eines Photons in jedem Detektor, abhängig von der BS-Stellung:

$$N_c = C \left[ R^2 + T^2 - 2RT \frac{\int_{-\infty}^{\infty} g(\tau) g(\tau - 2\delta\tau) d\tau}{\int_{-\infty}^{\infty} g^2(\tau) d\tau} \right]$$

Praxis:

Anzahl des Auftreffens eines Photons in jedem Detektor, abhängig von der BS-Stellung:

$$N_c = C \left[ R^2 + T^2 - 2RT \frac{\int_{-\infty}^{\infty} g(\tau) g(\tau - 2\delta\tau) d\tau}{\int_{-\infty}^{\infty} g^2(\tau) d\tau} \right]$$

mit  $g(\tau) = e^{-\frac{(\Delta\omega\tau)^2}{2}} \Rightarrow$

$$N_c = C (R^2 + T^2) \left[ 1 - \frac{2RT}{R^2 + T^2} e^{-\frac{(\Delta\omega\delta\tau)^2}{2}} \right]$$

Praxis:

$$\text{mit } g(\tau) = e^{-\frac{(\Delta\omega\tau)^2}{2}} \Rightarrow$$

$$N_c = C(R^2 + T^2) \left[ 1 - \frac{2RT}{R^2 + T^2} e^{-\frac{(\Delta\omega\delta\tau)^2}{2}} \right]$$

$$\delta\tau \rightarrow 0 \Rightarrow N_c = C(R - T)^2$$

$$\delta\tau \rightarrow \infty \Rightarrow N_c = C(R^2 + T^2)$$



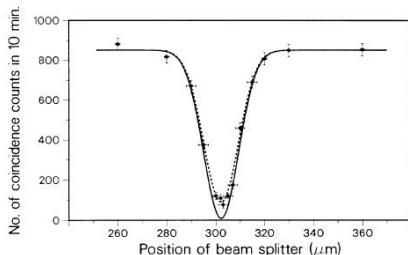
Praxis:

mit  $g(\tau) = e^{-\frac{(\Delta\omega\tau)^2}{2}} \Rightarrow$ 

$$N_c = C(R^2 + T^2) \left[ 1 - \frac{2RT}{R^2 + T^2} e^{-\frac{(\Delta\omega\delta\tau)^2}{2}} \right]$$

$$\delta\tau \rightarrow 0 \Rightarrow N_c = C(R - T)^2$$

$$\delta\tau \rightarrow \infty \Rightarrow N_c = C(R^2 + T^2)$$



HOM-Dip

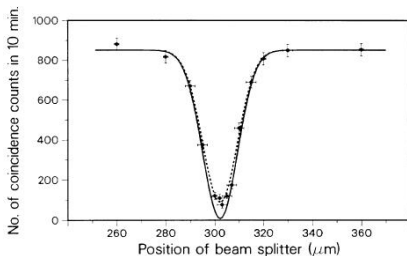
Praxis:

mit  $g(\tau) = e^{-\frac{(\Delta\omega\tau)^2}{2}} \Rightarrow$ 

$$N_c = C(R^2 + T^2) \left[ 1 - \frac{2RT}{R^2 + T^2} e^{-\frac{(\Delta\omega\delta\tau)^2}{2}} \right]$$

$$\delta\tau \rightarrow 0 \Rightarrow N_c = C(R - T)^2$$

$$\delta\tau \rightarrow \infty \Rightarrow N_c = C(R^2 + T^2)$$



HOM-Dip