



# Wheeler's Delayed Choice

-  
Einzelphotoneninterferenz

Judith Lehnert

Dezember 2007

Seminar Moderne Optik

# Gliederung

---

## Theoretische Betrachtung:

- Gedankenexperiment

## Experimentelle Durchführung:

- Übersicht über die einzelnen Komponenten
- Aufbau
- Auswertung

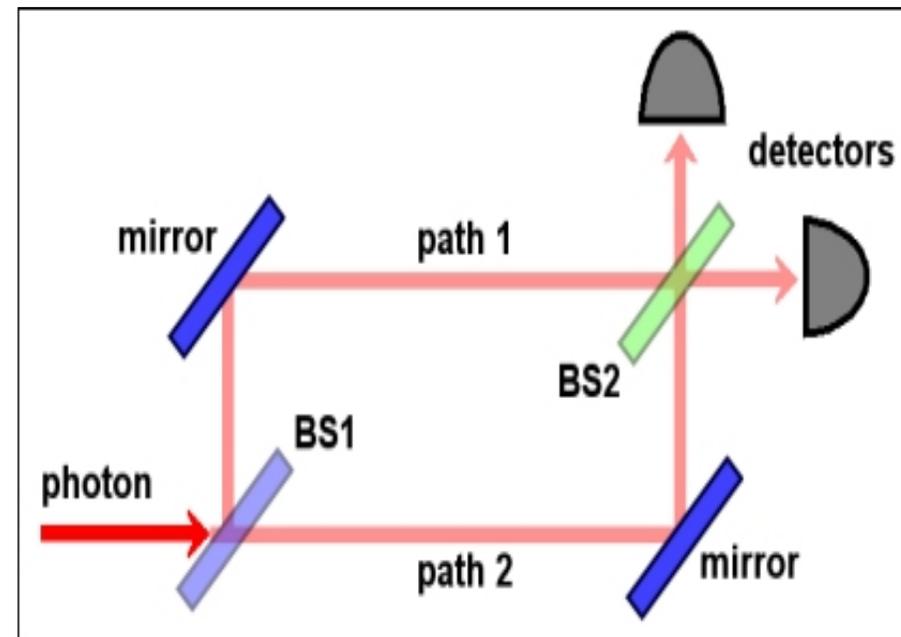
# Gedankenexperiment

Wheeler 1978

- Konfiguration eines Interferometers wird erst **nach** Eintritt eines Quantenteilchens festgelegt

- Pfade vereint  
➡ Interferenz
- Pfad gemessen  
➡ keine Interferenz

**Welle-Teilchen  
Dualismus**



<http://physicsworld.com/cws/article/news/27106/1/Interferometer>

# In kosmischen Dimensionen

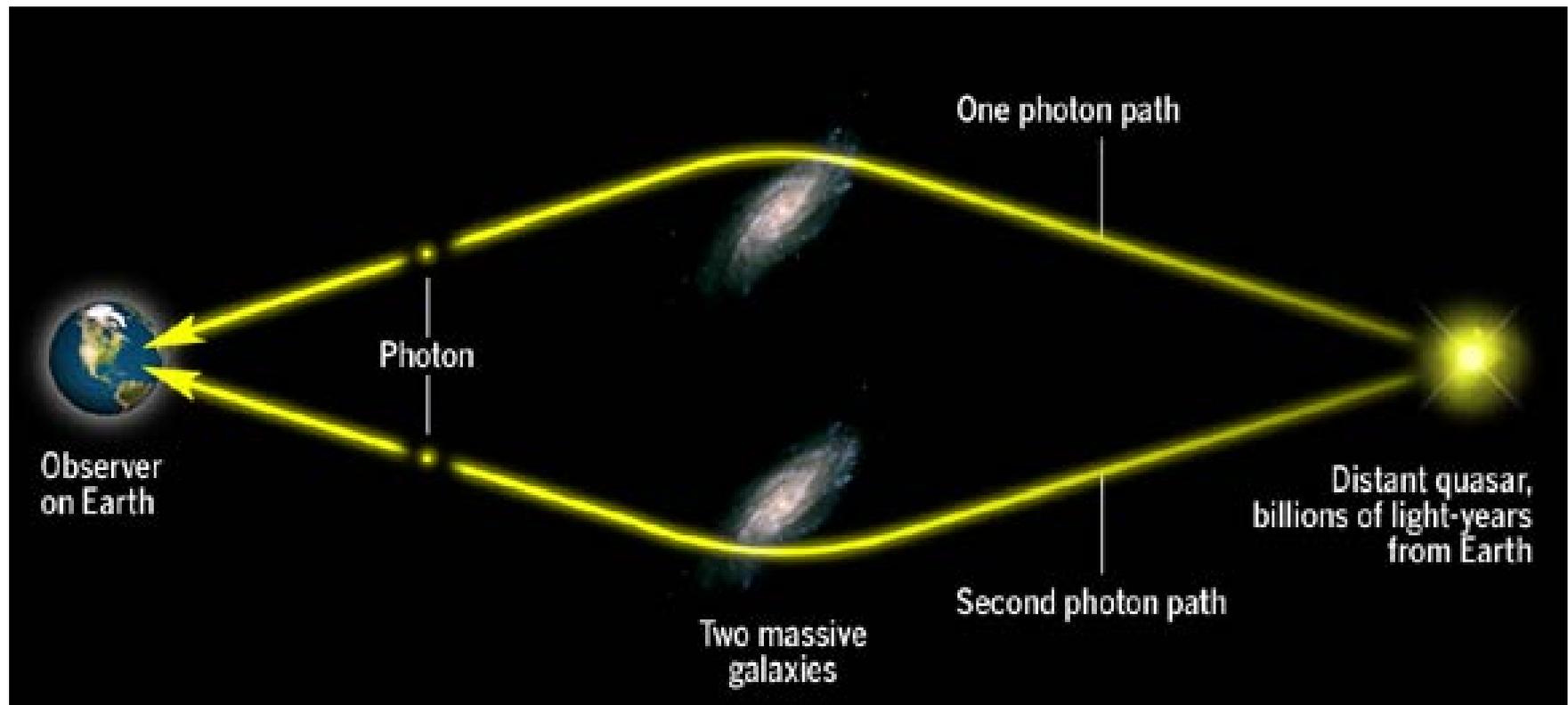


Abbildung: [http://discovermagazine.com/2002/jun/featuniverse/universe\\_2.jpg](http://discovermagazine.com/2002/jun/featuniverse/universe_2.jpg)

# Zweite Phase der Einstein-Bohr Debatte (ab 1933)



Niels Bohr 1925 mit Albert Einstein  
(fotografiert von Paul Ehrenfest)  
[http://de.wikipedia.org/wiki/Niels\\_Bohr](http://de.wikipedia.org/wiki/Niels_Bohr)

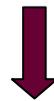
- Bohr: Art der **Messung** bestimmt Verhalten eines quantenmechanischen Systems
- Einstein: **Lokalität**  
„Spukhafte Fernwirkungen“ sind nicht möglich

„No elementary phenomenon is a phenomenon  
until it is an observed phenomenon“  
(Wheeler in *Law without Law*)

# Experimentelle Schwierigkeiten

---

- Erzeugung von Einzelquantenteilchen
- Realisierung des raumartigen Abstandes zwischen Wahl der Interferometerkonfiguration und dem Eintritt des Photons in das Interferometer

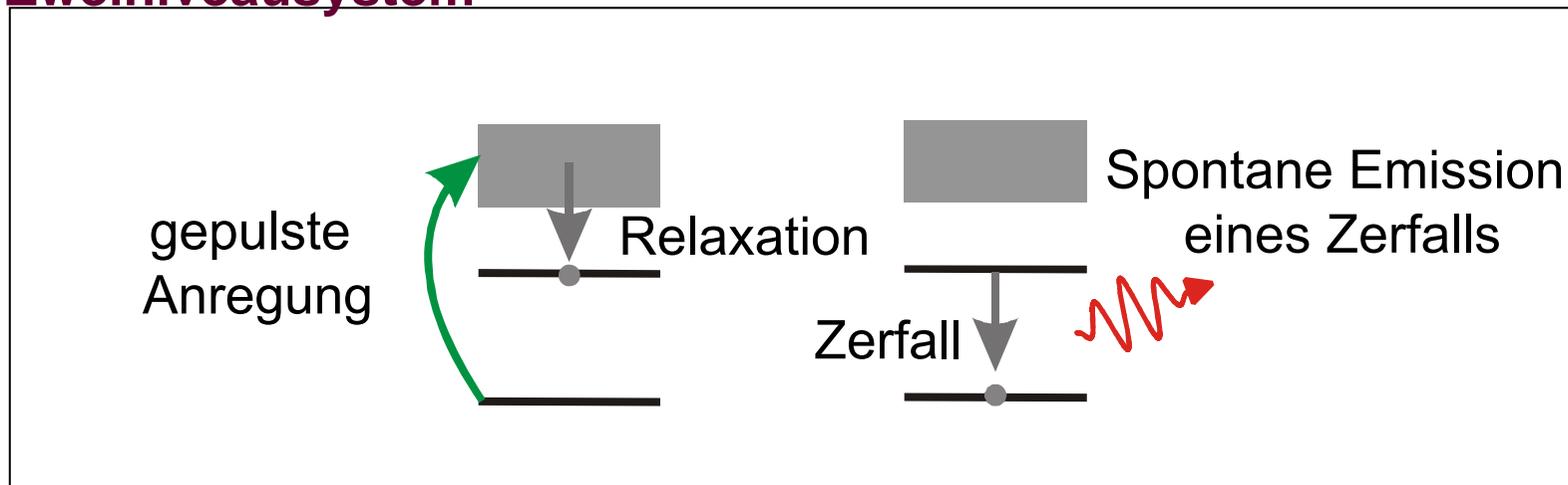


Experimentelle Durchführung erst 2006  
mit einzelnen Photonen

# Einphotonenquellen

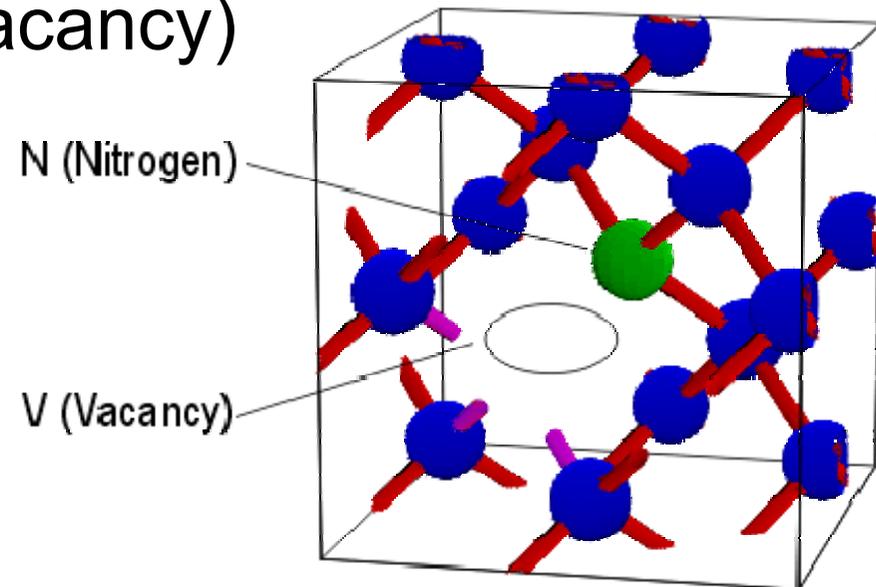
- **Ziel:** Nur einer von zwei Detektoren hinter einem Beamsplitter registriert ein Event
- Besonders geeignet Zweiniveausysteme, da Anregung und anschließenden Zerfall endliche Zeit brauche

## Zweiniveausystem



# Mögliche Zweiniveausysteme

- Einzelne Atome oder Ionen; **Problem:** hoher technischer Aufwand
- Farbmoleküle; **Problem:** hohe Zerfallsraten
- **Hier:** Stickstofffehlstellen in Diamant (single nitrogene-vacancy)



# Stickstofffehlstellen

## Vorteile:

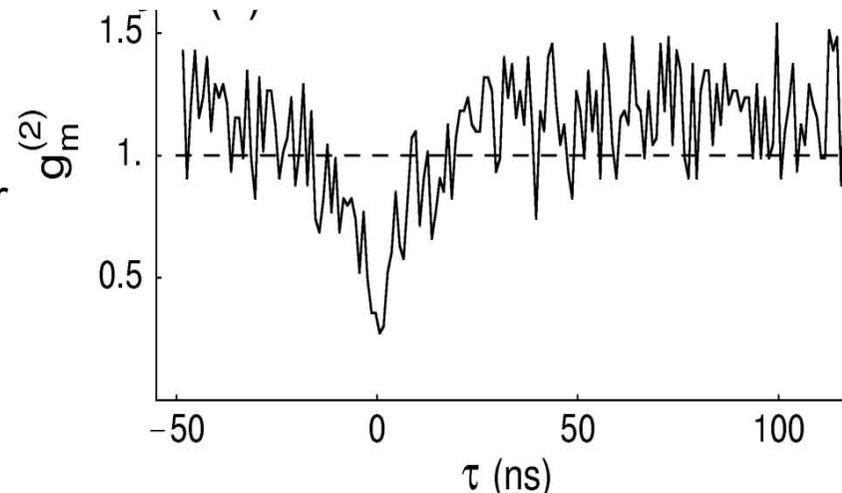
- Hohe Stabilität
- Geringer technischer Aufwand

## Pair Correlation Function:

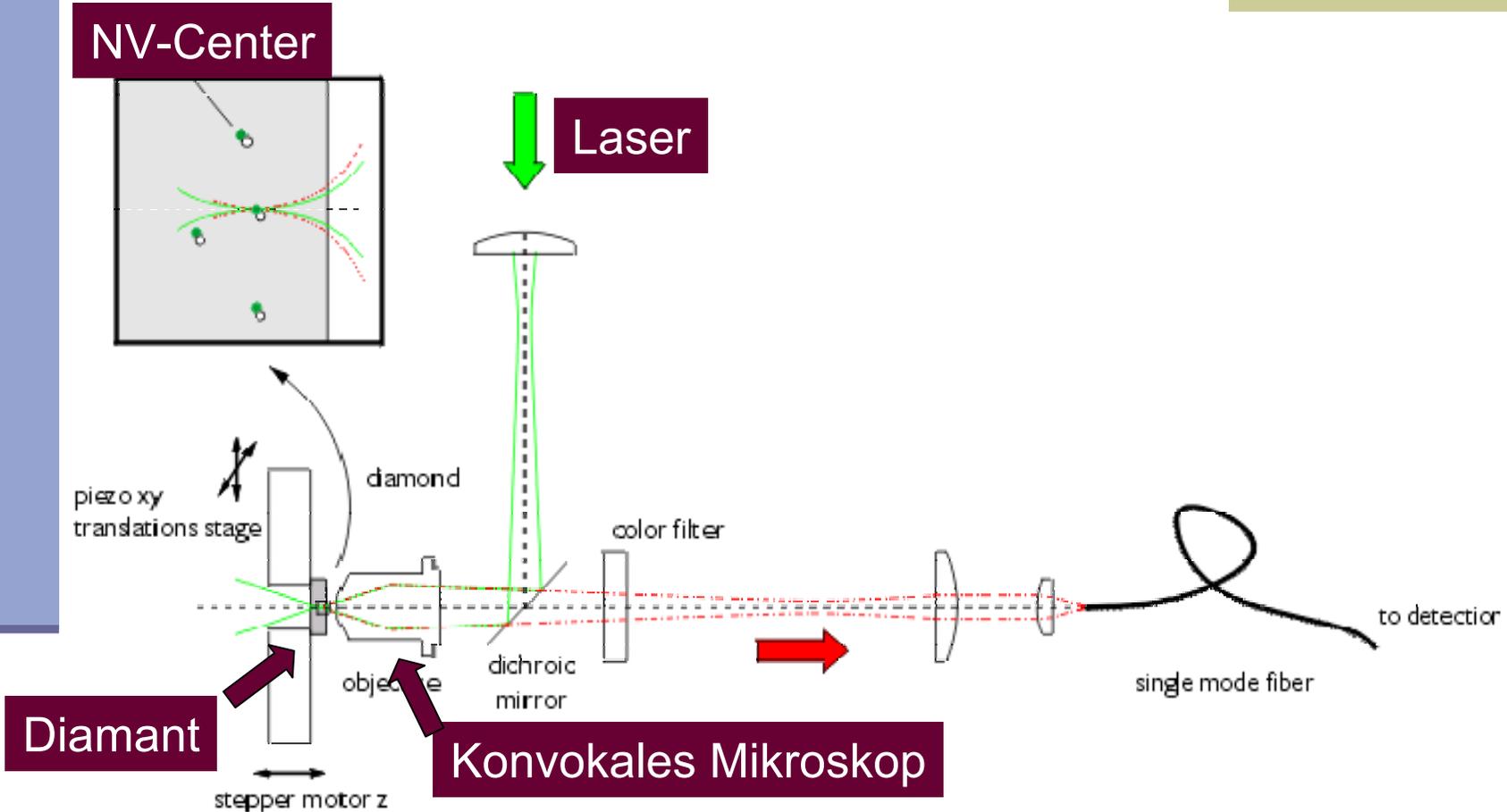
Proportional zur Anzahl der Ereignisse in einem Histogramm der Delayzeiten

## Realisierung von Antibunching:

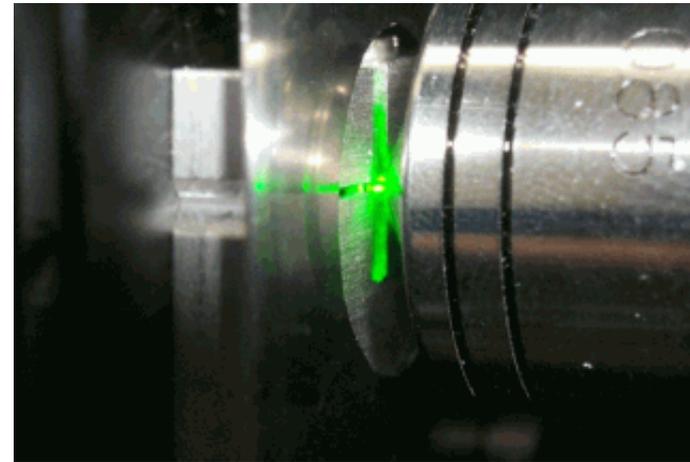
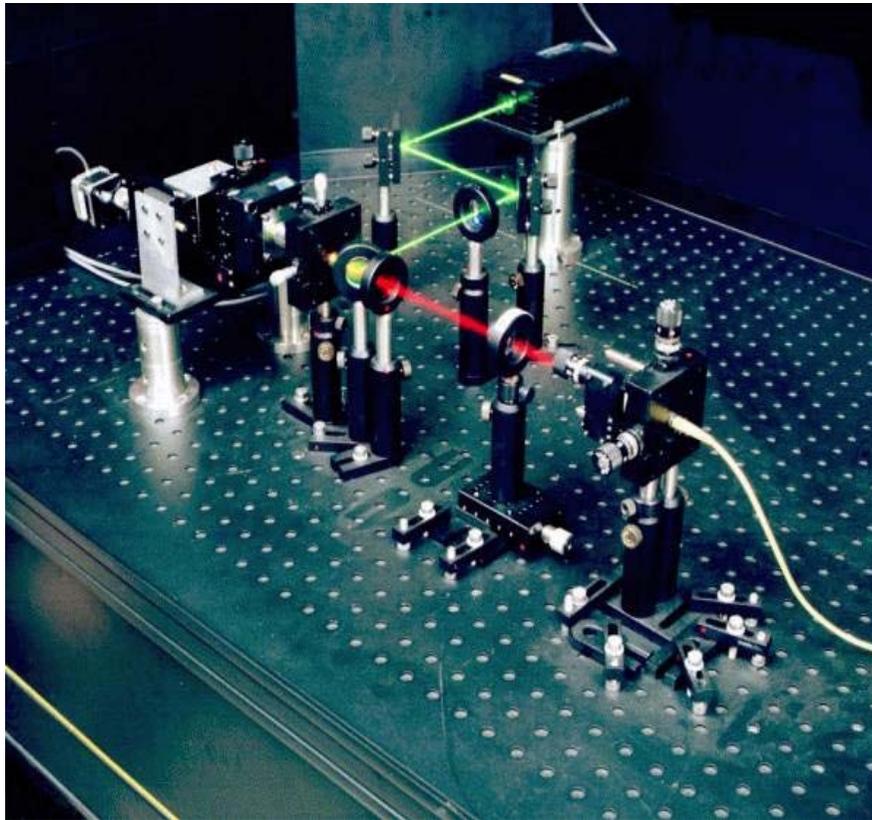
- Einzelphotonenverhalten
- Quantifizierbar durch **Pair correlation function**



# Aufbau: Erzeugung einzelner Photonen mit Stickstofffehlstellen



# Aufbau im Labor



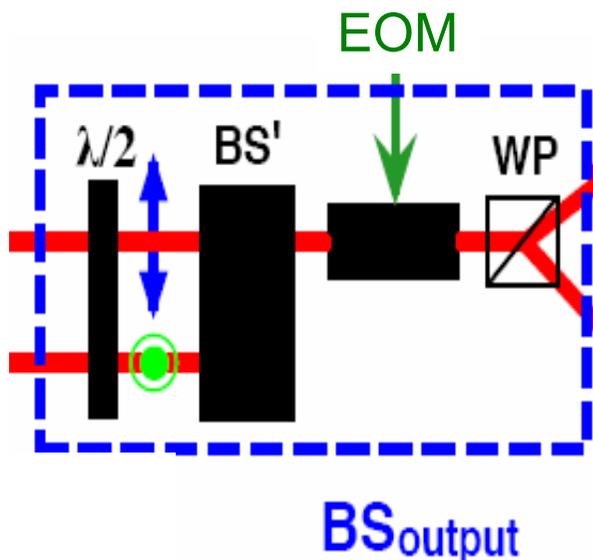
Oben:  
Fokussieren des Pumplasser auf  
die NV-center.

Links:  
Konfokaler Mikroskopaufbau

# Electro-optical Modulator (EOM)

- Realisiert offene/geschlossene Interferometerkonfiguration

Realisierung des Output-Beamsplitters

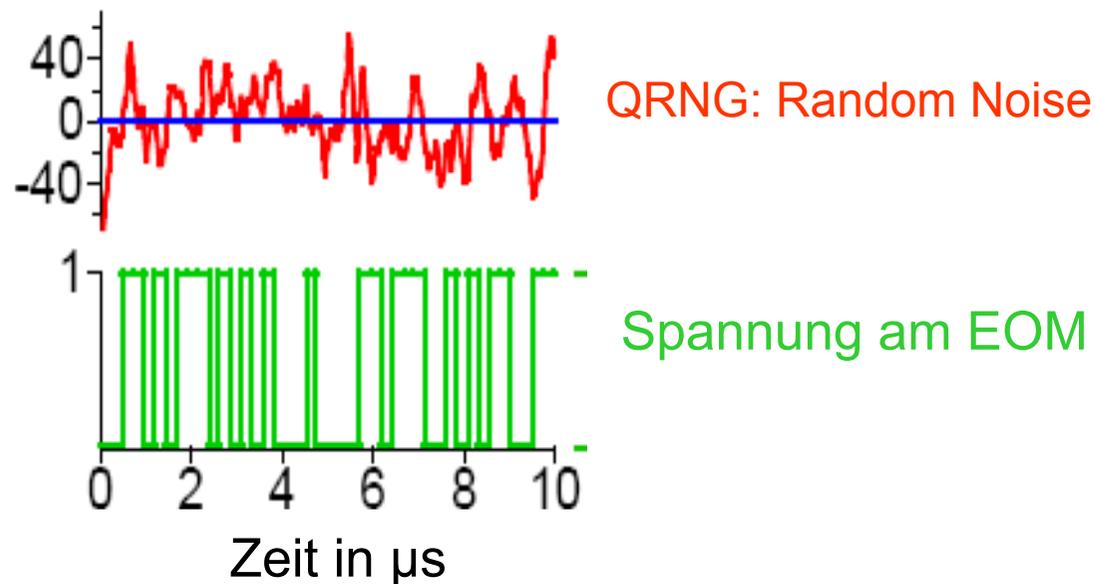


Drehung der Polarisierung

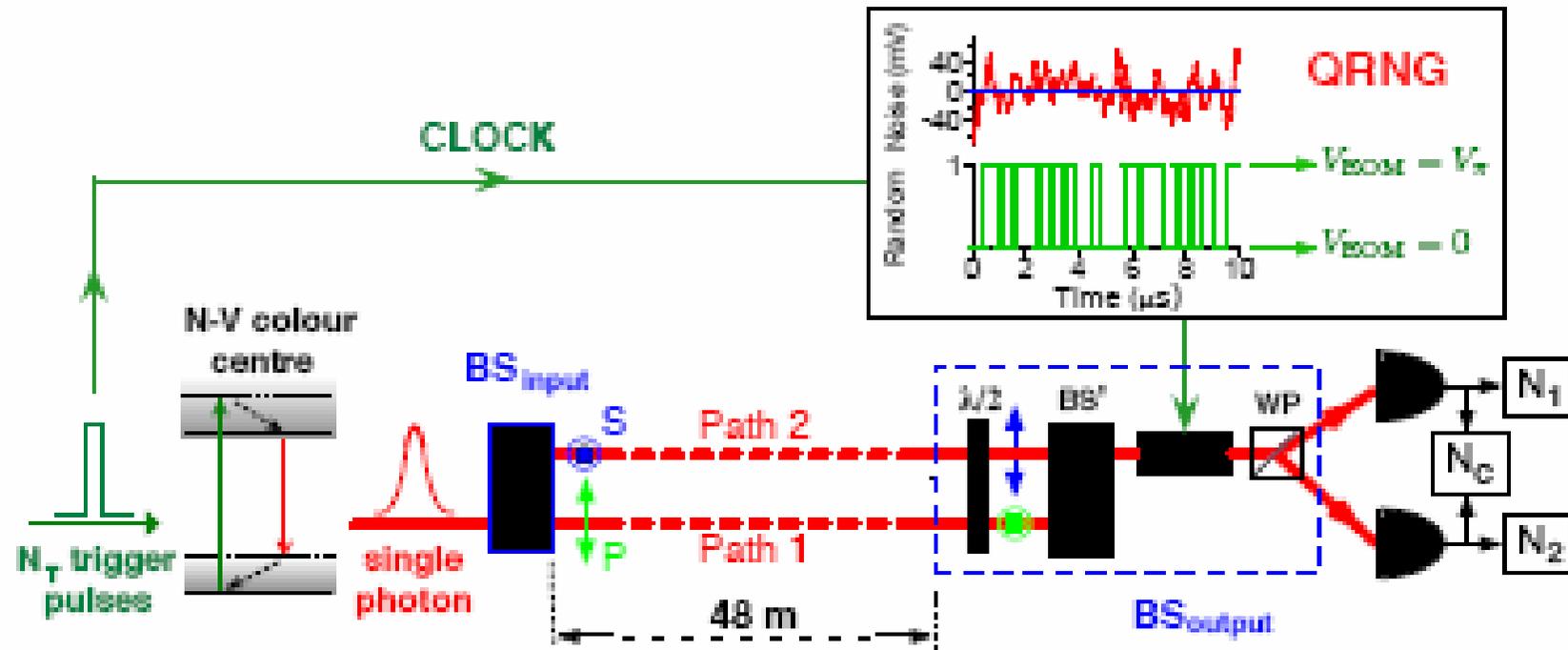
V am EOM	Nach BS	Nach EOM	Nach WP
$V=0$			
$V=V_{\pi}$			

# Quantum-Random-Number-Generator (QRNG)

- Steuerung der Spannung des EOM durch QRNG
- QRNG benutzt stark gedämpftes Laserlicht zu Erzeugung zufälliger Binärzahlen



# Experimenteller Aufbau



Quelle

Interferometer

Wahl der  
Konfiguration

Detektion

# Auswertung

## ■ Phasenunterschied

Realisierung durch verschiedene Neigungen des zweiten Beamsplitters

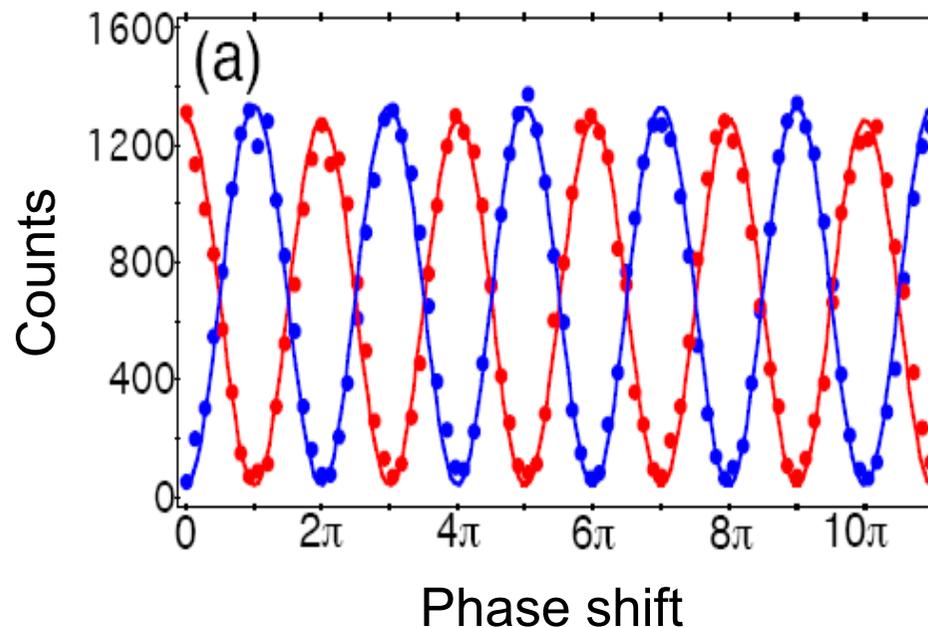


Abbildung: Vincent Jacques, et al.; Science **315**, 966(2007)

# Einzelphotonenverhalten

Haben wir es  
tatsächlich mit  
einzelnen Photonen zu  
tun?

$$\alpha = \frac{N_C N_T}{N_1 N_2}$$

- $N_C$  Koinzidenzen
- $N_T$  Trigger Impulse
- $N_1/2$  Photonen auf Detektor 1  
bzw. 2

Klassisch (Wellen) $\alpha \geq 1$	Einzelphotonen $\alpha = 0$	Im Experiment: $\alpha = 0.12$
--	--------------------------------	-----------------------------------

# Test der „Which-Way“- Information

- „Which-Way“-Information

$$I = \frac{N_1 - N_2}{N_1 + N_2}$$

- Messung, in dem einer der beiden Pfade blockiert wird.

- Ergebnis:

$I > 0.99$

➡ In der offenen Konfiguration wird tatsächlich gemessen, welchen Interferometerarm das Photon nimmt.

# Zusammenfassung

---

- Das Verhalten des Photons hängt von der Wahl der Observablen ab, auch wenn die Wahl erst nach Eintritt in das Interferometer erfolgt und **scheinbar** Spannungen mit der Relativitätstheorie auftreten.

# Literatur:

## **Gedankenexperiment (Originalvorschlag):**

- J.A. Wheeler, in Quantum Theory and Measurement, J.A. Wheeler, W.H. Zurek, Eds. (Princeton Univ. Press, Princeton, NJ, 1984), pp. 182-213

## **Experimentelle Realisierung:**

- *Delayed-Choice Gedanken Experiment Experimental Realization of Wheeler's*  
Vincent Jacques, et al.; Science **315**, 966(2007)

## **Einphotonenquellen:**

- *Stable Solid-State Source of Single Photons*  
Christian Kurtsiefer, et al., Physical Review Letters **85**, 290(2000)
- <http://xqp.physik.uni-muenchen.de/people/weinfurter.html>