



# Einzelne Photonen für die Quanteninformationsverarbeitung

Sebastian Knauer

Institut für Physik  
Humboldt-Universität zu Berlin

06.05.2009

- ① Motivation
- ② Einzelphotonenquellen
- ③ Quantenpunkte
- ④ NV-Zentren
- ⑤ Anwendung für die Quanteninformation

- 1980er erste Ideen für Quateninformation (z.B. 1982 Feynman: Bit  $\rightarrow$  quantenmechanische Zustände)
- „Quantum bit“  $\rightarrow$  „Qbit“
  - einzelne Qbits im Register
  - Quantenkohärenz
  - Erzeugung vieler Qbitsysteme (Erschaffen und Auslesen)
    - $\rightarrow$  Quantencomputer  
[DiVincenzo, Fortschr. Phys. 28 (2000), 771-783]
    - $\rightarrow$  CNOT-Gate  
[Knill, Laflamme, Milburn, Nature 409 (2001), 46-52]
- Quantenkryptographie, Quantenteleportation

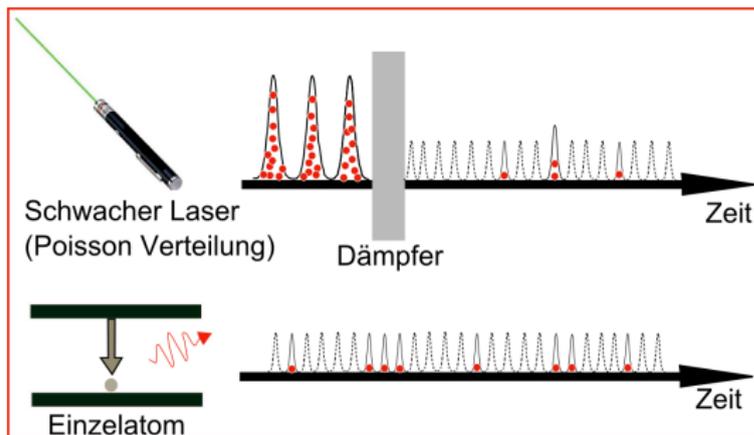


R. Feynman  
(1918 - 1988)

Warum Einzelphotonen interessant?

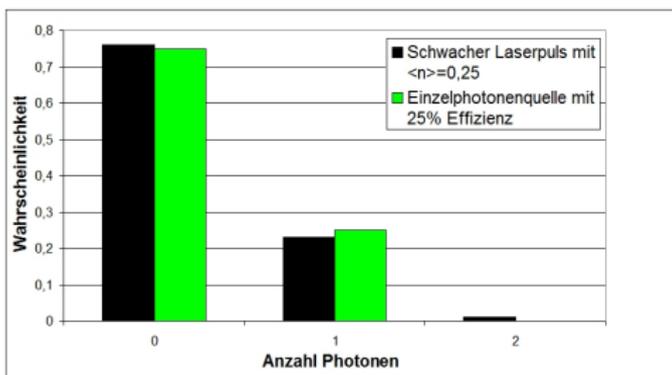
- Einfachheit Interferenz zu beobachten
- Transmitter für Quanteninformationen
- Datenübertragung ohne Abhörung (1984 Bennett & Brassard)
- Information über lange Strecken

# Einzelphotonenquellen

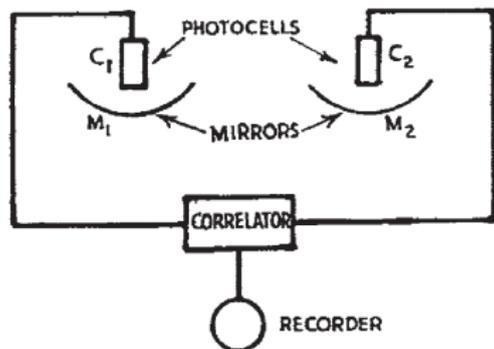


Anforderungen:

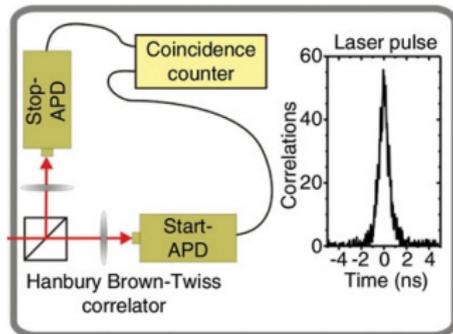
- Unterdrückung von Zwei-Photonen-Ereignissen
- identische Wellenpakete (identische Photonen)
- hohe Quanteneffizienz
- einzelne Photonen interferieren



# Einzelphotonenquellen

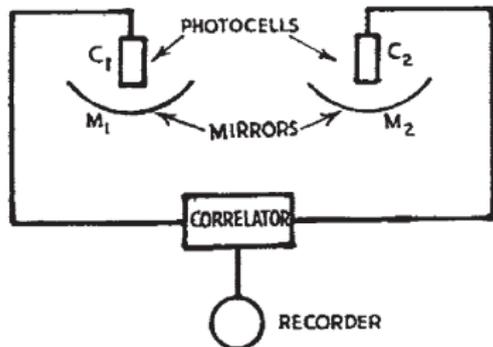


[Hanbury-Brown, Twiss; Nature; 1956; Vol. 127; 27-29]

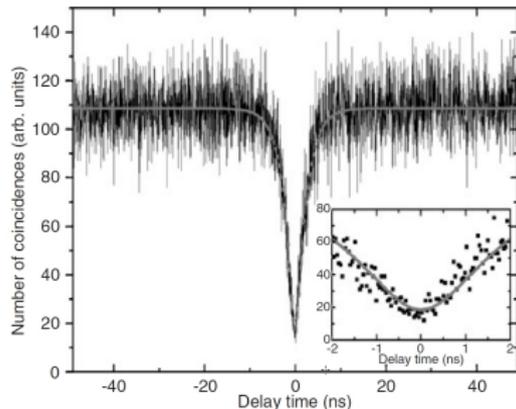


[New Journal of Ph. 6 (2004) 90; Aichele, Zwiller, Benson]

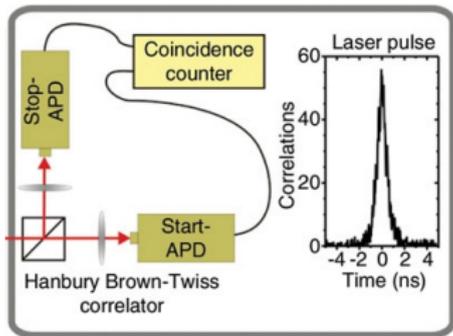
# Einzelphotonenquellen



[Hanbury-Brown, Twiss; Nature; 1956; Vol. 127; 27-29]



[New Journal of Ph. 6 (2004) 90; Aichele, Zwiller, Benson]



[New Journal of Ph. 6 (2004) 90; Aichele, Zwiller, Benson]

Intensitätskorrelation:  $\langle : I(0)I(0+t) : \rangle$

$$g^{(2)}(\tau) = \frac{\langle a^+(0)a^+(t)a(t)a(0) \rangle}{\langle a^+a \rangle^2}$$

# Einzelphotonenquellen

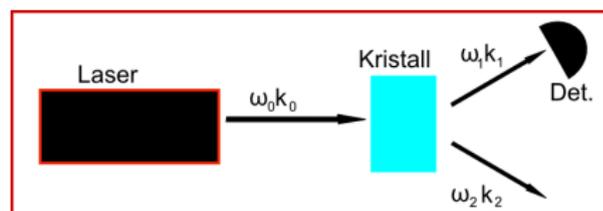
Arten zur Erzeugung von Einzelphotonen:

(a) Down conversion:

[z.B. Mandel, Wolf, Cambridge University Press, 1995]

Probleme:

- stat. Antreffen
- 2 Photonen in einem Arm
- hohe Pumpraten



Energie- und Impulserhaltung

# Einzelphotonenquellen

Arten zur Erzeugung von Einzelphotonen:

(a) Down conversion:

[z.B. Mandel, Wolf, Cambridge University Press, 1995]

(b) Systeme mit diskretem Energielevel:

- Atome/Ionen

[z.B. Kimble et al., Phys. Rev 39, 691 (1977)]

- Moleküle

[z.B. A. Kiraz et al., PRL 94, 223602]

- Nanokristalle

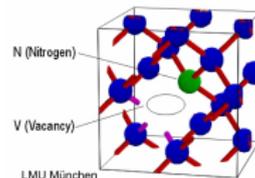
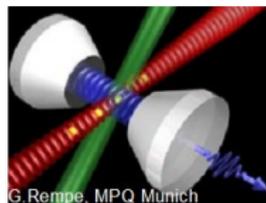
[z.B. P. Michler et al., Nature 406, 968]

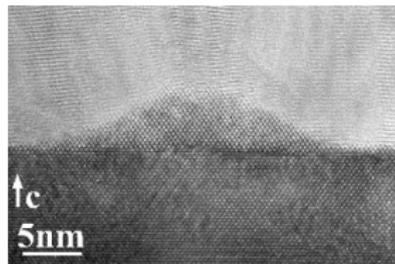
- HL Quantenpunkte

[z.B. Michler et al., Science 290, 2282]

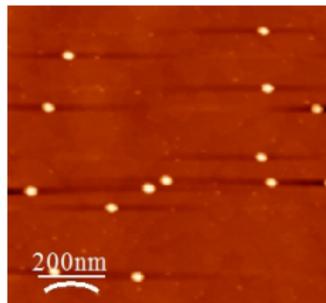
- Defektzentren in Diamanten (NV-Zentren)

[z.B. C. Kurtsiefer et al., PRL 85, 290]





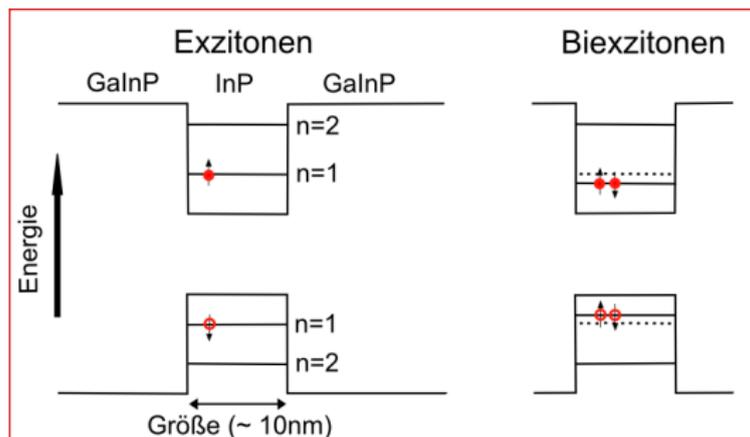
[TEM: CdSe QP auf ZnSe [CEA Grenoble]]



[AFM Bild von InP Quantenpunkten auf InGaP]

Herstellungsmethoden (Auswahl):

- Ausätzen von Pfosten in 2 dim. HL-Schicht
- selbstorganisierende Inseln



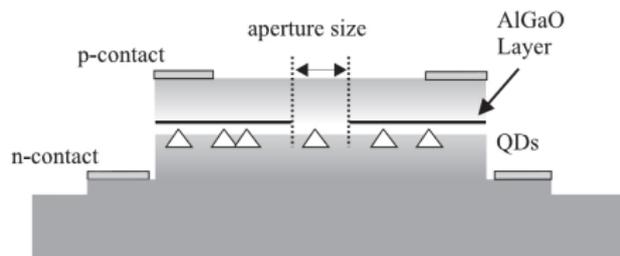
[Schematische Darstellung Exzitonen & Biexzitonen]

Eigenschaften:

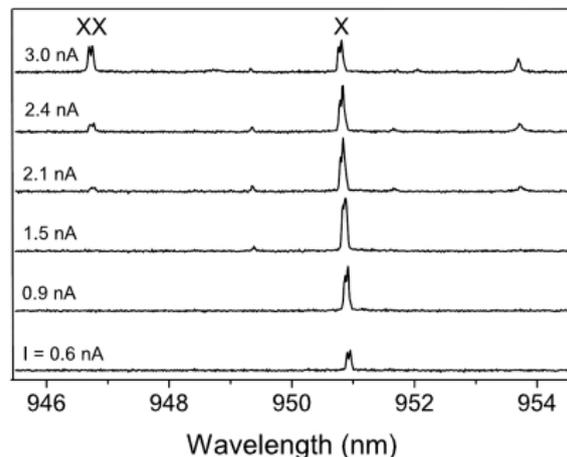
- Elektronen und Löcher durch HL Heterostrukturen begrenzt
- diskrete Energieniveaus
- Rekombination von einzelnen Elektronen und Löchern bilden diskrete spektrale Linien (vgl. Atome)
- Integrierbarkeit in größere Strukturen

## Arten der Anregung von Quantenpunkten:

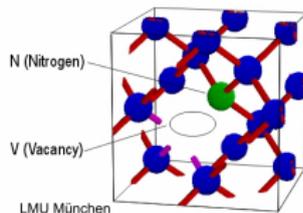
- Laser
- Elektrisch:



[Scholz, Büttner, Benson; Opt. Exp.; Vol. 15;  
No.15; 23.07.07]



[Scholz, Büttner, Benson; Opt. Exp.; Vol. 15;  
No.15; 23.07.07]

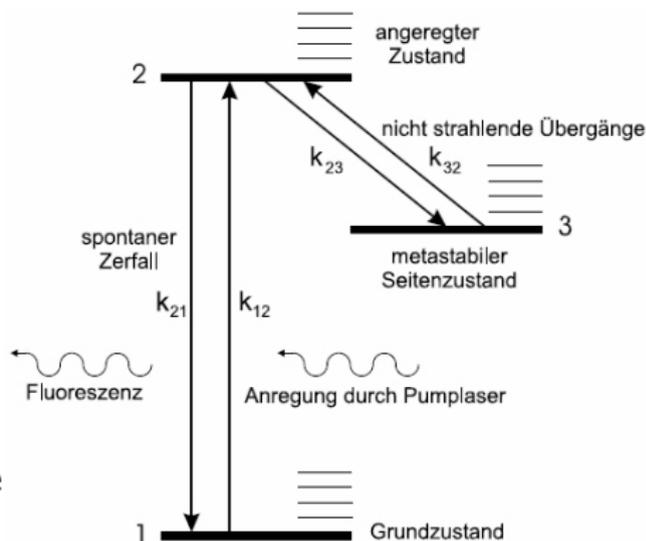


## Vorteile:

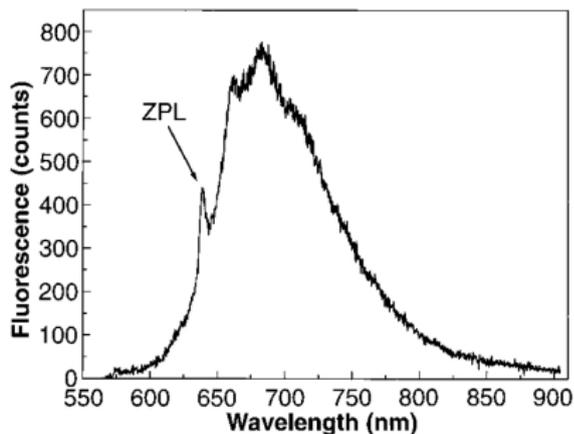
- großer Absorptionsquerschnitt bei Anregungswellenlänge
- Verwendung bei Raumtemperatur
- kurze Lebenszeit des angeregten Zustandes
- Strahlungswahrscheinlichkeit  $\phi \approx 1$

## Nachteil:

- kein schmalbandiges Spektrum

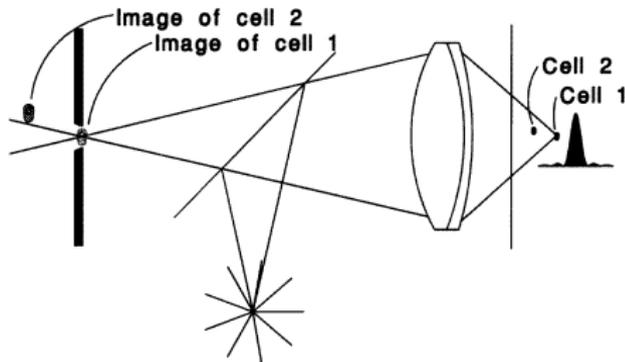


# NV-Zentren



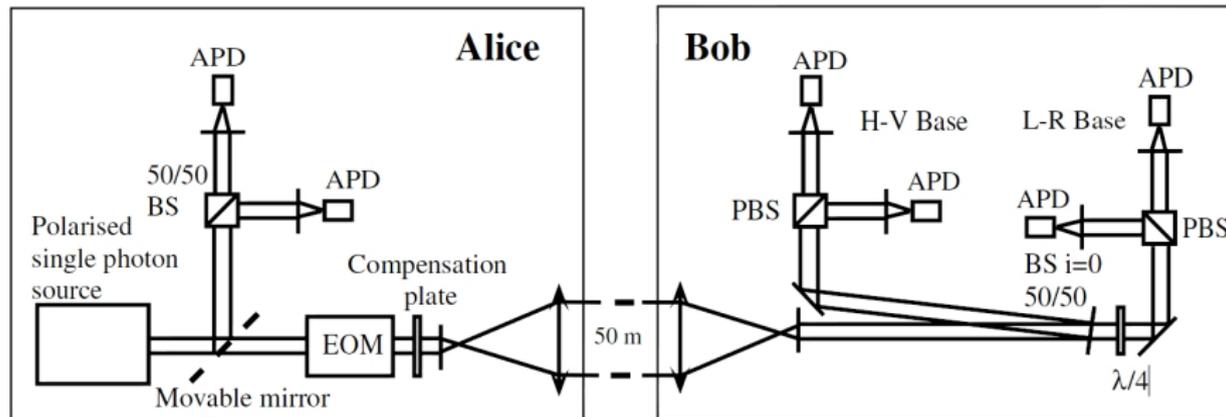
[Gruber et al.; science;  
Vol. 276; 27.06.97]

## Konfokales Mikroskop:



[R. H. Webb, Rep.  
Prog. Phys. 1996]

## 1. Quantenkryptographie (Transfer von Quanteninformationen in der Polarisation)



[Beveratos et al.; Phys. Rev. Lett.; Vol. 89; 18; 28.10.02]

- 50 m Übertragungsstrecke
- 7700 bits/s
- NV-Zenter (Lebenszeit oberes Niveau: 23 ns; ZPL: 637 nm)
- Raumtemperatur

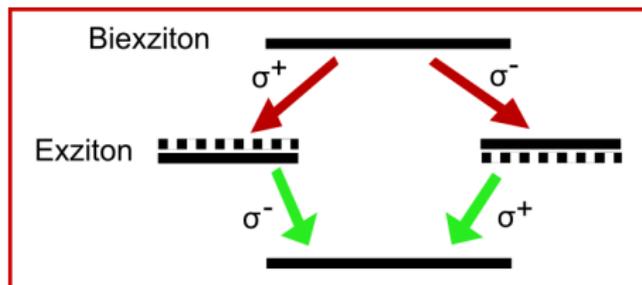
1. Quantenkryptographie  
(Transfer von Quanteninformationen in der Polarisation)
2. Quantencomputer
  - „One-way quantum computing“  
[Walther, Zeilinger et al.; Nature; Vol. 434; 10.03.05]
  - C-NOT Gatter [Okamoto et al.; Phys. Rev. Lett.; 95; 210506; 18.1.05]

# Anwendungen

1. Quantenkryptographie  
(Transfer von Quanteninformationen in der Polarisation)

2. Quantencomputer

Weitere Notwendigkeit:  
Verschränkte Einzelphotonen



$$|\phi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\sigma^+\rangle_1 |\sigma^-\rangle_2 + |\sigma^-\rangle_1 |\sigma^+\rangle_2)$$

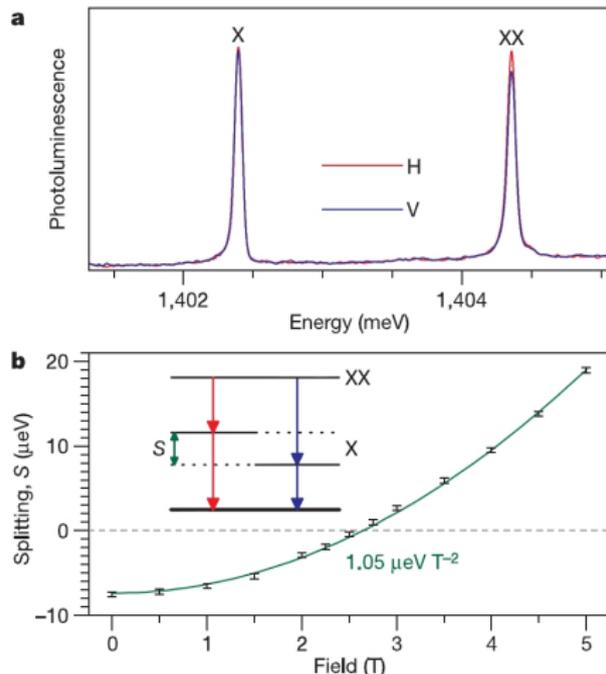
# Anwendungen

1. Quantenkryptographie  
(Transfer von Quanteninformationen in der Polarisation)

2. Quantencomputer

Weitere Notwendigkeit:  
Verschränkte Einzelphotonen

- Quantenpunkte
- Exzitonenniveaus nicht gleich
- Exzitonenniveaus durch MF angeglichen (auch durch Piezoelement möglich)



[Shields et al.; Nature; Vol. 439; 12.01.06]

1. Quantenkryptographie  
(Transfer von Quanteninformationen in der Polarisation)
2. Quantencomputer

Weitere Notwendigkeit:  
Verschränkte Einzelphotonen

Mittelfristige Ziele:

- viele ununterscheidbare Photonen von hoher Effizienz
- verschränkte Photonenpaare mit hohem Verschränkungsgrad

# Anwendungen

1. Quantenkryptographie  
(Transfer von Quanteninformationen in der Polarisation)
2. Quantencomputer

Weitere Notwendigkeit:  
Verschränkte Einzelphotonen



- NV-Zentrum
- 10°C bis 40°C
- 700 nm
- $g^{(2)}(0) < 0,1$

[Quantum Communications Victoria,  
The University of Melbourne]

- Arten: down conversion & Systeme mit diskretem Energielevel (Bsp. NV-Zentren und Quantenpunkte)
- Antibunching (Nachweis von Einzelphotonen)
- „Echte“ Einzelphotonenquellen erfüllen bereits heute die meisten Anforderungen für die Anwendung in der Quanteninformaton.
- Anwendungen realisiert (bes. Quantenkryptographie)

Ich bedanke mich für Ihre Aufmerksamkeit.

▶ Kimble

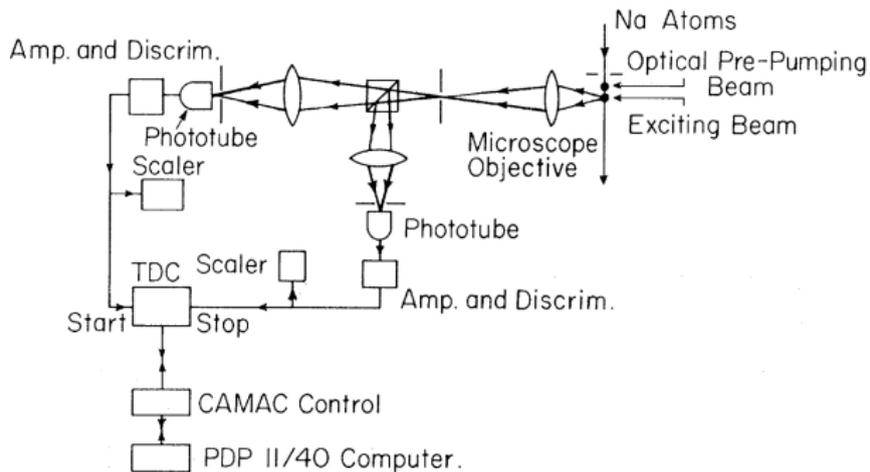
▶ wire

▶ CNOT

▶ Dichtem.

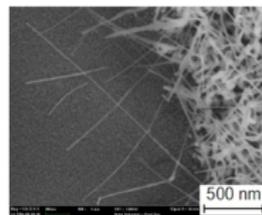
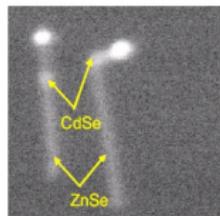
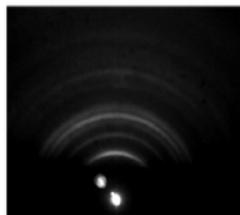
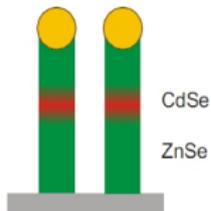
▶ Yamamoto

# Set up Kimble



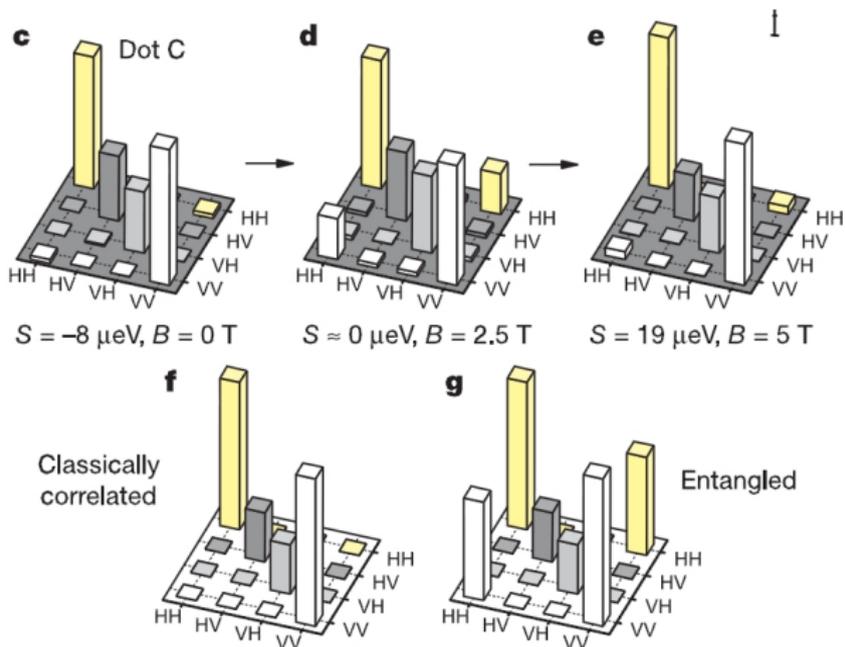
[Kimble et al., Phys. Rev 39, 691 (1977)]

# Nanowire



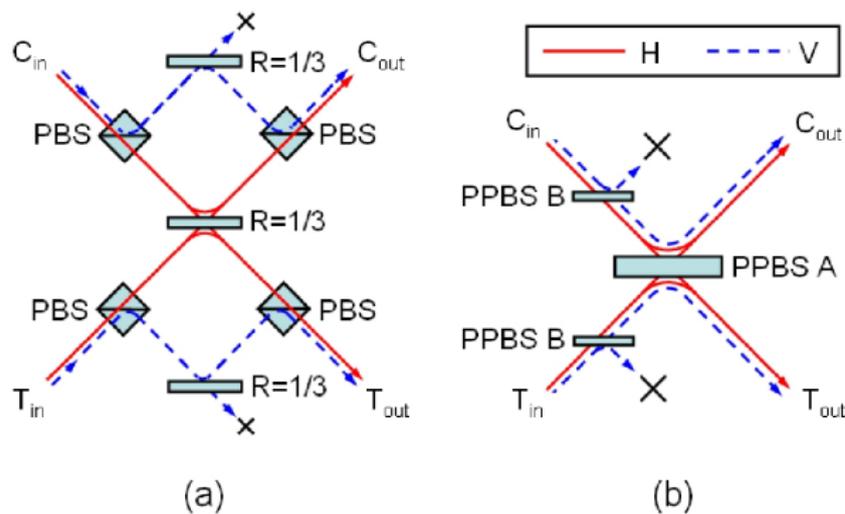
► Zurück

# Dichtematrix



[Shields et al.; Nature; Vol. 439; 12.01.06]

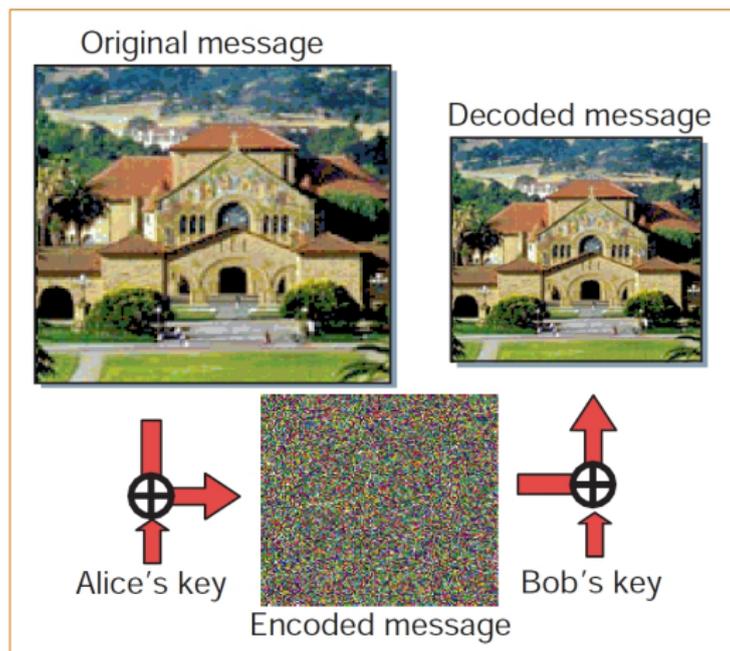
# CNOT



[Okamoto et al.; Phys. Rev. Lett.; 95; 210506; 18.1.05]

► Zurück

# Exp. Yamamoto et al.



[Yamamoto, Santori et al.; NATURE; VOL 420; 19/26.12. 2002]