Die Quantennatur des Lichts

von kohärenter Strahlung zu einzelnen Photonen

Axel Kuhn
Max-Planck-Institut für Quantenoptik
Garching bei München

Die Quantennatur des Lichts

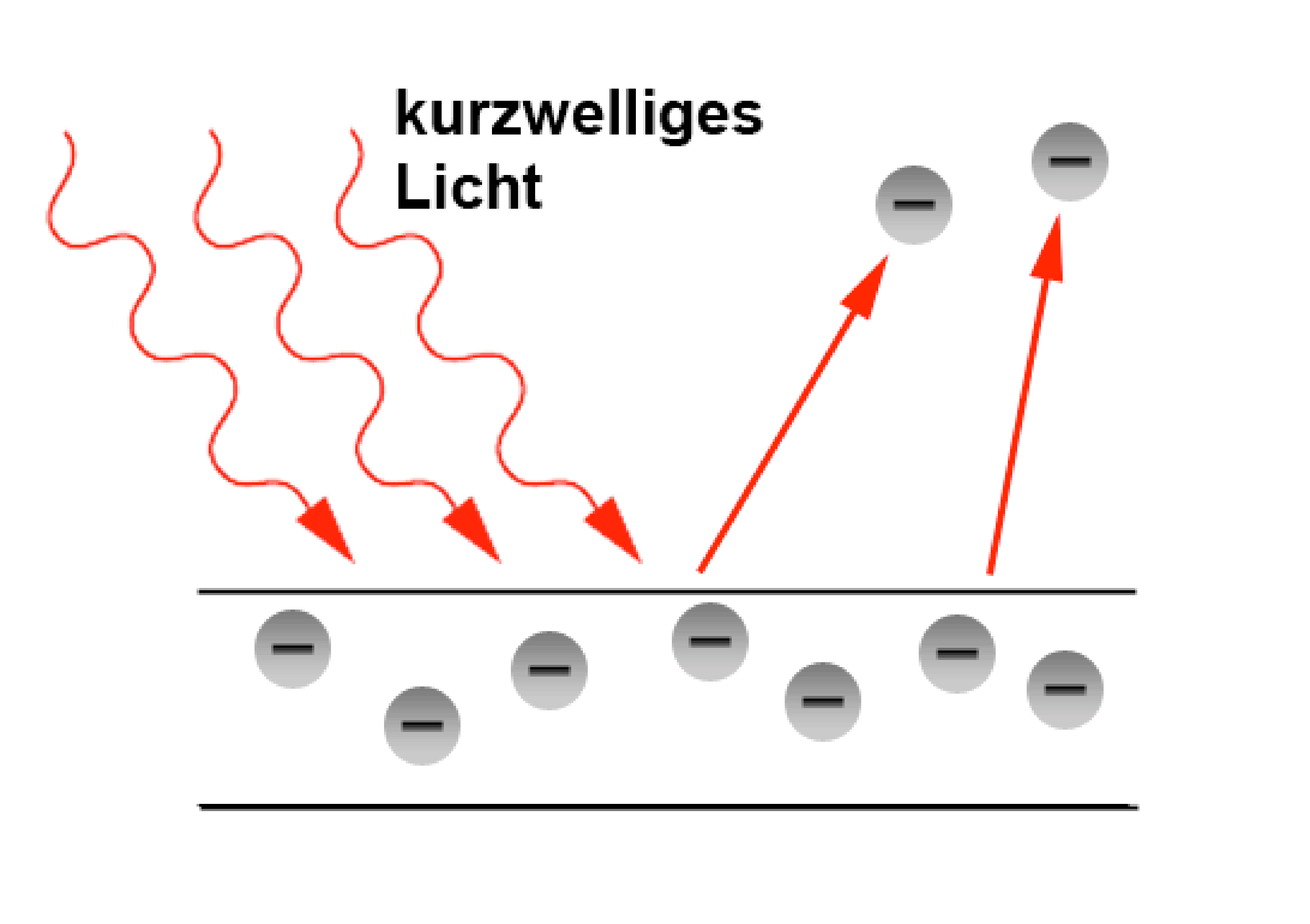
- *Photoelektrischer Effekt (Einstein 1905)*
- *Lichtquanten* $\longrightarrow$ *Photonen*
- *Thermische Strahlung – Bunching*
- *Kohärente Strahlung*
- *Einzelne Photonen – Antibunching*
- *Von nicht-klassischem zu klassischem Licht*
- *Interferenz unabhängiger Photonen*

Photoelektrischer Effekt

$$E_{kin} = h\nu - E_{bind}$$

$$\downarrow$$

Licht quantisiert?



A. Einstein

ANNALEN DER PHYSIK.

6. *Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt;* *von A. Einstein.*

Zwischen den theoretischen Vorstellungen, welche sich die Physiker über die Gase und andere ponderable Körper gebildet haben, und der Maxwellschen Theorie der elektromagnetischen Prozesse im sogenannten leeren Raume besteht ein tiefgreifender formaler Unterschied. Während wir uns

[...]

den Frequenz) keine merkliche nicht von Ionisation begleitete Absorption aufweist.

Bern, den 17. März 1905.

---

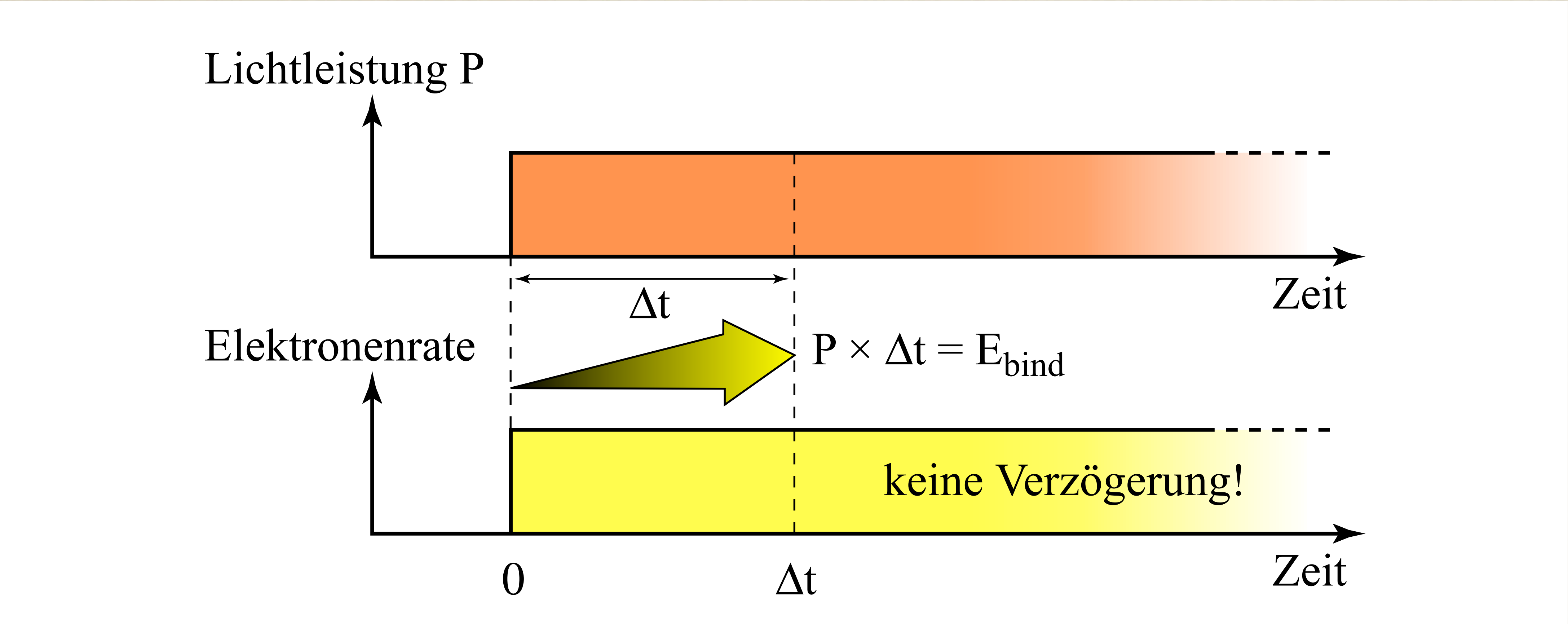
1) J. Stark, Die Elektrizität in Gasen p. 57. Leipzig 1902.

2) Im Gasinnern ist die Ionisierungsspannung für negative Ionen allerdings fünfmal größer.

(Eingegangen 18. März 1905.)

Photoelektrischer Effekt

- *Austrittsarbeit* $E_{kin} = h\nu - E_{bind}$
  $\Rightarrow$ *Wechselwirkung quantisiert*
- *Keine Verzögerung* $\Rightarrow$ *Lichtquanten*



Was ist ein “Photon” ?

Die ganzen Jahre bewusster Grübelei haben mich der Antwort der Frage

“Was sind Lichtquanten”

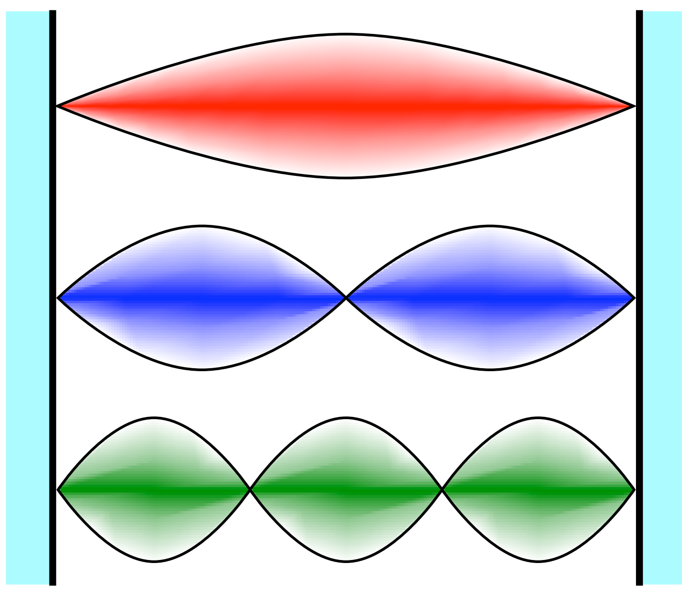
nicht näher gebracht. Heute glaubt zwar jeder Lump, er wisse es, aber er täuscht sich. . .

ALBERT EINSTEIN
(in einem Brief an M. Besso, 1951)

Ein “Photon”...

- *war da, wenn der Detektor klickt (fapp).*
- *ist ein Teilchen Licht (Newton).*
- *ist die kleinste Menge Licht einer Frequenz.*
- *ist ein Energiequant einer Feldmode (Planck).*
- *ist nicht teilbar.*
- *interferiert nur mit sich selbst (Dirac).*

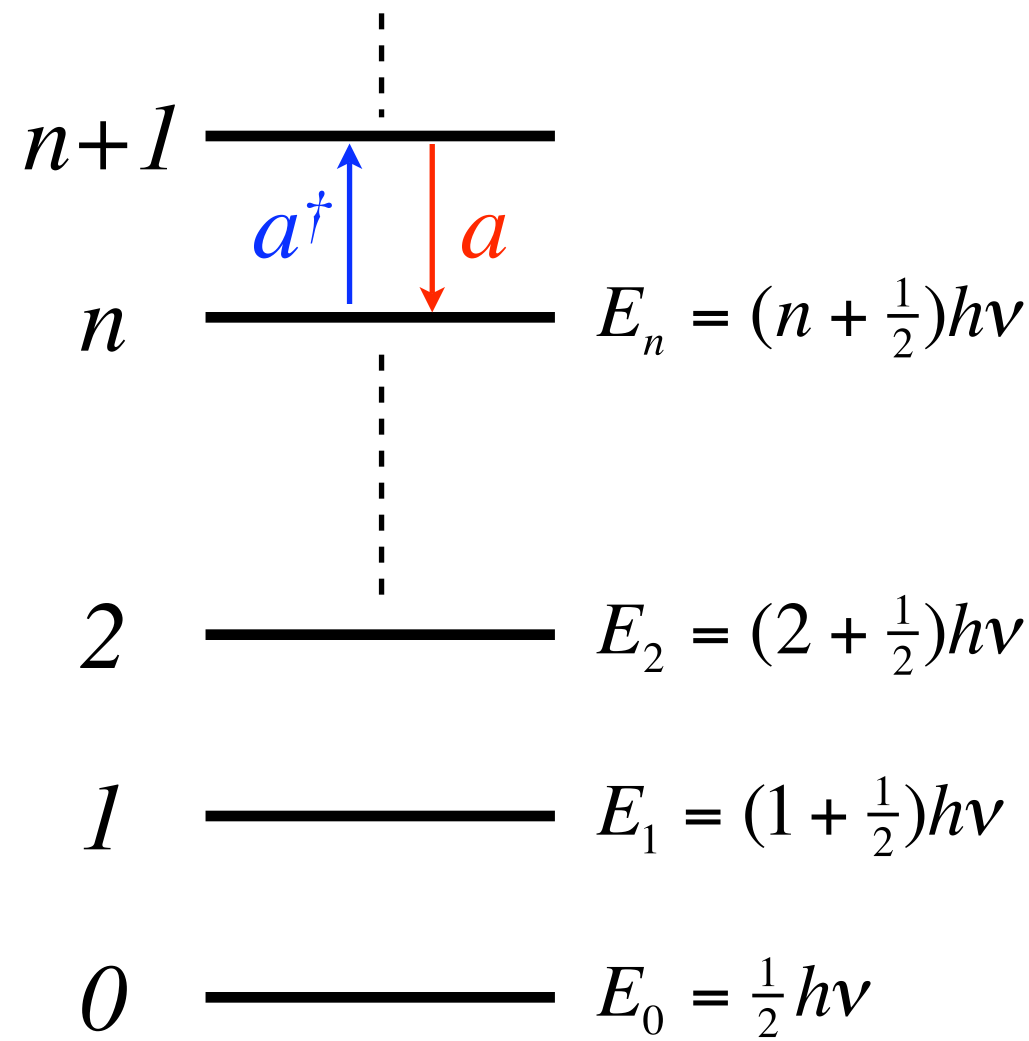
Quantisierung des Lichtfelds



$$\nu_1 = \frac{c}{2L}; \quad \nu_2 = 2\frac{c}{2L}; \quad \nu_3 = 3\frac{c}{2L}$$

$$\nu_m = m\frac{c}{2L}$$

Photonenzahlzustände



Quantisierung des Lichtfelds

$$E_{Photon} = h\nu = h\frac{c}{\lambda}$$

$$\downarrow \text{ bei 500 nm}$$

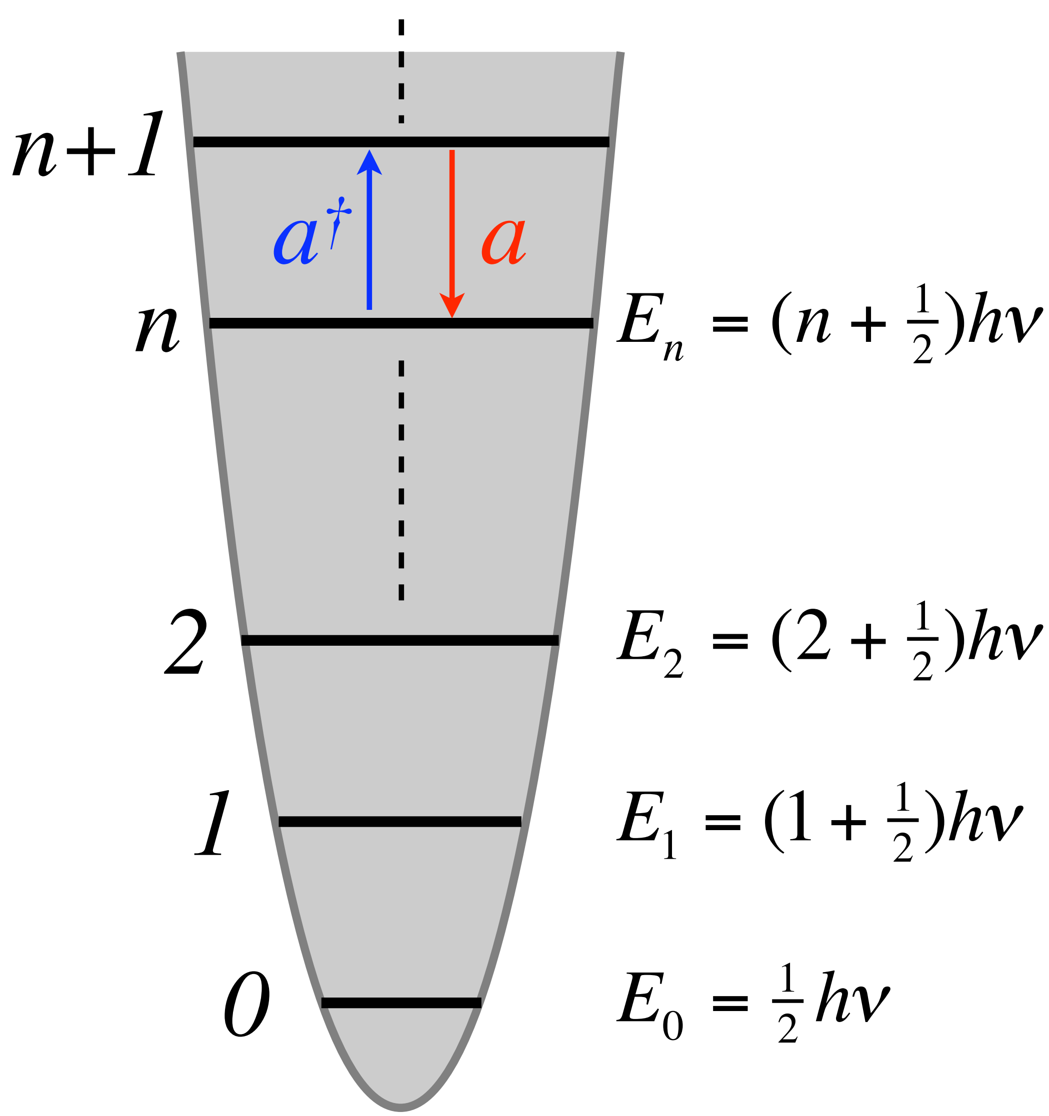
$$0,4 \times 10^{-18}\ Joule = 2,5\ eV$$

$$\downarrow$$

$$5\ mW\ \text{Laserpointer} \rightarrow 13 \times 10^{15}\ \frac{\text{Photonen}}{\text{Sekunde}}$$

Quantisierung des Lichtfelds

Fock-Zustände: $|n\rangle$



- *harmonischer Oszillator:*

  $\Delta E = h\nu$

- *Leiteroperatoren:*

  $a|n\rangle = \sqrt{n}\,|n-1\rangle$ und $a^\dagger|n-1\rangle = \sqrt{n}\,|n\rangle$

- *Photonenzahloperator:*

  $n = \langle n|a^\dagger a|n\rangle$

- *Superpositionszustände:*

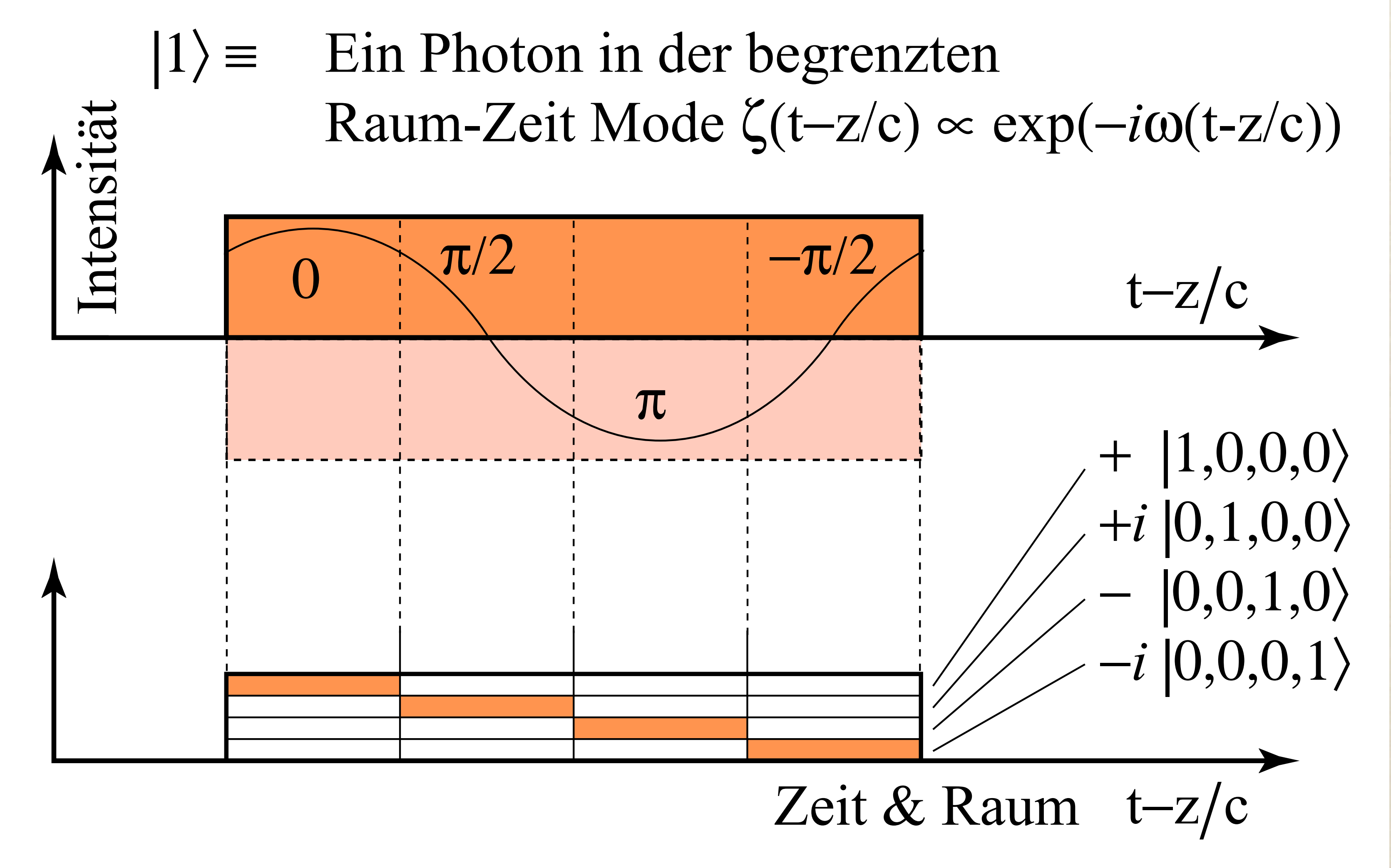
  $|\psi_{licht}\rangle = \sum_n c_n\,|n\rangle$

Photonen im freien Raum

- *Raum-Zeit Moden (1D): ζ(t-z/c)*

- *freies Photon:*

  Raum-Zeit Mode im Zustand $|1\rangle$.



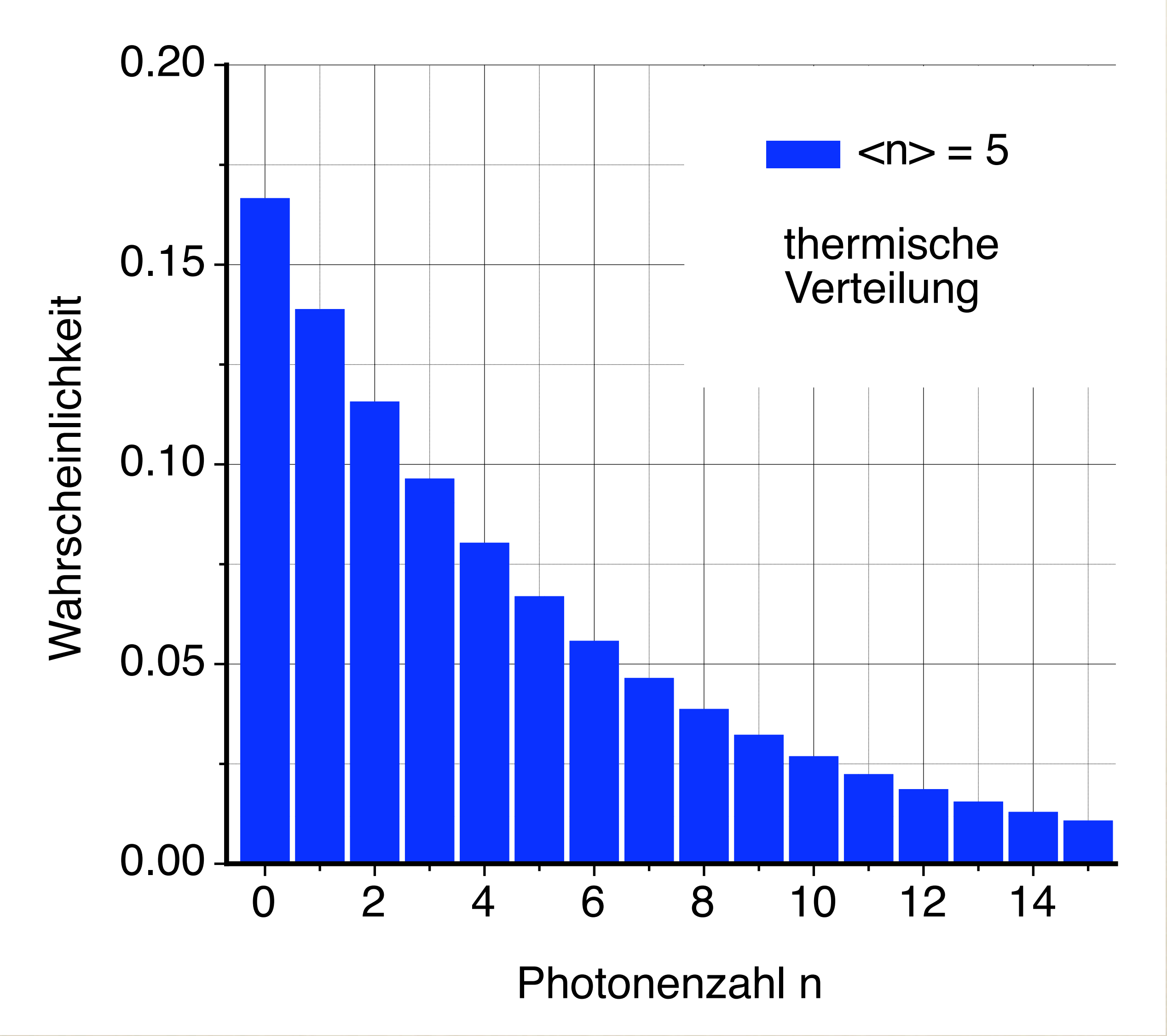
- *Zeitauflösung:*

  Superposition aneinander gereihter Raum-Zeit Moden

Thermische Strahlung

- *Boltzmannverteilung*

$$p(T,n) \propto \exp\left(-n\frac{h\nu}{k_B T}\right)$$



- *mittlere Photonenzahl* $\overline{n}(T)$

$$p(\overline{n},n) = \frac{\overline{n}^n}{(\overline{n}+1)^{n+1}}$$

- *Detektion:* $a\,|n\rangle = \sqrt{n}\,|n\text{-}1\rangle$

$$\rightarrow p_{cond}(\overline{n},n) = \frac{p(\overline{n},n+1)\times(n+1)}{Norm} = \frac{\overline{n}^n}{(\overline{n}+1)^{n+1}} \times \frac{n+1}{\overline{n}+1}$$

Thermische Strahlung

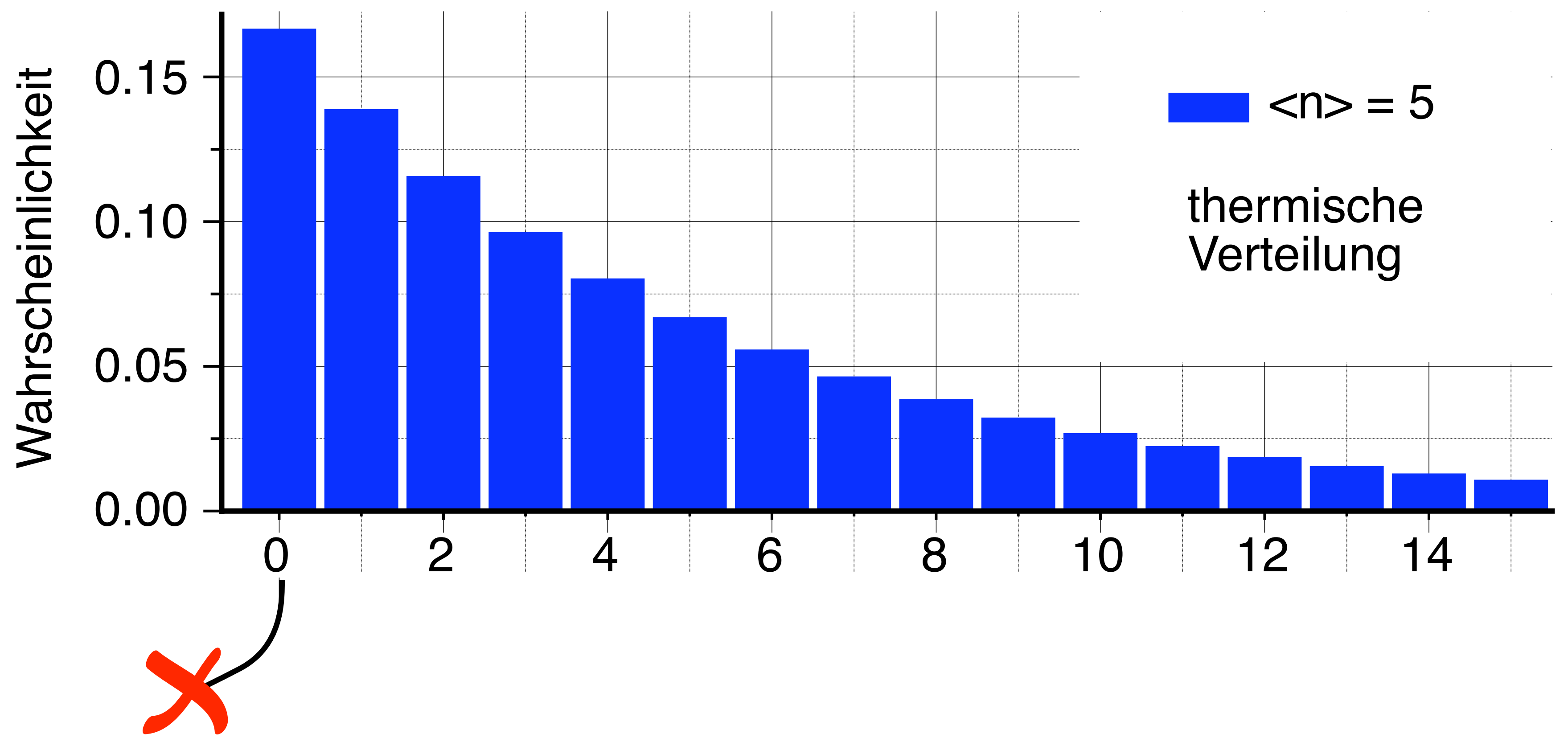
Detektion eines Photons

n p(n)

↓

p(n-1)

neue Verteilung!



Thermische Strahlung

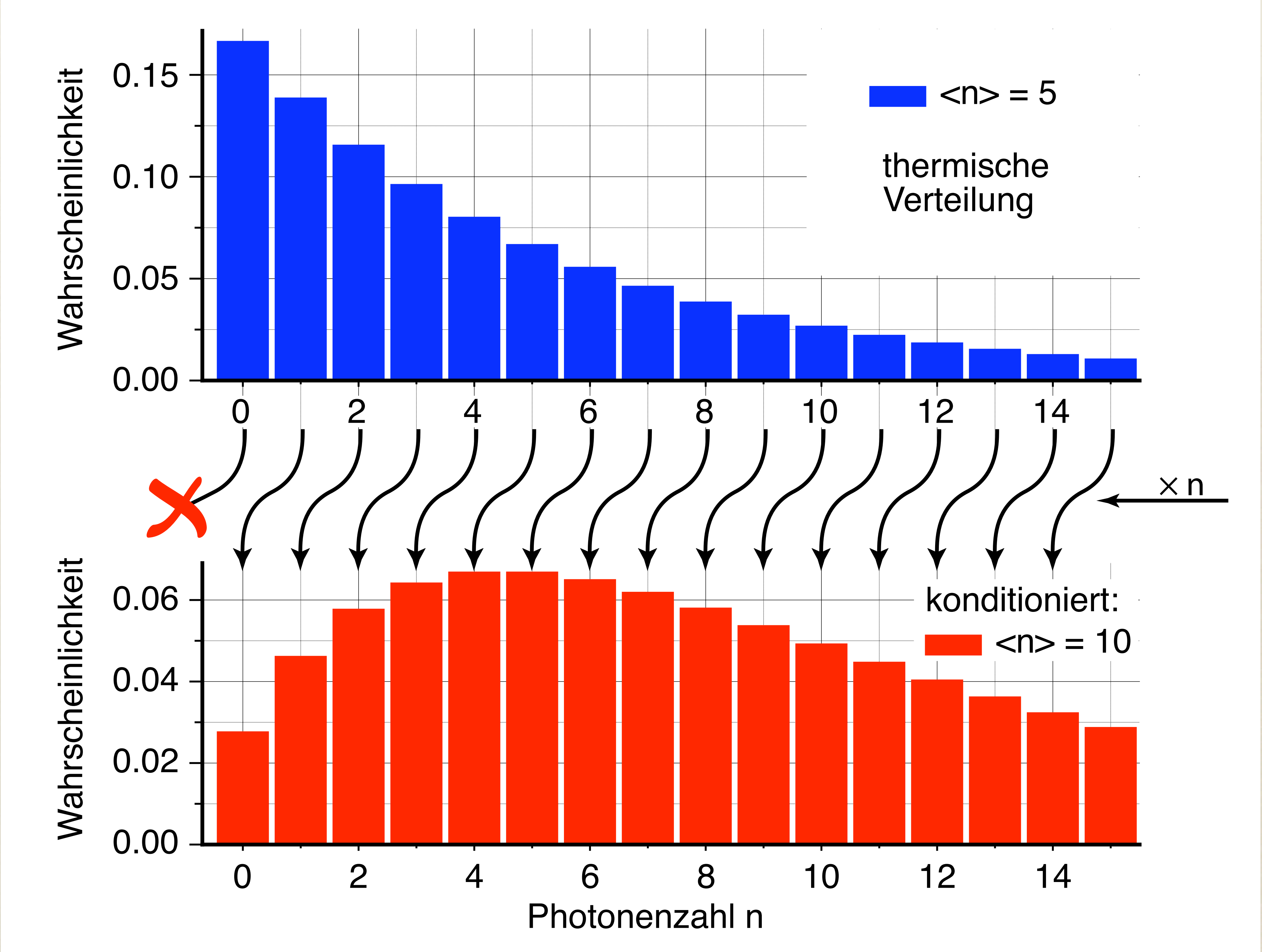
Detektion eines Photons

<n>

↓

2×<n>

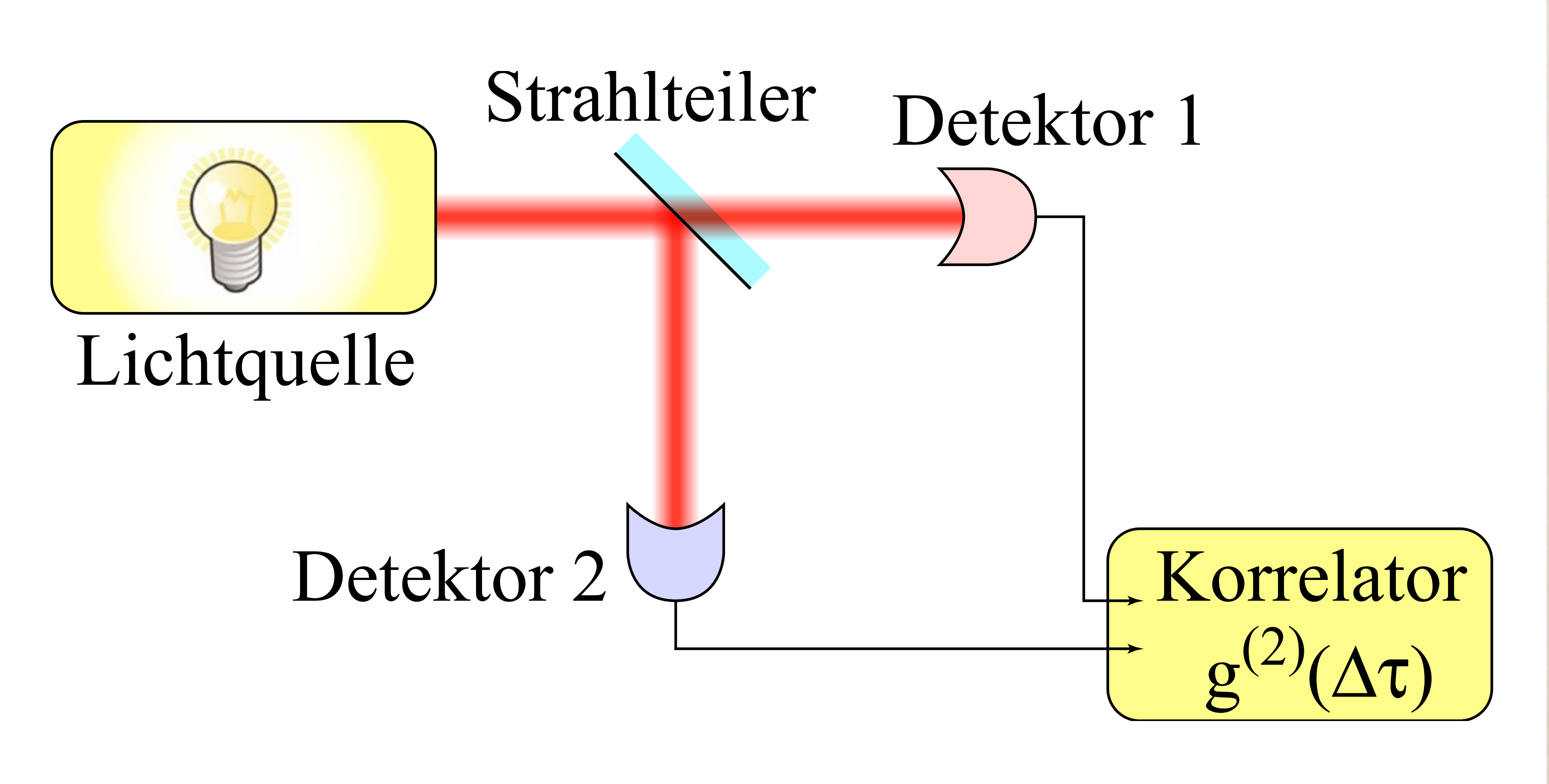
doppelte Photonenzahl!



Photonenzahl-Statistik

- Hanbury Brown & Twiss (1954/1956):

  Korrelation im Licht entfernter Sterne

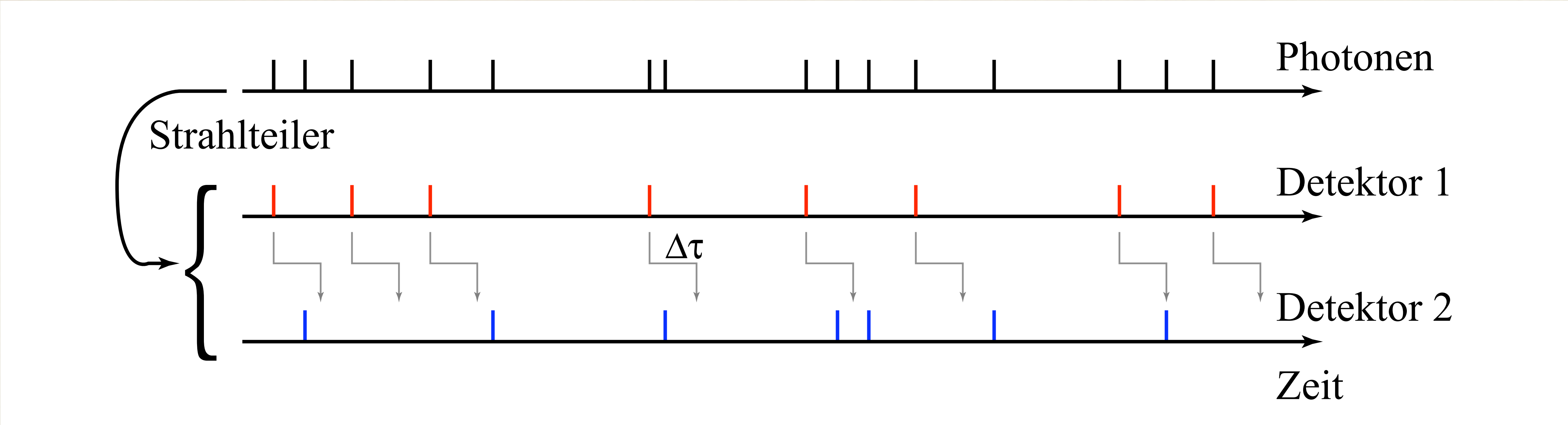


- Konditionierte Wahrscheinlichkeit:

$$g^{(2)}(\Delta\tau) = \frac{\langle p(t)p(t+\Delta\tau)\rangle_t}{\langle p(t)\rangle_t^2} = \frac{\text{Wahrscheinlichkeit für zweites Photon im Abstand } \Delta\tau}{\text{Mittlere Photonenzählrate}}$$

Photonenzahl-Statistik

$$g^{(2)}(\Delta\tau) = \frac{\langle p(t)p(t+\Delta\tau)\rangle_t}{\langle p(t)\rangle_t^2} = \frac{\text{Wahrscheinlichkeit für zweites Photon im Abstand } \Delta\tau}{\text{Mittlere Photonenzählrate}}$$



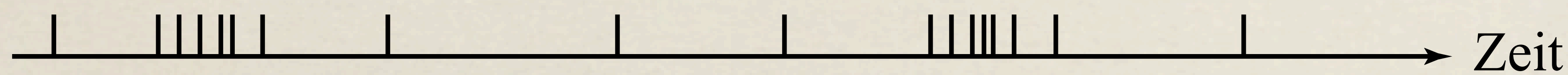
Sonderfall: Keine Korrelationen (konstante Rate)

$$p(t)=const. \Leftrightarrow g^{(2)}(\Delta\tau)=1$$

Photonenzahl-Statistik

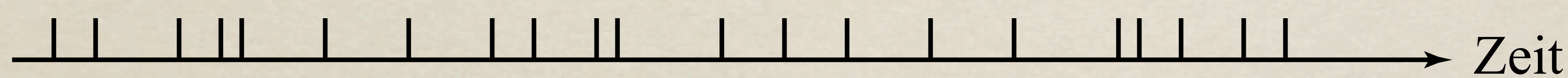
- *Korrelationen: Bunching (thermische Strahlung)*

  $g^{(2)}(0)>1$



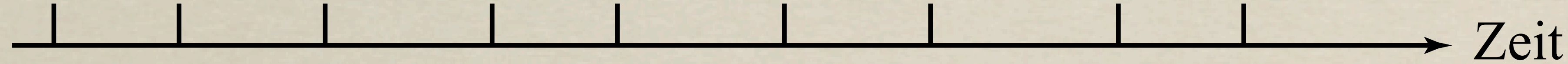
- *Unkorreliert: Poisson-Verteilung (Laser)*

  $g^{(2)}(\Delta\tau)=1$



- *Mindestabstand: Antibunching (Einzelphotonen)*

  $g^{(2)}(0)< g^{(2)}(\Delta\tau)$



Thermisches Bunching

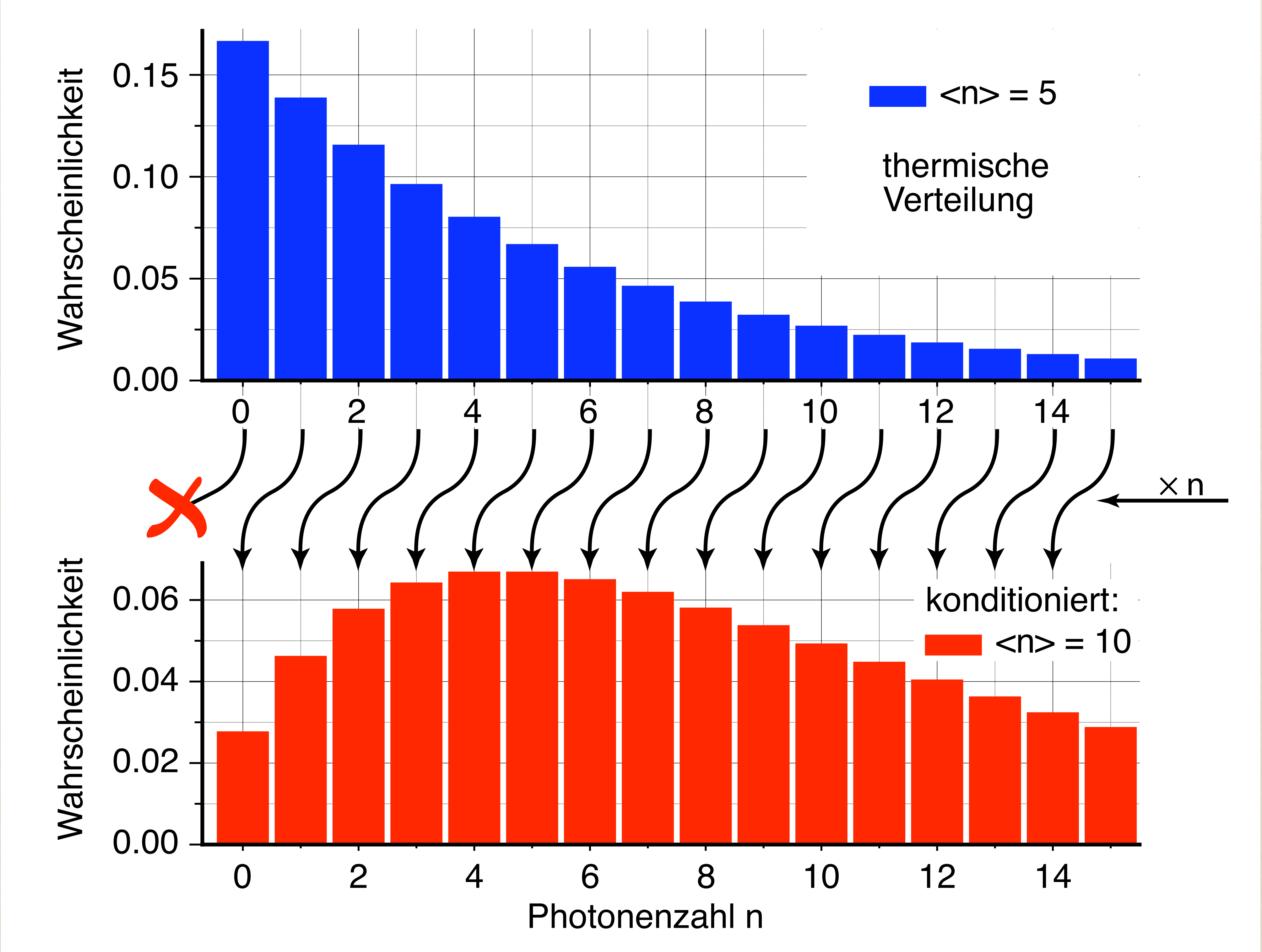
Detektion eines Photons

<n>

↓

2×<n>

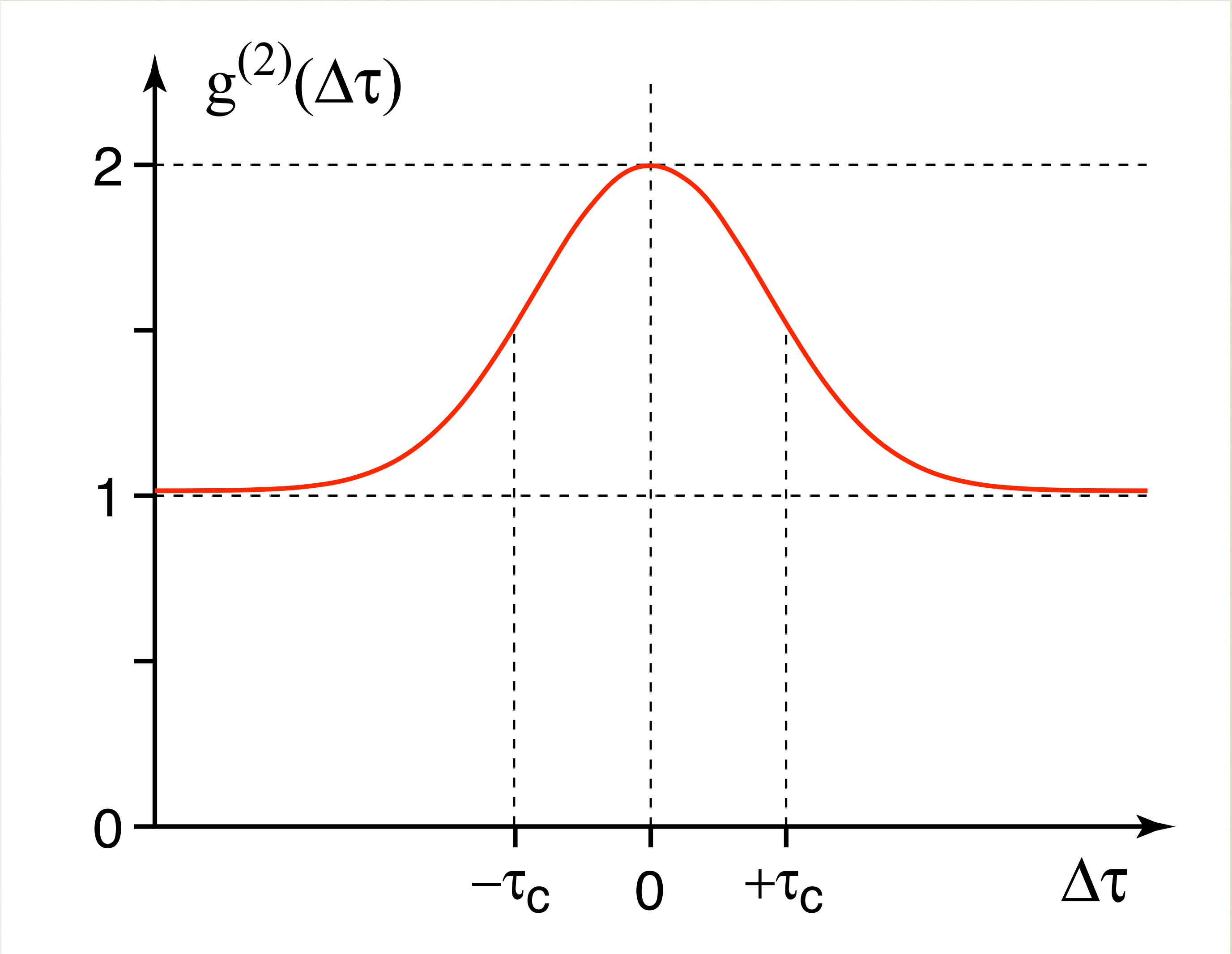
Doppelte Detektions-wahrschein-lichkeit!



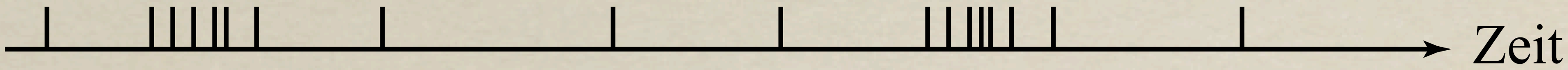
Thermisches Bunching

- *Doppelte Photonenzahl nach jeder Detektion*

$\Rightarrow$ $\boxed{g^{(2)}(0)=2}$



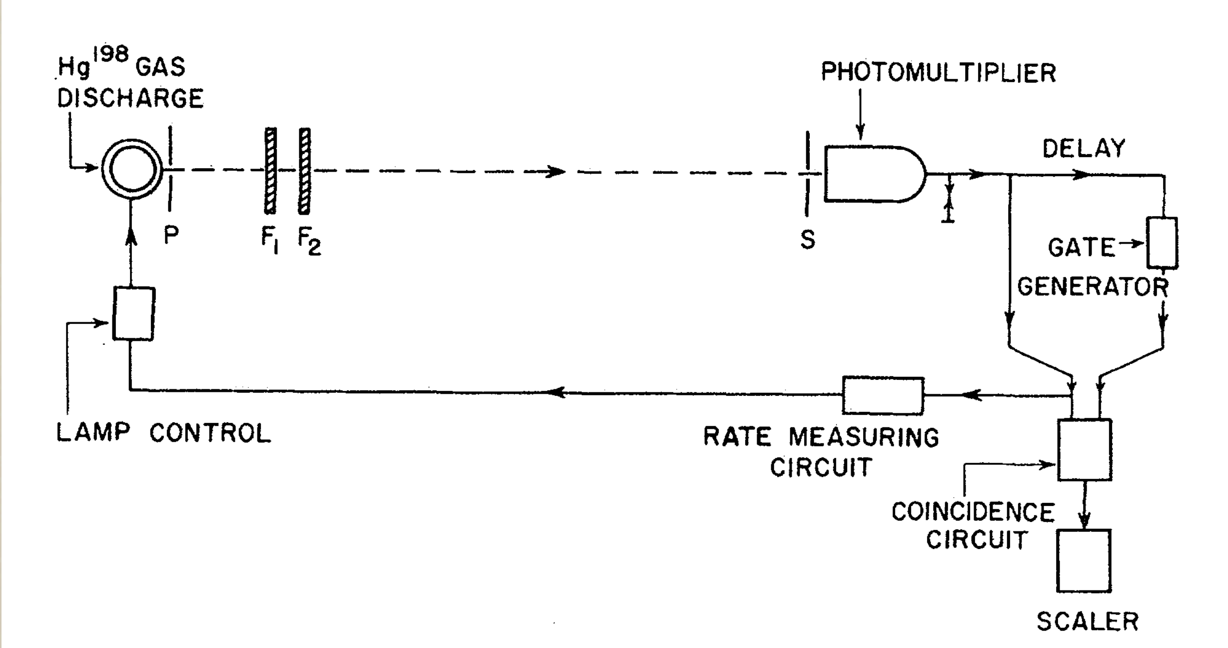
- *Dauer* $\tau_c \propto$ *Kohärenzlänge*



Thermisches Bunching

Bunching im Licht einer Hg-Dampflampe

B. L. Morgan and L. Mandel
Phys. Rev. Lett. 16, 1012 (1966)



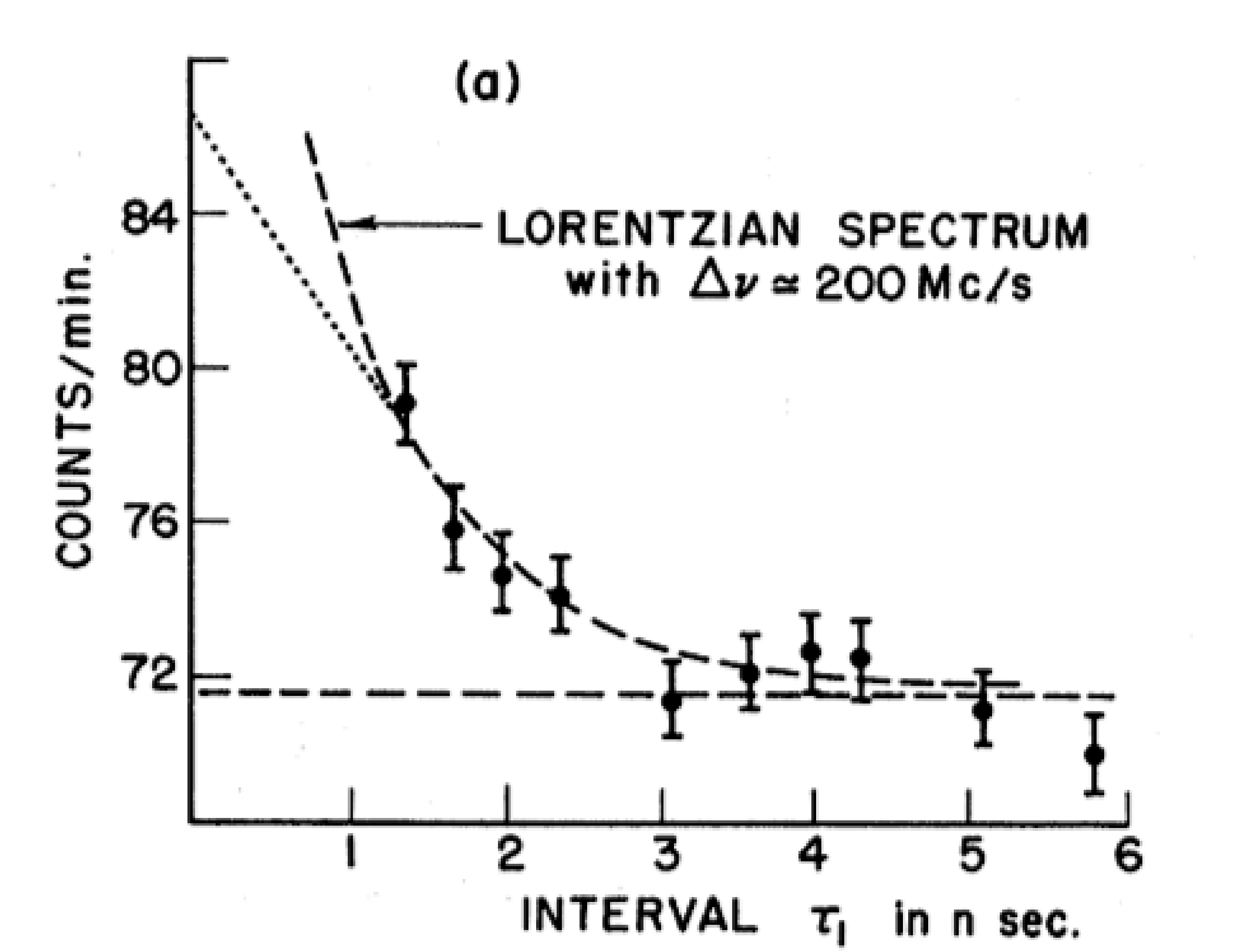


FIG. 2. Experimental results for the two-photon counting rate obtained (a) with the Hg^{198} light source;

Thermisches Bunching

Bunching Dauer
⇒ Linienbreite

D. T. Phillips, H. Kleiman, and S. P. Davis
Phys. Rev. 153, 113 (1967)

- *Fabry-Perot Filter (FPI)+ Hg-Dampflampe*

- *zunehmende FPI Länge*
➙ schmaleres Spektrum
➙ längeres Bunching

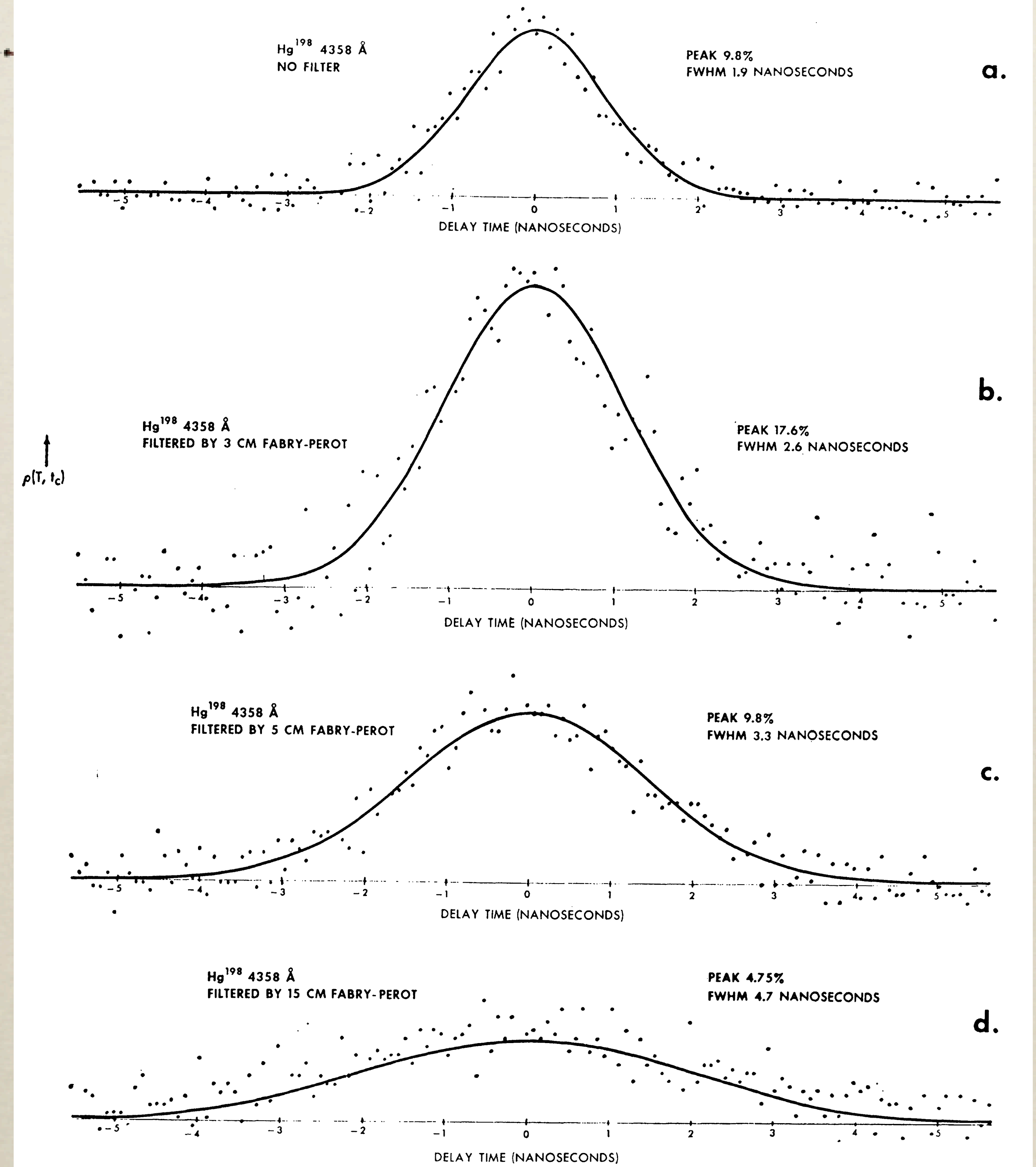


FIG. 2. Number of coincidences versus delay time for filtered Hg^{198} 4358 Å light. (a) No filter. (b) 3-cm Fabry-Perot filter. (c) 5-cm Fabry-Perot filter. (d) 15-cm Fabry-Perot filter.

Thermisches Bunching

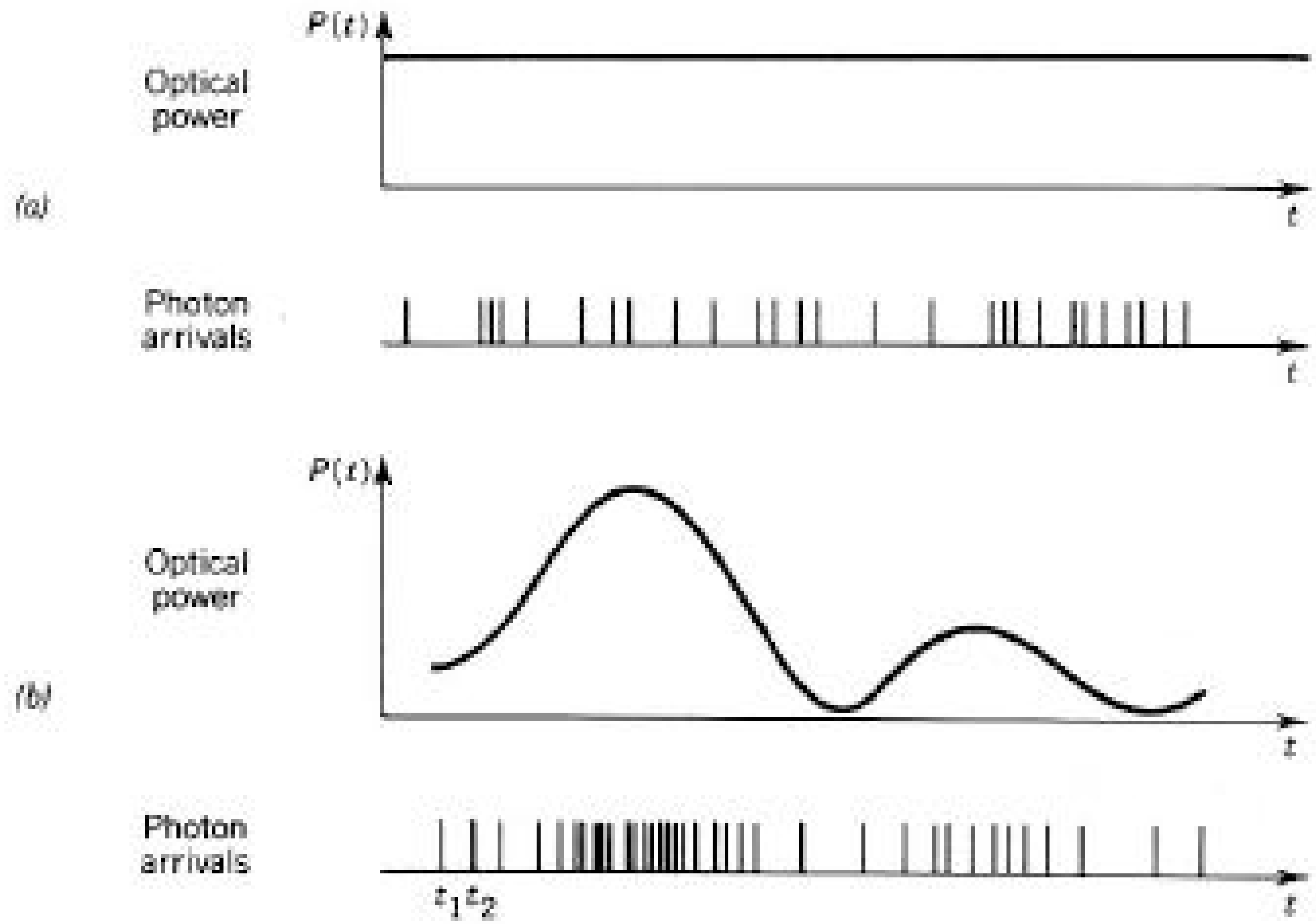
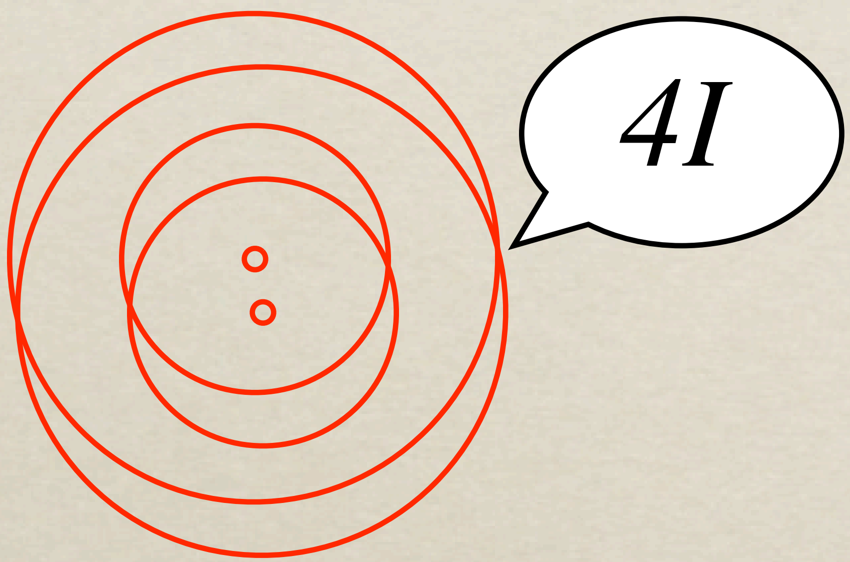


Figure 11.2-3 (*a*) Constant optical power and the corresponding random photon arrival times. (*b*) Time-varying optical power and the corresponding random photon arrival times.

Thermisches Bunching

Heuristische Begründung:

- *unabhängige Dipole, Intensität* $I \propto E^2$
- *Interferenz unabhängiger Kugelwellen*



$\Rightarrow$ *mittlere Intensität* $2I \propto 2E^2$

$\Rightarrow$ *maximale Intensität* $4I \propto (2E)^2$

Thermisches Bunching

Photonenstatistik im pseudo-thermischen Licht

F. T. Arecchi et al.
Phys. Lett. 20, 27 (1966)

- *Laser mit Phasenrührer*
  $g^{(2)}(0)=2$

- *Laser ohne Störung*
  $g^{(2)}(\Delta\tau)=1$

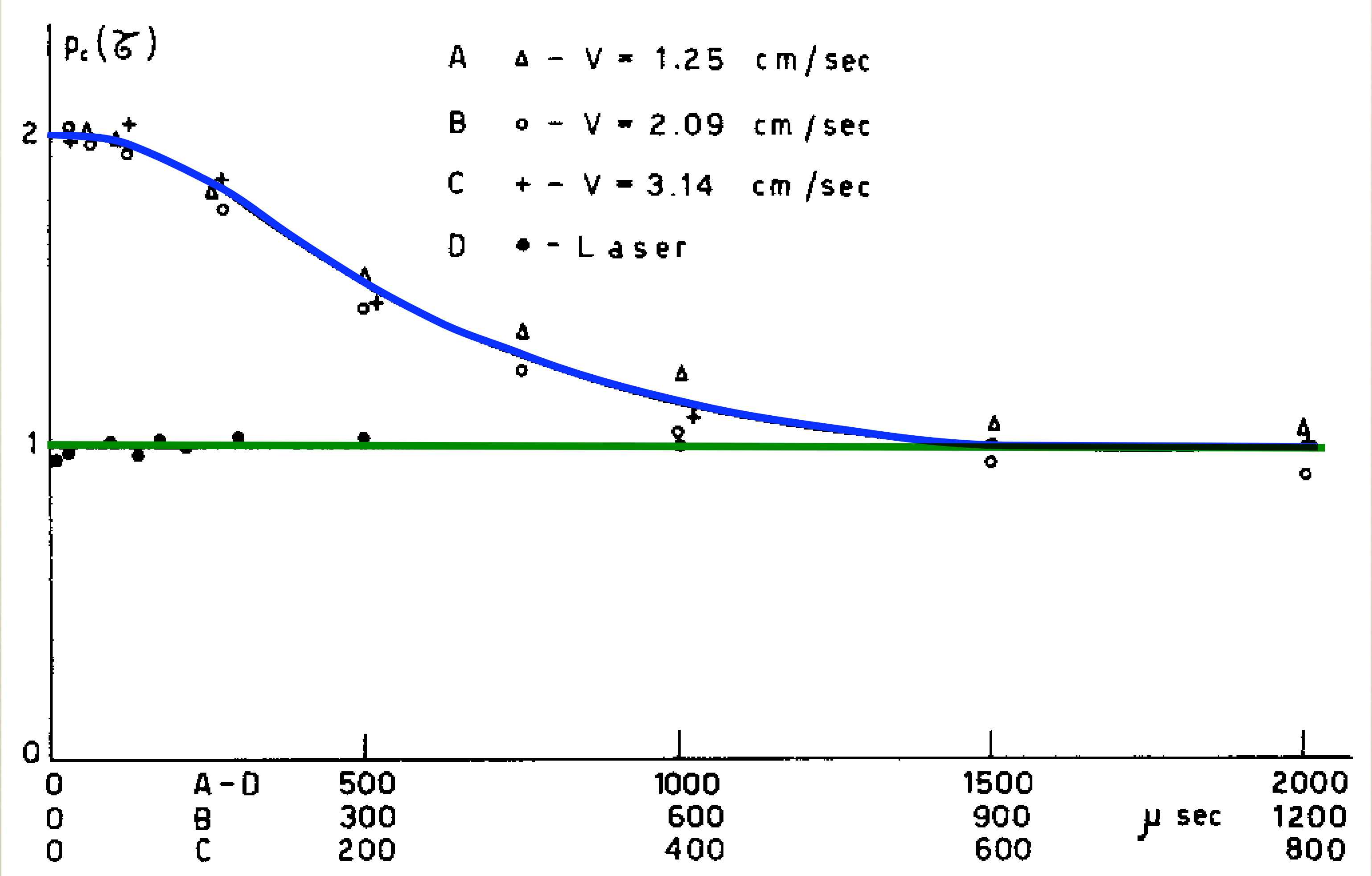
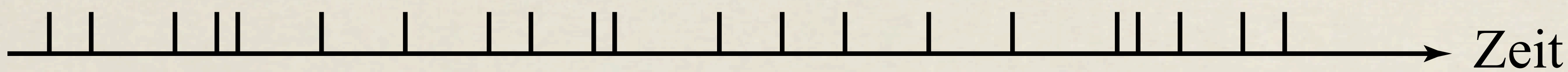


Fig. 1. Conditional probability $p_C(\tau)$ of a second count occurring at a time τ after a first has occurred at time $\tau = 0$.

Kohärentes Licht



Intensität konstant

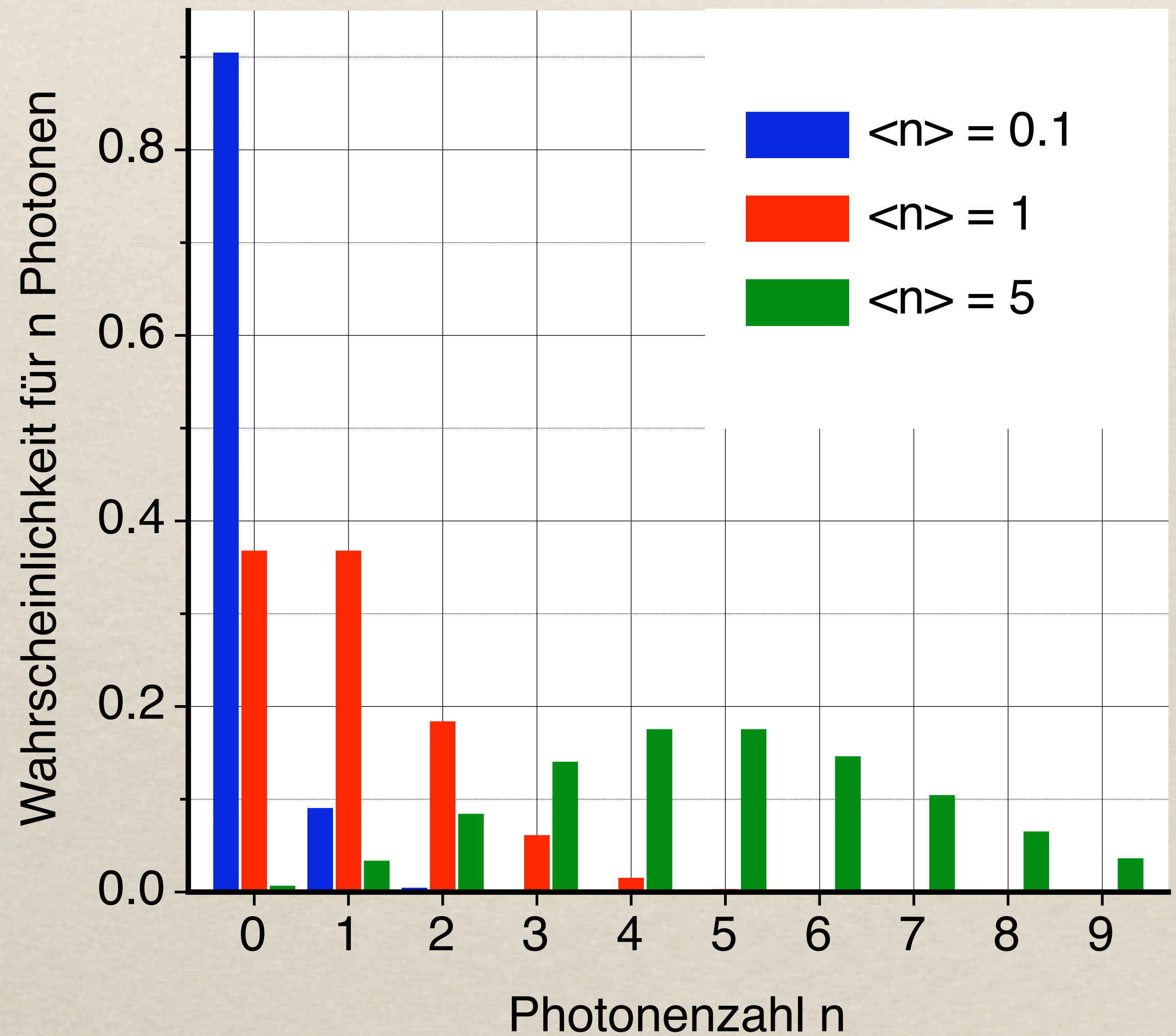
$\Rightarrow$ *Poissonverteilung*

- *Wahrscheinlichkeit für n Photonen*

$$p(\bar{n},n) = \frac{\bar{n}^n}{n!} \times \exp(-\bar{n})$$

- *mittlere Photonenzahl*

$$\bar{n} = \langle \alpha | a^\dagger a | \alpha \rangle = |\alpha|^2$$



Kohärentes Licht

- *Kohärenter Zustand*

$$|\alpha\rangle = e^{-|\alpha|^2/2}\left(|0\rangle + \alpha|1\rangle + \frac{\alpha^2}{\sqrt{2}}|2\rangle + \ldots + \frac{\alpha^n}{\sqrt{n!}}|n\rangle + \ldots\right)$$

- *Detektion eines Photons*

$$a|\alpha\rangle = e^{-|\alpha|^2/2}\left(0 + \alpha|0\rangle + \alpha^2|1\rangle + \ldots + \frac{\alpha^n\sqrt{n}}{\sqrt{n!}}|n-1\rangle + \ldots\right) = \alpha|\alpha\rangle$$

- *Zustand unverändert $\Rightarrow$ Photonenzahl bleibt!*

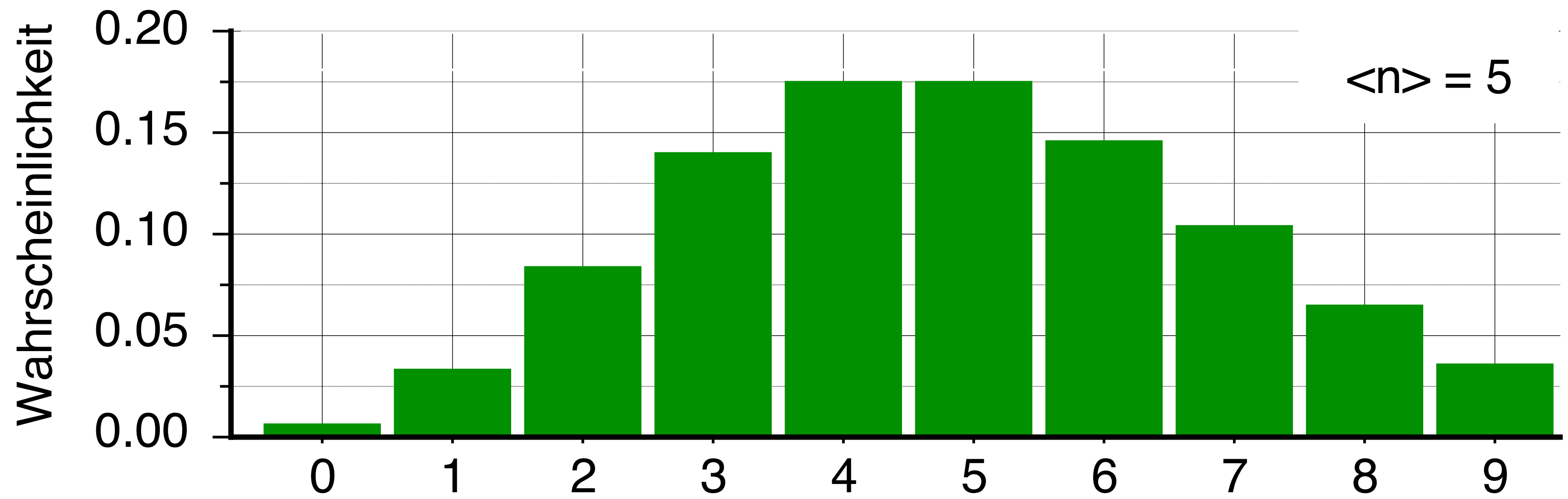
$$\bar{n}_{initial} = |\alpha|^2 = \bar{n}_{final}$$

Kohärentes Licht

Detektion eines Photons

$<n>$
$\downarrow$
$<n>$

Photonenzahl unverändert!



$$p(n) \propto \frac{\bar{n}^n}{n!} \rightarrow p'(n-1) \propto n\ p(n) = \bar{n} \times \frac{\bar{n}^{n-1}}{(n-1)!}$$

Kohärentes Licht

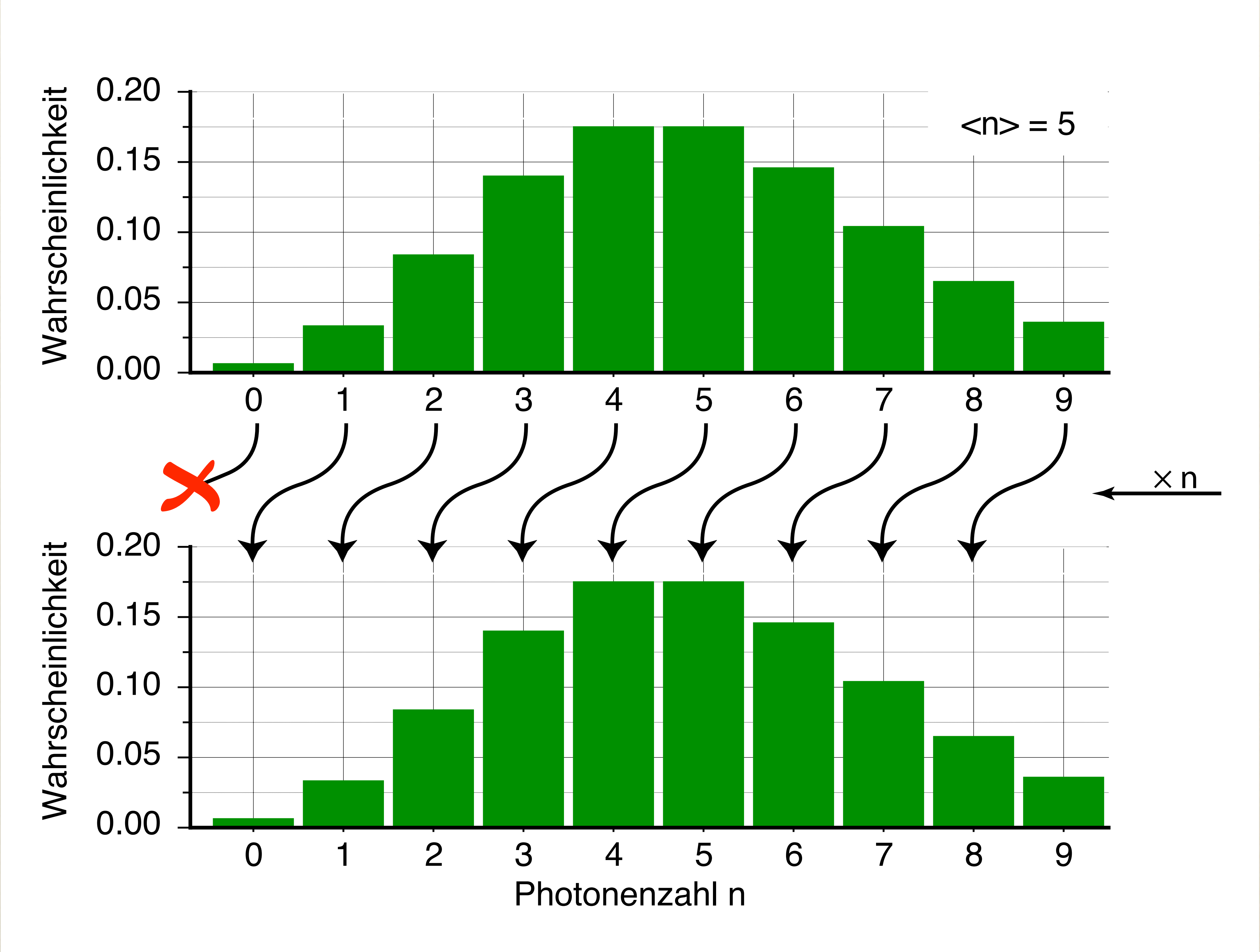
Detektion eines Photons

$<n>$

$\downarrow$

$<n>$

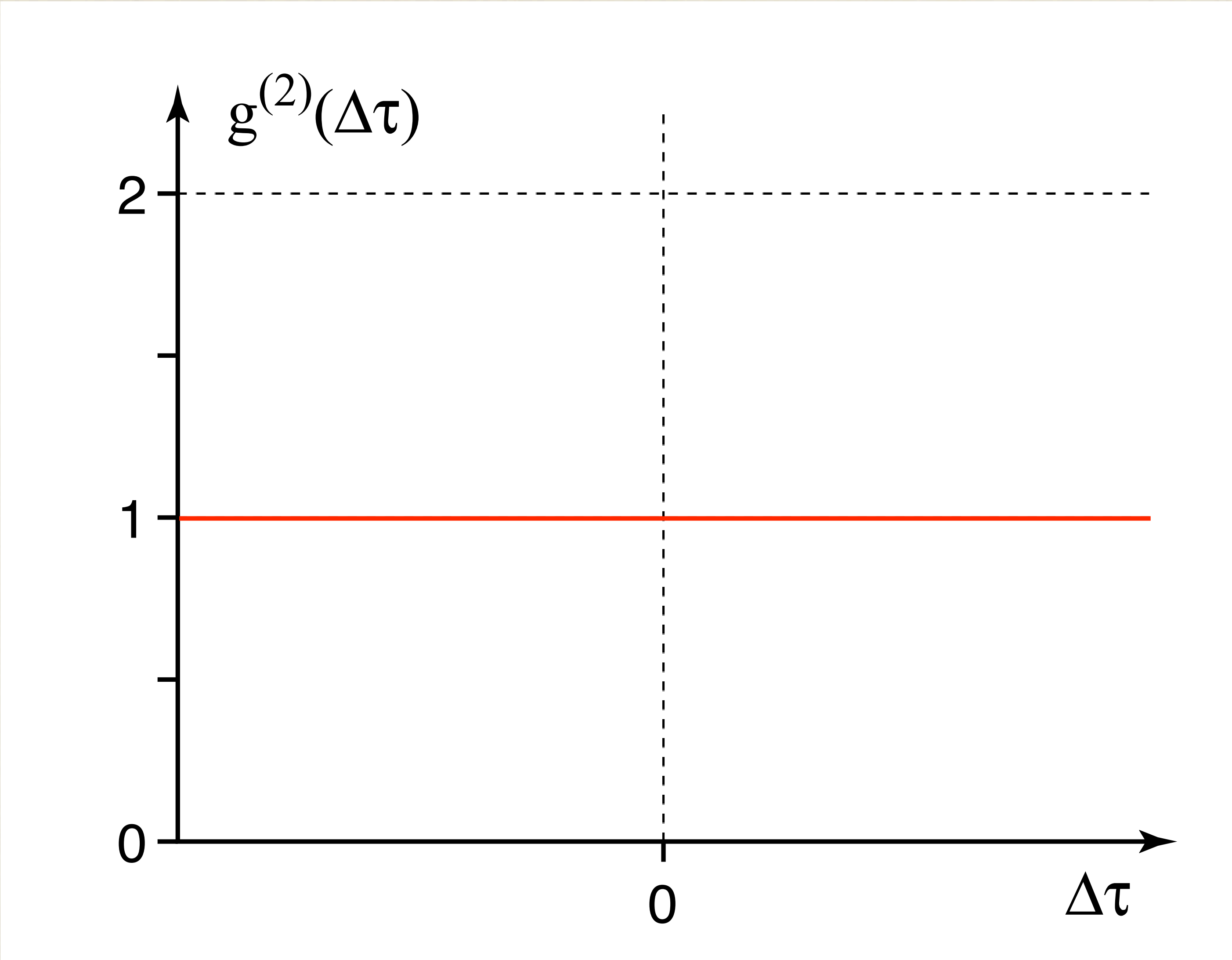
Photonenzahl unverändert!



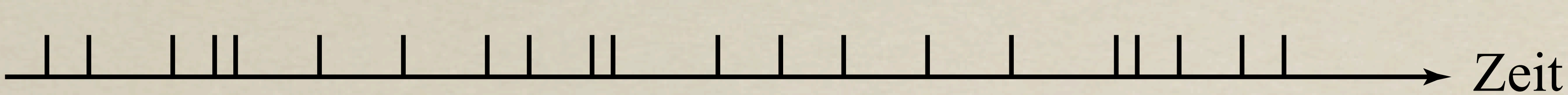
Kohärentes Licht

- *Keine Änderung durch Photodetektion*

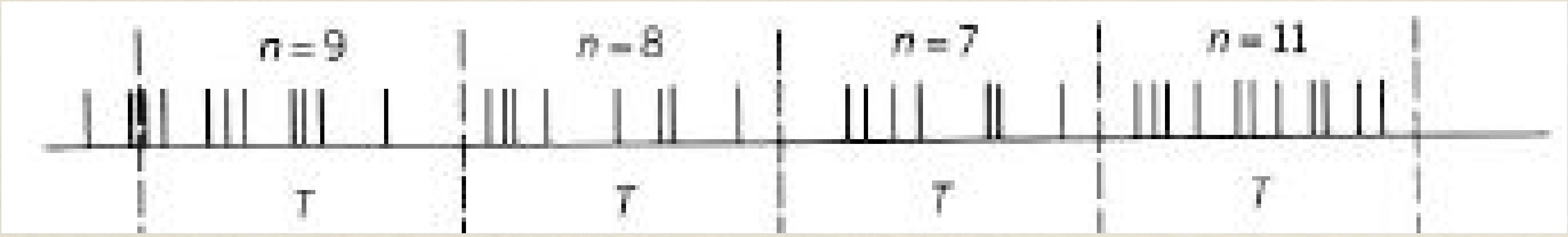
$$\Rightarrow \quad \boxed{g^{(2)}(\Delta\tau) = 1}$$



- *Kohärenz nicht limitiert*



Kohärentes Licht



F. T. Arecchi et al.
Phys. Lett. 20, 27 (1966)

- *Laser mit Phasenrührer*
  $g^{(2)}(0)=2$

- *Laser ohne Störung*
  $g^{(2)}(\Delta\tau)=1$

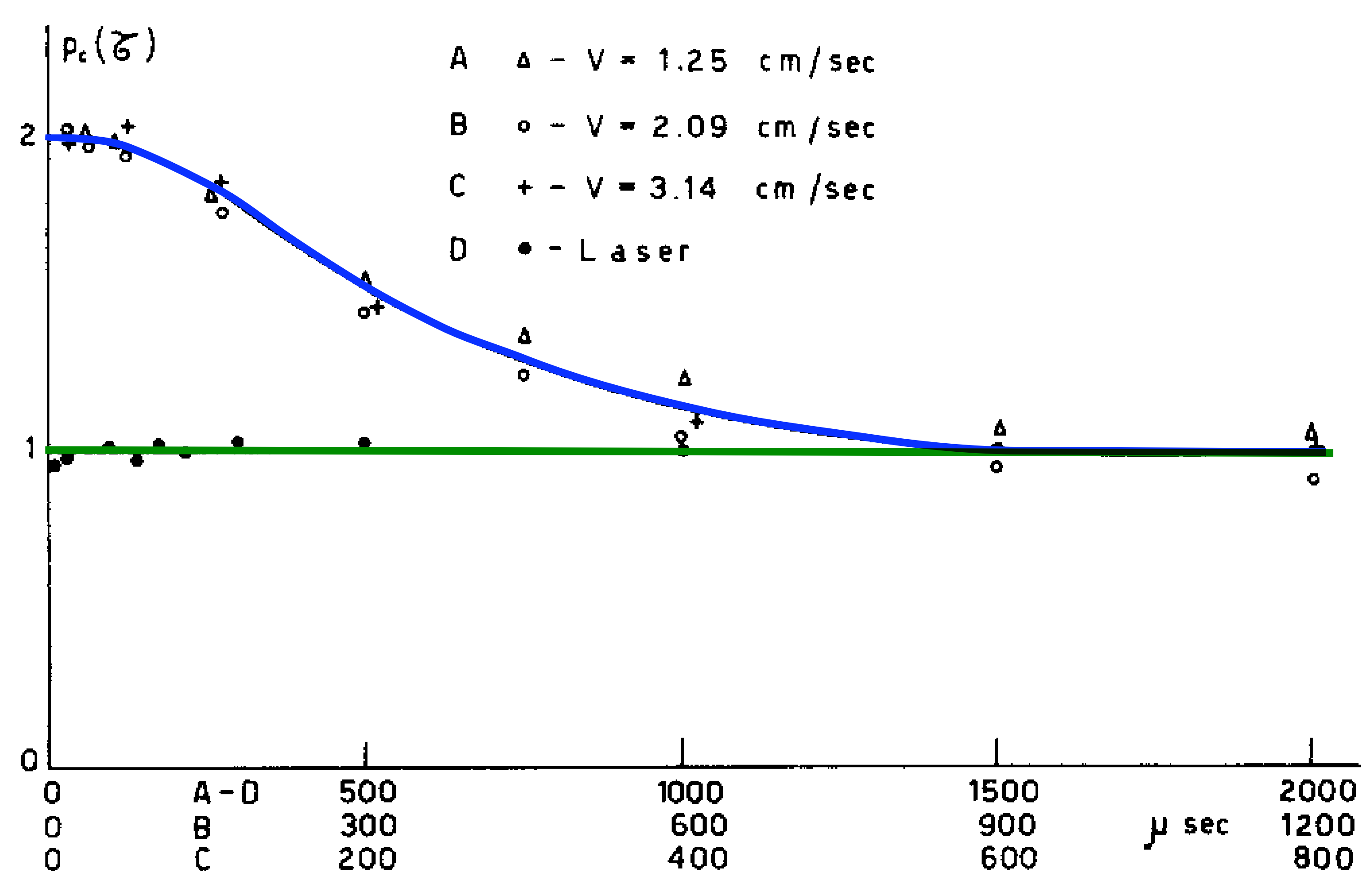


Fig. 1. Conditional probability $p_C(\tau)$ of a second count occurring at a time τ after a first has occurred at time $\tau = 0$.

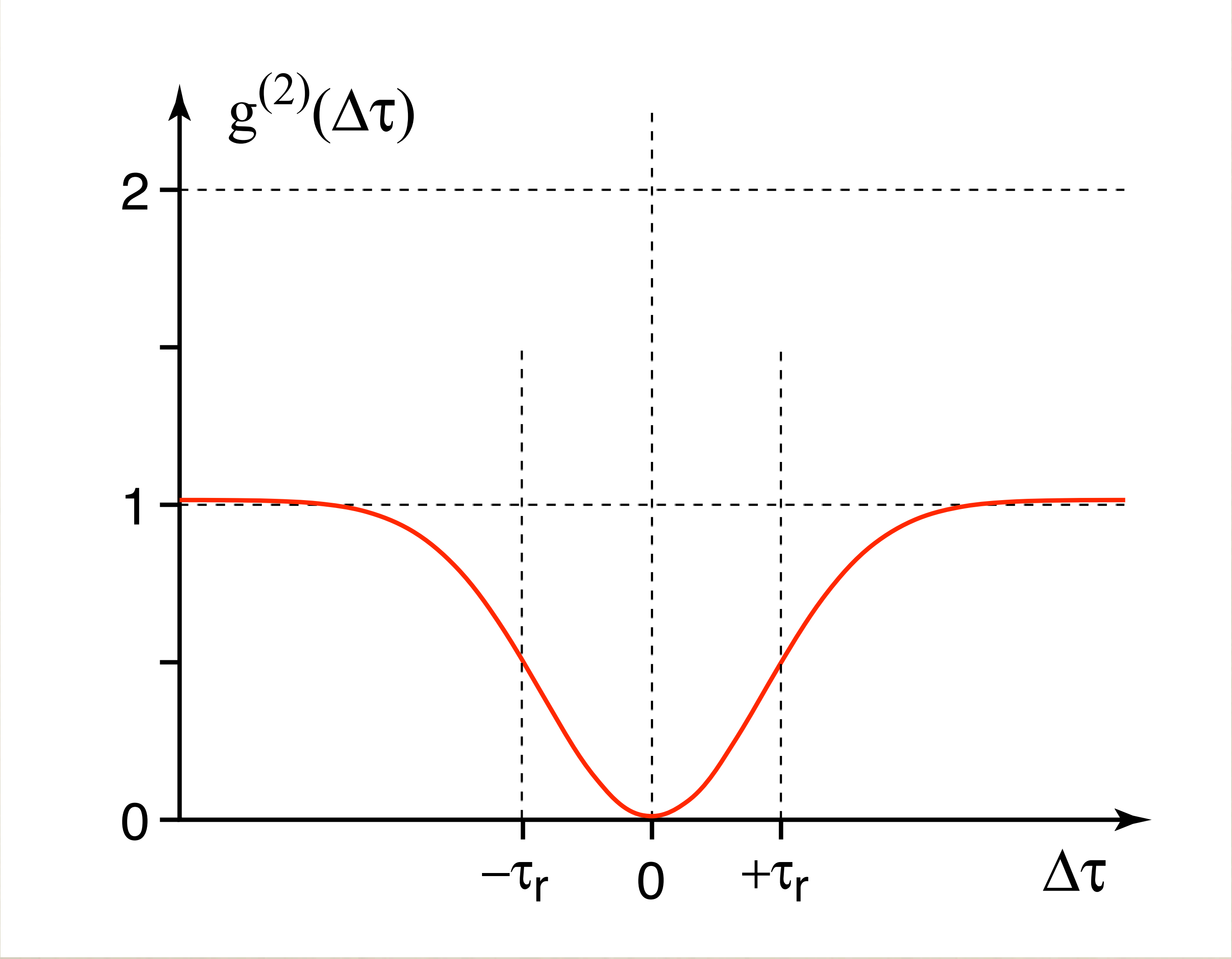
Einzelne Photonen

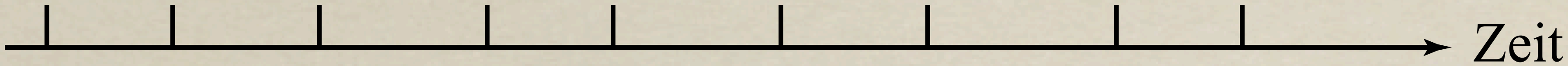
- *Mode (Zeitfenster) im Zustand* $|1\rangle$
- *Detektion:*

  $a\,|1\rangle \rightarrow |0\rangle$

  $\Rightarrow$ *Vacuum!*
- *Anti-Bunching*

  $$\boxed{g^{(2)}(0) < g^{(2)}(\Delta\tau)}$$

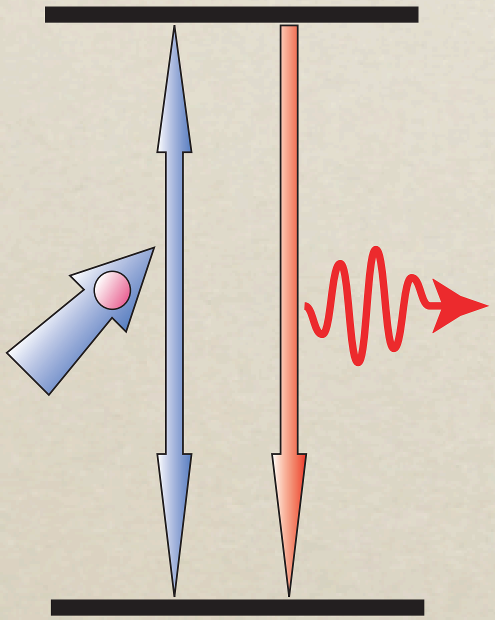




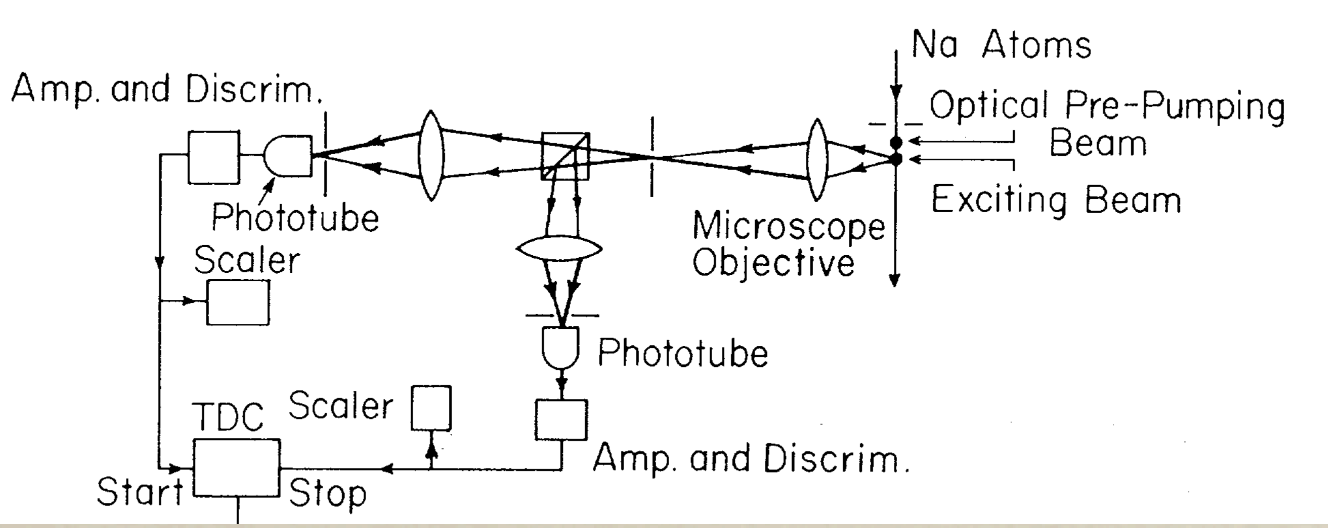
Einzelne Photonen

Fluoreszenz weniger Atome

- *Atomstrahl geringer Dichte*
- *Antibunching*



H.J. Kimble et al.
Phys. Rev. Lett. 39, 691 (1977)



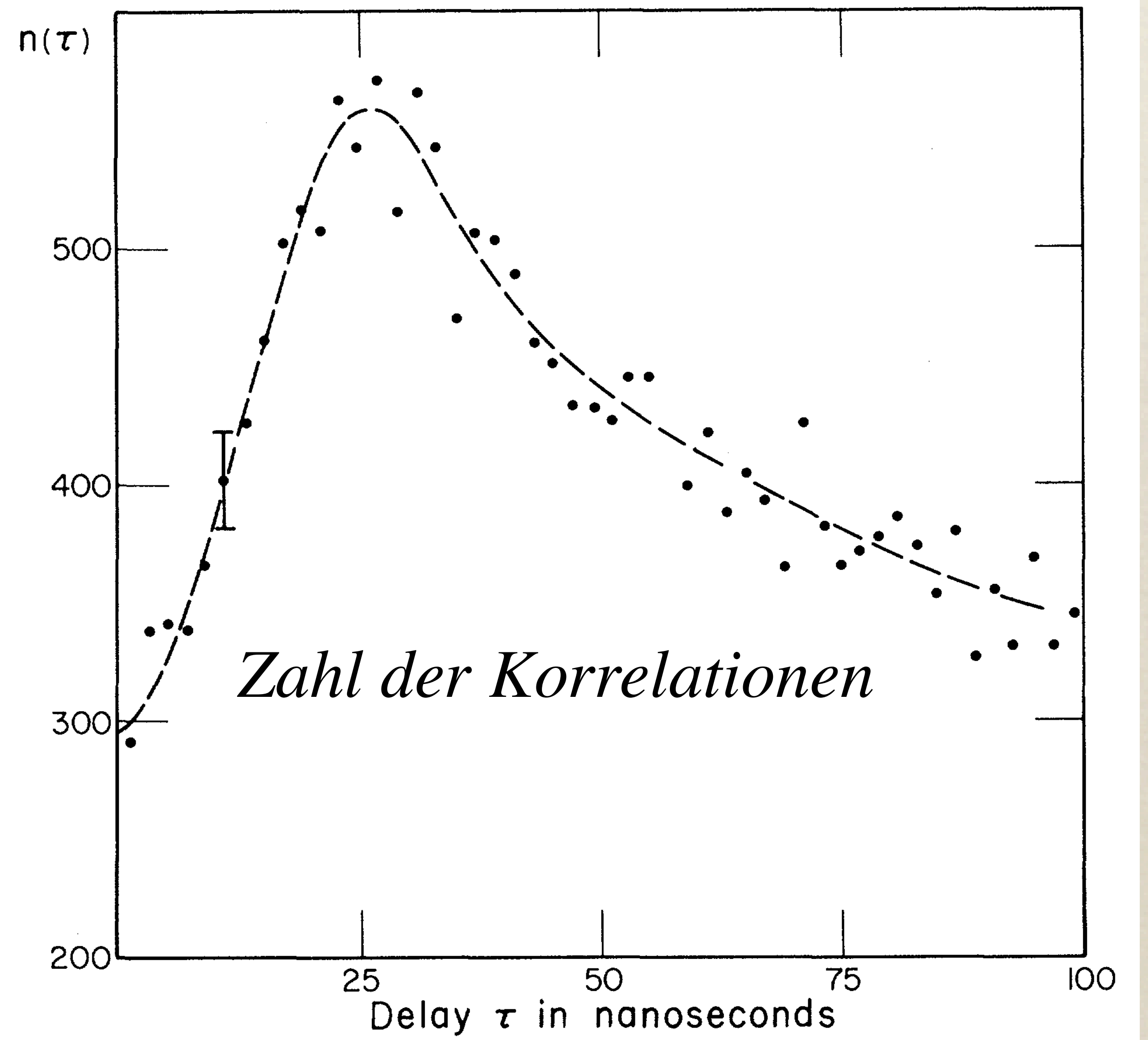
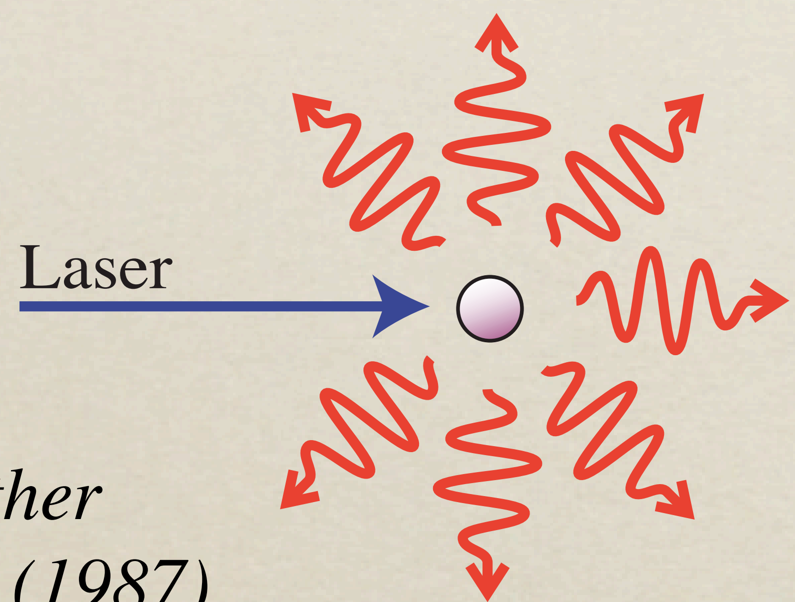


FIG. 2. The number of recorded pulse pairs $n(\tau)$ as a function of the time delay τ in nanoseconds. The growth of $n(\tau)$ from $\tau = 0$ shows antibunching. The bars on one point indicate statistical uncertainties corresponding to one standard deviation. The broken line just outlines the trend.

Einzelne Photonen

Fluoreszenz eines einzigen Ions

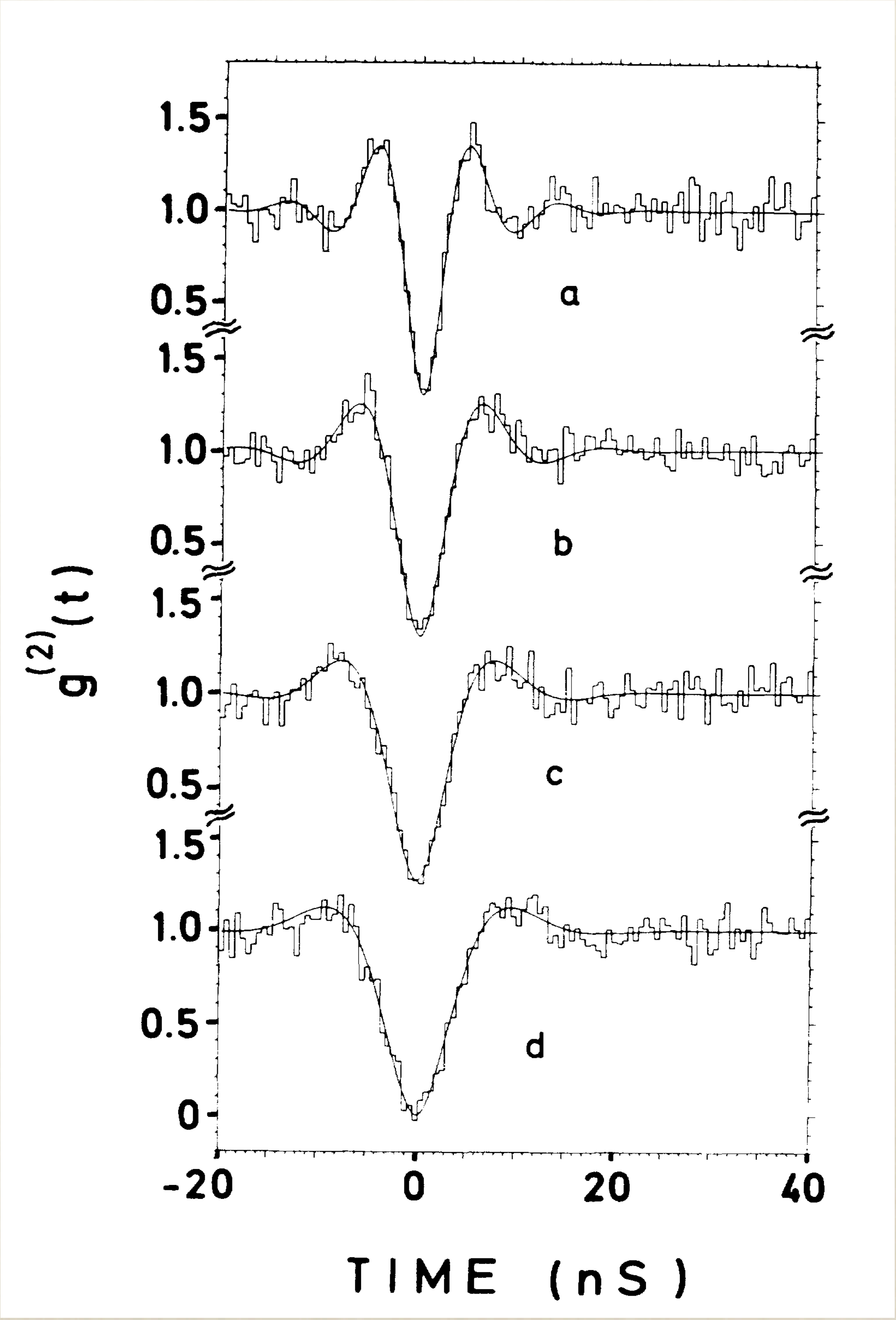
- *Ion gefangen in RF-Falle*
- *Antibunching*



F. Diedrich and H. Walther
Phys. Rev. Lett. 58, 203 (1987)

- *verschiedene Laserintensitäten:*

schwach → *breites Minimum*
stark → *schmales Minimum*

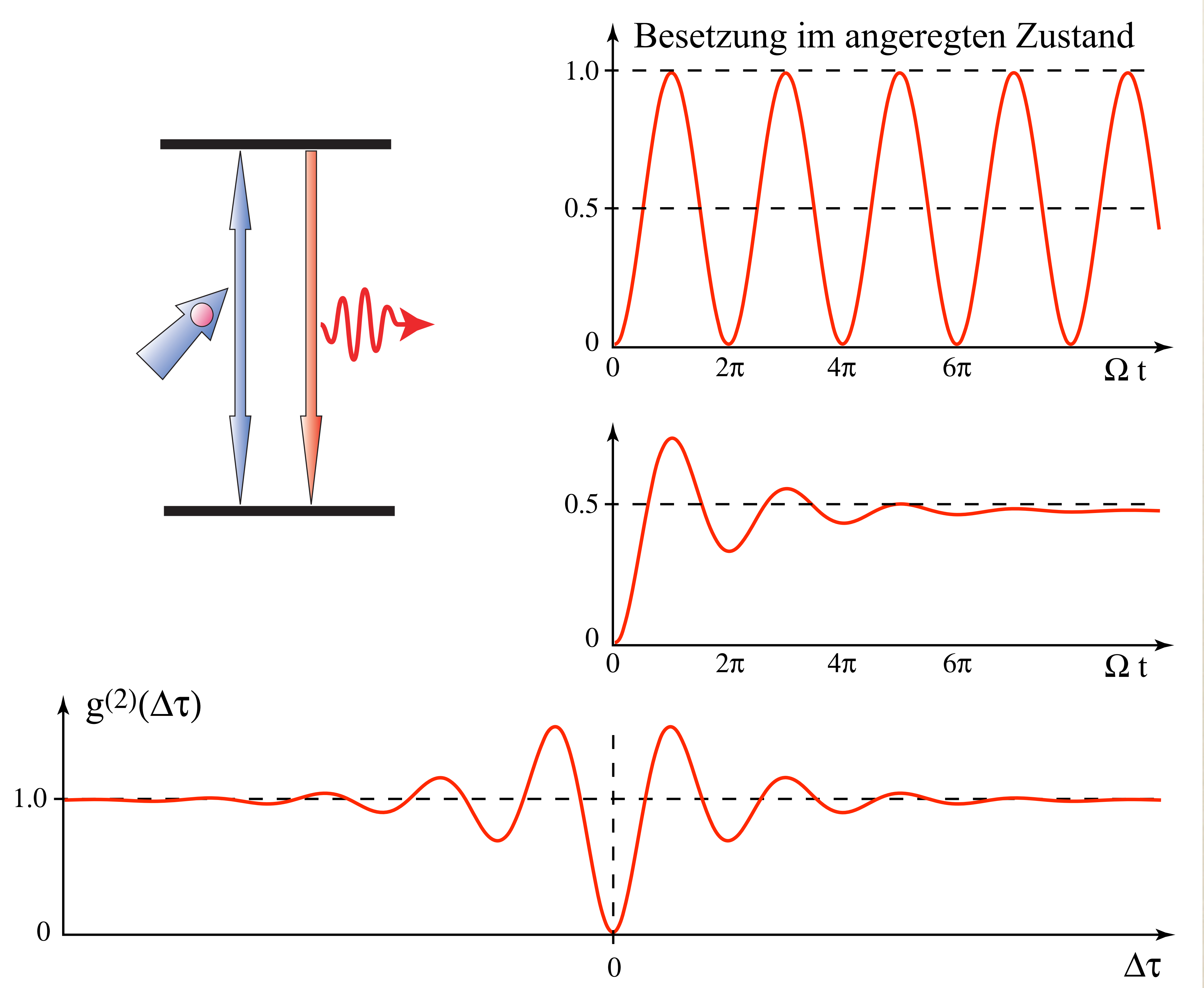


Rabioszillationen in der Korrelation

Absorption & stimulierte Emission
$\Downarrow$
Besetzung oszilliert

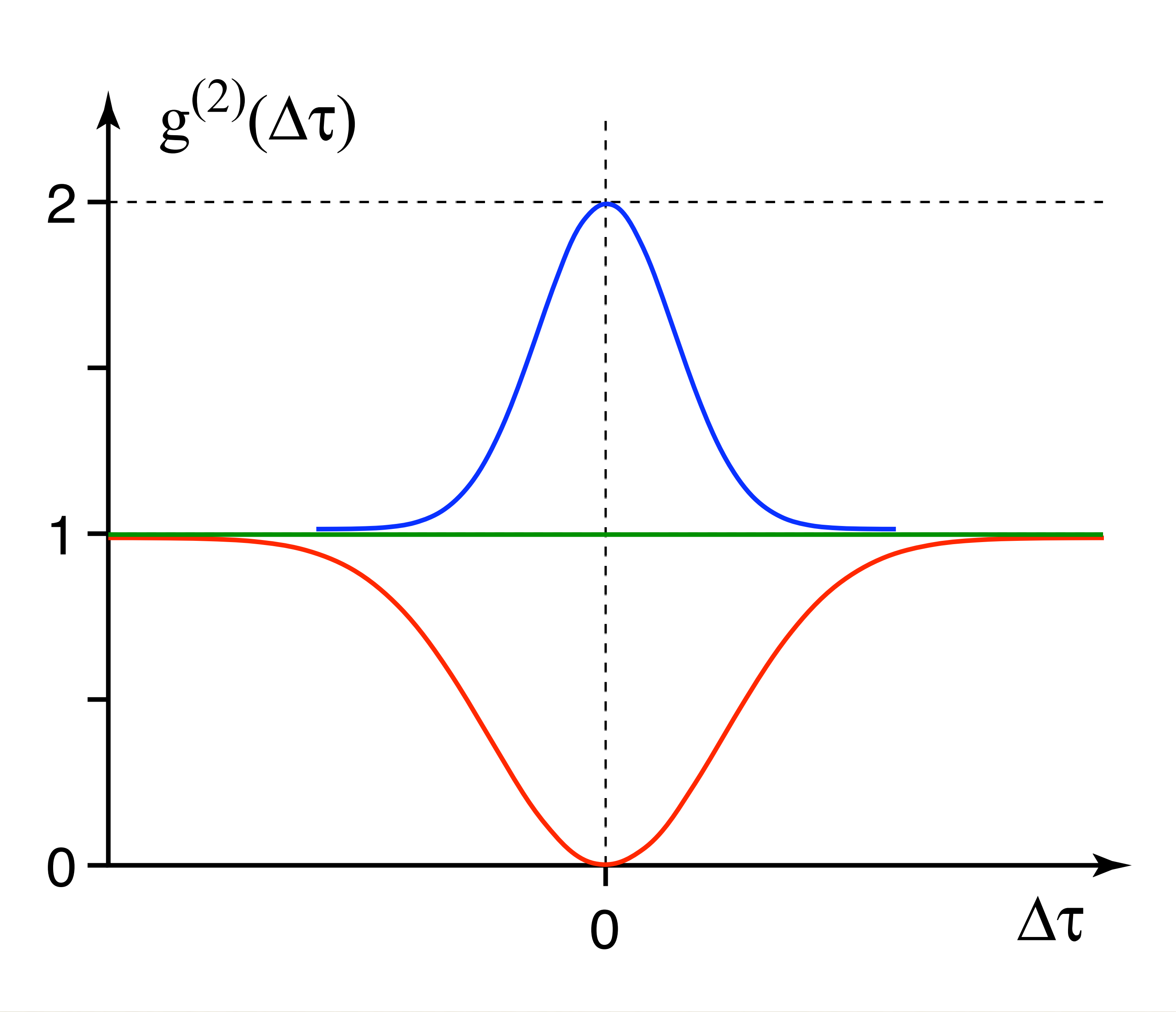
---

spontane Emission
$\Downarrow$
Photonen Relaxation Antibunching

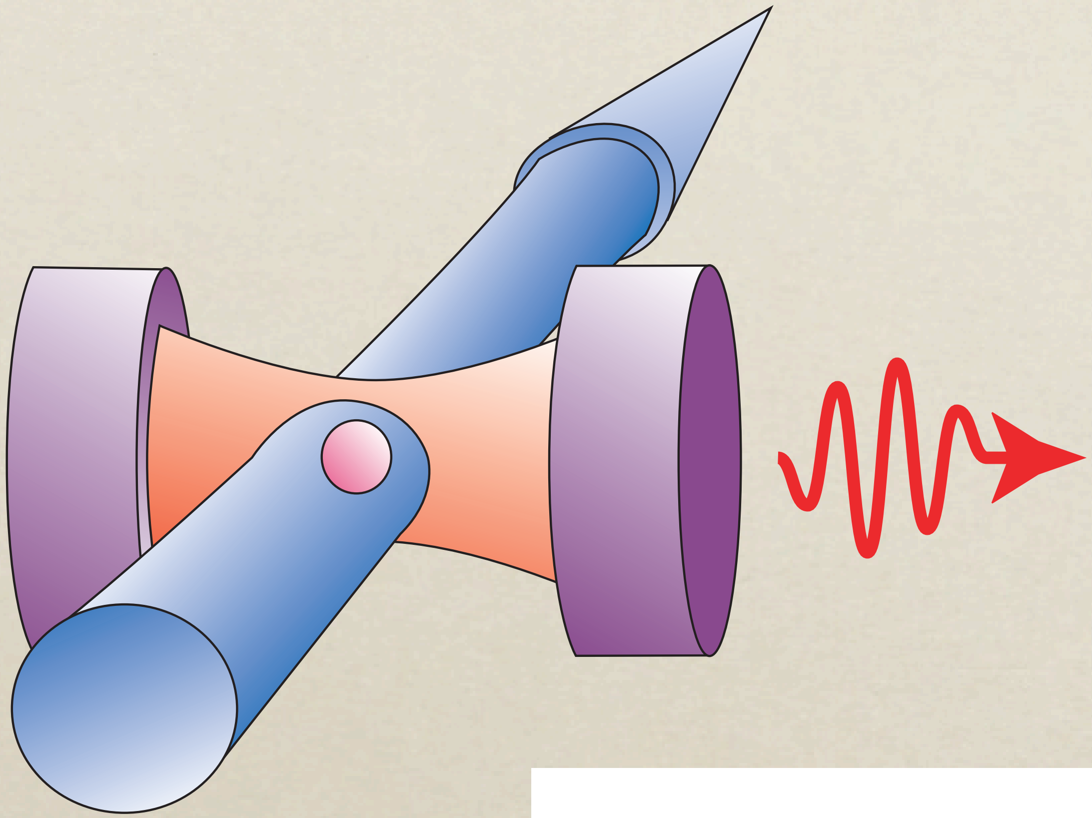


Intensitätskorrelationen

- *Bunching: thermisch*
  $g^{(2)}(0)=2$
- *Unkorreliert: Laser*
  $g^{(2)}(\Delta\tau)=1$
- *Antibunching:* $|1\rangle \rightarrow |0\rangle$
  $g^{(2)}(0)< g^{(2)}(\Delta\tau)$

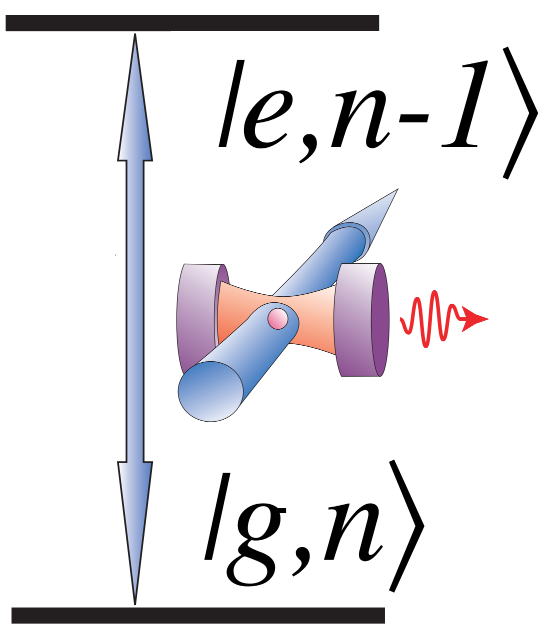


Atom & Photon im Resonator

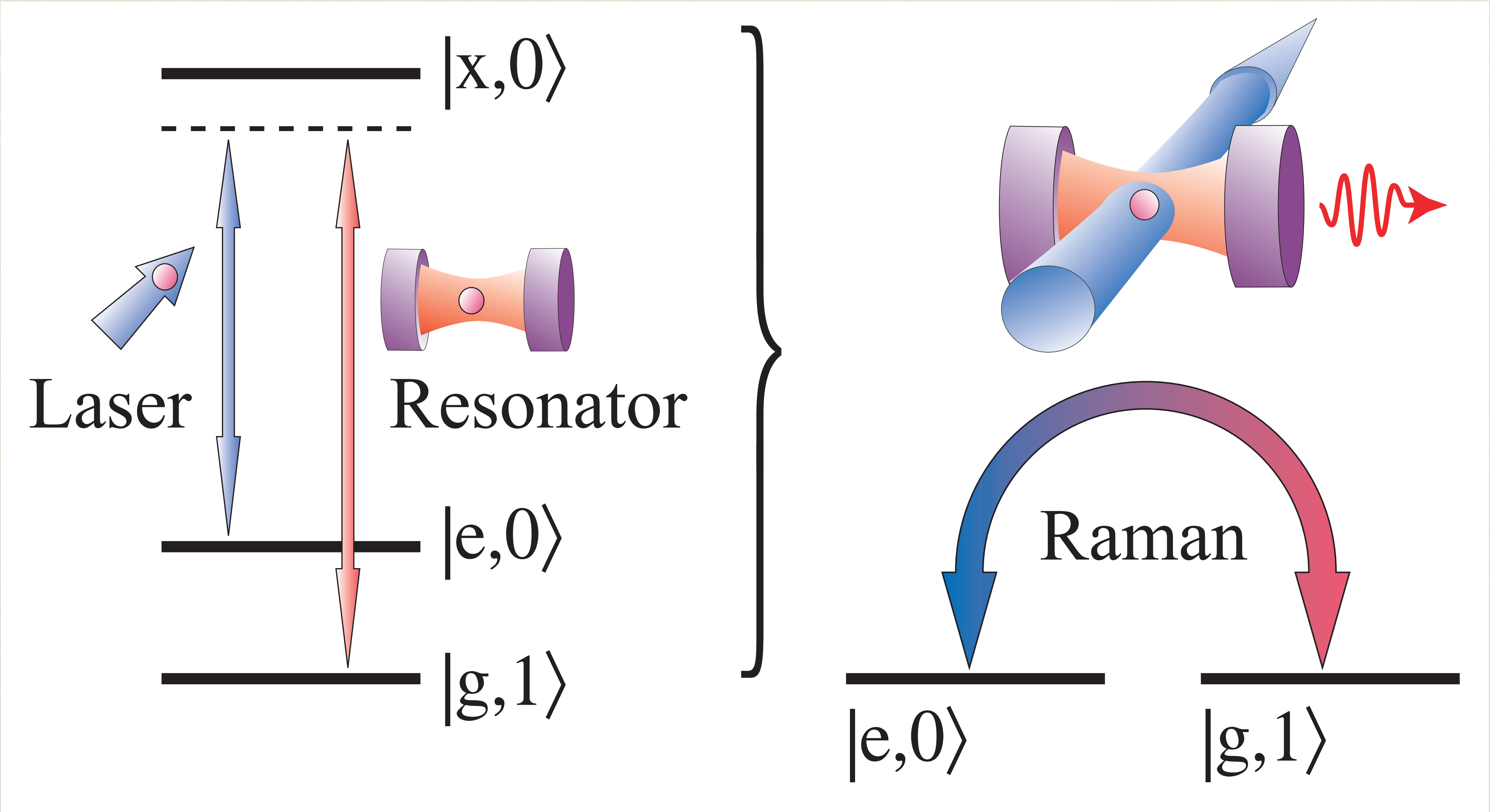


E. T. Jaynes and F. W. Cummings.
Proc. IEEE, 51:89–109, 1963.

Besetzungsoszillation
$\Omega \propto E \propto \sqrt{n} / \sqrt{V}$



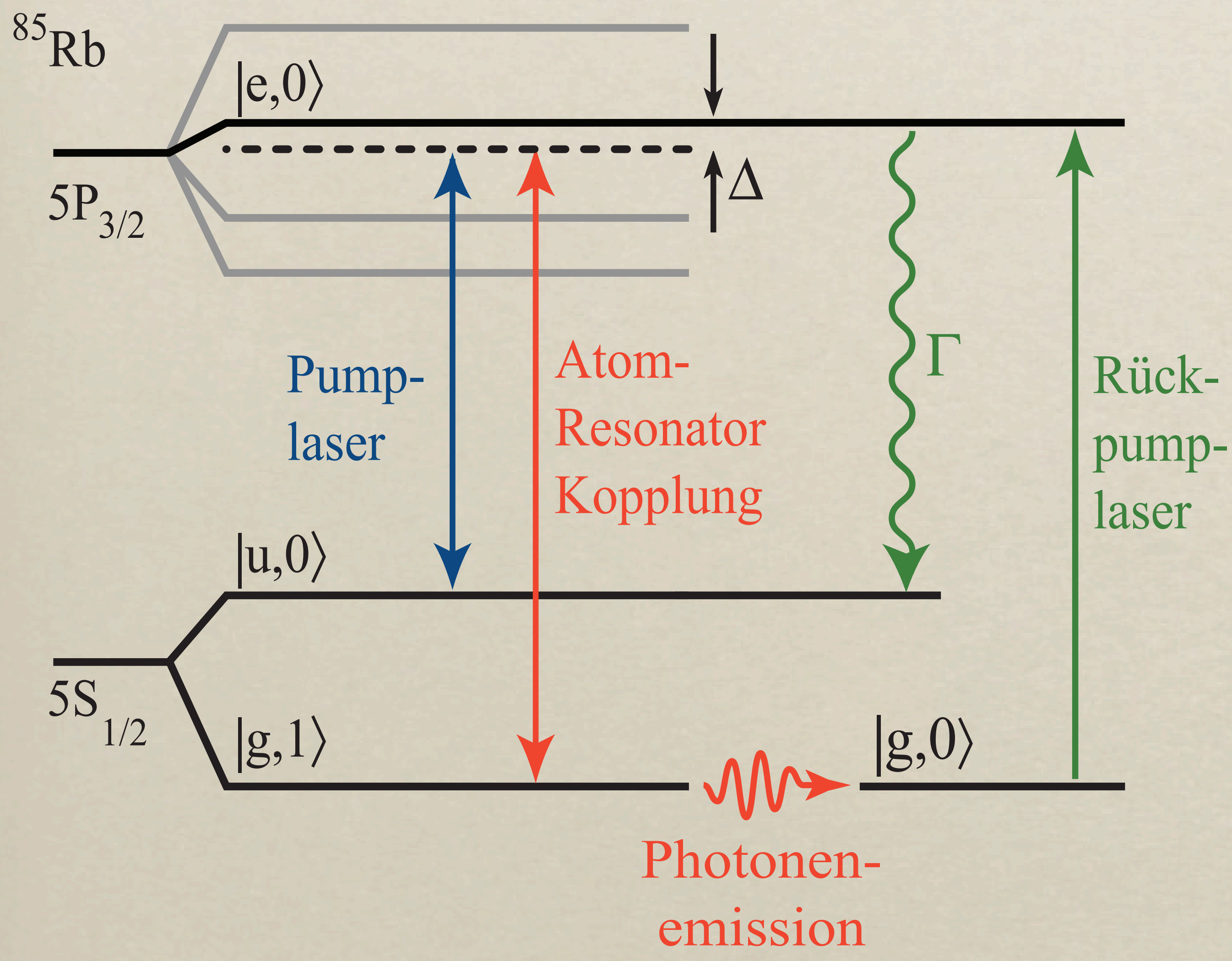
Atom & Photon im optischen Resonator

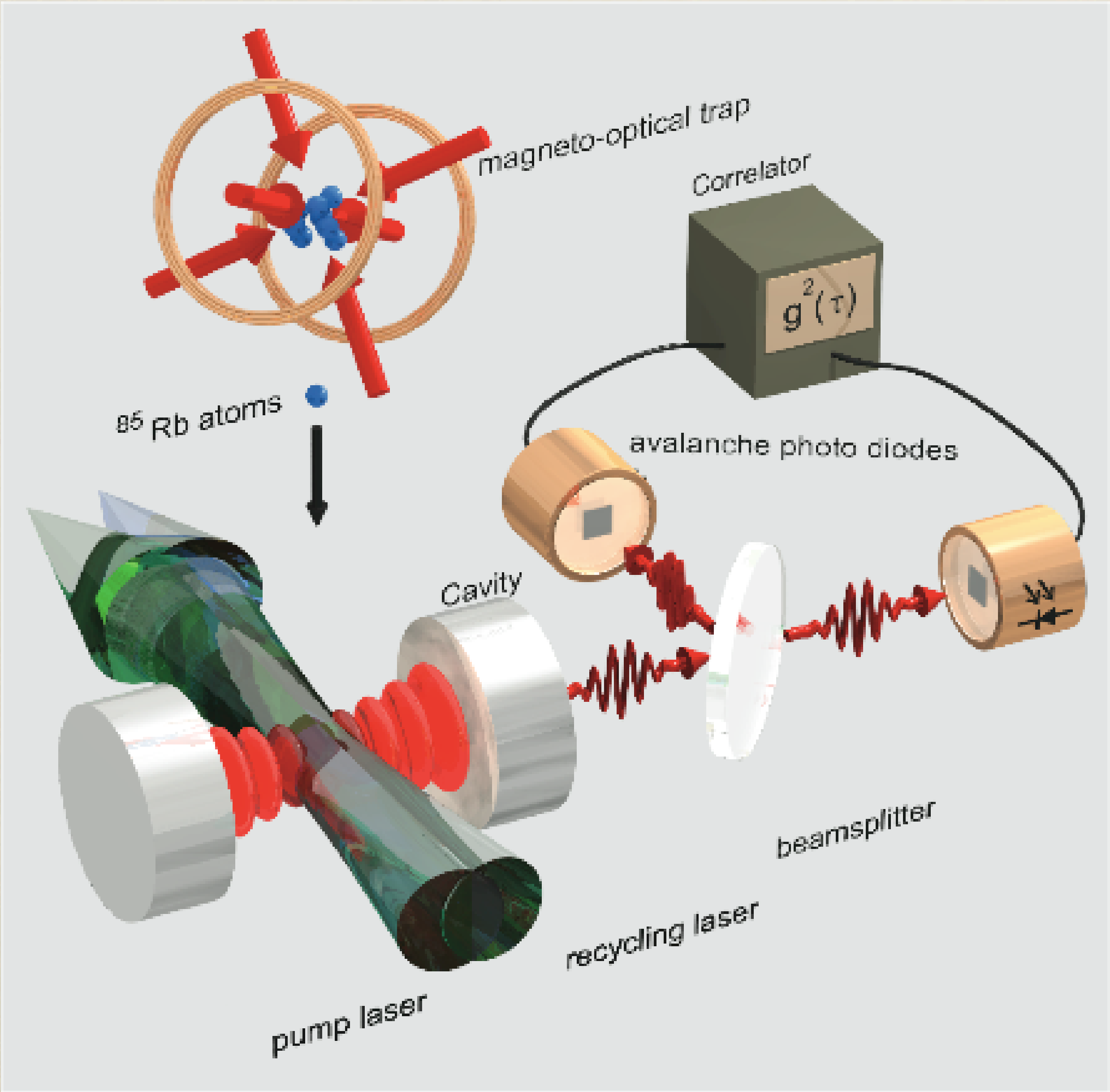


- *A. Kuhn et al., Phys. Rev. Lett. 89, 067901 (2002)*
- *J. McKeever et al., Science 303, 1992 (2004)*
- *M. Keller et al., Nature 431, 1075 (2004)*

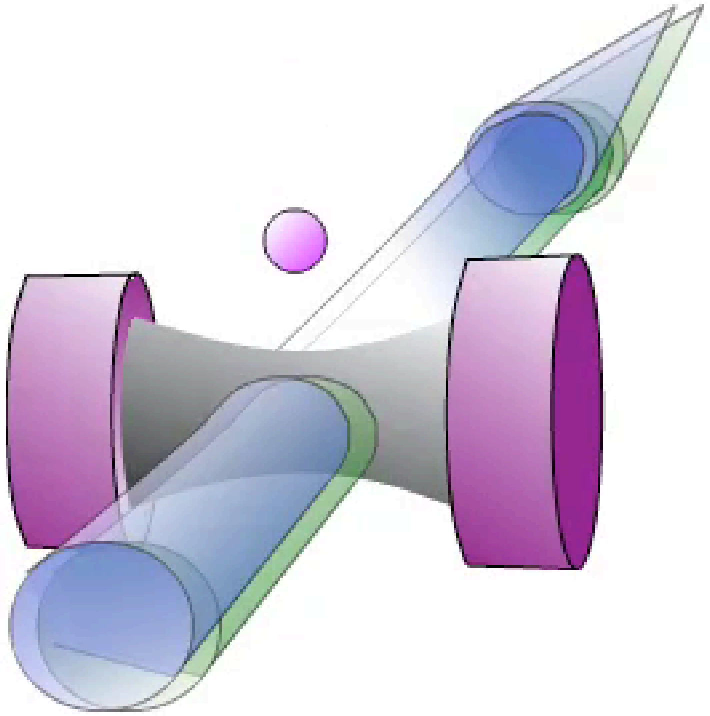
Atom & Photon im optischen Resonator

M. Hennrich, A. Kuhn & G. Rempe, Phys. Rev. Lett. 94, 53604 (2005)
A. Kuhn et al., Phys. Rev. Lett. 89, 067901 (2002)

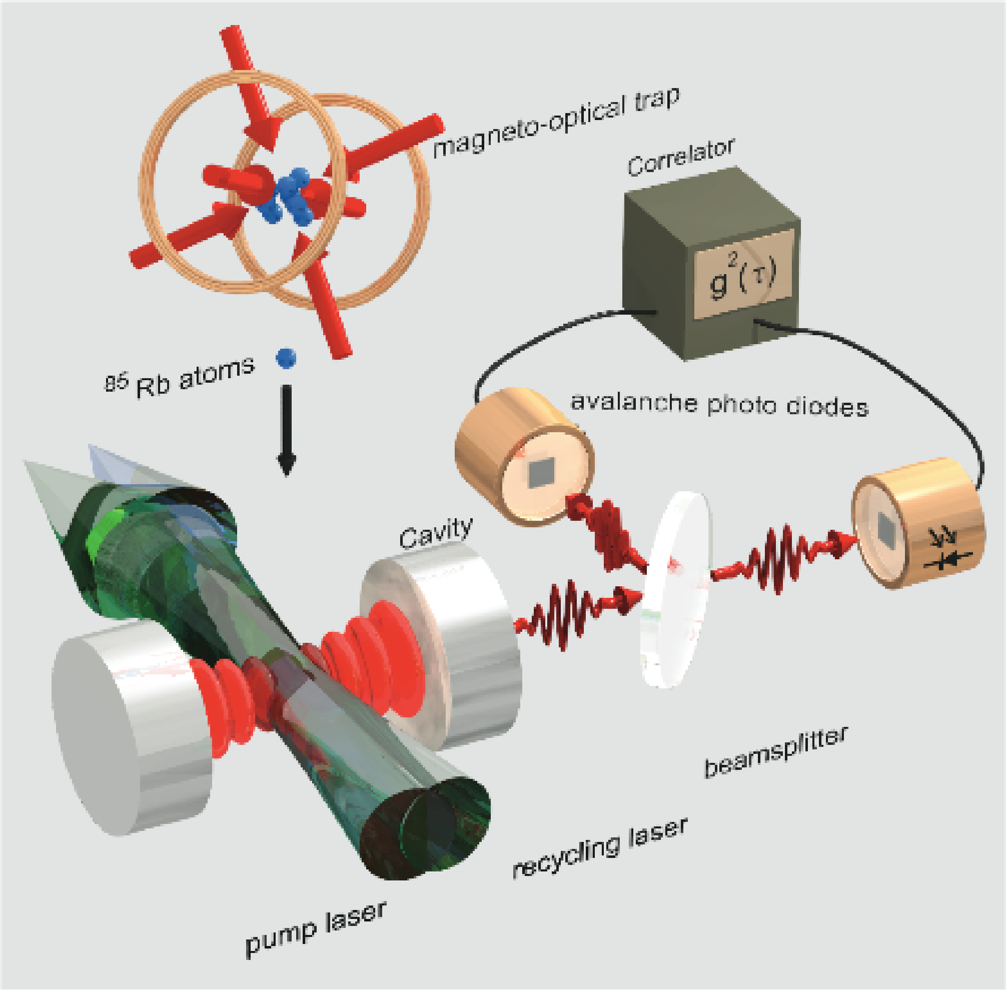




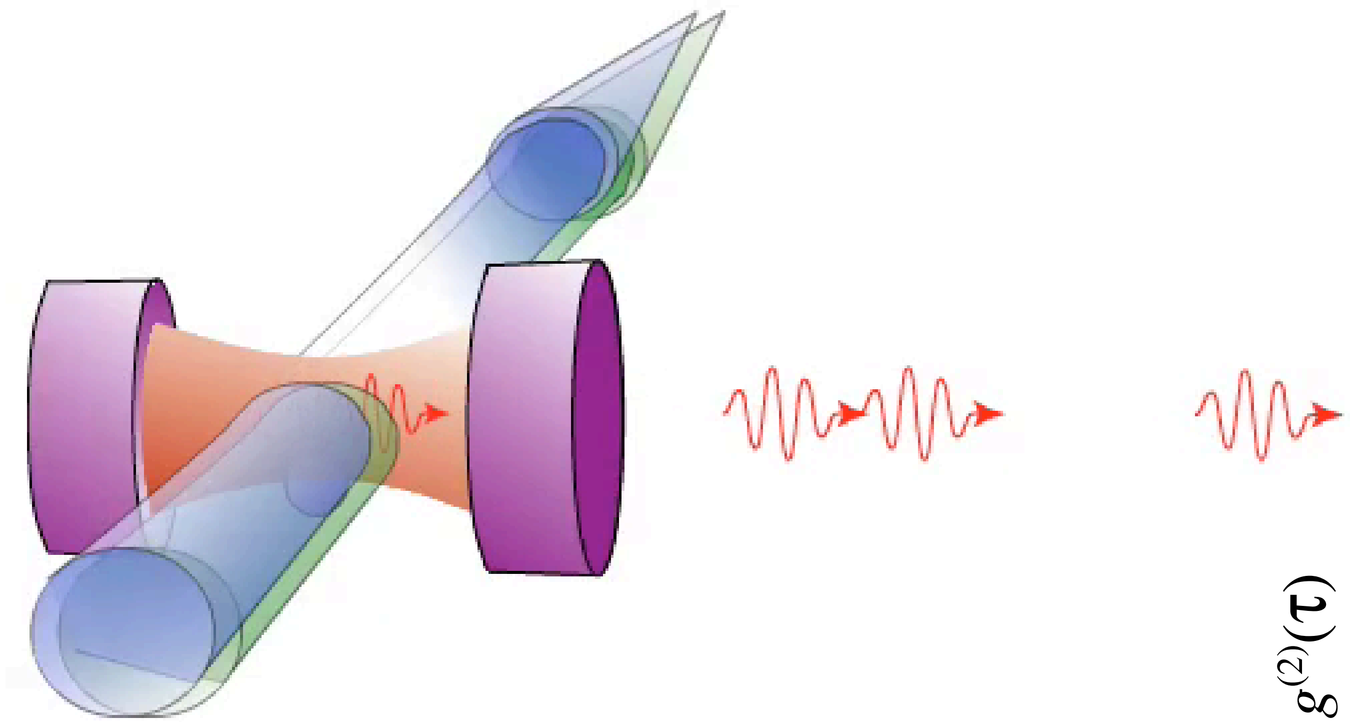
Von Antibunching zu Bunching



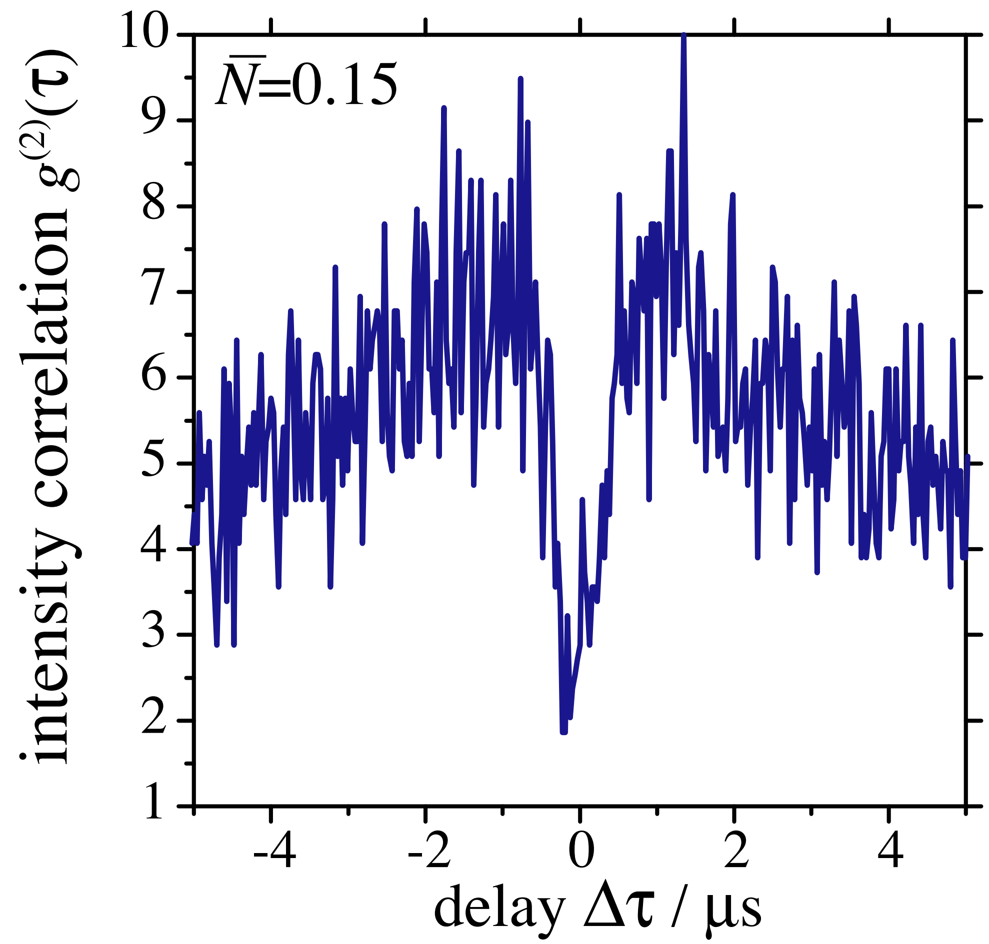
- *Einzelne Atome*
  $\Rightarrow$ *Antibunching*
- *Viele Atome*
  $\Rightarrow$ *Bunching*



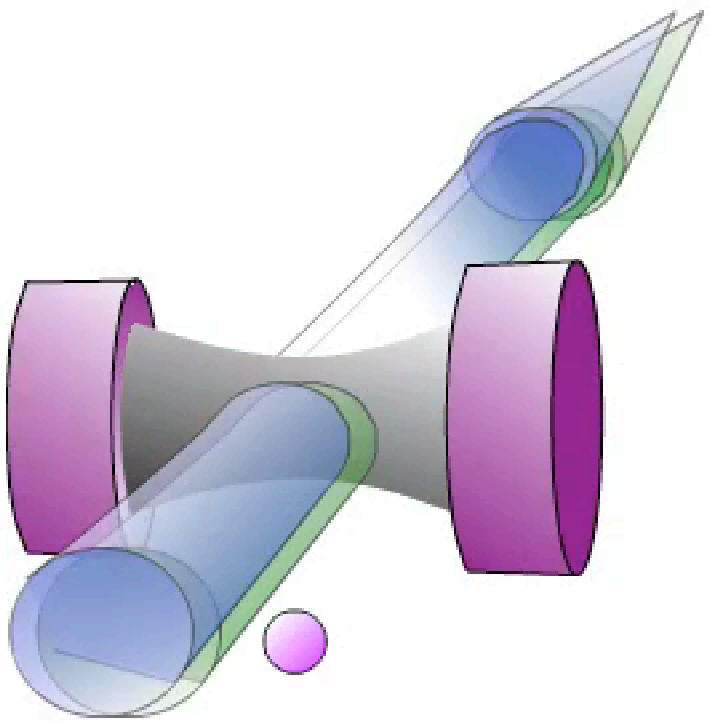
Von Antibunching zu Bunching



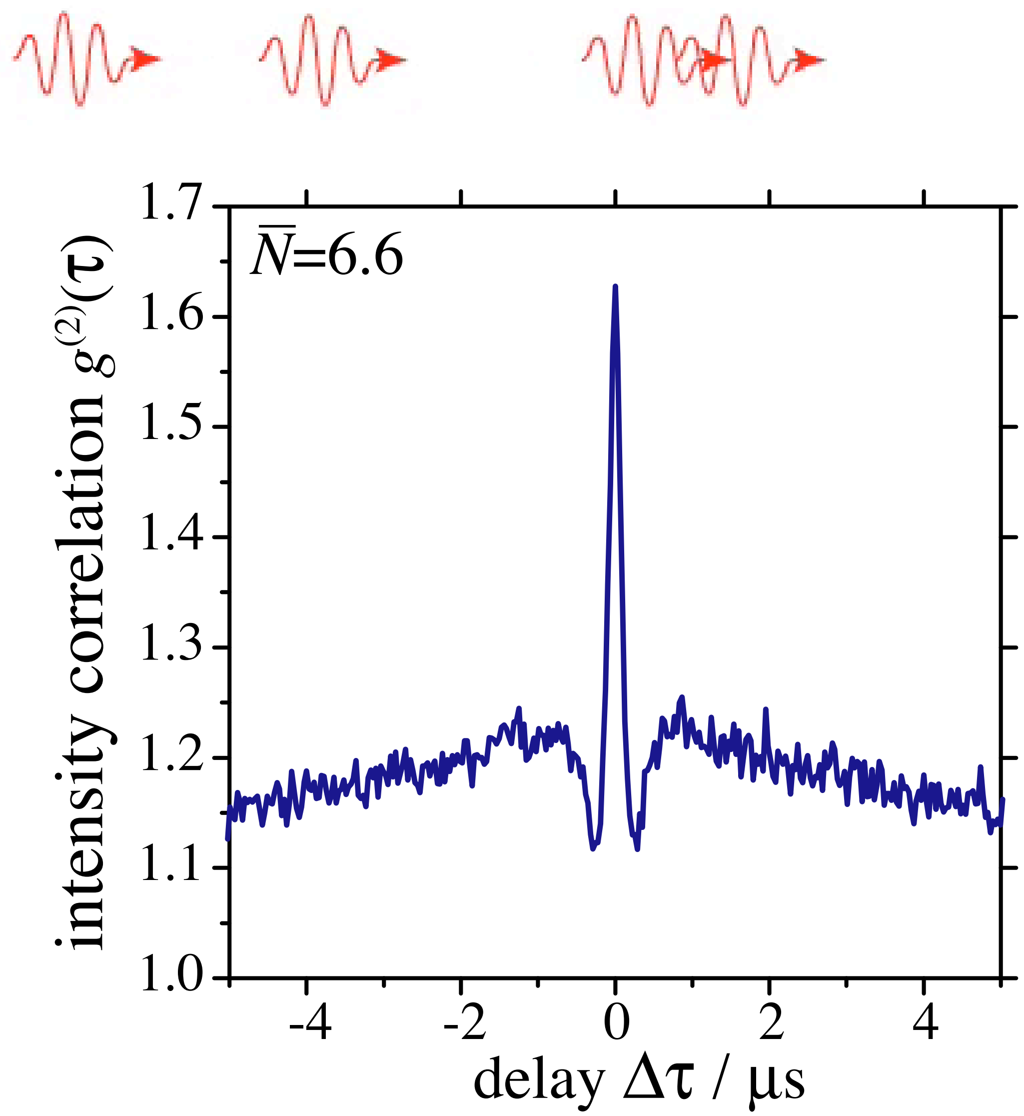
- *Einzelne Atome*
  ⇒ Antibunching
- *Viele Atome*
  ⇒ Bunching



Von Antibunching zu Bunching



- *Einzelne Atome*
  $\Rightarrow$ *Antibunching*
- *Viele Atome*
  $\Rightarrow$ *Bunching*

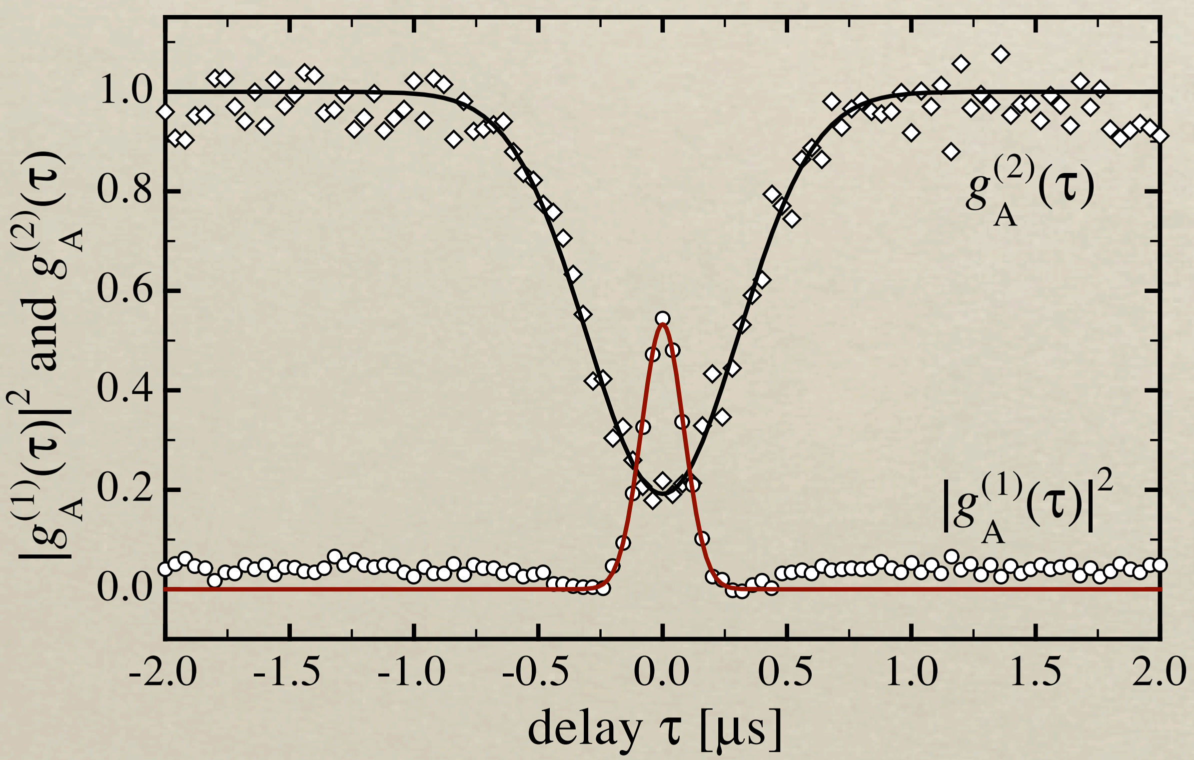


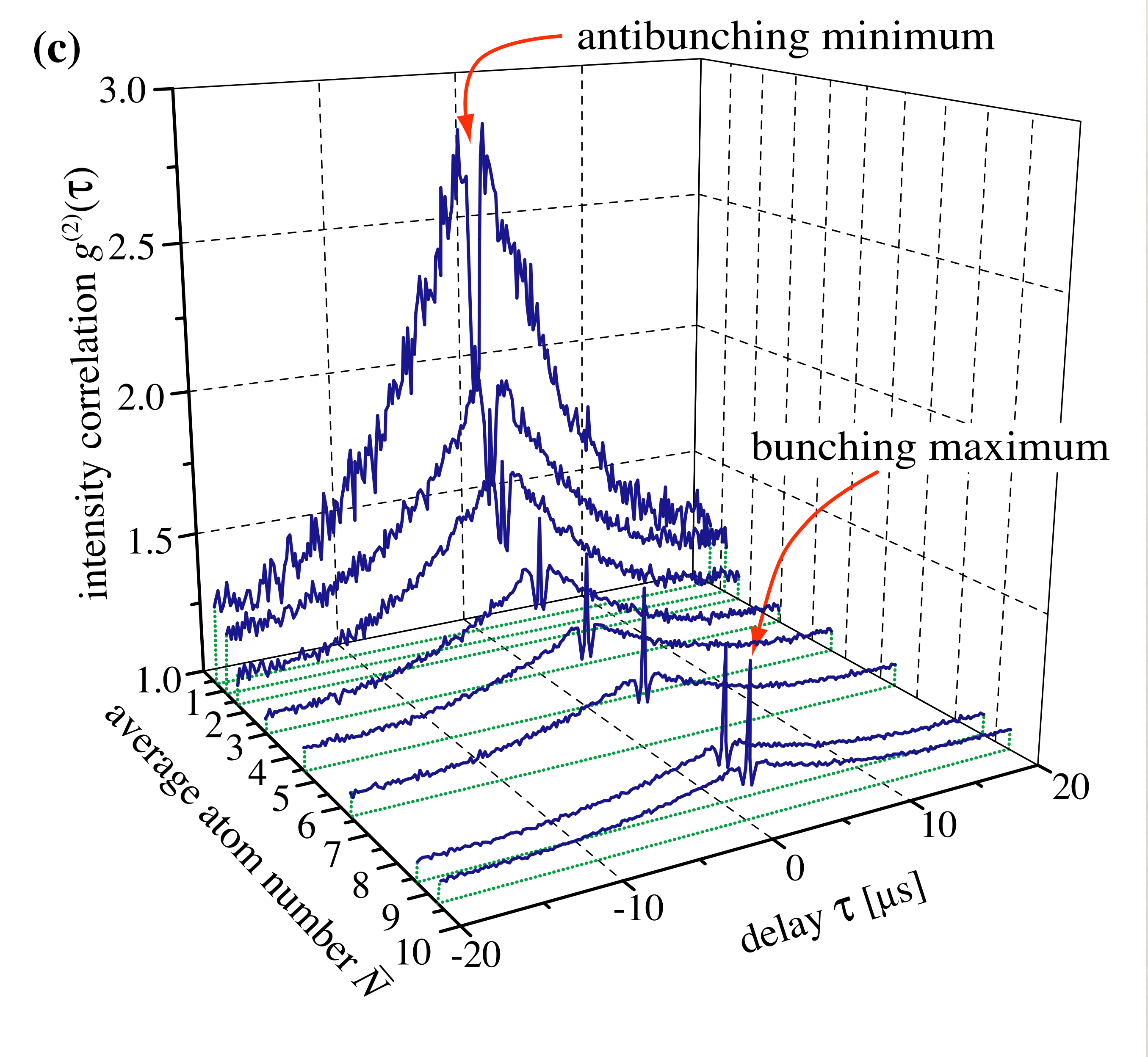
Von Antibunching zu Bunching

- *kontinuierlicher Übergang mit steigender Atomzahl*

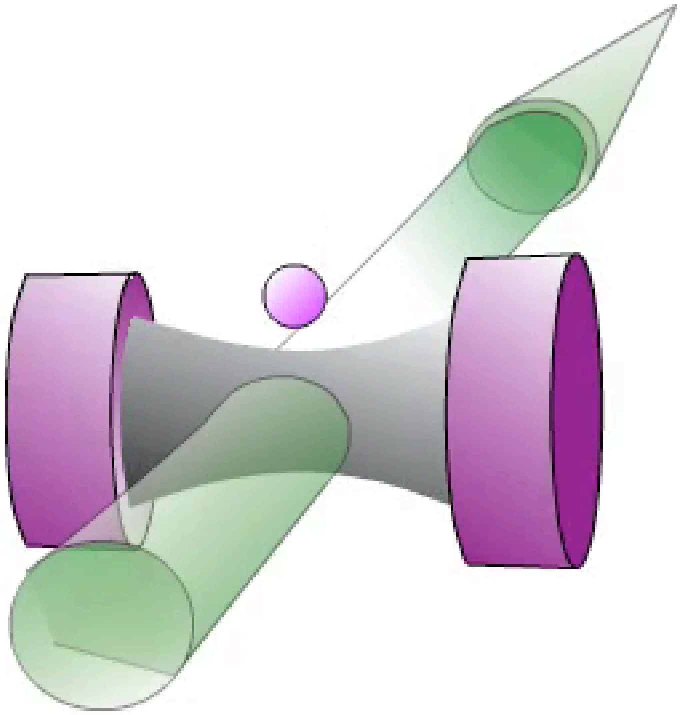
M. Hennrich, A. Kuhn & G. Rempe, Phys. Rev. Lett. 94, 53604 (2005)

- *Rückpumpdauer*
- *Kohärenzzeit*

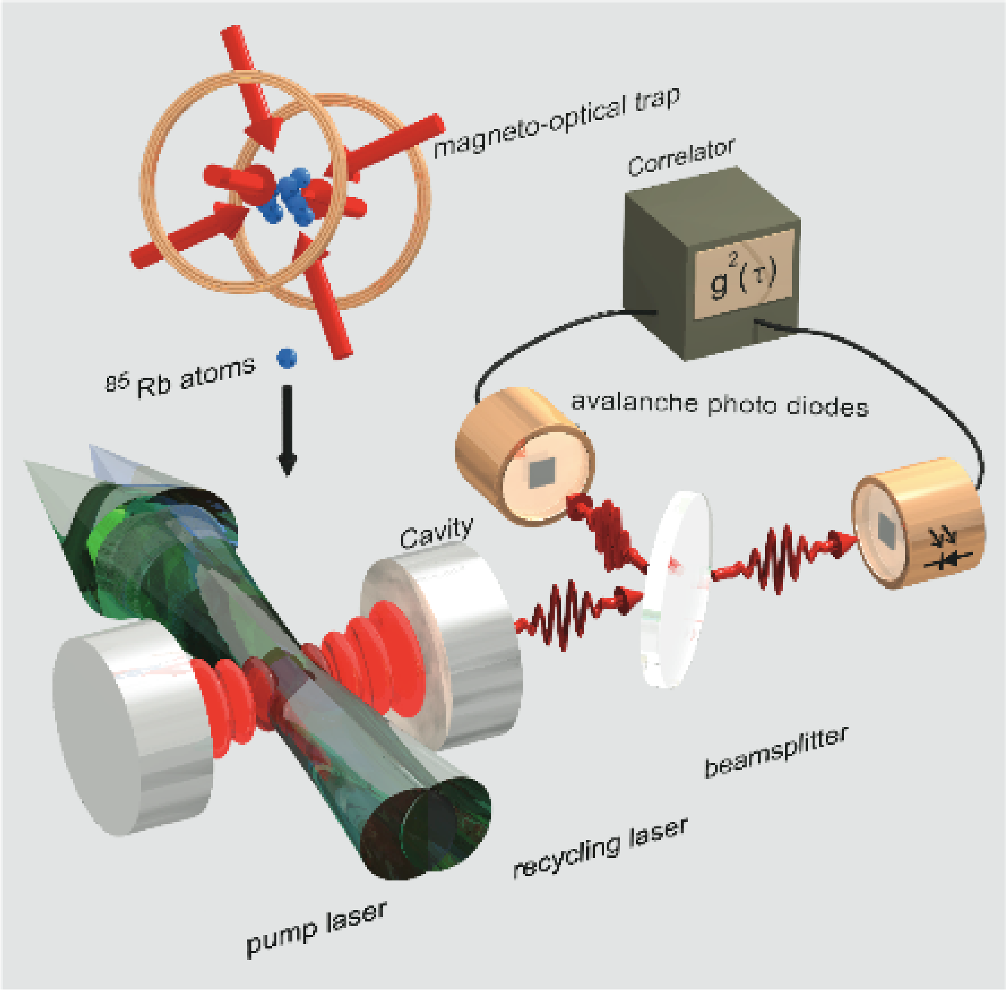




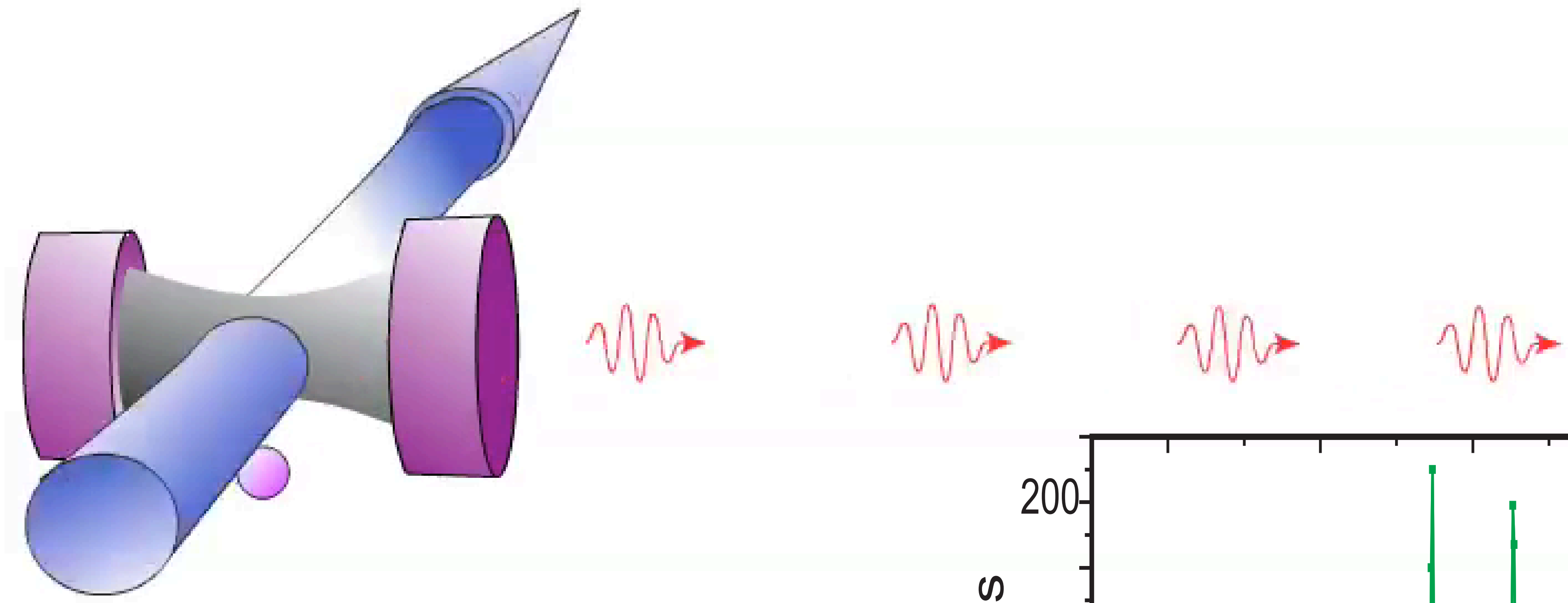
Photonen auf “Knopfdruck”



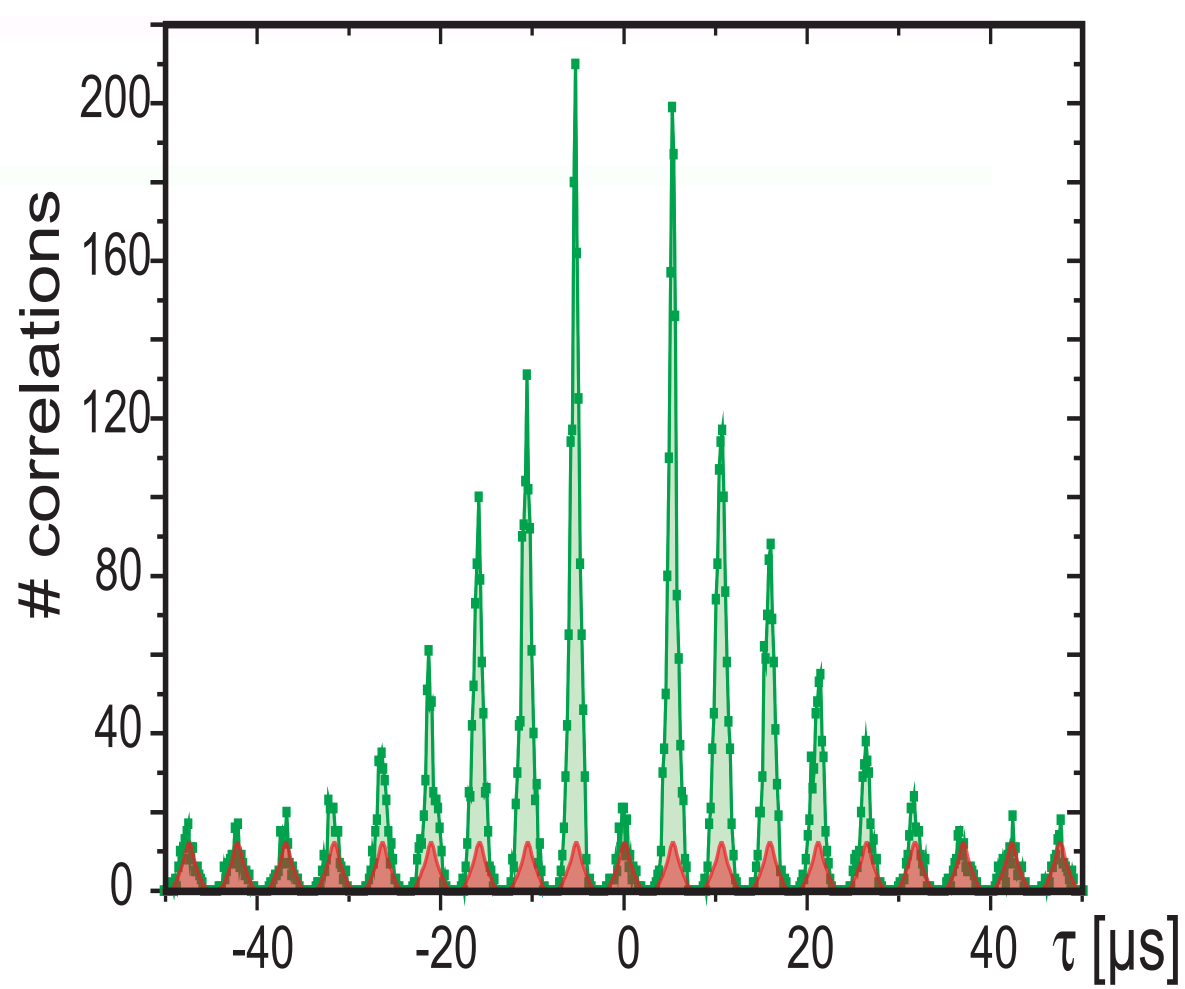
- *A. Kuhn et al.,*
  Phys. Rev. Lett. 89, 067901 (2002)
- *J. McKeever et al.,*
  Science 303, 1992 (2004)
- *M. Keller et al.,*
  Nature 431, 1075 (2004)



Photonen auf “Knopfdruck”



- *Einhüllende ⇒ begrenzte Zeit*
- *Äquidistanter Kamm*
  ⇒ Emission getriggert
- *Antibunching:* $g^{(2)}(0) < g^{(2)}(\Delta\tau)$
  ⇒ einzelne Photonen



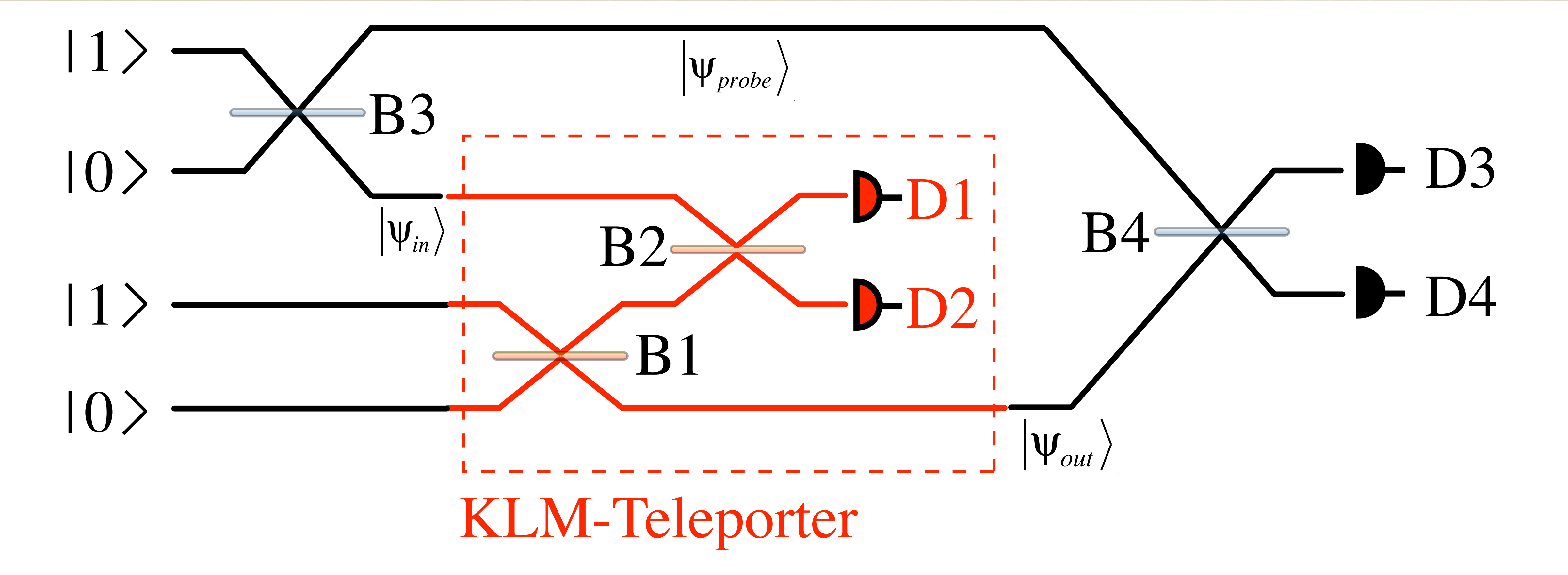
Einzelne Photonen - Wozu?

- *Quantenkryptographie*
- *Optische Quantencomputer*
- *Verschränkung und Teleportation*

Quantenlogik mit Licht

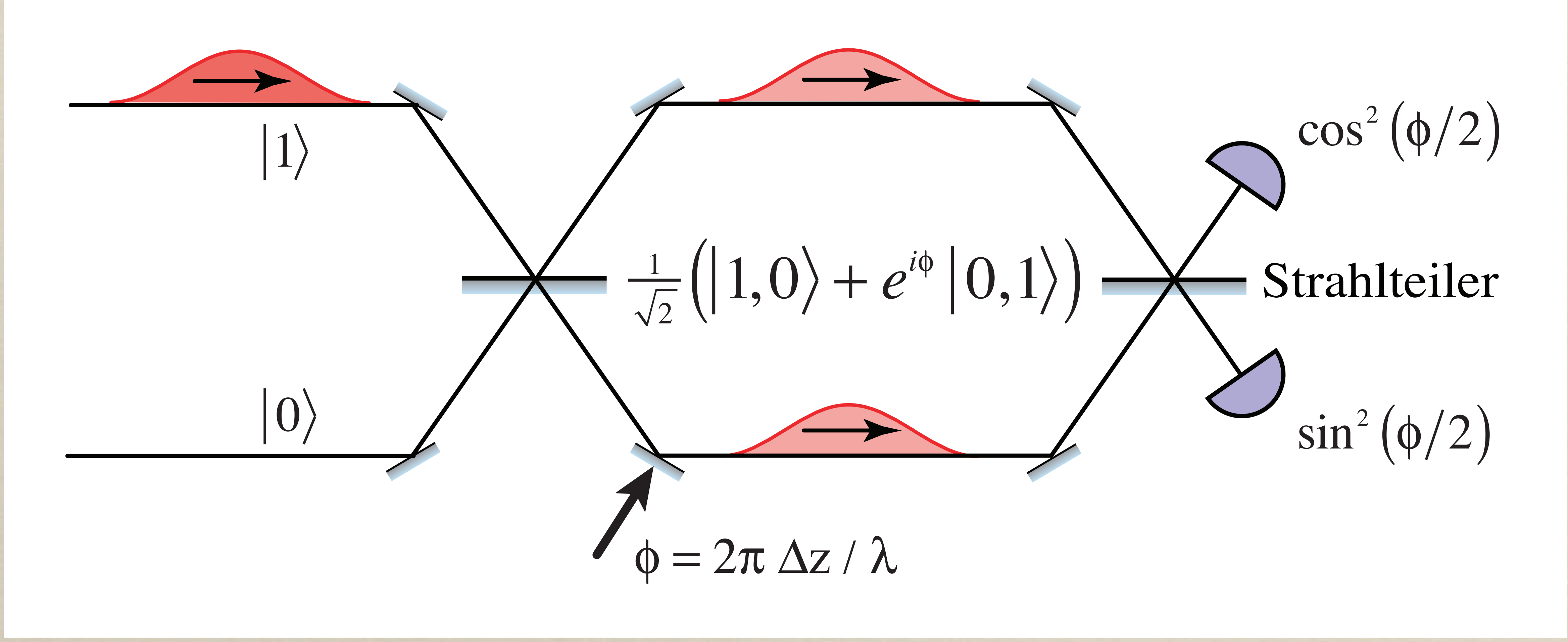
Knill, Laflamme & Milburn, Nature 409, 46 (2001)

- *Lineare Optik: Interferenz & Phasenschieber*
- *Einzelne Photonen kodieren 0 und 1*
- *Probabilistisch: Konditioniert auf Hilfsphotonen*

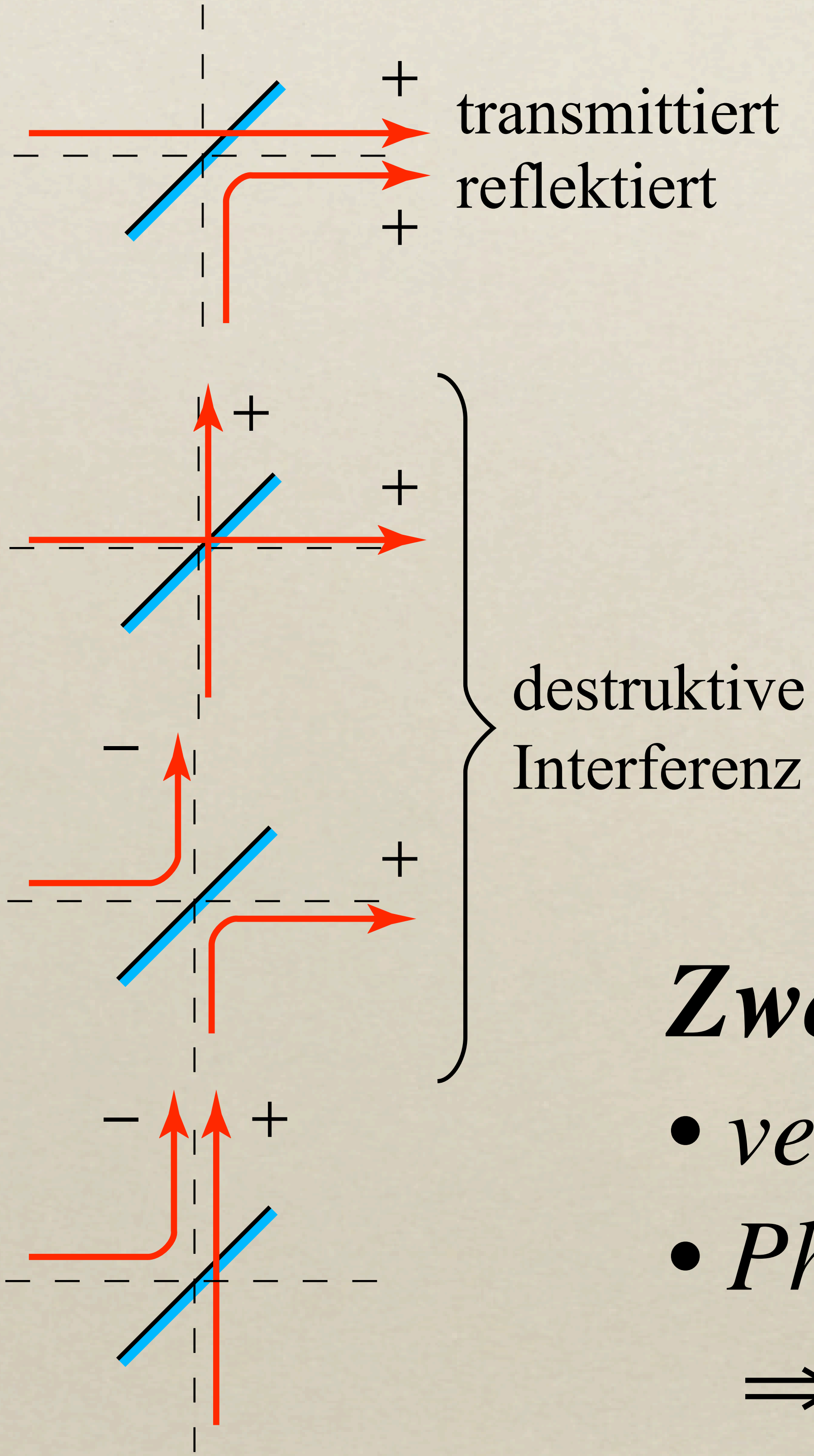


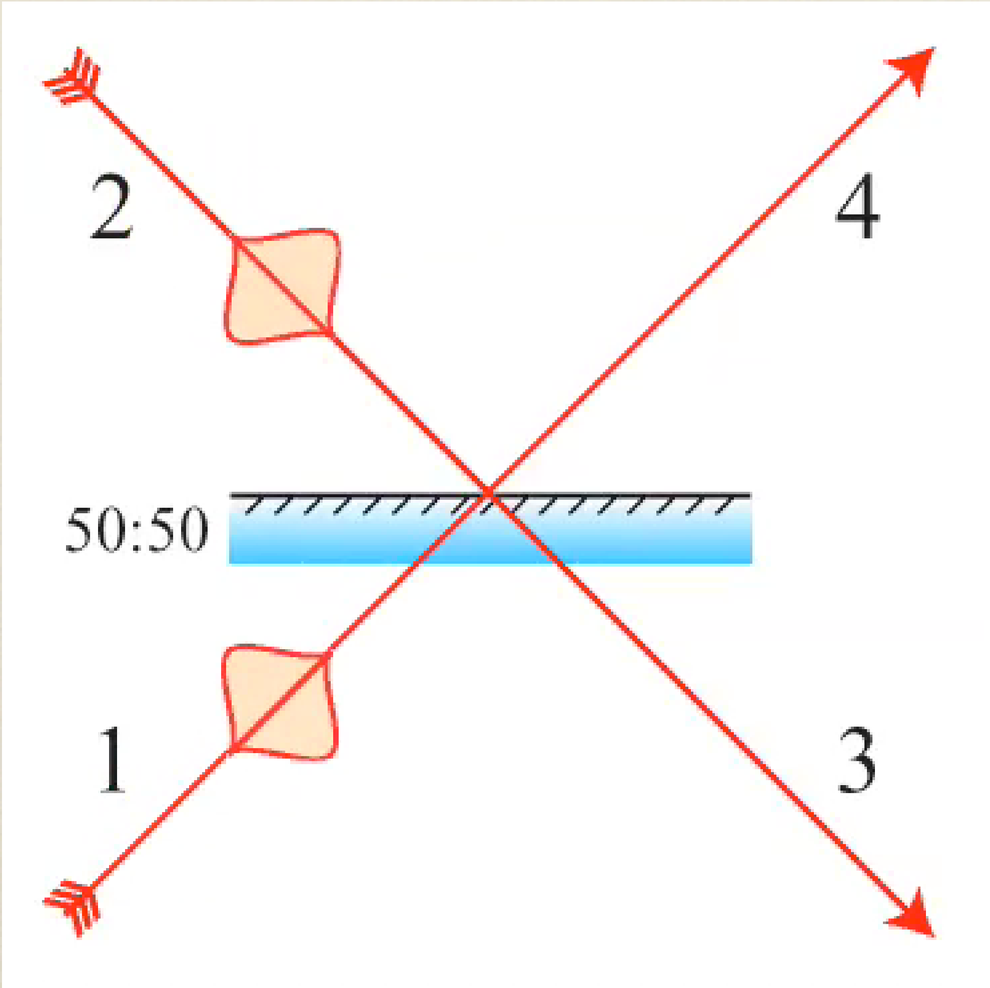
Interferenz – klassisch gesehen

- *Dirac: "Jedes Photon interferiert nur mit sich selbst"*



Interferenz unabhängiger Photonen





Zwei Photonen am Strahlteiler:

- *verlassen den Strahlteiler als Paar*
- *Phasensprung bei Reflektion*

  $\Rightarrow$ *destruktive Interferenz*

Interferenz unabhängiger Photonen

- *Photonenpaar aus einem nichtlinearen Kristall*

  Hong, Ou & Mandel,
  Phys. Rev. Lett. 59, 2044 (1987)

- *unabhängige Photonen von einem Quantenpunkt*

  C. Santori et al.
  Nature 419, 594 (2002)

$$|1,1\rangle \rightarrow \left(|2,0\rangle - |0,2\rangle\right)/\sqrt{2}$$

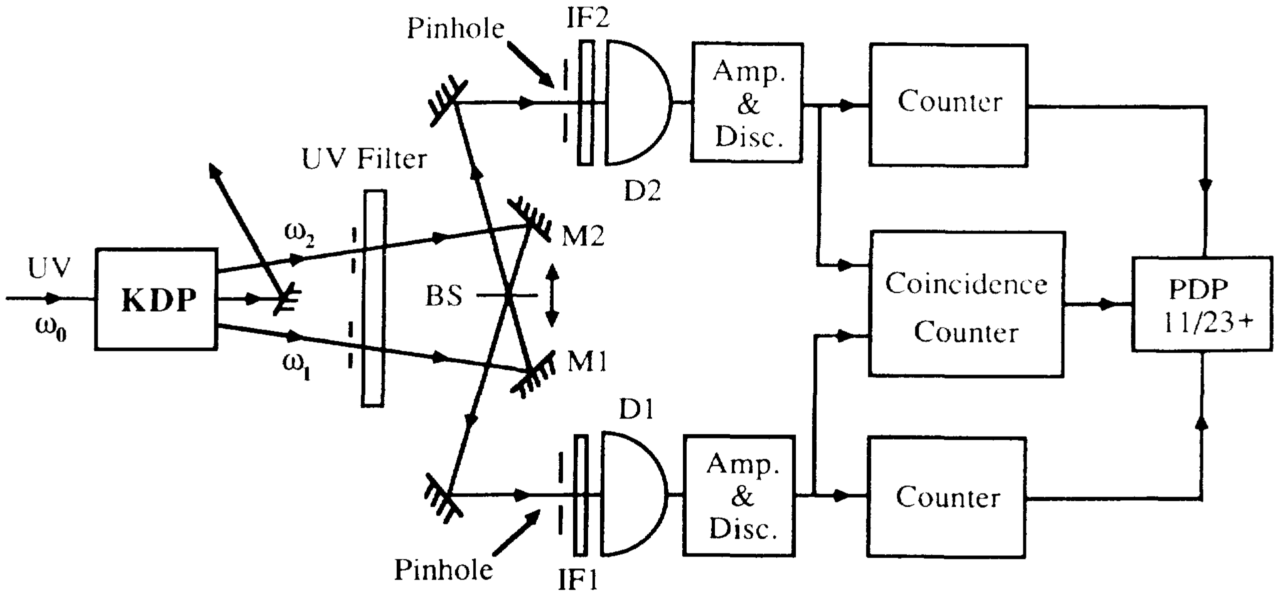
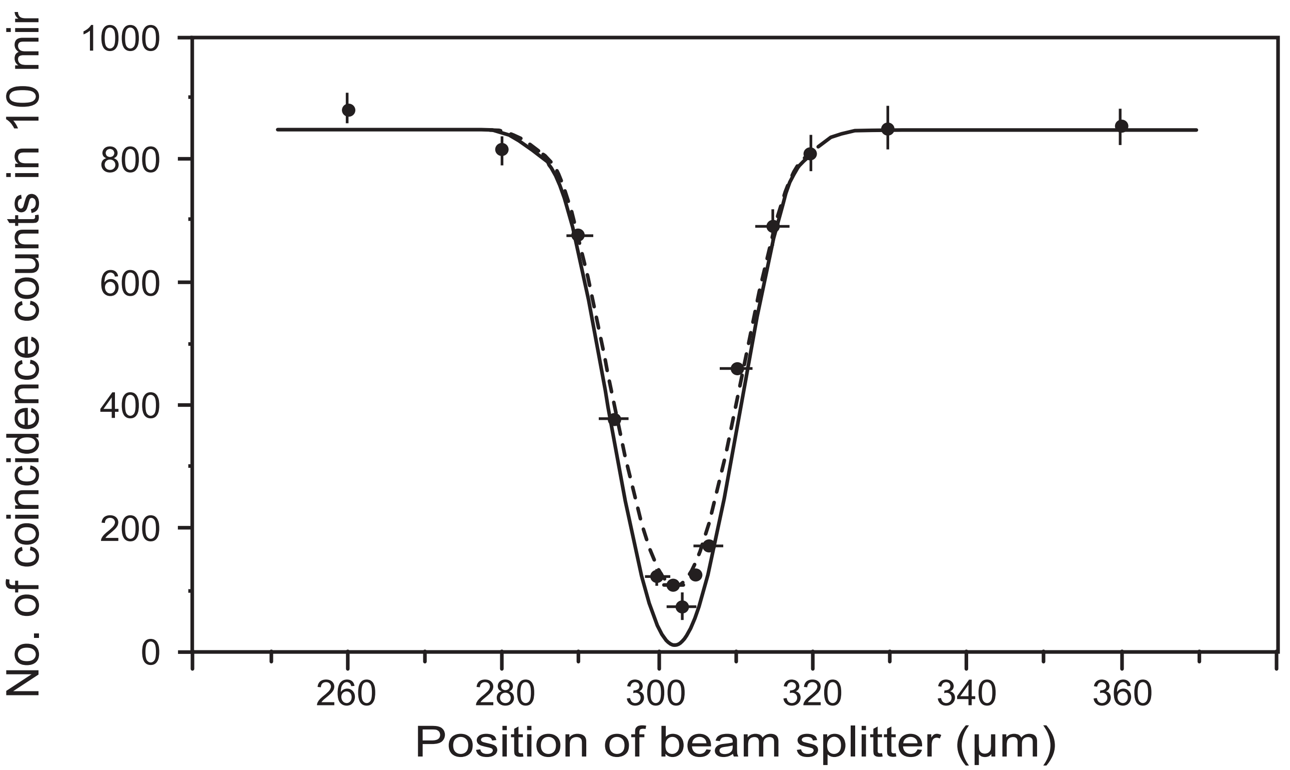
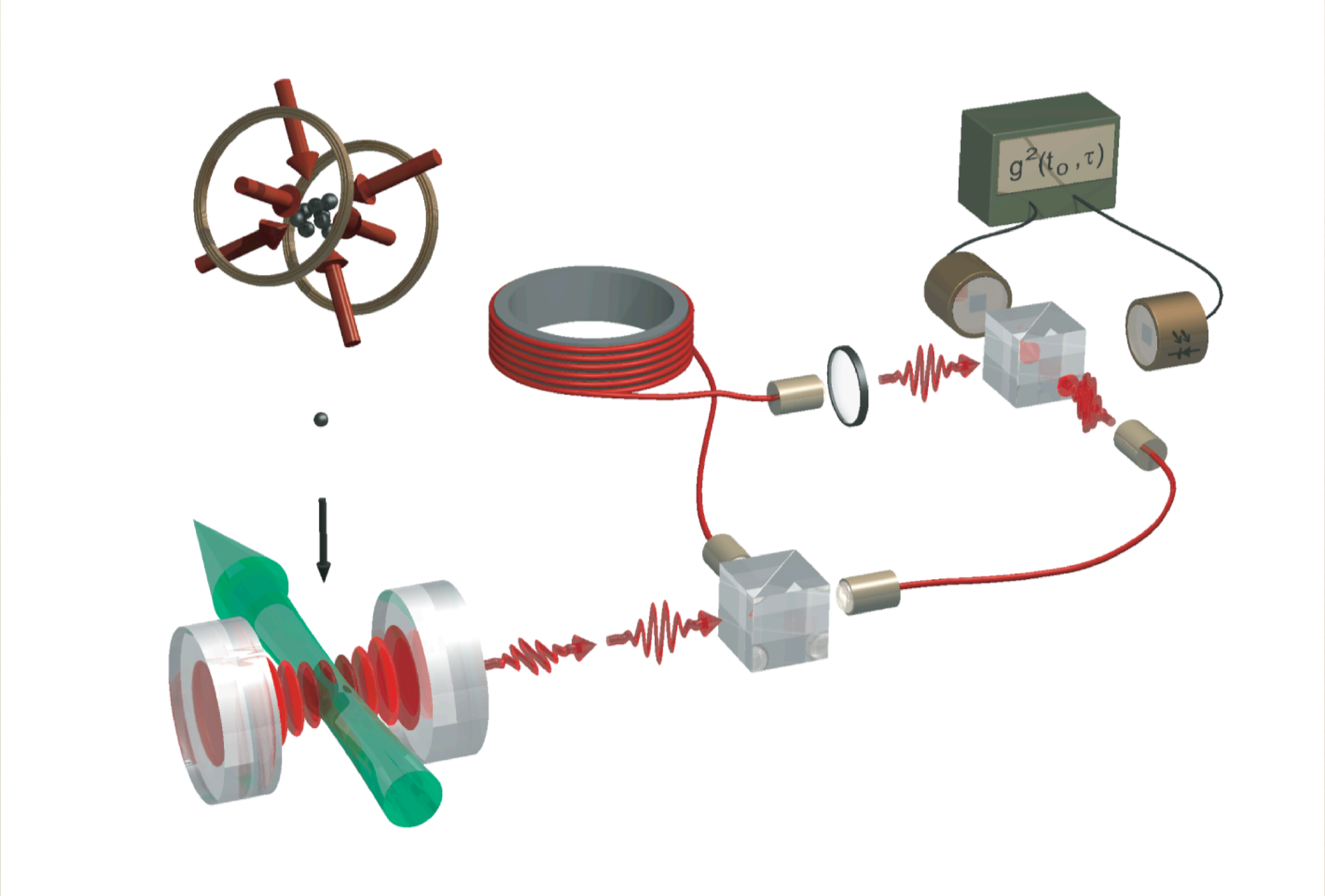


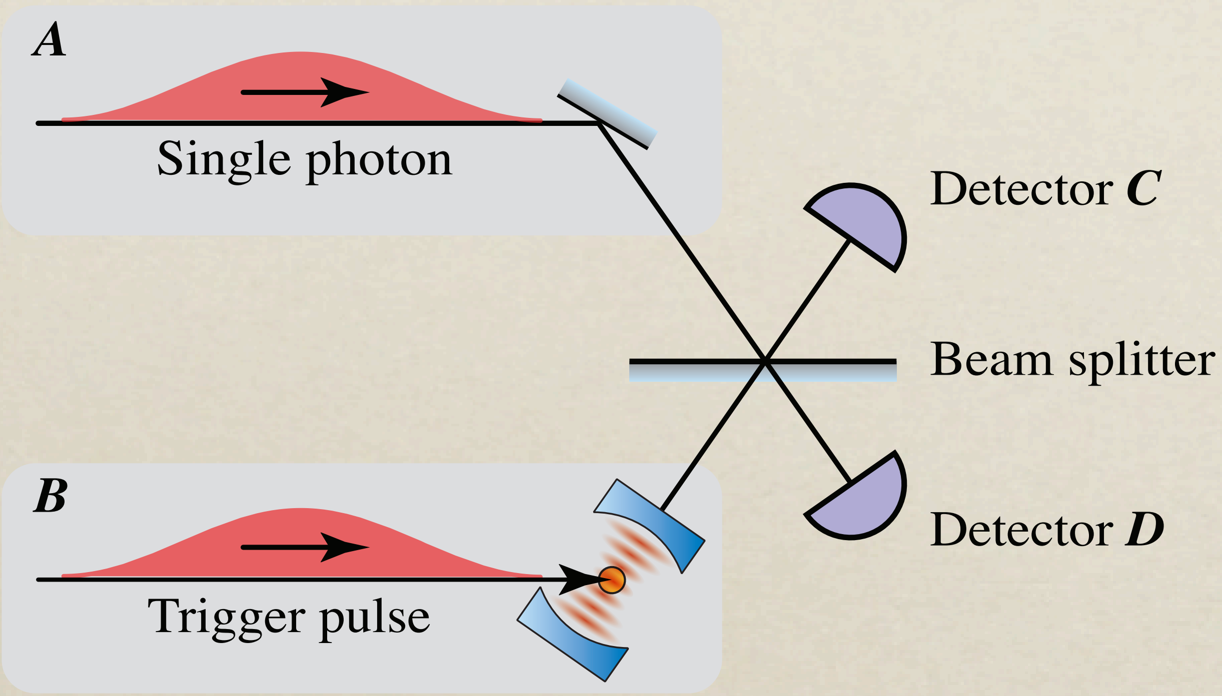
FIG. 1. Outline of the experimental setup.



Interferenz unabhängiger Photonen



Interferenz unabhängiger Photonen



Zeitaufgelöste Zwei-Photonen-Interferenz

T. Legero et al.
Appl. Phys. B 77, 797 (2003)

$$|1,1\rangle$$

1. Detektion $\downarrow$

$$\left(|1,0\rangle \pm |0,1\rangle\right)/\sqrt{2}$$

... Dephasierung $\downarrow$

$$\left(|1,0\rangle \pm e^{i\phi}|0,1\rangle\right)/\sqrt{2}$$

2. Detektion $\downarrow$

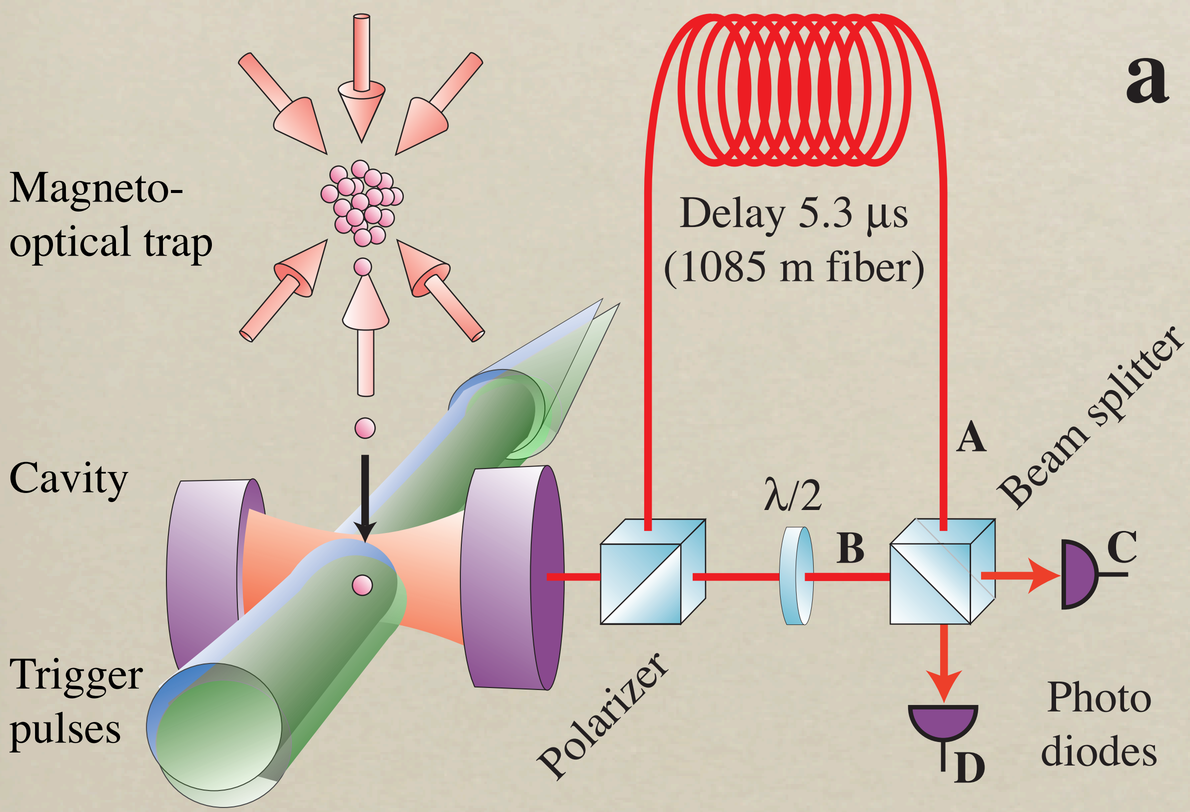
$$P_{Koinzidenz} = \sin^2\left(\phi/2\right)$$

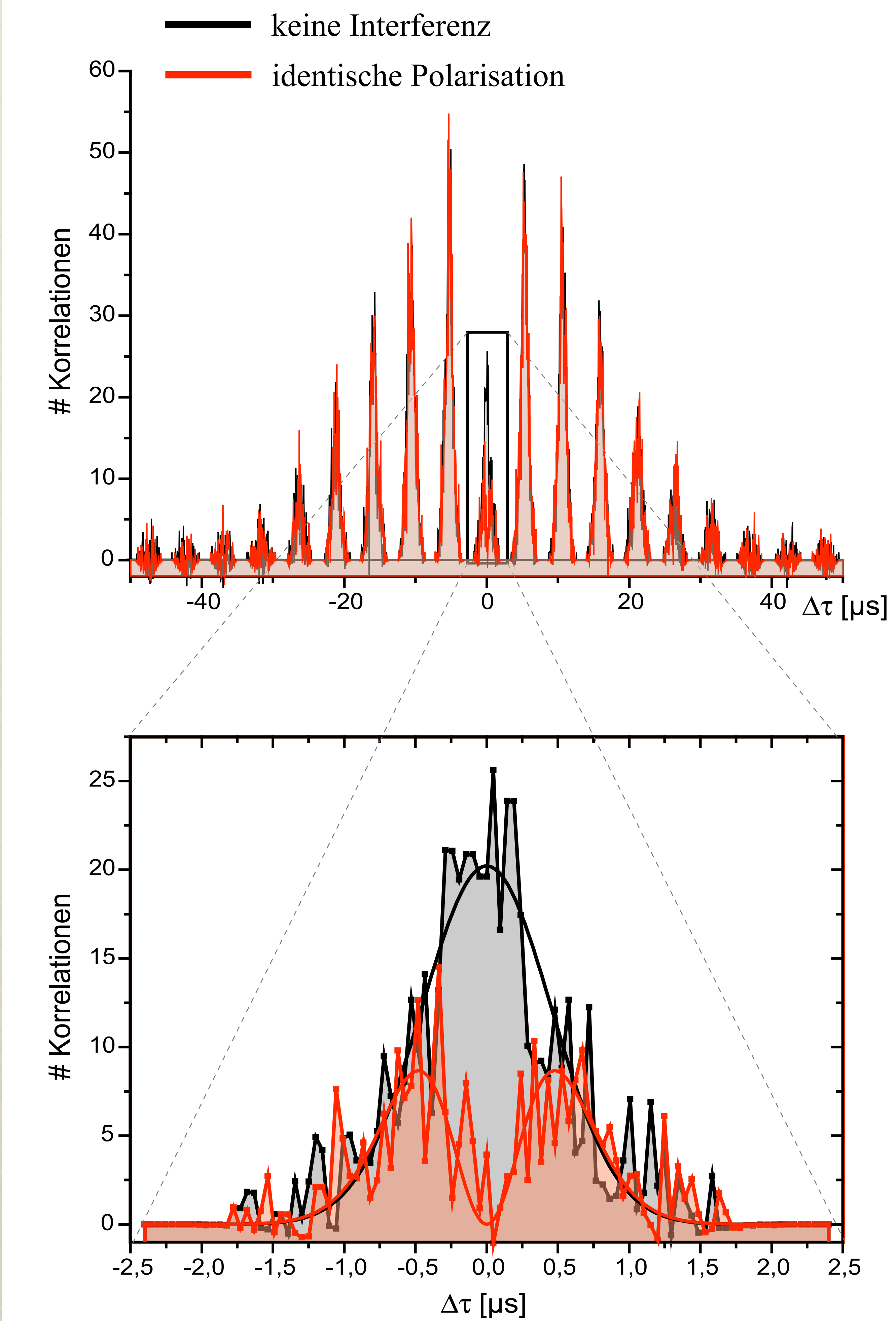
Zeitaufgelöste Zwei-Photonen-Interferenz

T. Legero et al.

Phys. Rev. Lett. 93, 70503 (2004)

Interferenz unabhängig erzeugter Photonen

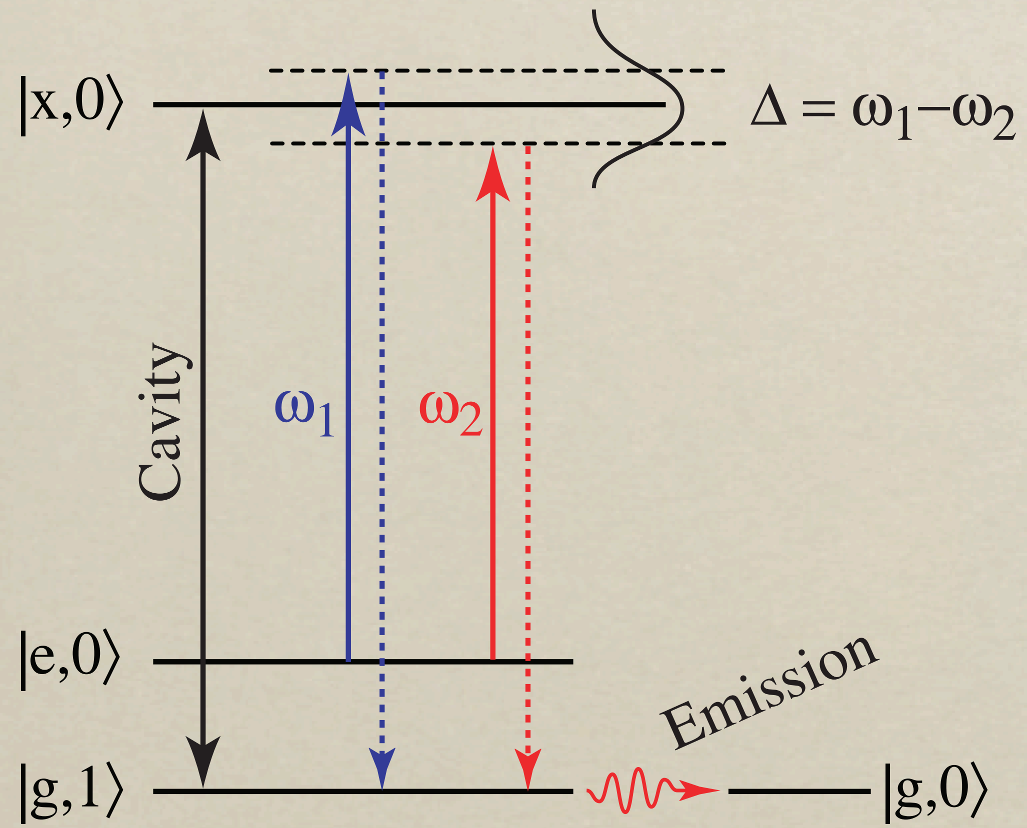


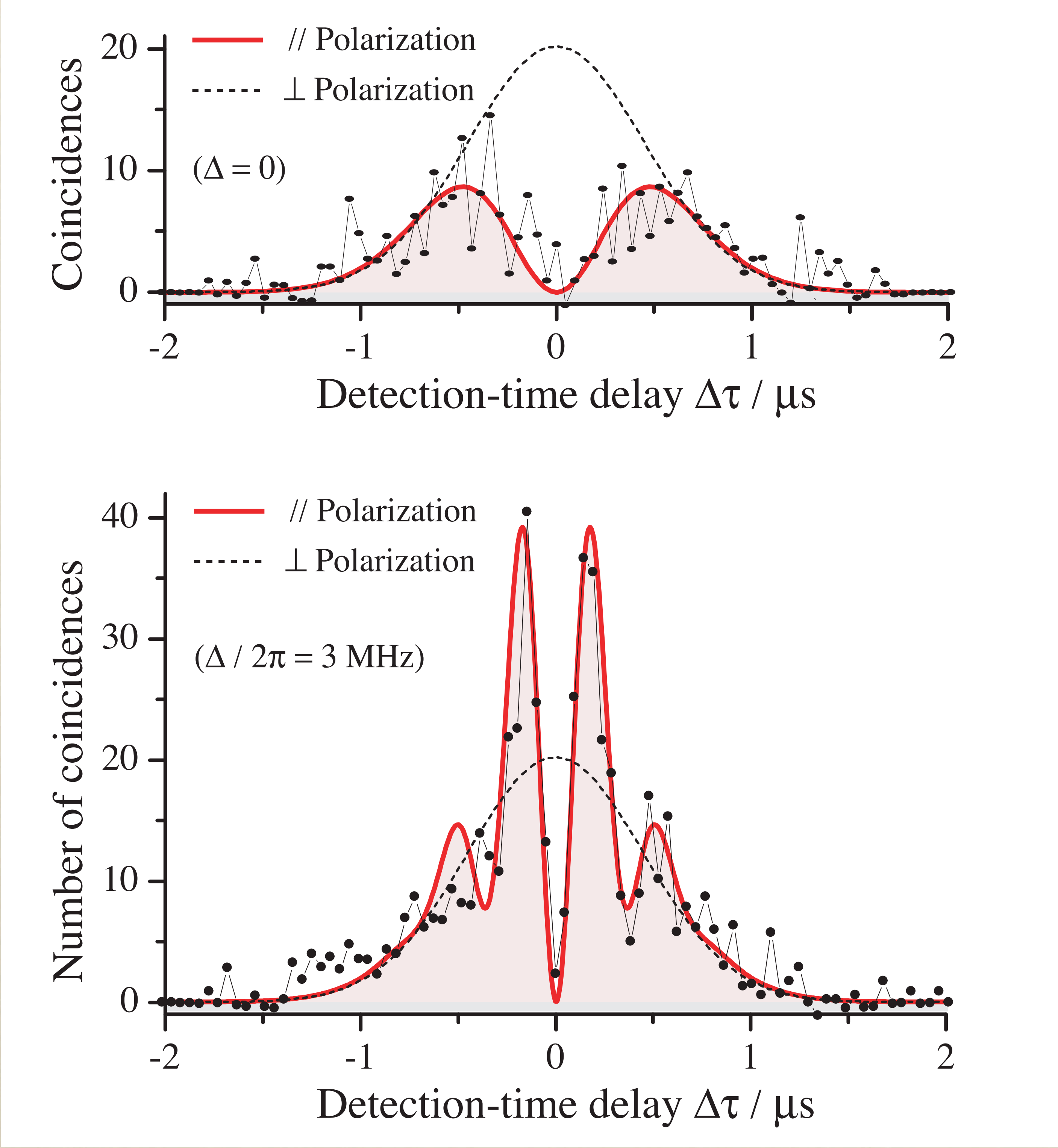


Zwei-Photonen Quantenbeat

Unterschiedliche Frequenz

- *Dephasierung:* $\phi = \Delta\tau\ \Delta\omega$
- *Oszillation in der Korrelationsfunktion*





Zusammenfassung