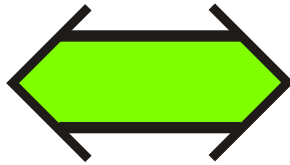
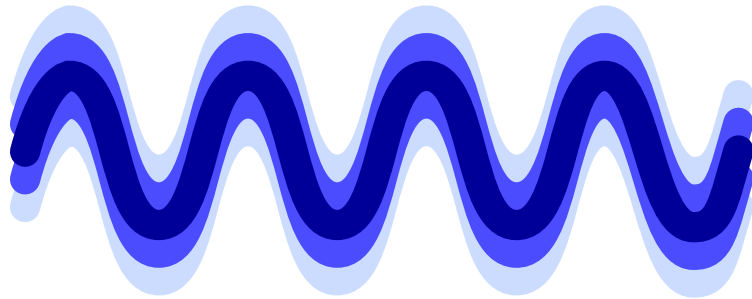


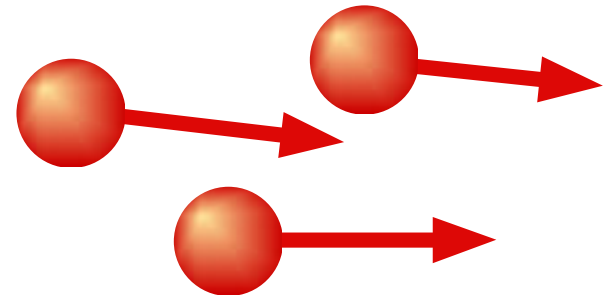
Nichtklassisches Licht

Experimentell beobachtbare Konsequenzen
der quantenmechanischen Natur des Lichtes

Welle

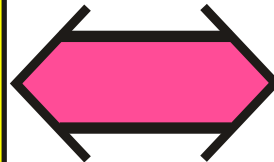


Teilchen



Maxwell
Gleichungen

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2}$$



QED

$$H = \hbar \omega \left(a^\dagger a + \frac{1}{2} \right)$$

Die Natur des Lichtes

Welle oder Teilchen ?

Robert Hooke (1635-1703)

Beobachtet Interferenz und Beugung; Wellentheorie

Isaac Newton (1642-1727)

Teilchentheorie mit WellenASPEKTEN

Thomas Young (1773-1829)

Augustin Jean Fresnel (1788-1827)

Wellentheorie erklärt Interferenzeffekte

James Clerk Maxwell (1831-1879)

Elektrodynamik: Ausbreitung elektromagnetischer Wellen

Die Natur des Lichtes

Welle oder Teilchen ?

Max Karl Ernst Ludwig Planck (1858-1947)

1900: Erklärung der Schwarzkörperstrahlung mit Hilfe von 'Lichtquanten'

Albert Einstein (1879-1955)

1905: Erklärung des photoelektrischen Effekts mit Hilfe von 'Lichtquanten'. Ab 1926 werden diese als 'Photonen' bezeichnet (G.N. Lewis).

Hamiltonoperator

Elektromagnetisches Feld

$$\mathcal{H} = \frac{1}{2} \int_V dV (\epsilon_0 E_0^2 + \mu_0 H_0^2)$$

Harmonischer Oszillator

$$\mathcal{H} = \frac{1}{2} (\Omega^2 q^2 + p^2)$$

Identifizieren

$$\int_V dV (\epsilon_0 E_0^2) = \Omega^2 q^2$$

$$\int_V dV (\mu_0 H_0^2) = p^2$$

$$a = \frac{1}{\sqrt{2h\Omega}} (\Omega q + ip)$$

$$a^\dagger = \frac{1}{\sqrt{2h\Omega}} (\Omega q - ip)$$

Quanten-Elektrodynamik

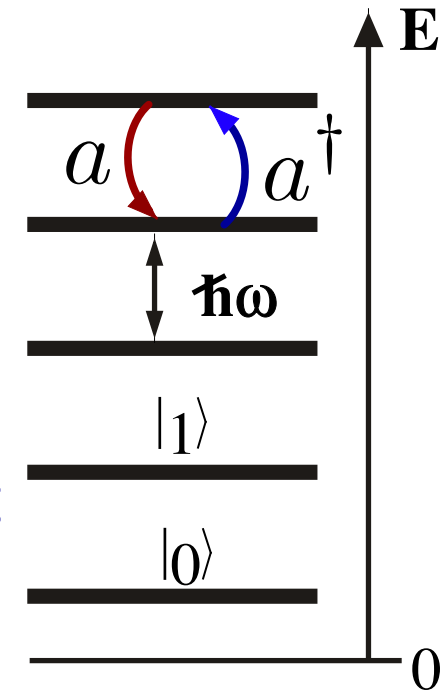
Die wichtigsten Grundlagen

Strahlungsfeld =
harmonische Oszillatoren

$$E \propto (a + a^\dagger)$$

elektrisches
Feld

Vernichtung **Erzeugung**
eines Photons



einige Unterschiede zur Maxwell-Theorie

Die Energie des Strahlungsfeldes ist quantisiert
Nullpunktsenergie $\hbar\omega/2$

Heisenberg-Beziehungen: Intensität / Phase, Quadraturamplituden

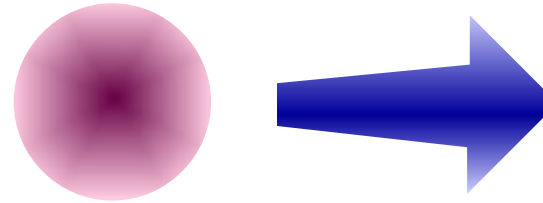
(halb-) klassischer Limit

für grosse Quantenzahlen (hier v.a. grosse Photonen-zahlen) und niedrige Photonenenergien kann das Licht in guter Näherung klassisch beschrieben werden

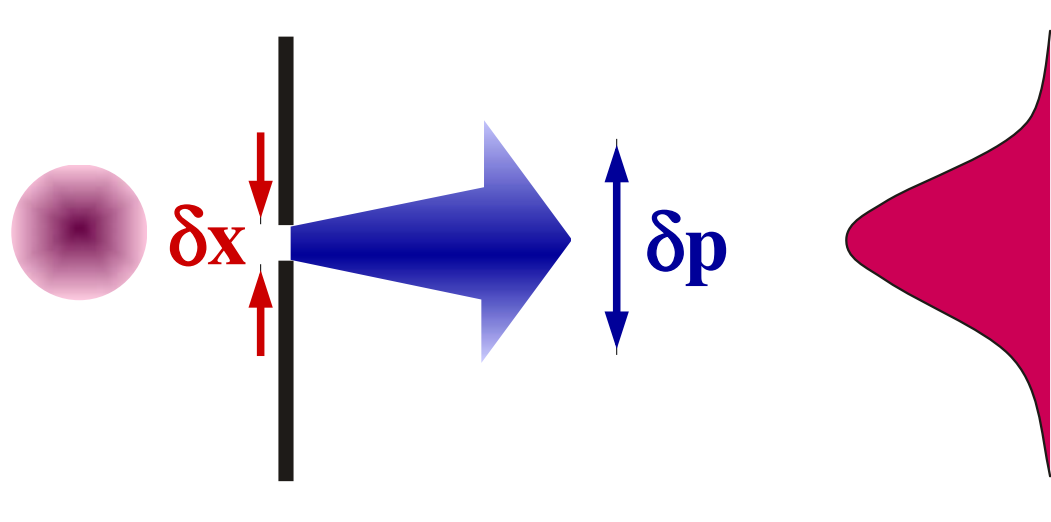
Unschärfe

$$\delta x \delta p \geq \frac{\hbar}{2}$$

Teilchen

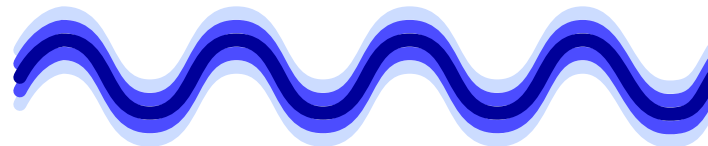


Beispiel: Beugung am Spalt



$$\delta E \delta B \geq k \frac{\hbar}{2}$$
$$\delta n \delta \phi \geq \frac{1}{2}$$

Welle

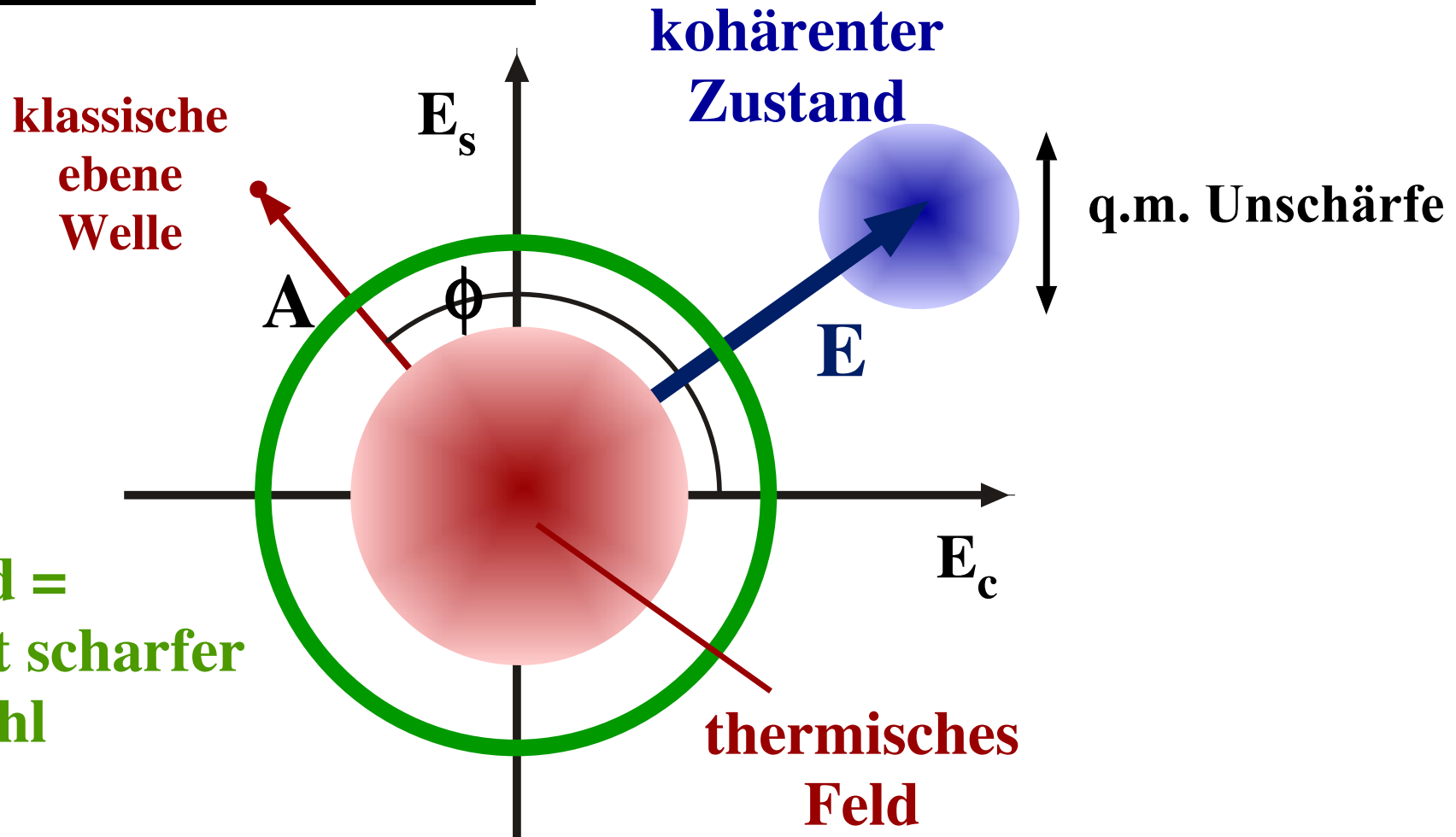


Zustände 1er Mode

monochromatisches Feld in komplexer Schreibweise

$$\mathbf{E}(t) = E_c \cos(\omega t) + i E_s \sin(\omega t)$$

eine Auswahl von Zuständen



**Zahlzustand =
Zustand mit scharfer
Photonenzahl**

Kohärente Zustände

Kohärente Zustände können in einer Basis von Zahlzuständen geschrieben werden als

$$|\alpha\rangle = e^{-|\alpha|^2/2} \sum_n \frac{\alpha^n}{\sqrt{n!}} |n\rangle$$

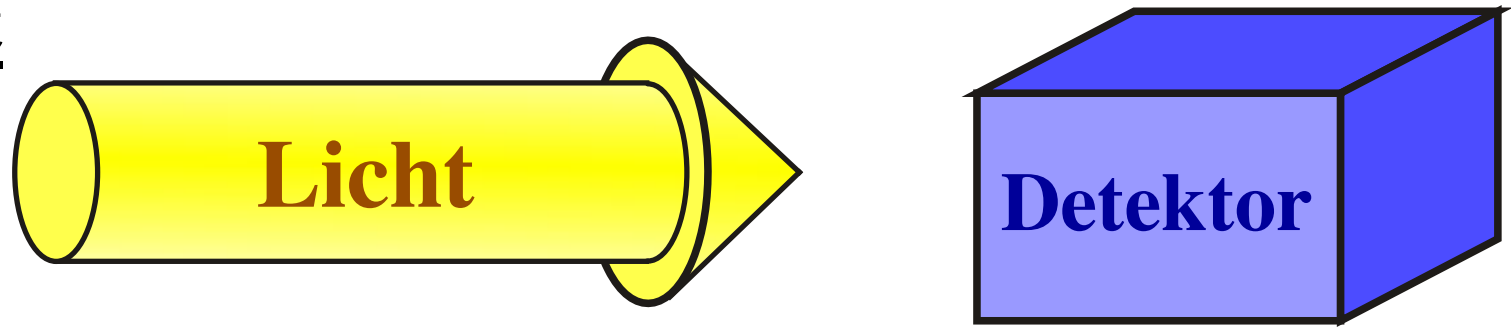
R.J. Glauber, Phys.Rev. 130, 2529; 131, 2766 (1963).

Eigenschaften

- Zustand minimaler Unschärfe: $\Delta p \Delta q = \frac{\hbar}{2}$
- Der Schwerpunkt gehorcht den Maxwell Gleichungen
- Schließt den Vakuumzustand ein

Photonenstatistik

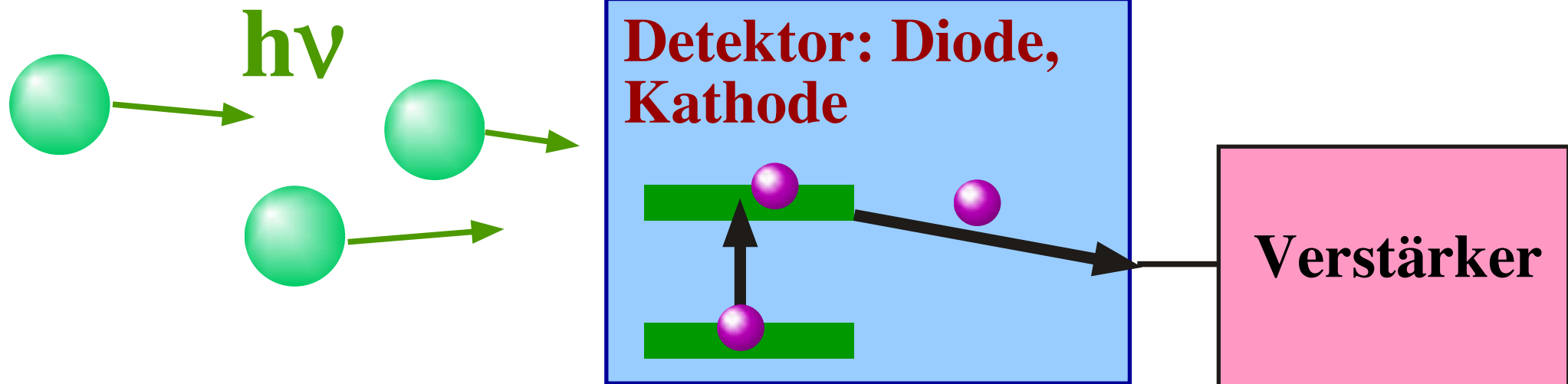
Experiment



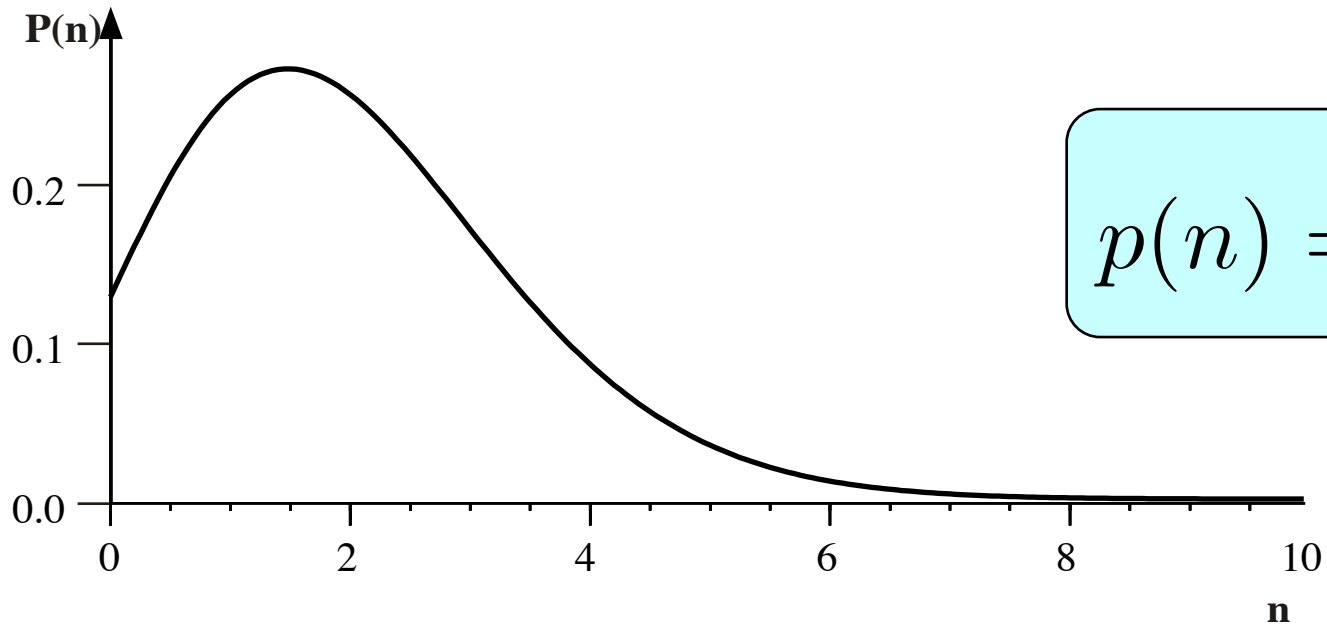
Signal



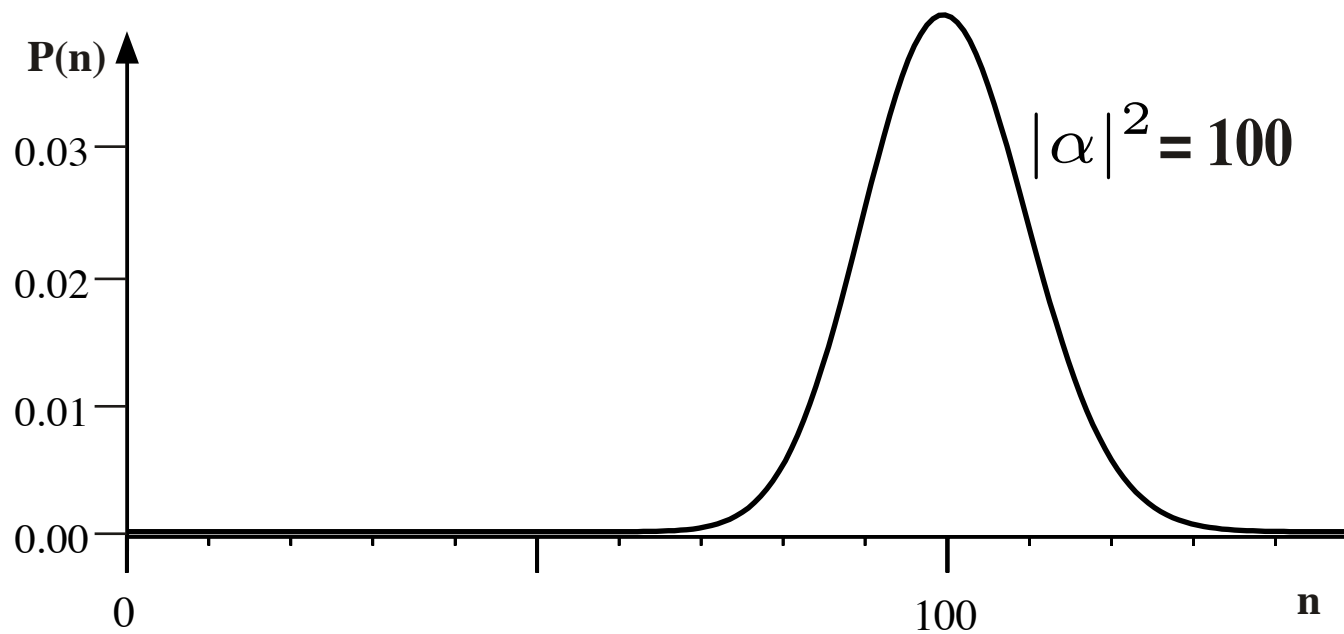
Modell



Poisson Verteilung

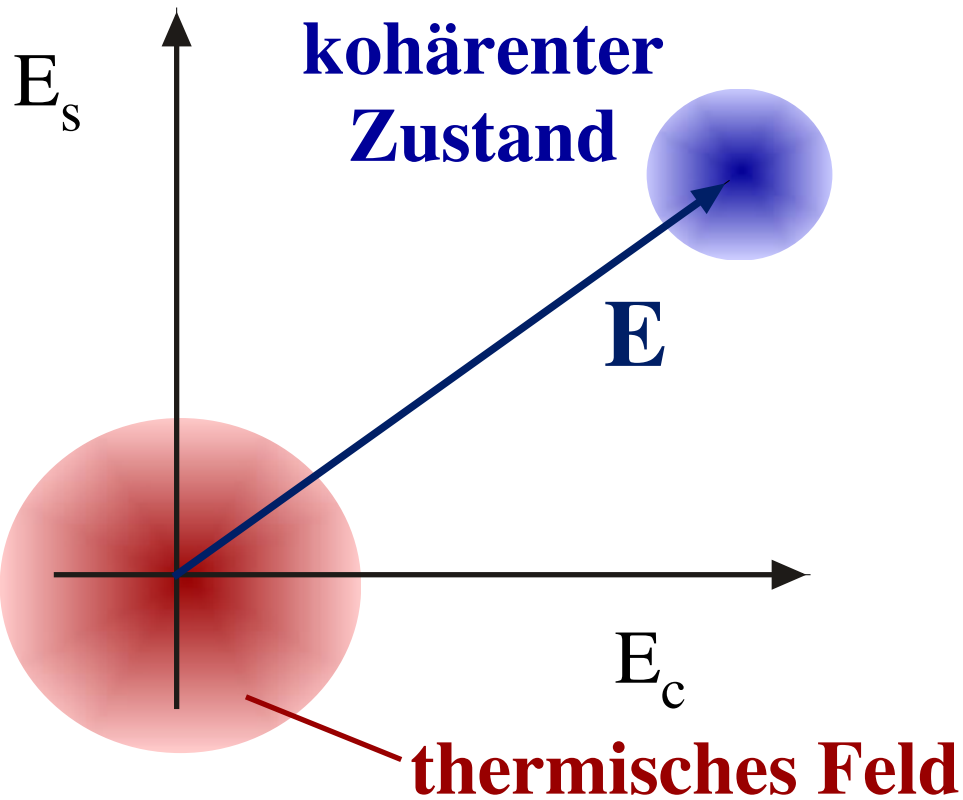


$$p(n) = e^{-|\alpha|^2} \frac{|\alpha|^{2n}}{n!}$$

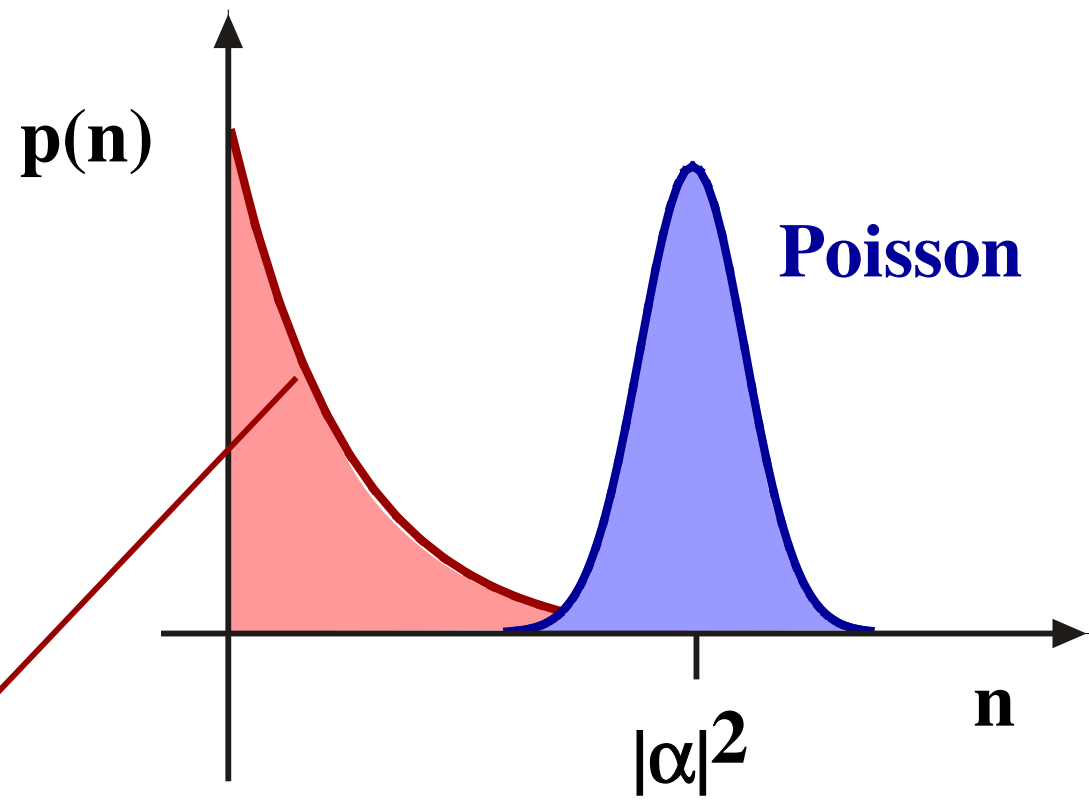


Kohärente vs. thermische Zustände

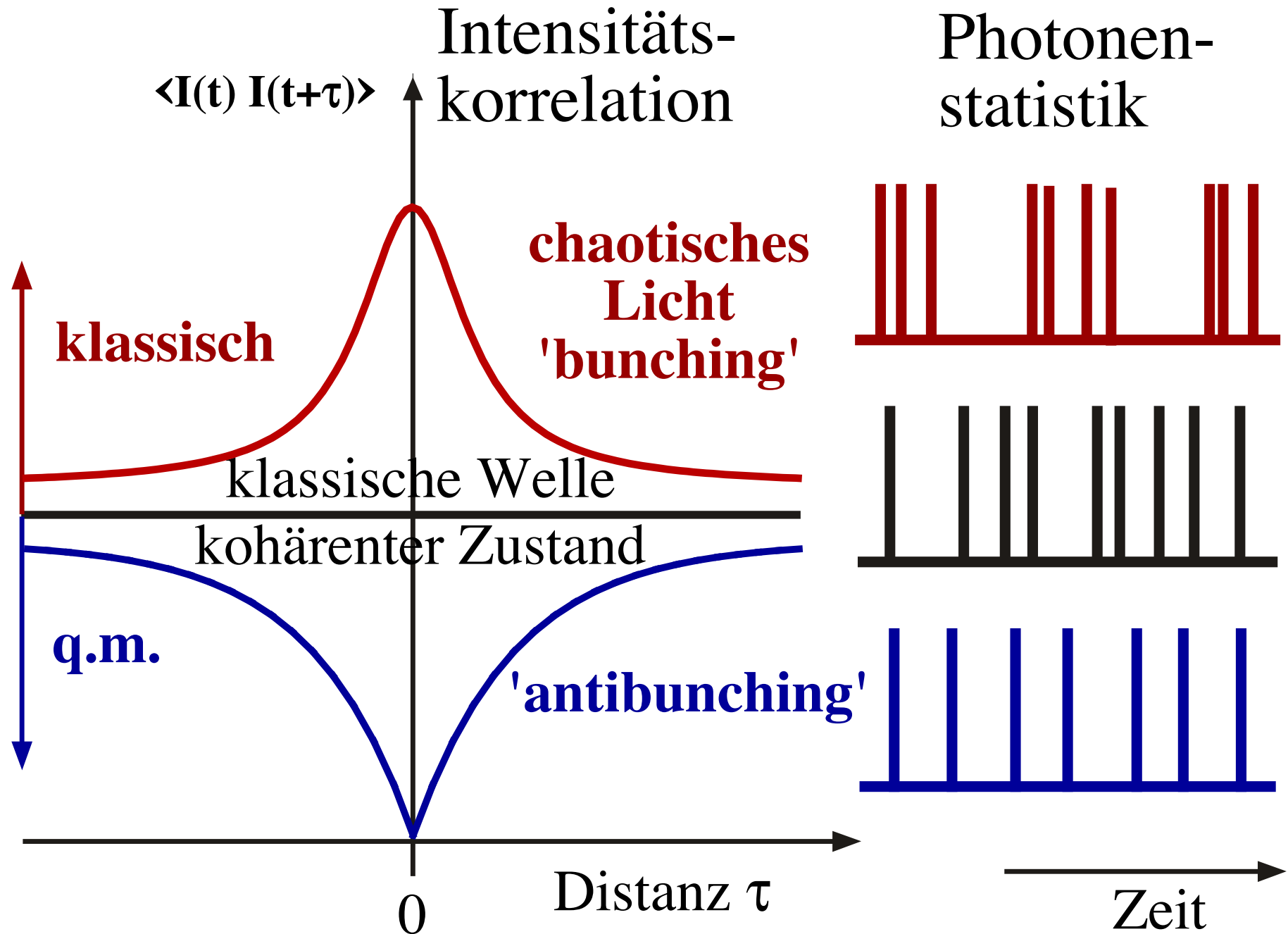
Feldverteilung



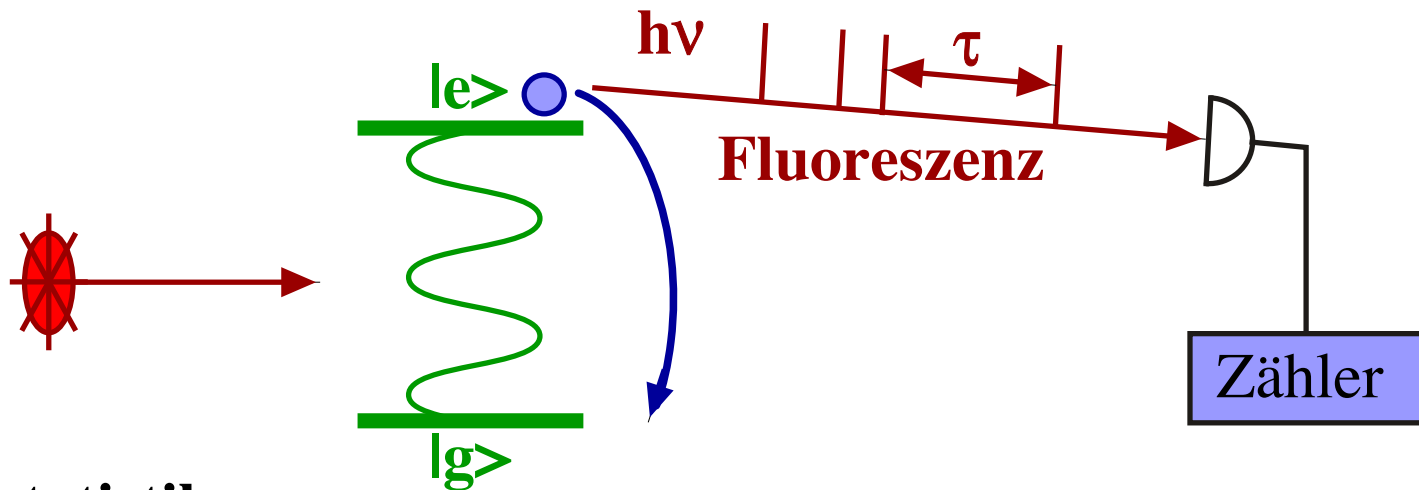
Photonenstatistik



Intensitätskorrelation



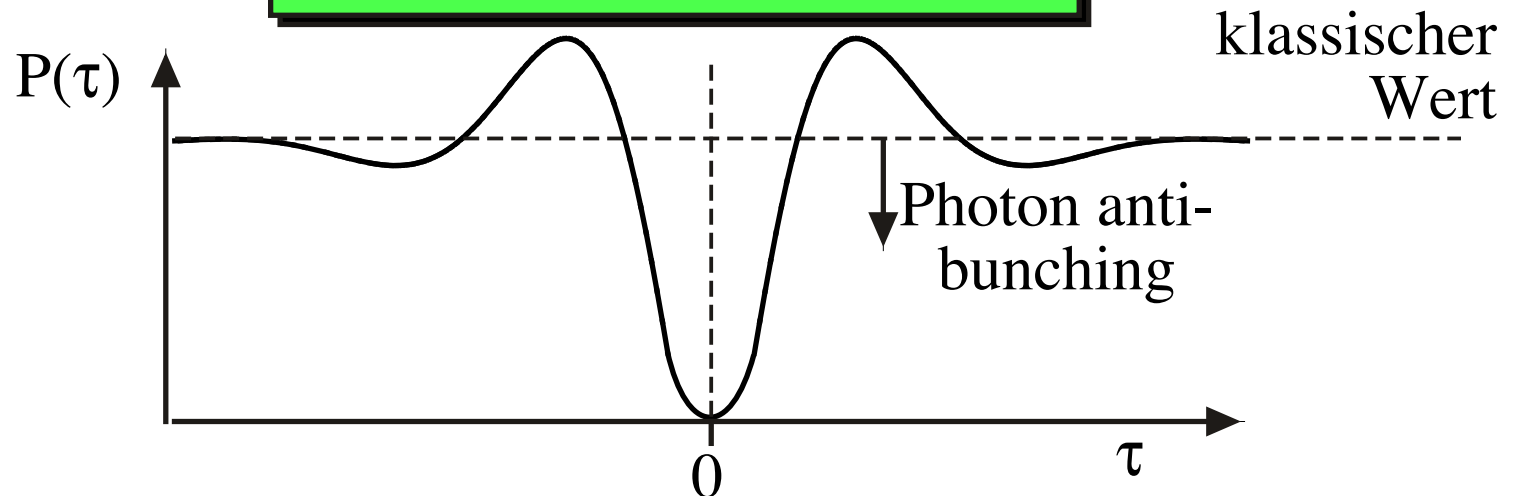
Resonanzfluoreszenz



Photonenstatistik

Wie gross ist die Wahrscheinlichkeit $P(\tau)$, innerhalb einer Zeit τ nach dem Nachweis eines Photons ein zweites zu beobachten?

$$P(\tau) = 1 - e^{-(\gamma+\Gamma)\tau/2} \cos(R_0\tau)$$

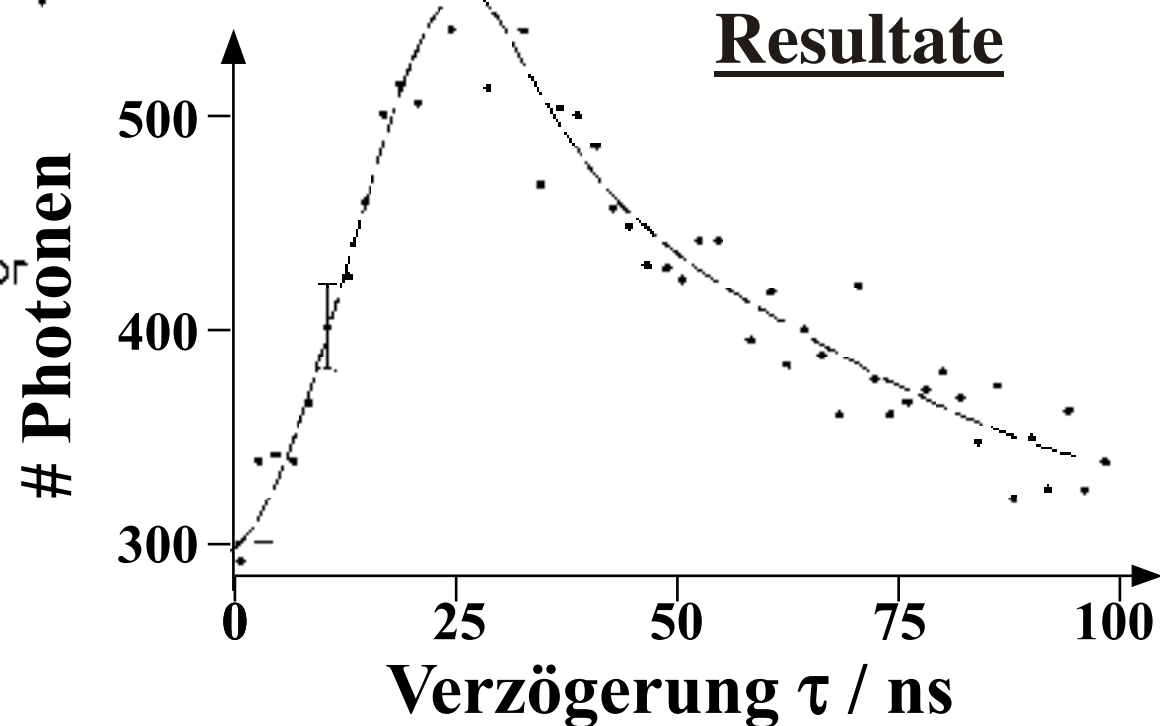
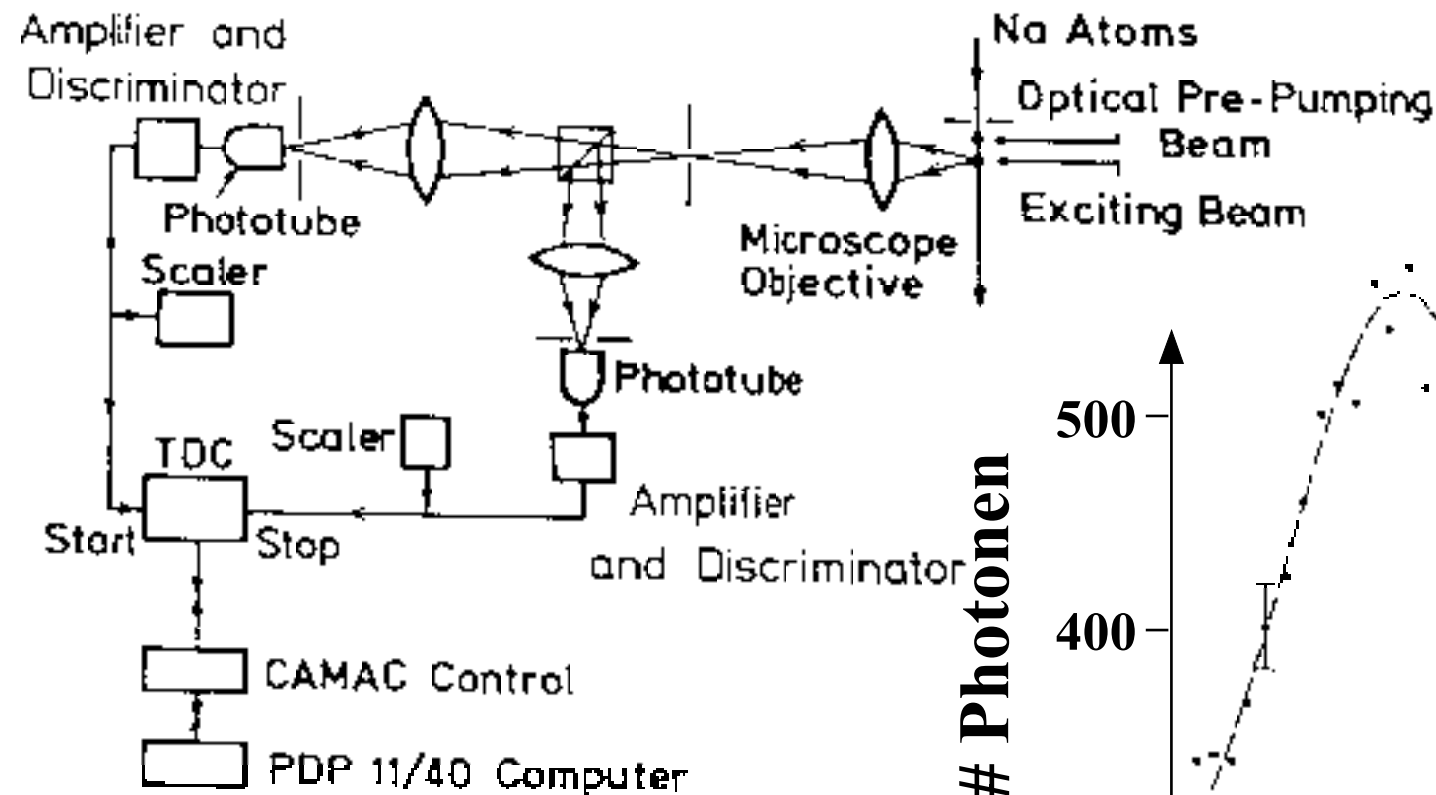


Fluoreszenz Antibunching

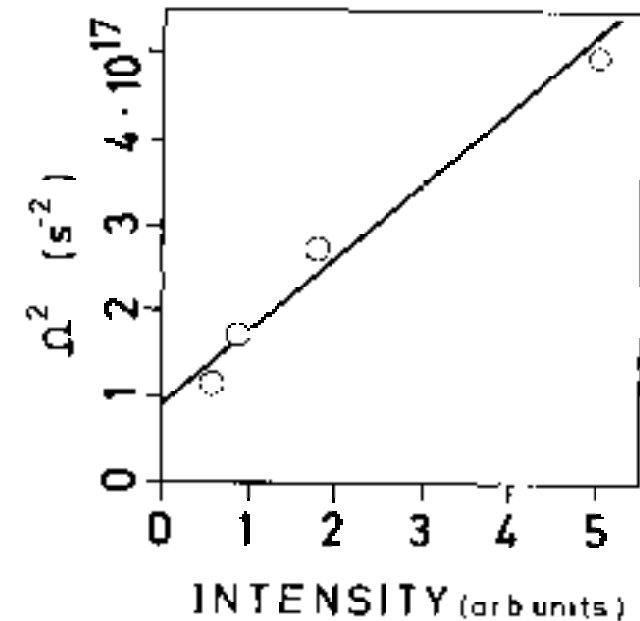
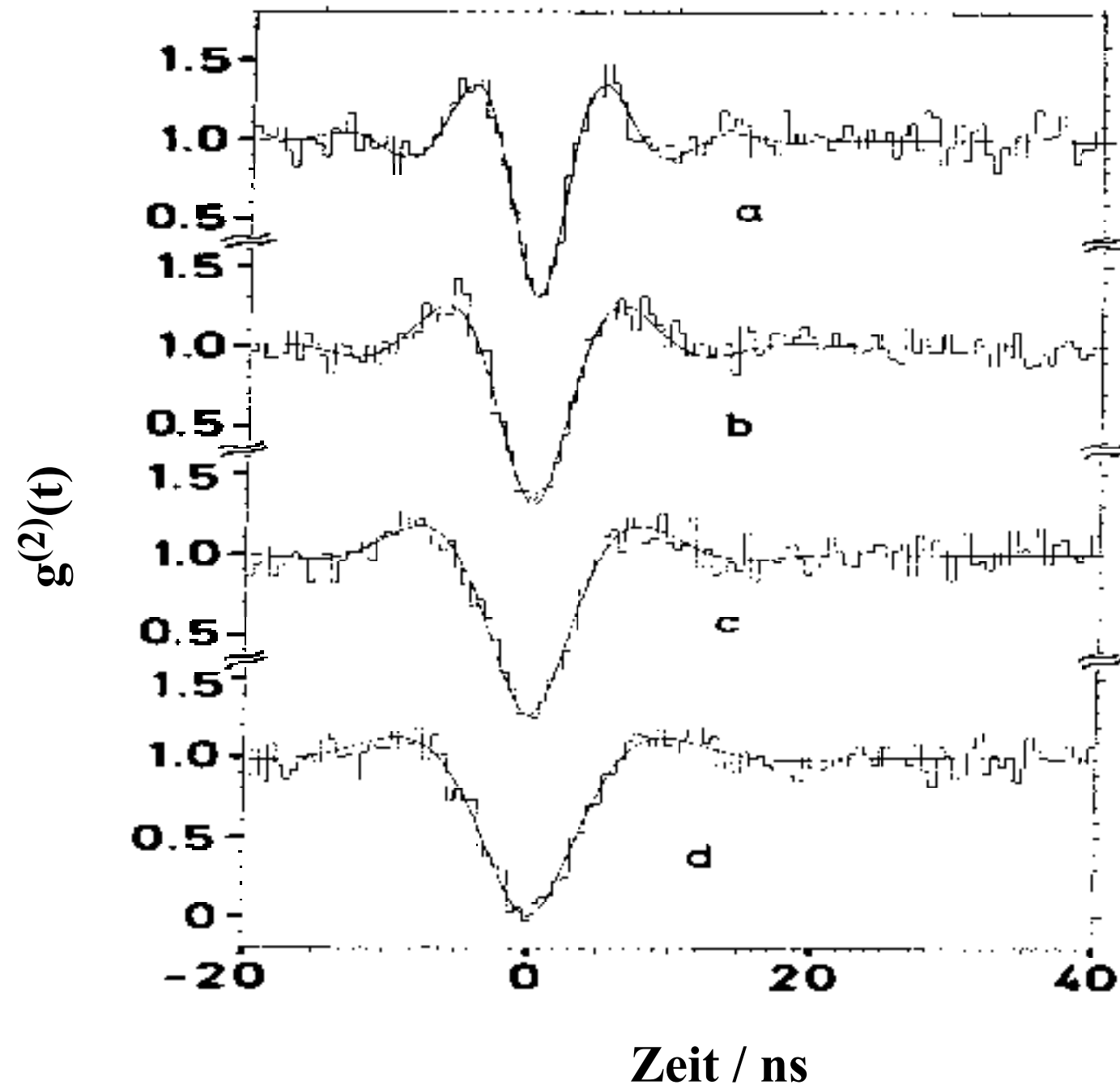
H.J. Kimble, M. Dagenais, and L. Mandel, Phys. Rev. Lett. 39, 691 (1977)

Messung an einem Atomstrahl mit niedriger Intensität

experimenteller Aufbau



Gespeichertes Ion

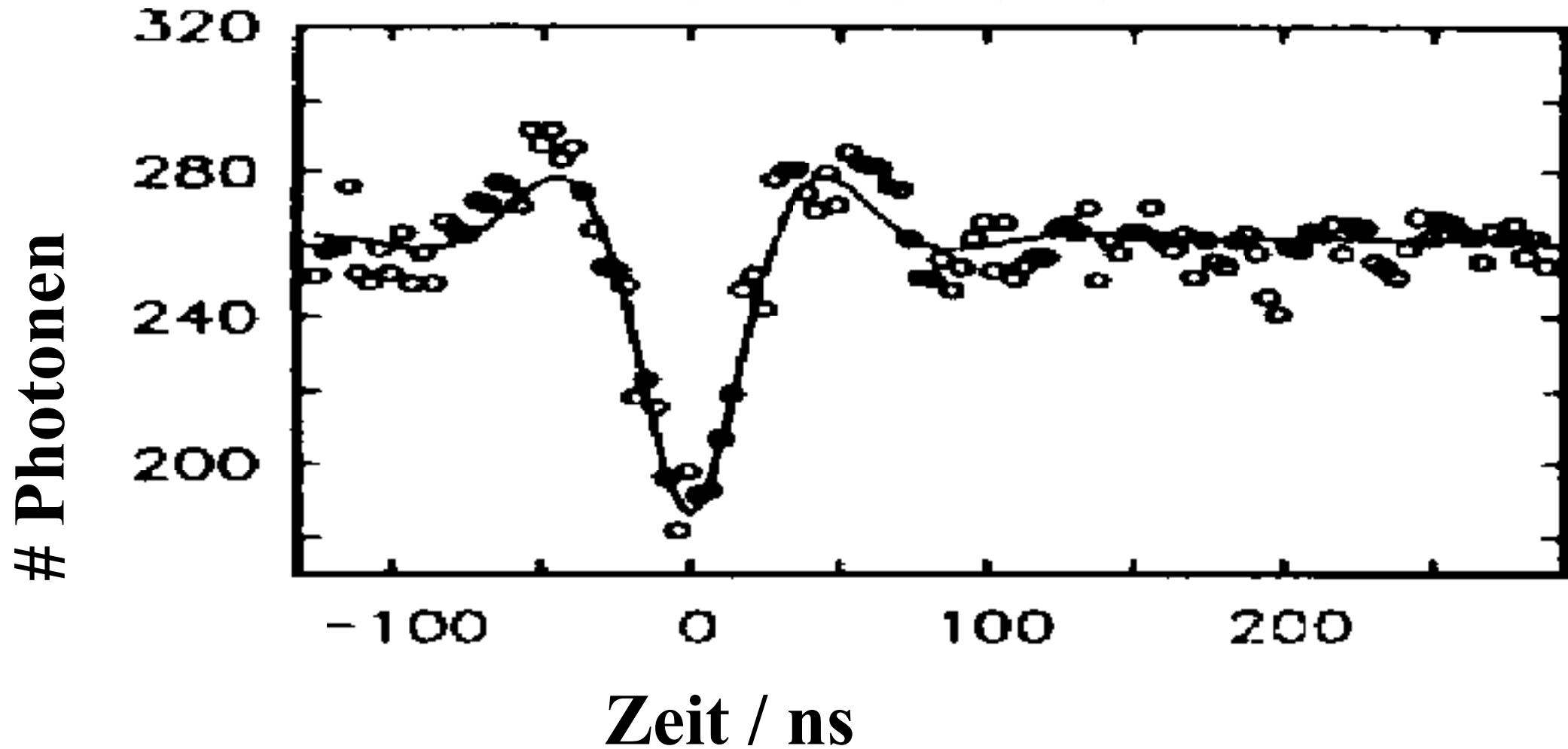
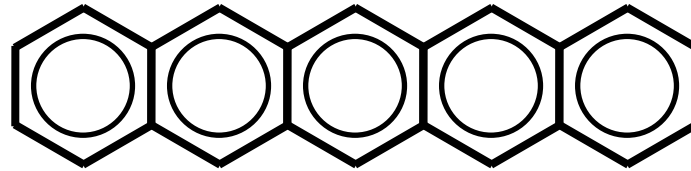


*F. Diedrich and H. Walther,
Phys. Rev. Lett. 58, 203-206
(1987).*

Festkörper

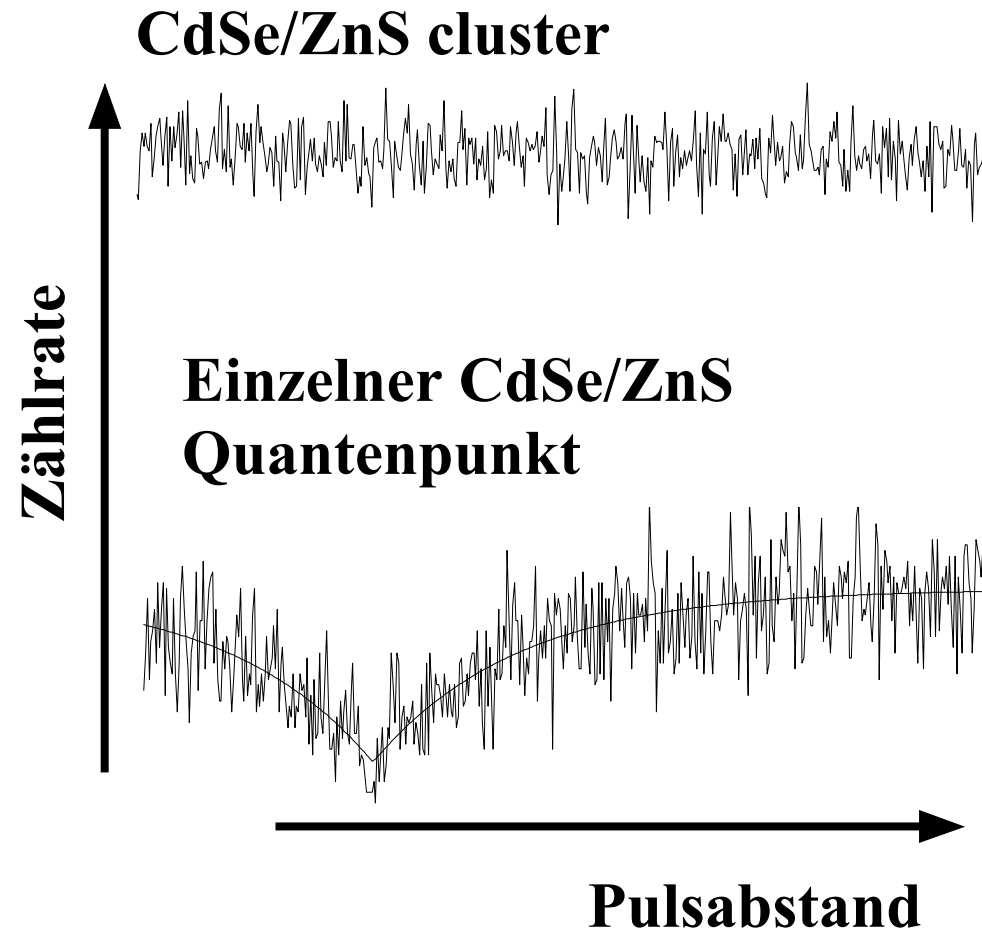
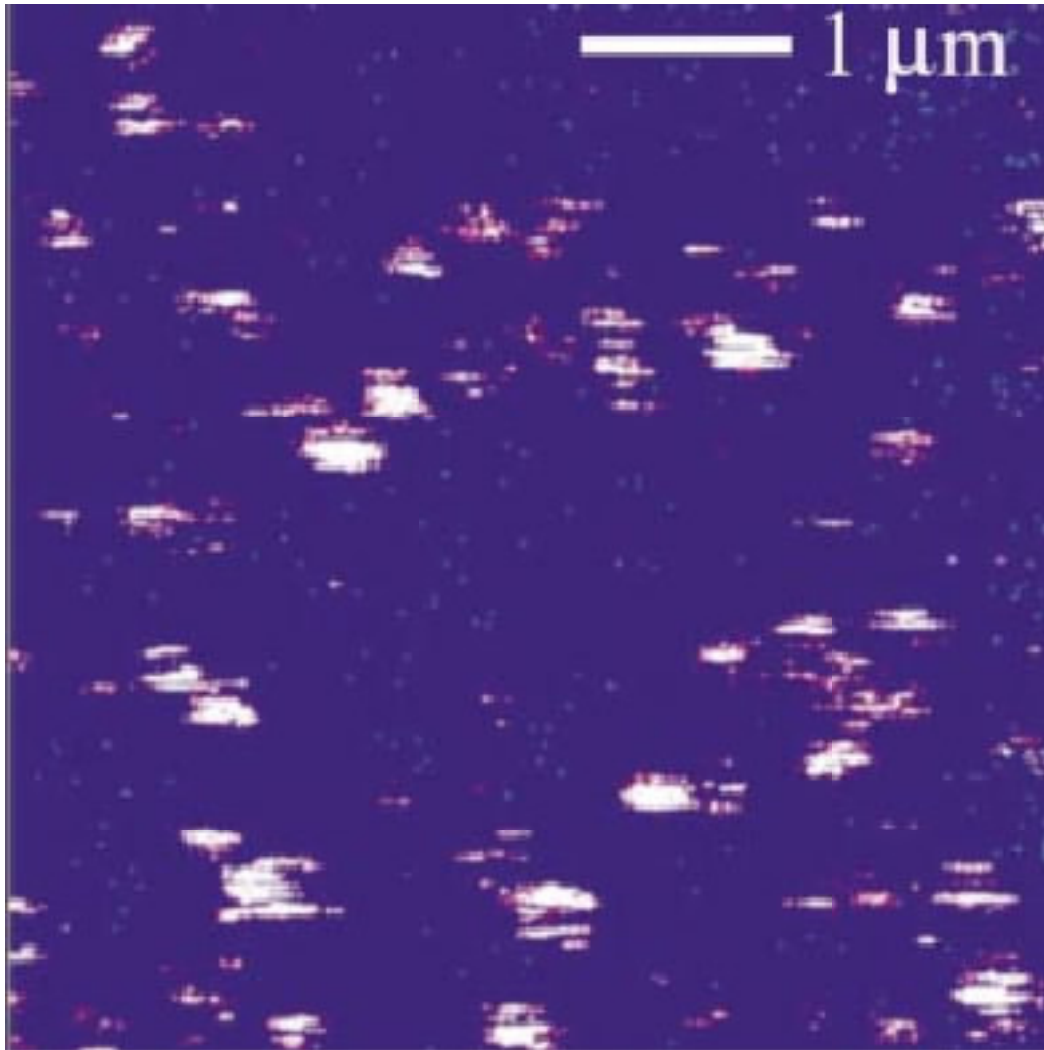
Basche et al., Phys. Rev. Lett. 69, 1516-1519 (1992).

Messung an Pentacen
in p-Terphenyl



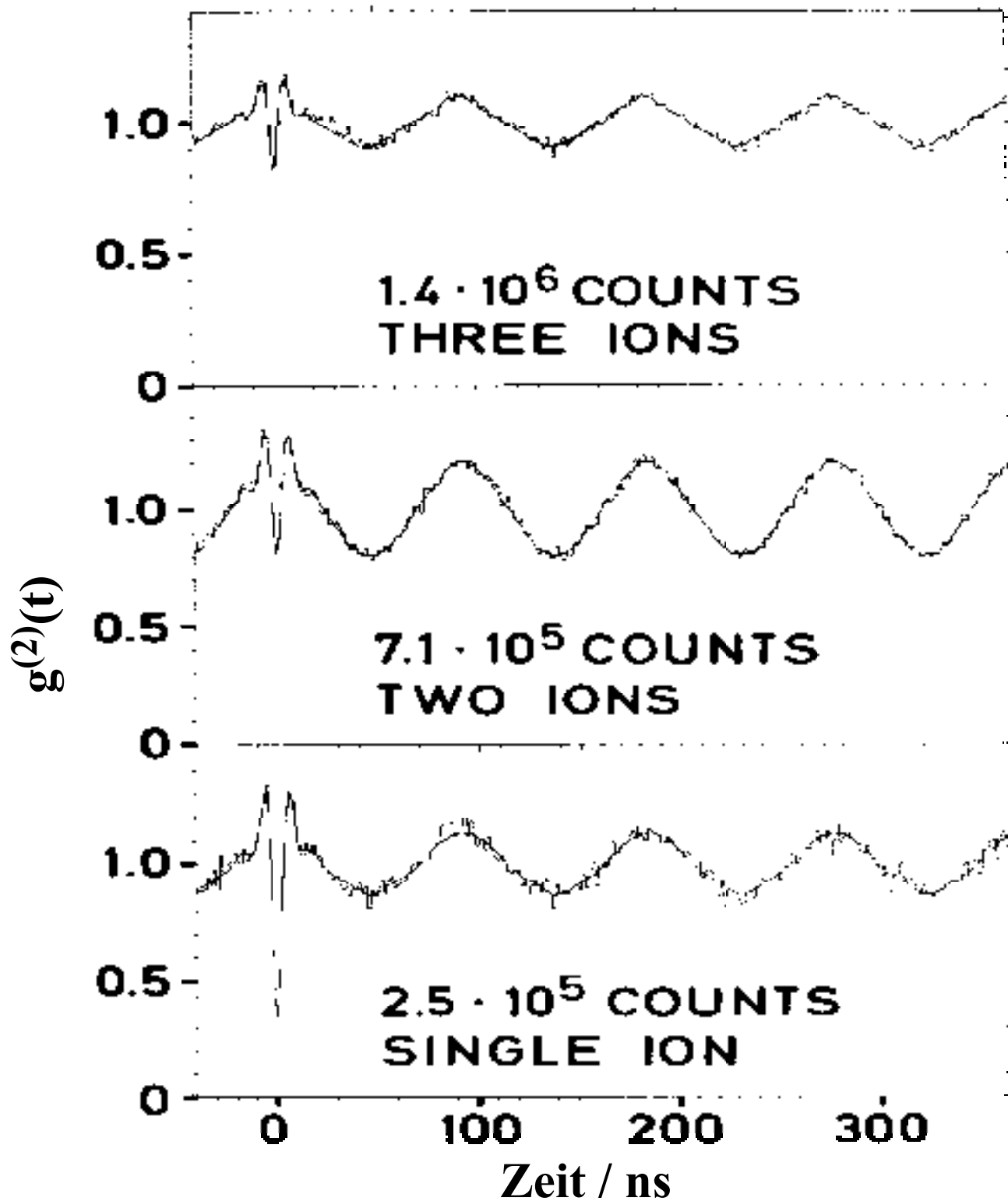
Quantenpunkte

PL von CdSe / ZnS quantenpunkten



Michler et al., Nature 406, 968 (2000).

Ionen

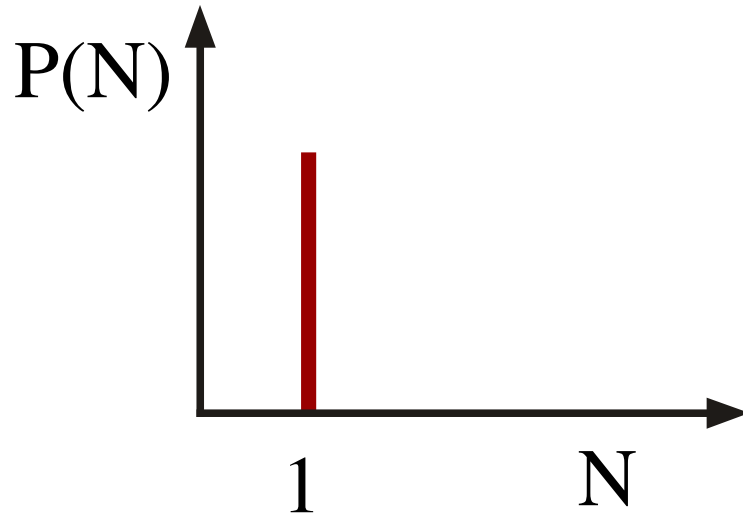


*F. Diedrich and H. Walther,
Phys. Rev. Lett. 58, 203-206
(1987).*

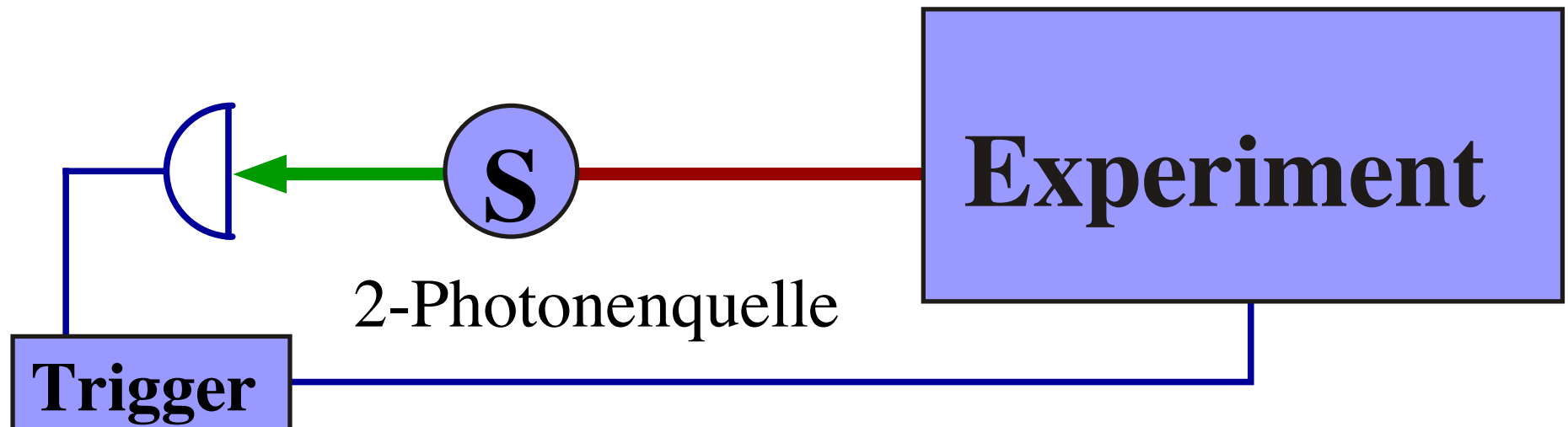
Experimente mit 1 Photon

*P. Grangier, G. Roger, and A. Aspect,
Europhys. Lett. 1, 173 (1986).*

*C.K. Hong and L. Mandel,
Phys. Rev. Lett. 56, 58 (1986).*

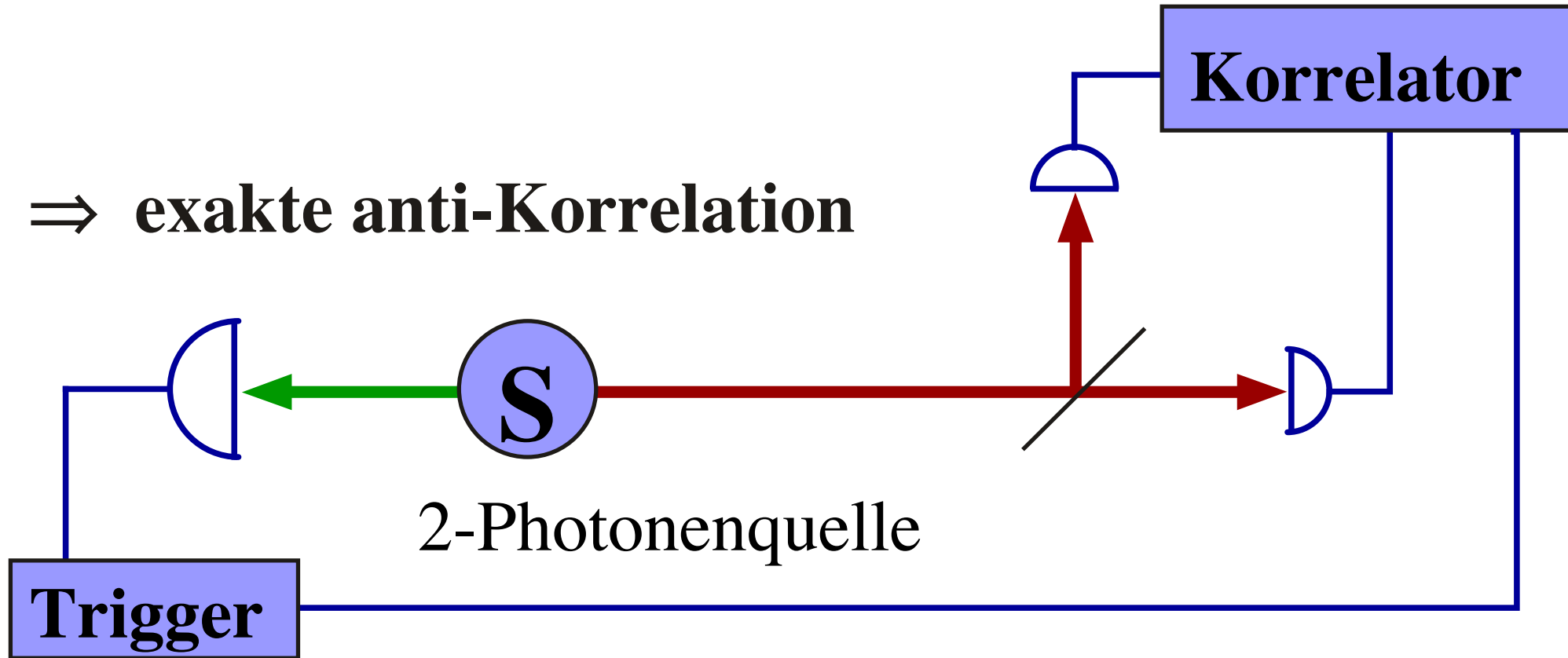


Photonen als Teilchen



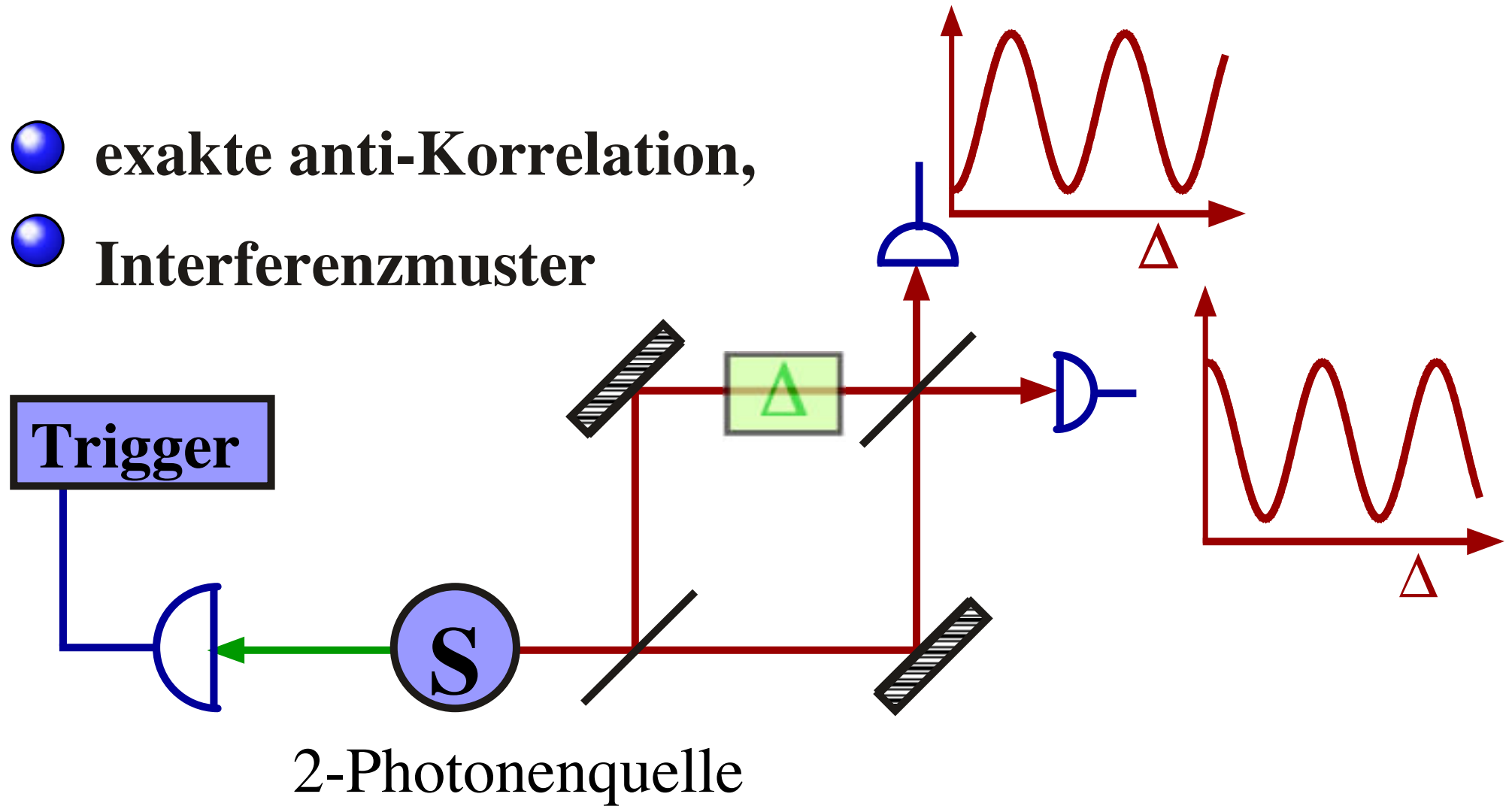
Einzelne Photonen: Teilchen

⇒ exakte anti-Korrelation



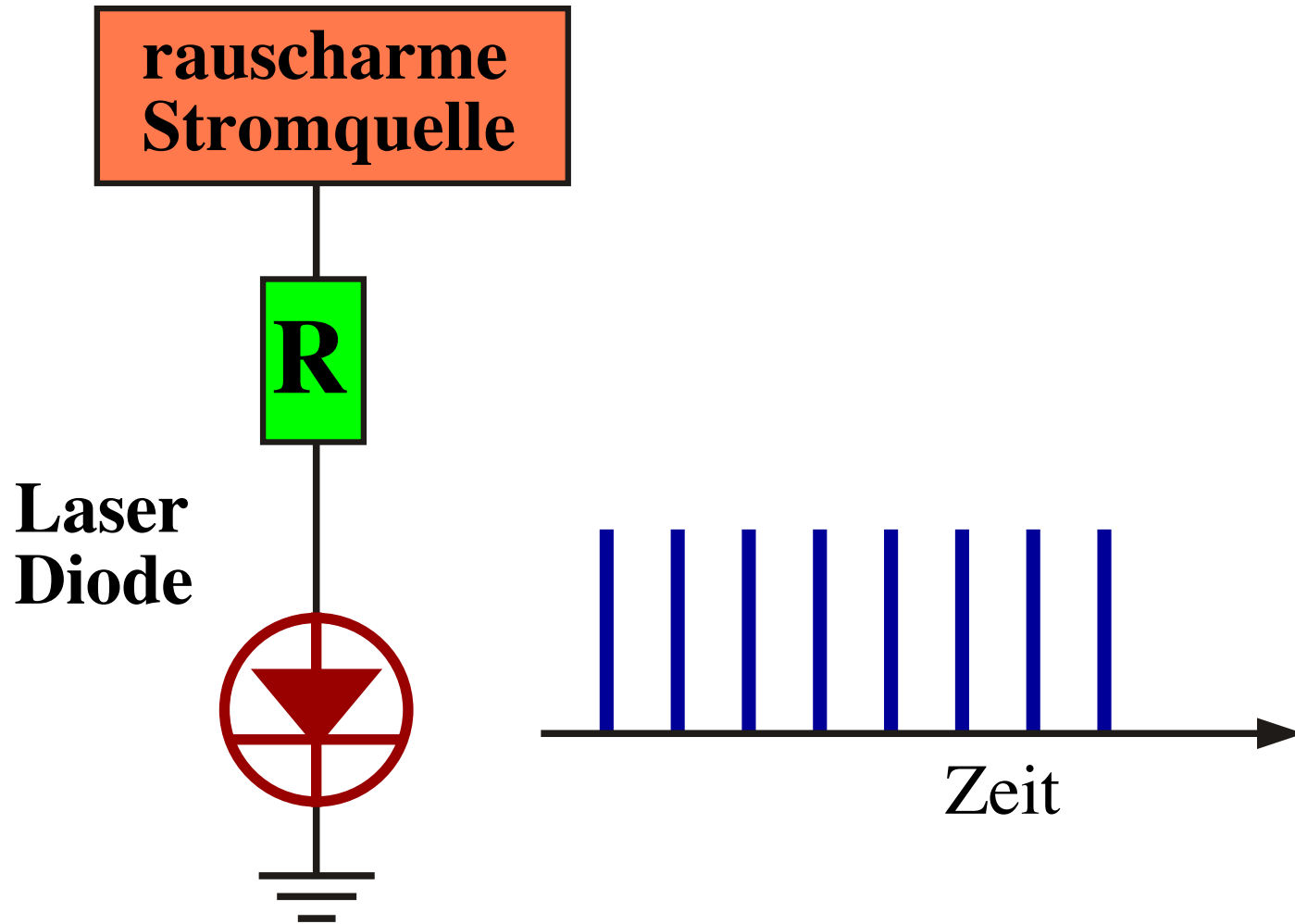
Welle und Teilchen !

- exakte anti-Korrelation,
- Interferenzmuster



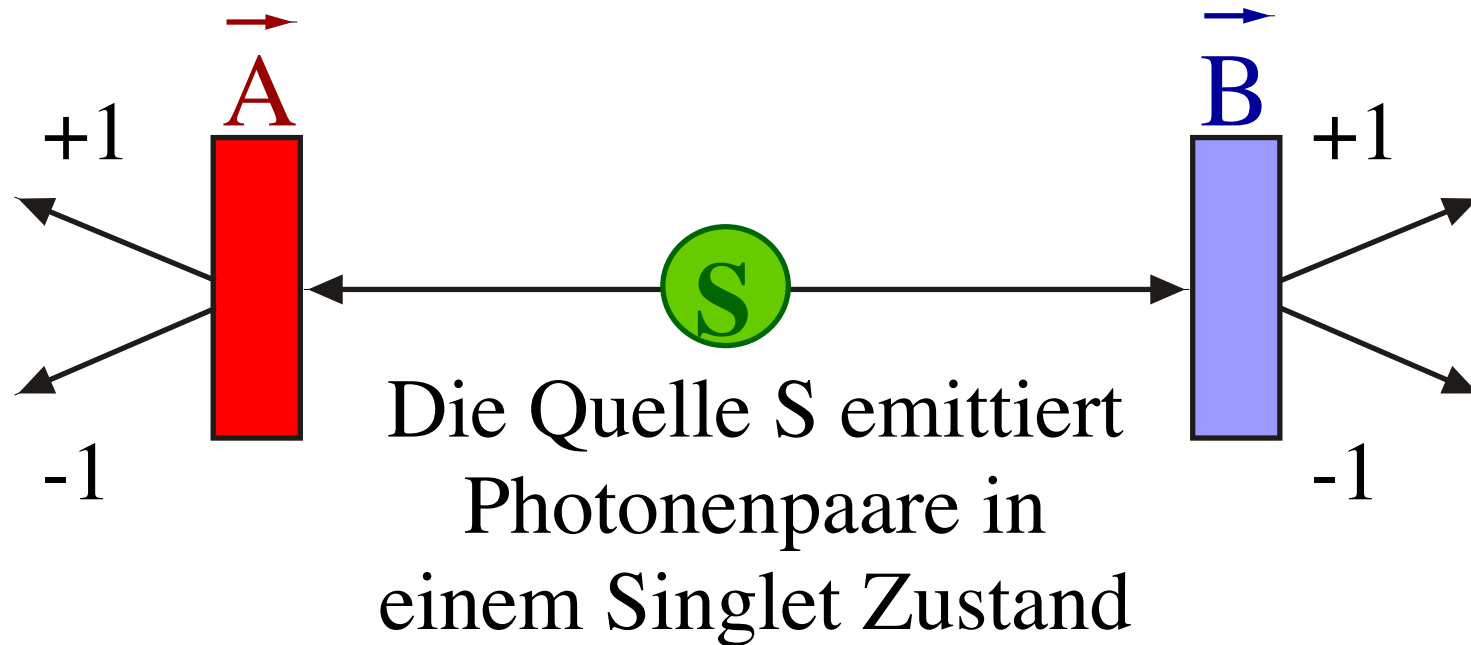
Reduziertes Rauschen

Y. Yamamoto, S. Machida, and W.H. Richardson, Science 255, 1219 (1992).



EPR Korrelationen

Gedankenexperiment:



EPR benutzten dieses Gedankenexperiment um zu zeigen, dass die Quantenmechanik nicht vollständig sei

A. Einstein, B. Podolsky, and N. Rosen, Phys. Rev. 47, 777 (1935)

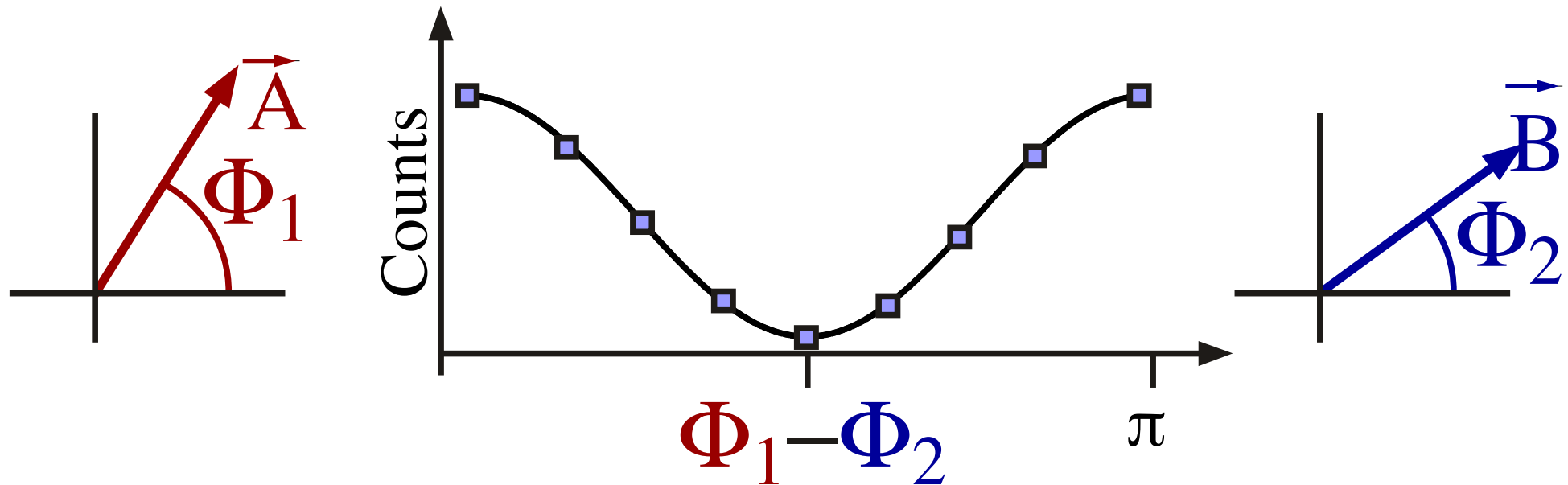
Bell zeigt, welche Werte erhalten werden können, wenn 'lokale, realistische' Theorien (im Sinne von EPR) gelten

J.S. Bell, Physics 1, 195 (1965)

EPR Widerlegt

Aspect und Mitarbeiter erhalten experimentelle Resultate, welche mit der Quantenmechanik übereinstimmen, nicht aber mit klassischen Theorien

A. Aspect, P. Grangier, and G. Roger, Phys. Rev. Lett. 49, 91 (1982)



Unschärfen

Zerlegung der Feldamplitude:

klassisch: $E(t) = E_c \cos(\omega t) + i E_s \sin(\omega t)$

QED: $a + a^\dagger$ $a - a^\dagger$

Vertauschungsrelation für a, a^\dagger : $[a, a^\dagger] = 1$

Unschärfenrelation für Feldamplituden:

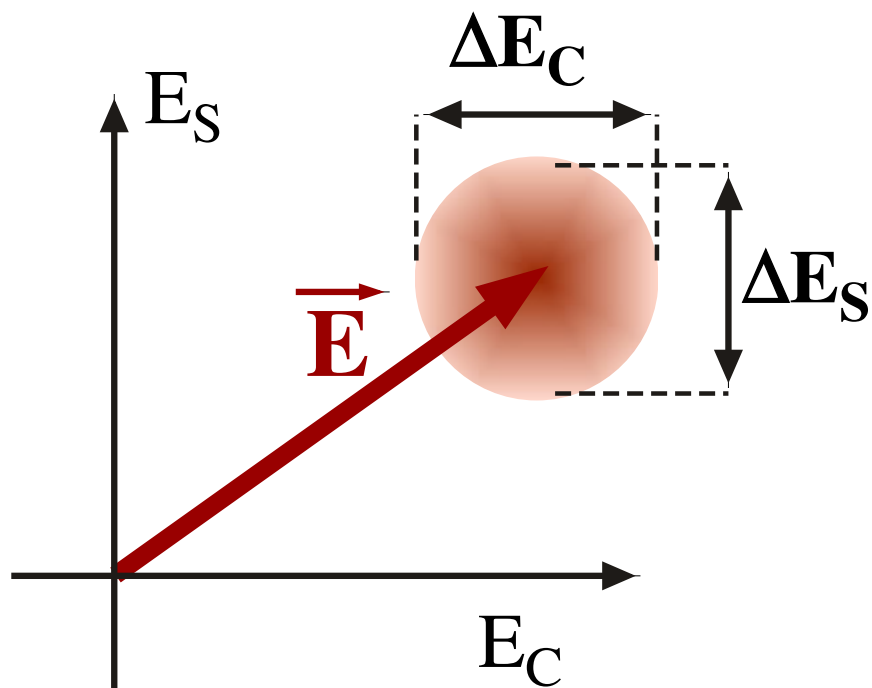
$$\sqrt{\langle \Delta E^2(0) \rangle \langle \Delta E^2(\phi) \rangle} \geq \frac{1}{4} \epsilon_c^2 |\sin \phi|$$

Gequetschtes Licht

Kohärenter Zustand

symmetrischer Zustand
minimaler Unschärfe

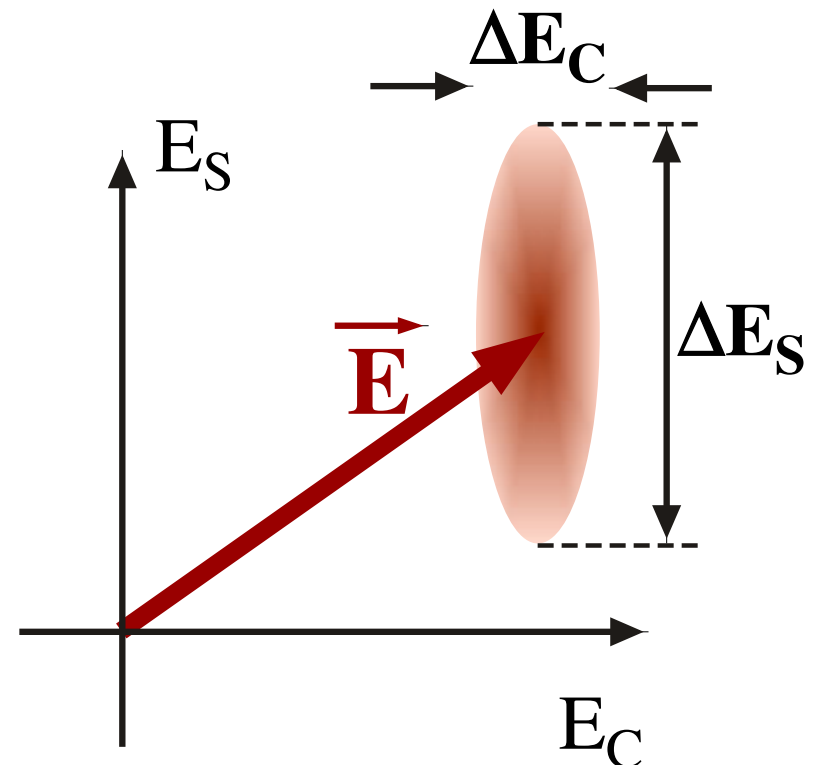
$$\Delta E_C = \Delta E_S$$



Gequetschter Zustand

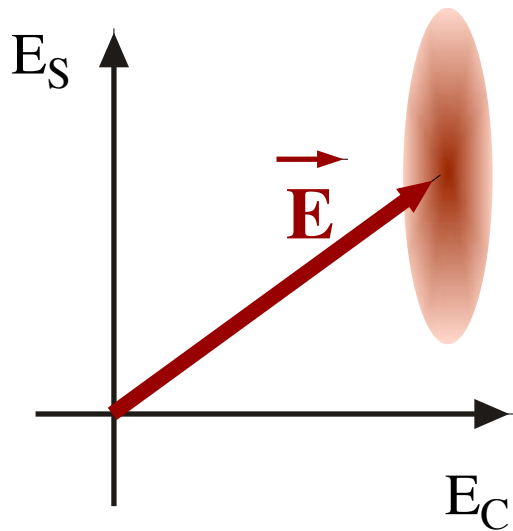
asymmetrischer Zustand
minimaler Unschärfe

$$\Delta E_C < \Delta E_S$$

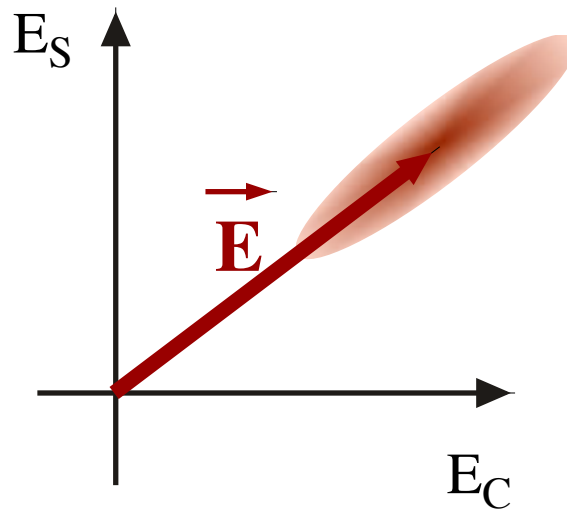


Nichtklassische Zustände

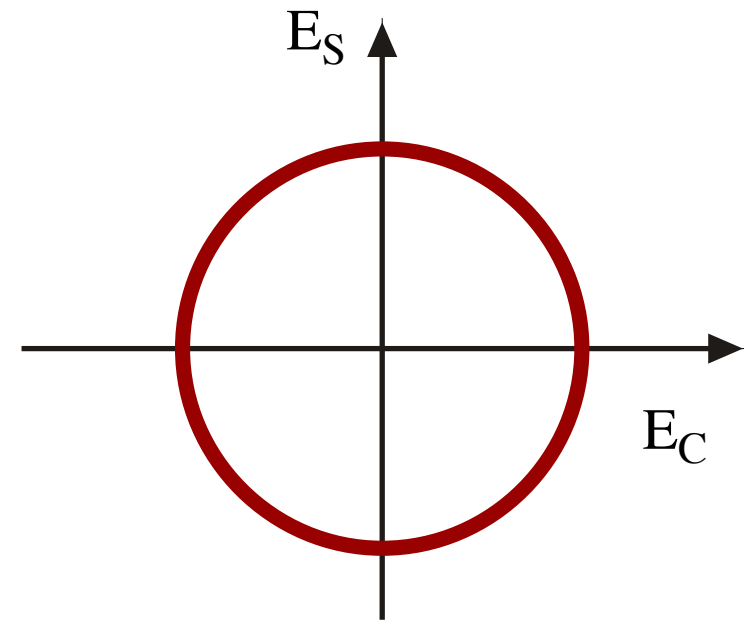
Quadratur
Amplitude



Phase

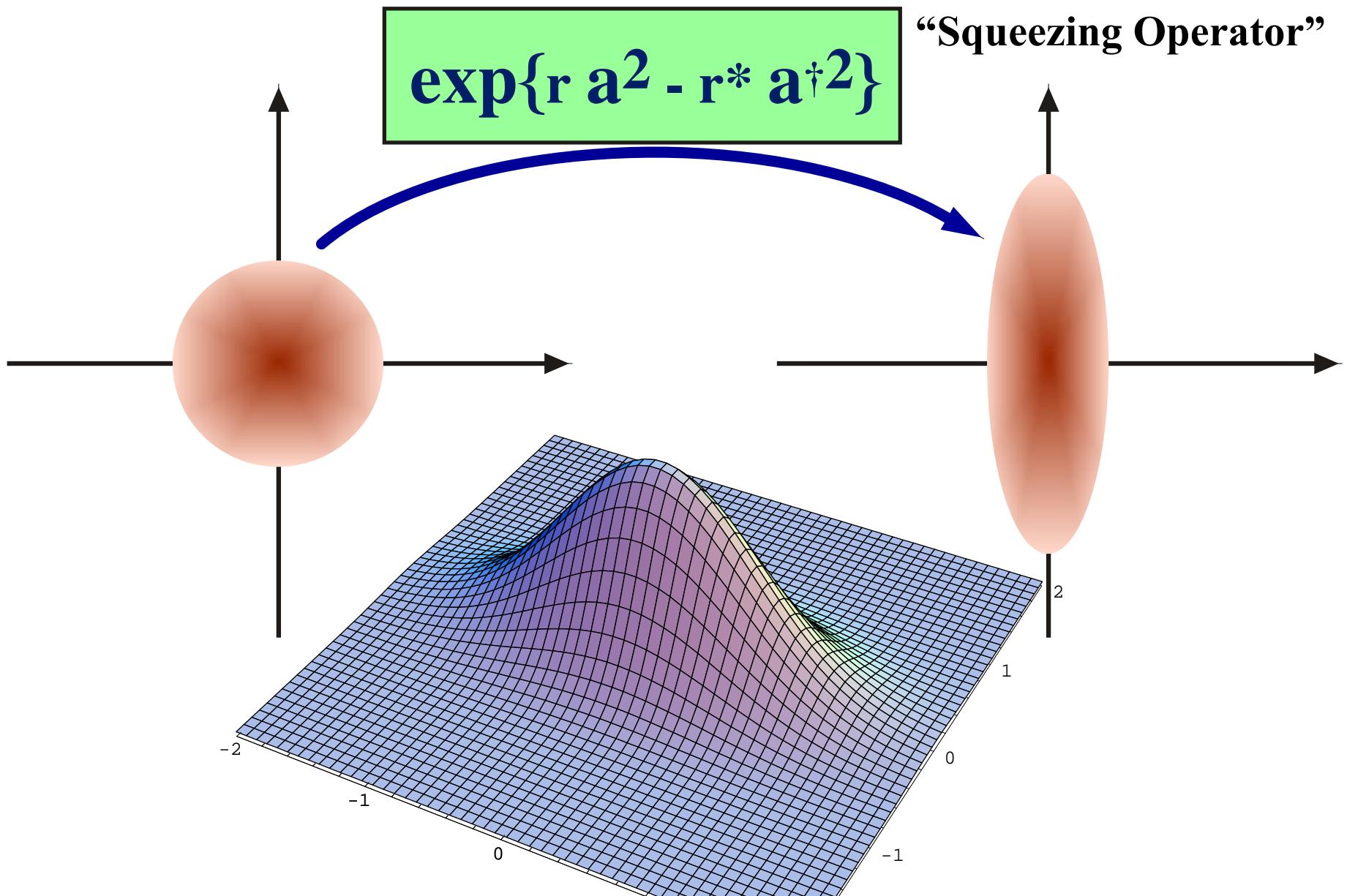


Zahlzustand /
Fockzustand



Herstellung

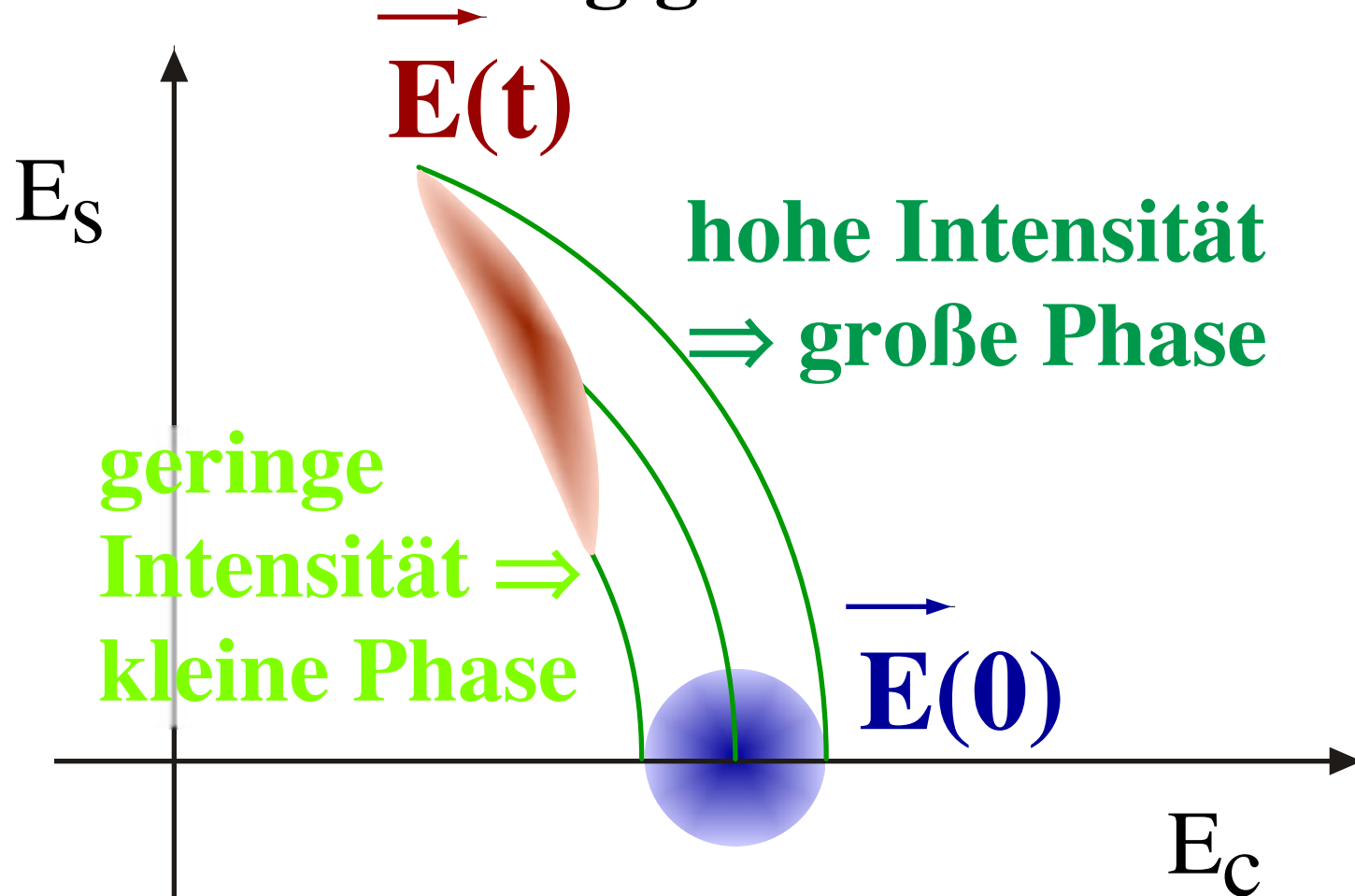
Theorie: Quetschen des Vakuumzustandes



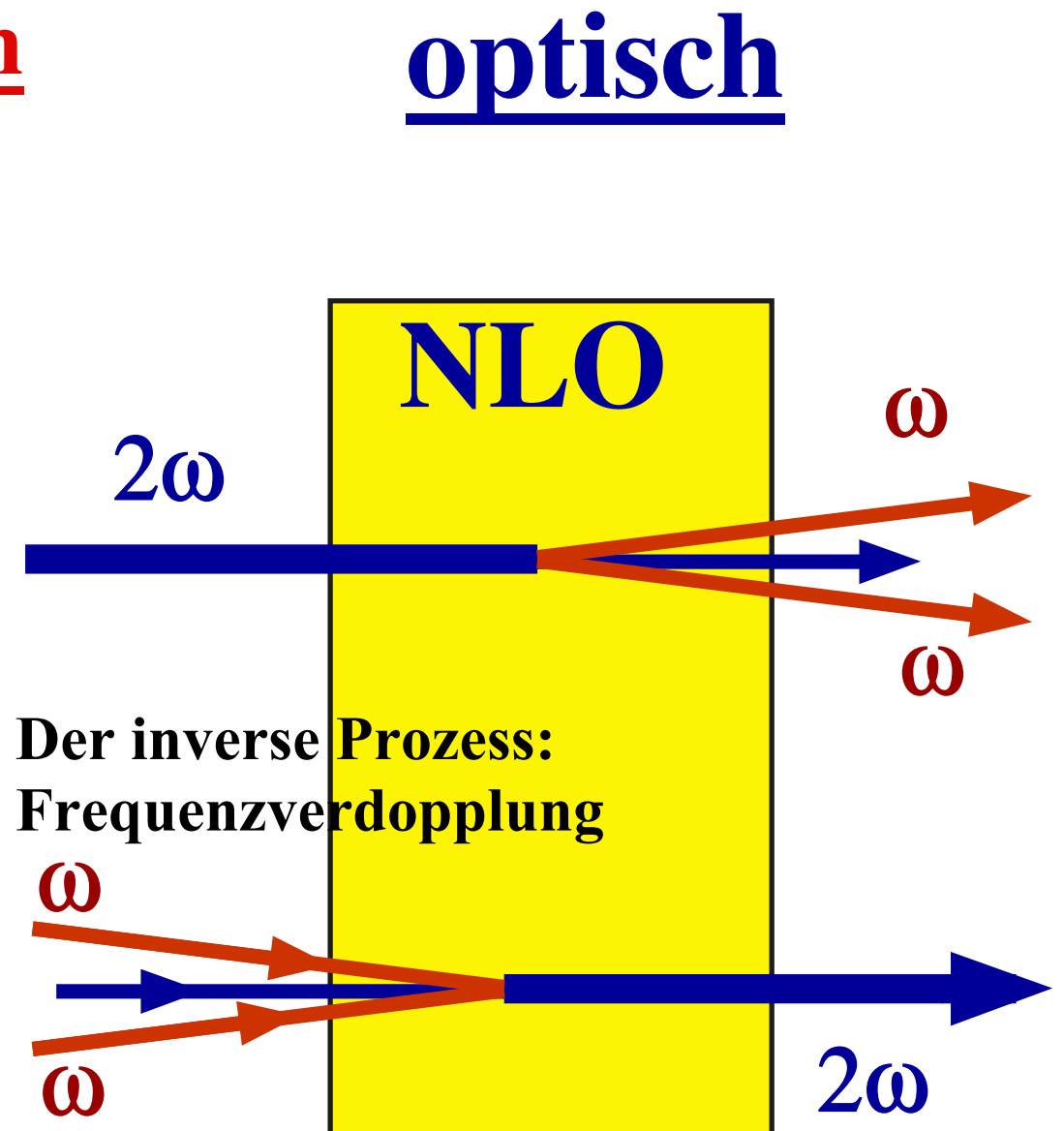
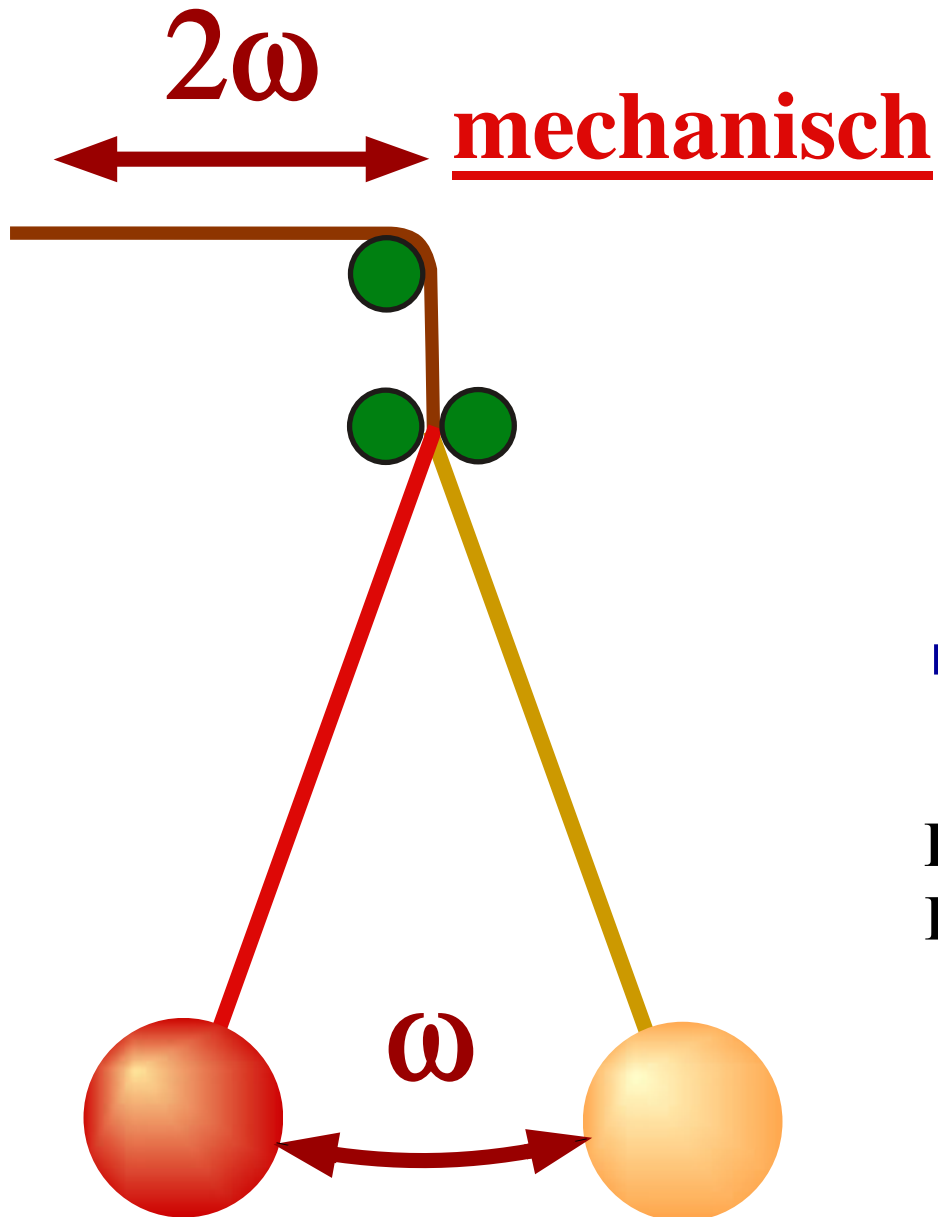
Herstellung

Experiment: Nichtlineare Optik

z. B. Intensitätsabhängige Phasenverschiebung



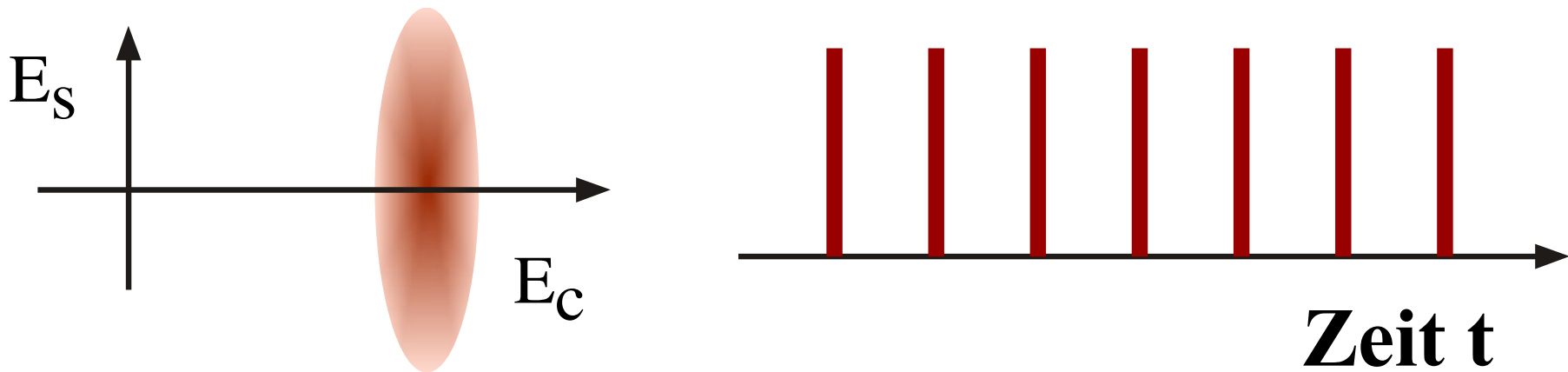
Parametrischer Oszillator



Photonenkorrelation

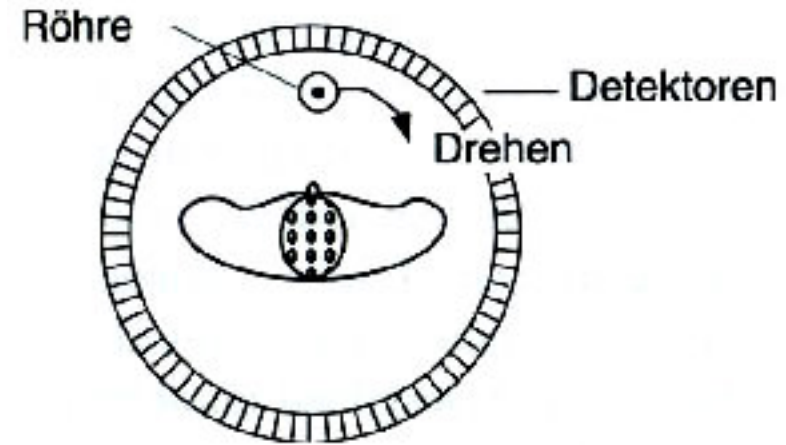
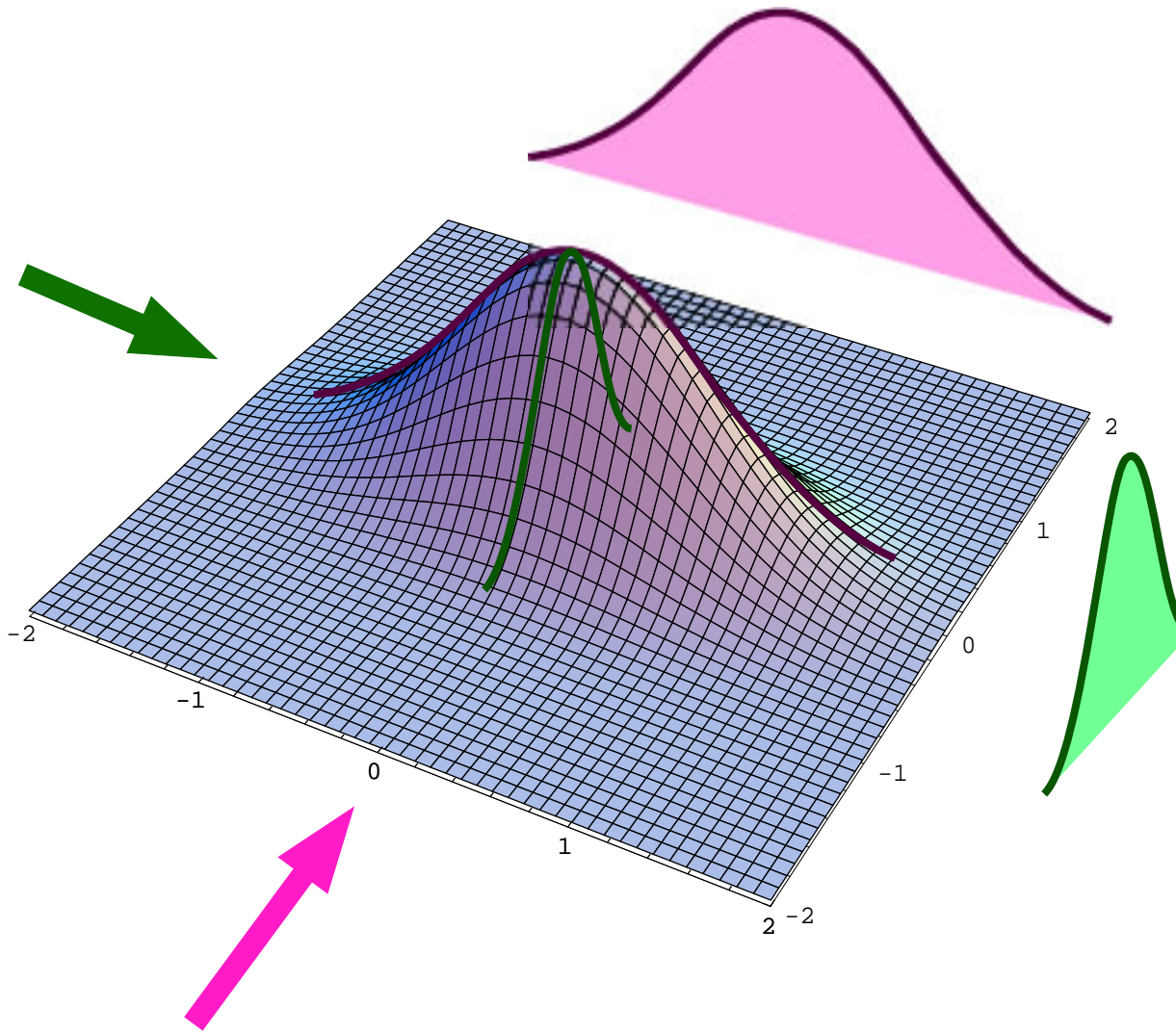
Photonenkorrelation

Wenn der Zustand in Richtung der kohärenten Anregung gequetscht ist, zeigt der Zustand 'antibunching'



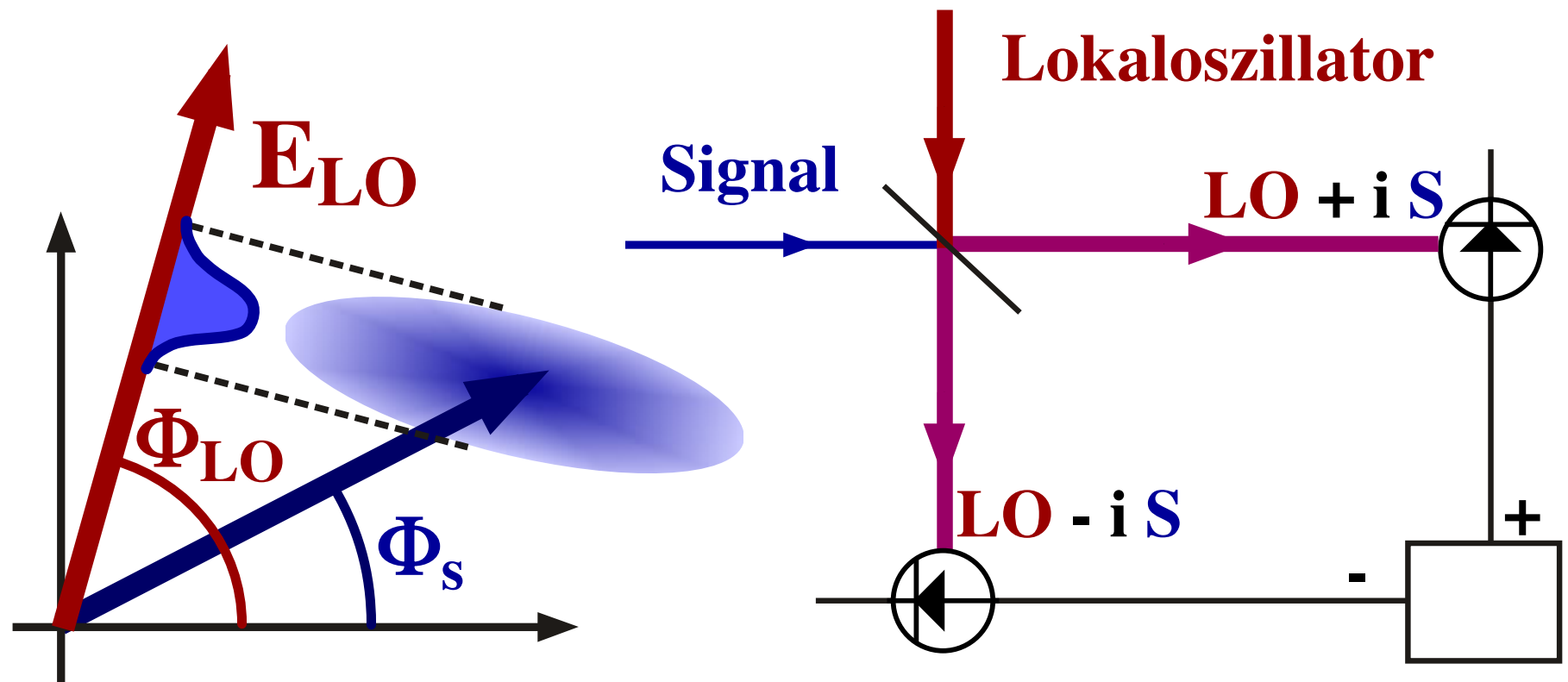
Zustandstomographie

Z. Vgl. : Röntgen-CT



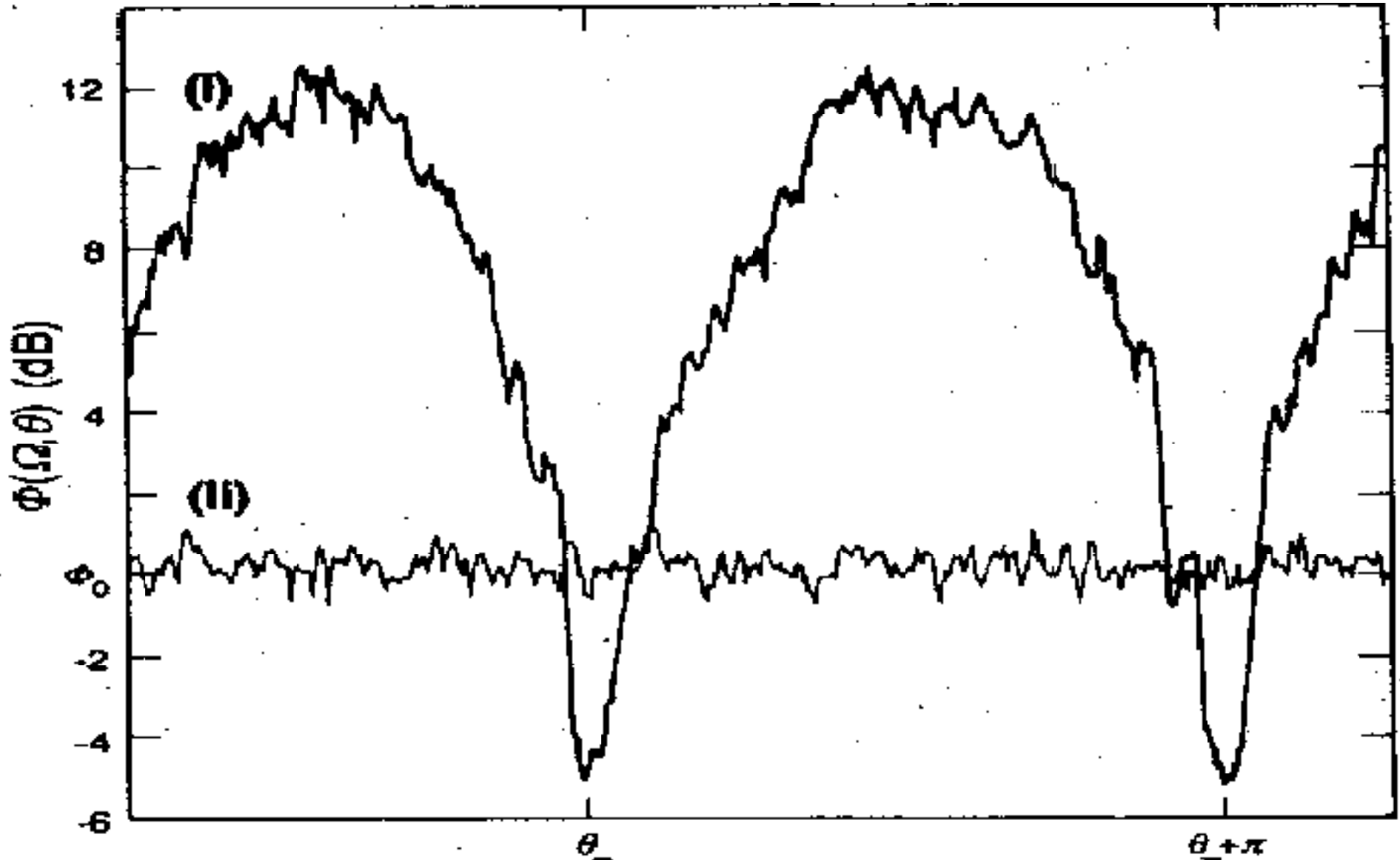
Heterodyn Nachweis

H.P. Yuen and V.W.S. Chan, Optics Letters 8, 177 (1983).



- implementiert die Messung einer Quadraturamplitude
- unabhängig vom Rauschen des Lokaloszillators

Squeezing Experiment



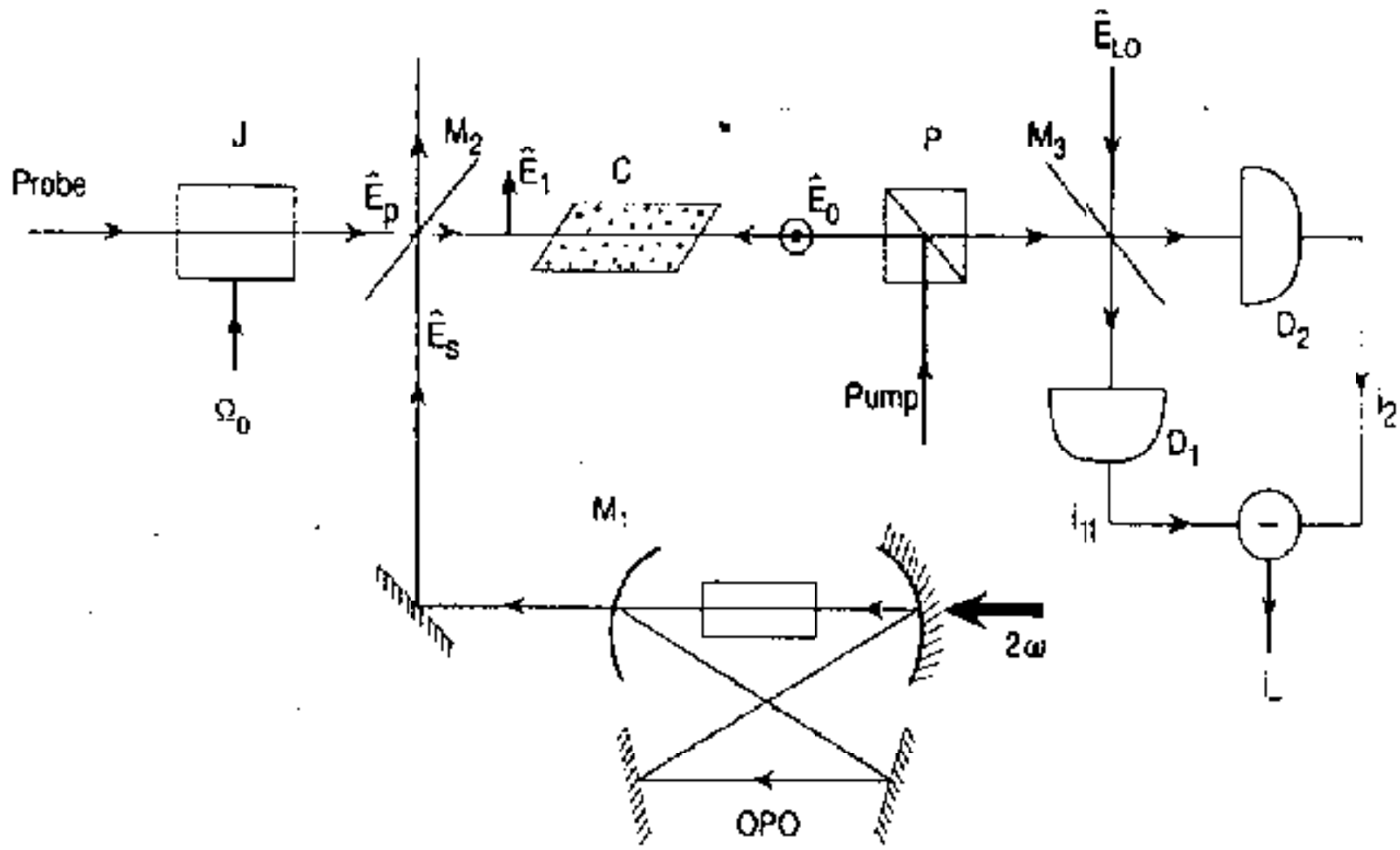
LO-Phase

Anwendung: Spektroskopie

Spectroscopy with Squeezed Light

PRL 68, 3020 (1992).

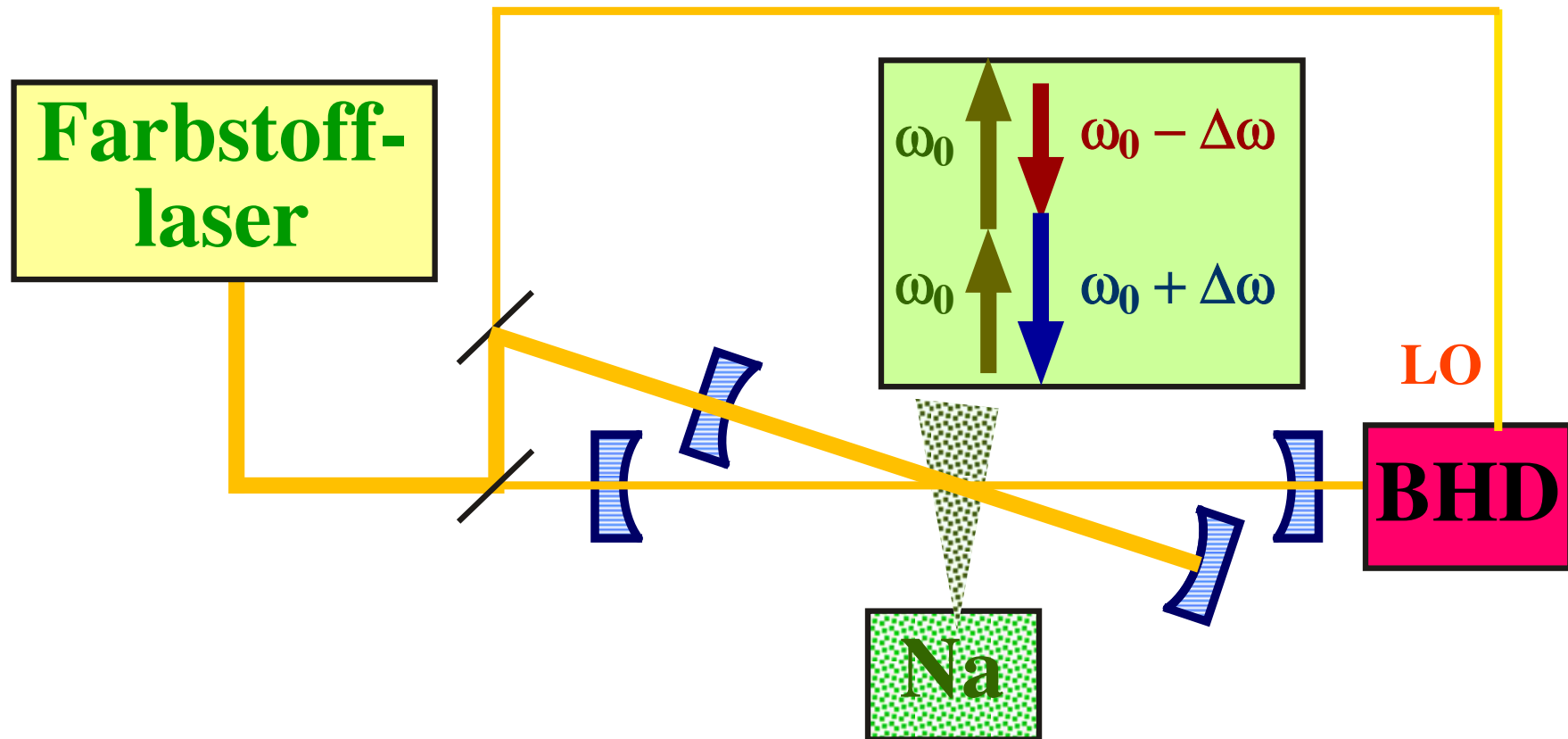
E. S. Polzik, J. Carri, and H. J. Kimble



Squeezing Experimente

Vierwellenmischung an einem Na-Atomstrahl

*R.E. Slusher, L.W. Hollberg, B. Yurke, J.C. Mertz, and J.F. Valley,
Phys. Rev. Lett. 55, 2409 (1985).*

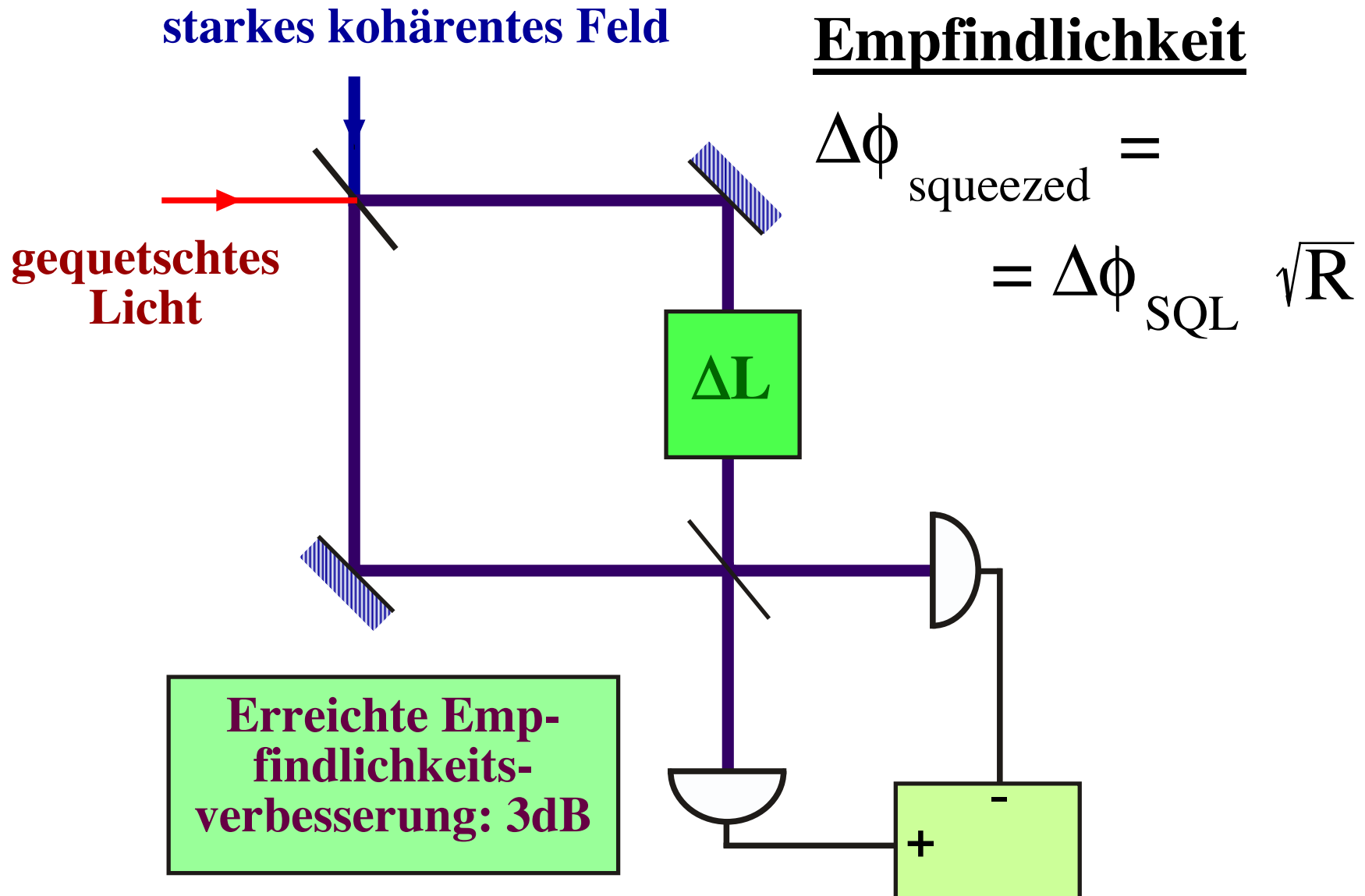


- Beobachteter Rauschpegel 7% unter Schrotrauschen
- Entspricht 20% Squeezing

Interferometrie

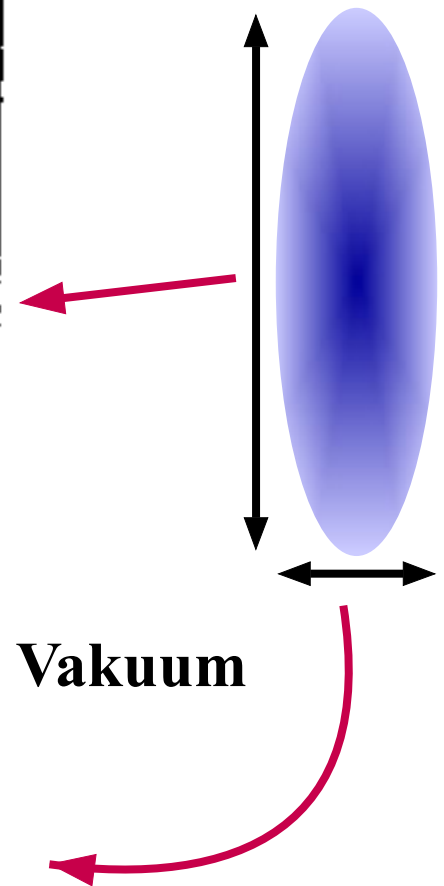
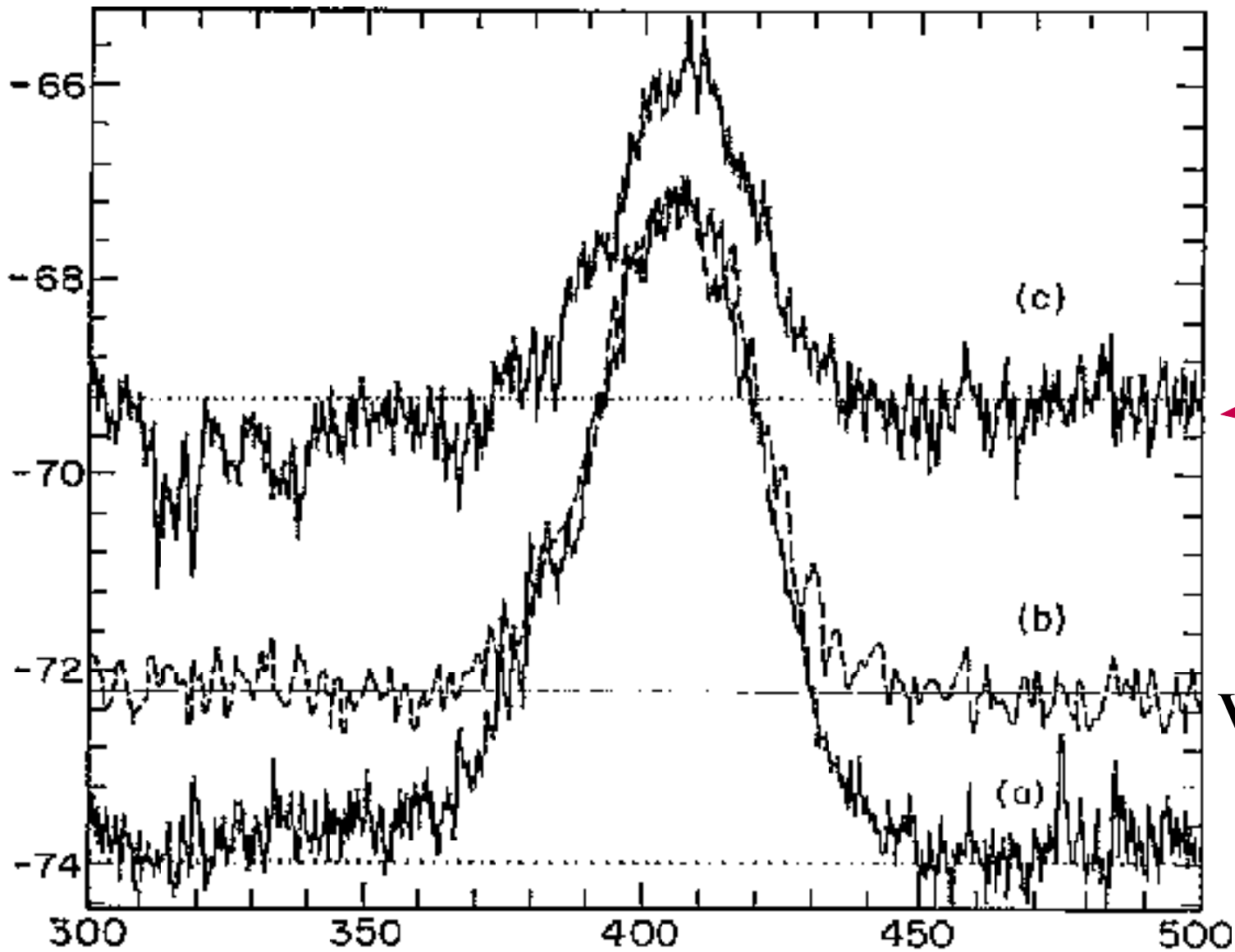
M. Xiao, L.A. Wu, and H.J. Kimble, Phys. Rev. Lett. 59, 278 (1987).

P. Grangier, R.E. Slusher, B. Yurke, and A. LaPorta, Phys. Rev. Lett. 59, 2153 (1987).



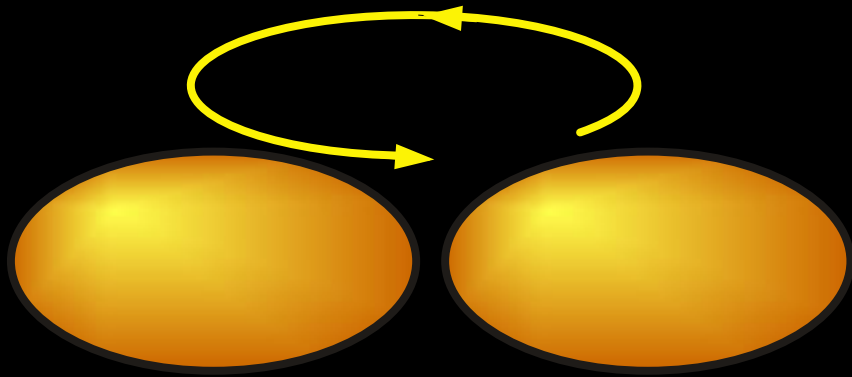
Squeezing

Rauschen / dBm

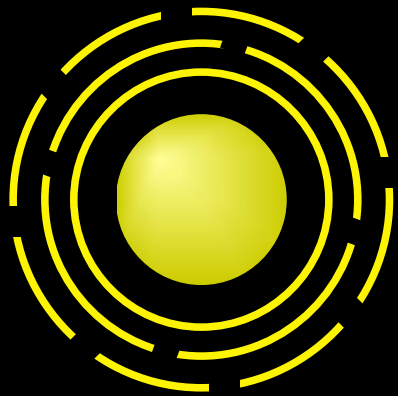


Frequenz / kHz

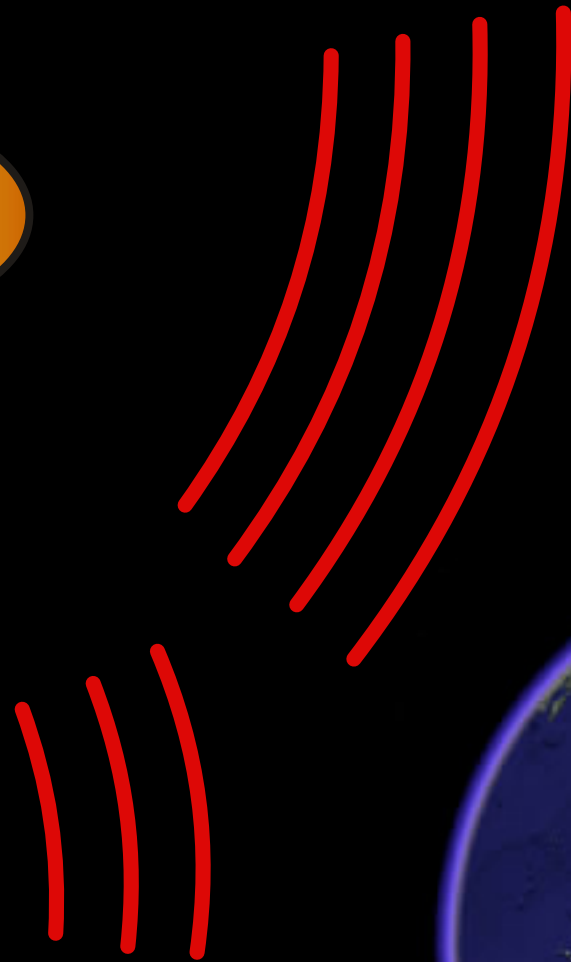
Gravitationswellen



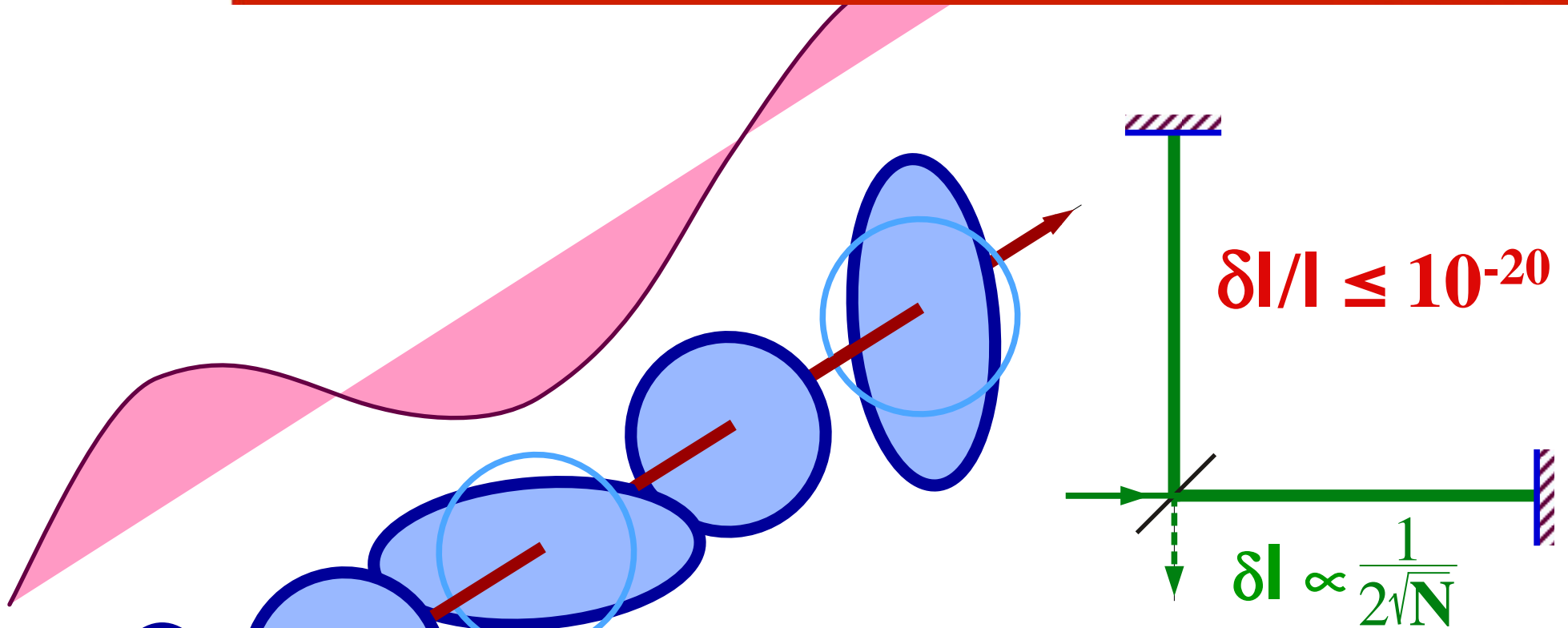
**Verschmelzen von
Neutronensternen**



Supernova



Wirkung und Nachweis



Detektoren

existieren

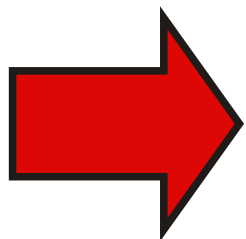
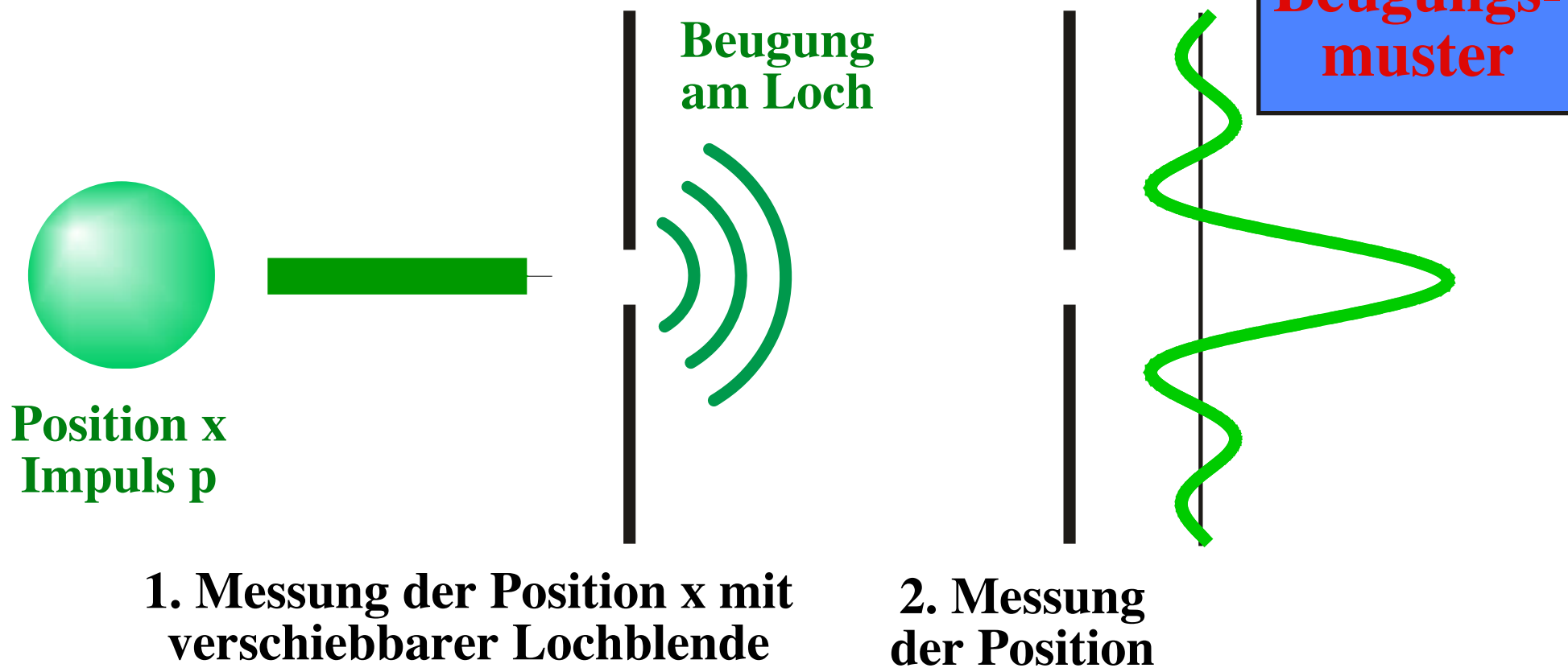
Garching 30 m
Glasgow 10 m
Tokio 10 m
Caltech 40 m

im Bau

GEO (Hannover) 3 km
LIGO (USA) 2x4 km
VIRGO (Pisa) 3 km
Japan, Australien

Rückwirkung von Messungen

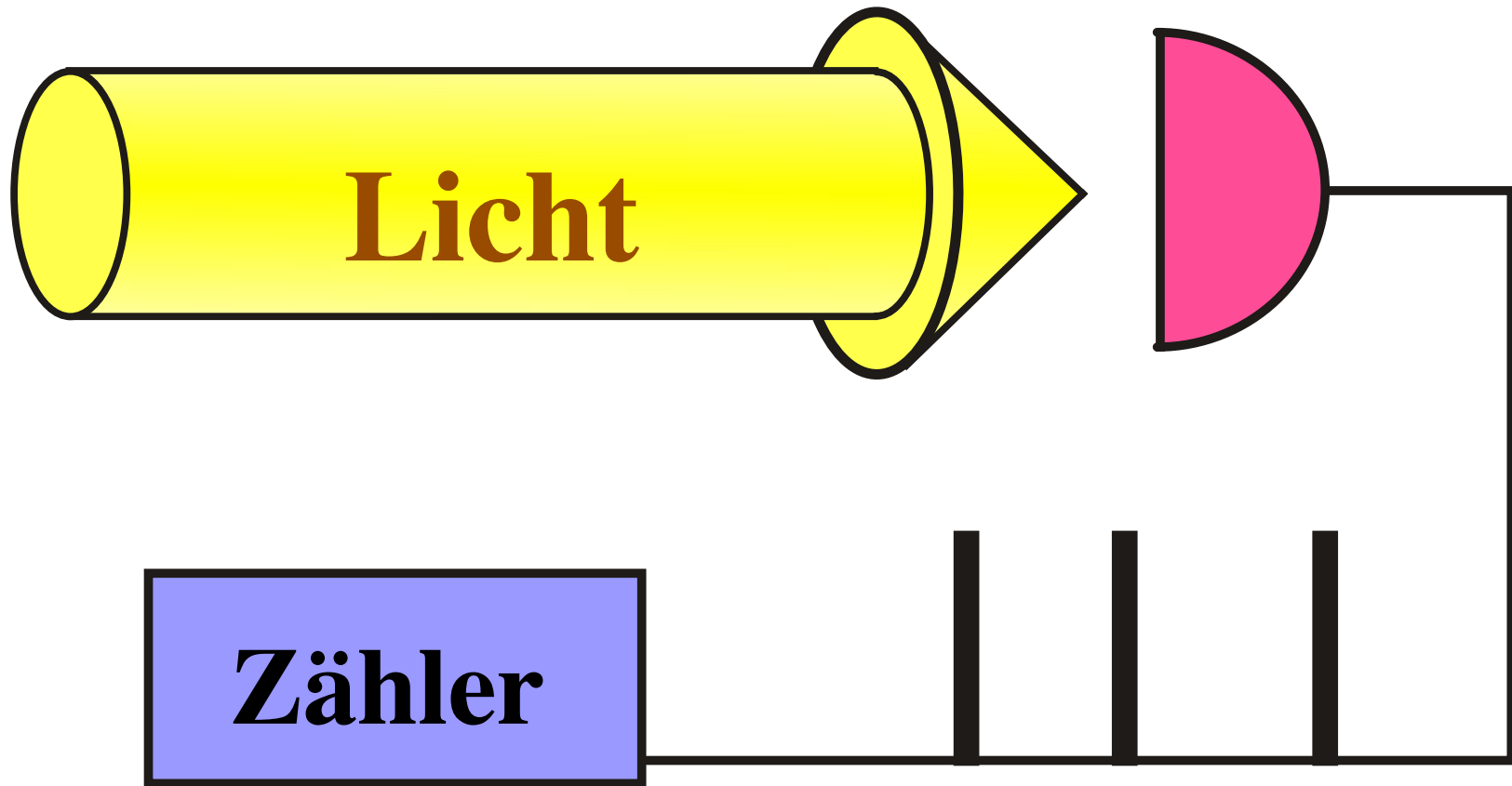
Wiederholte Messung der Position eines Teilchens



" Die Position ist keine QND-Variable",
d.h. sie kann nicht wiederholt mit beliebig-
er Genauigkeit gemessen werden

Optische Leistung

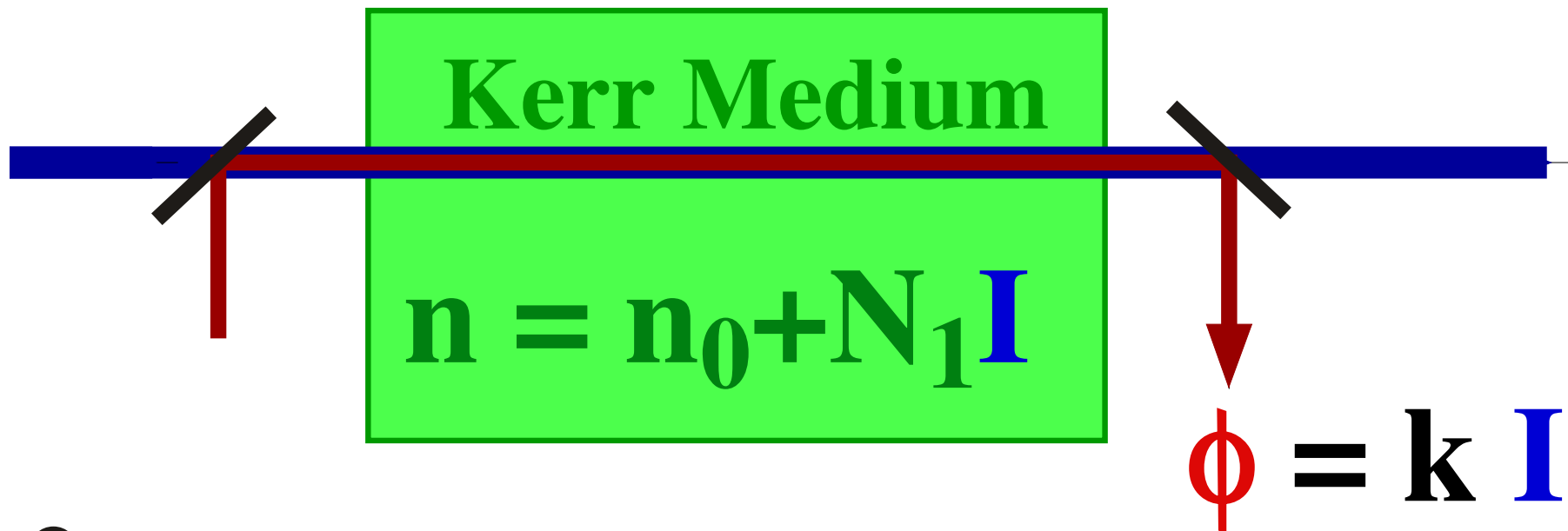
Messung der Photonenzahl



➔ Photonen werden bei der Messung vernichtet

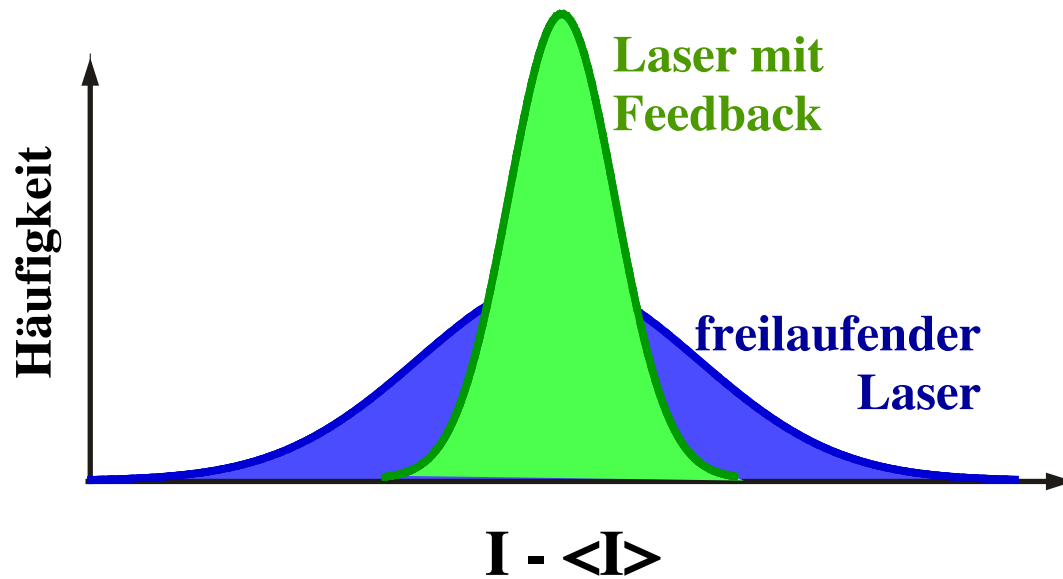
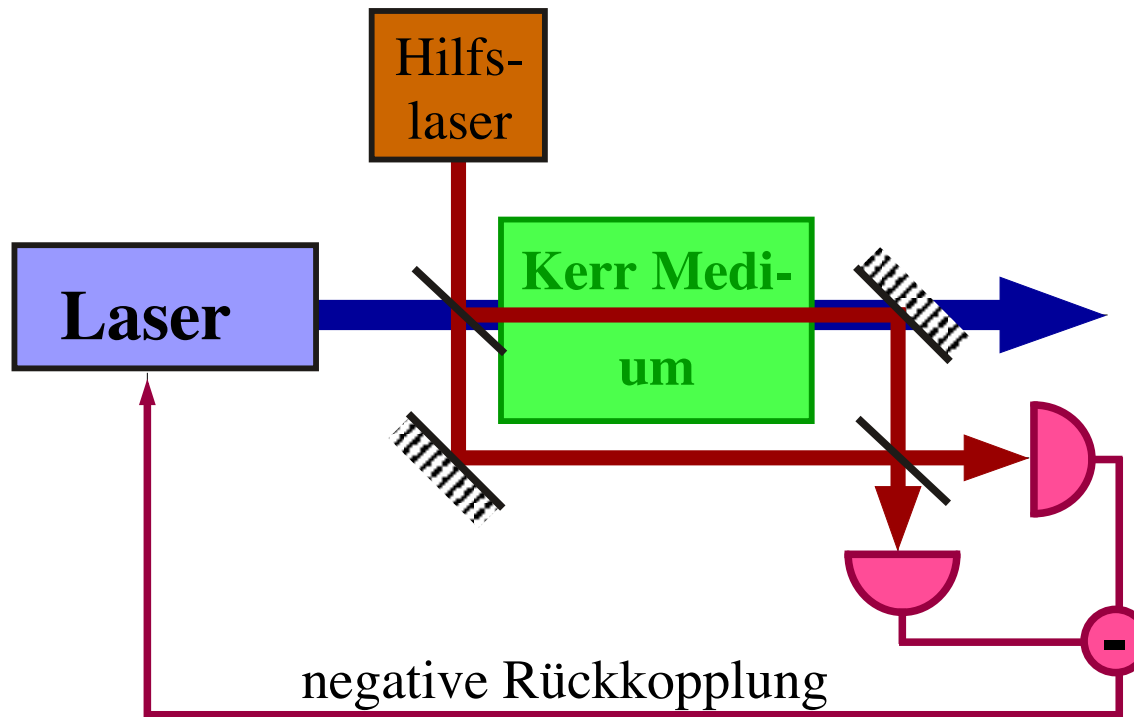
QND Messung

Levenson, Shelby, Reid, and Walls, Phys. Rev. Lett. 57, 2473 (1986).



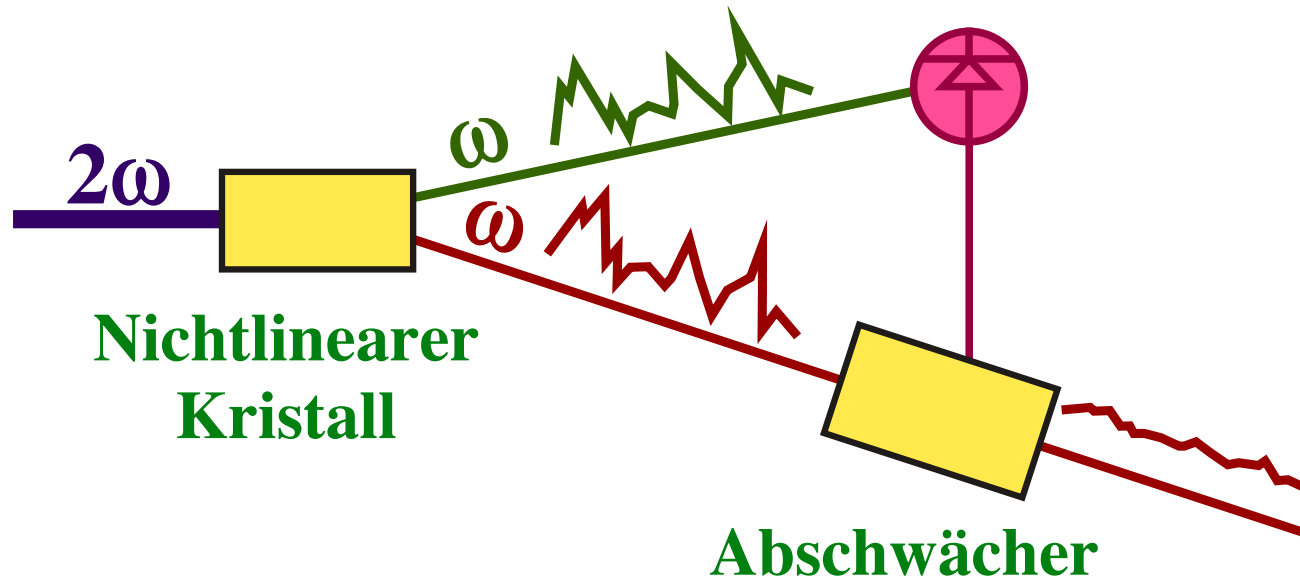
- Rückwirkungsfrei für Intensität
- Phase wird gestört

QND für Squeezing

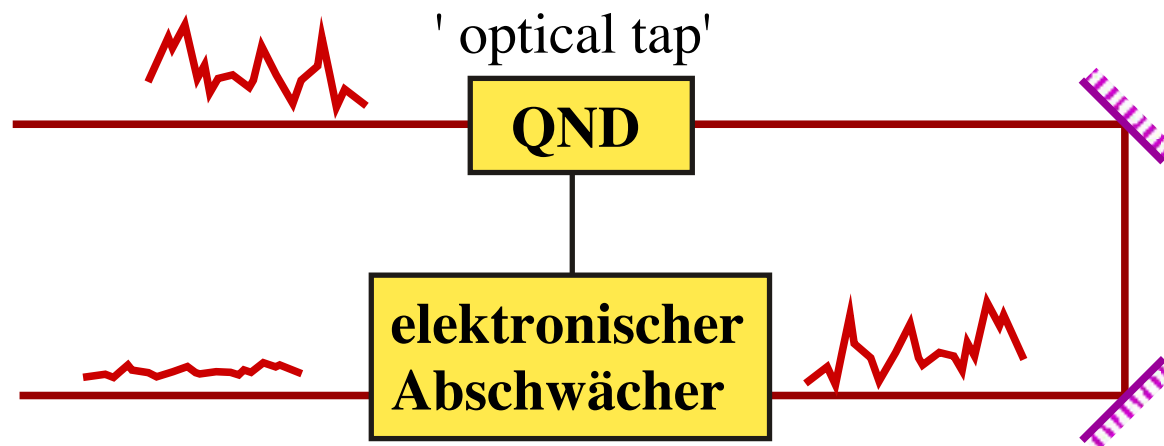


Reduziertes Rauschen

mit Zwillingenstrahlen ('twin beams')

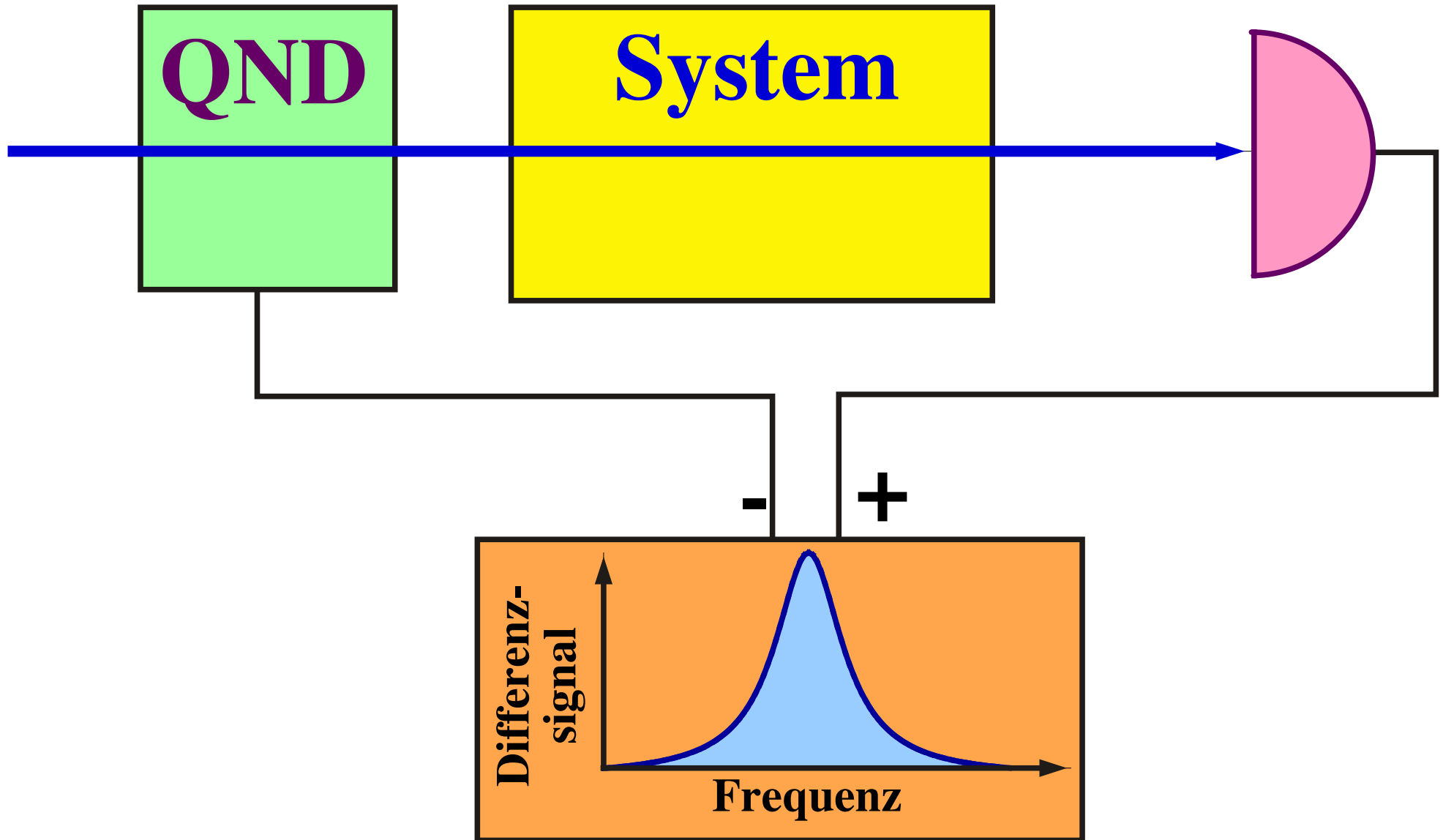


über nichtdestruktive Detektion (QND)



Empfindlichkeitssteigerung

konventioneller
Detektor



Zusammenfassung

- Wo liegen die Grenzen der klassischen Theorie ?

● Die Maxwell Gleichungen sind lokal

Korrelationen zwischen Photonen werden deshalb nicht erklärt.

Bsp: EPR-Korrelationen, Photon-Antibunching, Squeezing

● Nullpunktenergie des freien Feldes

Die Wechselwirkung des Vakuumzustandes mit materiellen Systemen führt zu spontaner Emission, Lamb Shift, g-2

- Wann hilft die Quantenmechanik weiter ?

● Empfindlichkeit über der "Schrotrauschgrenze"

Zustände des elektromagnetischen Feldes, die klassisch nicht beschreibbar sind ("squeezed states"), ermöglichen Experimente mit einer Empfindlichkeit, die unterhalb der Schrotrauschgrenze liegt.

Beispiele: Laser-Gyroskop, Gravitationswellendetektor,
kohärente optische Kommunikation

Weiterführende Literatur

Photonenstatistik

D.F. Walls, 'Evidence for the Quantum Nature of Light', Nature 280, 451-454 (1979).

Quantenoptik

P. Meystre and M.Sargent III, 'Elements of Quantum Optics', Springer, Berlin (1990).

Nichtlineare Optik

Y.R. Shen, 'The principles of Nonlinear Optics', Wiley, New York (1984).

Squeezing

D.F. Walls, 'Squeezed States of Light', Nature 306, 141-146 (1983).

P. Grangier, 'Spectroscopy Squeezed Beyond the Shot-Noise Limit', Physics World Aug.1992, 18-19 (1992).

QND

V.B. Braginsky, Y.I. Vorontsov, and K.S. Thorne, 'Quantum Nondemolition Measurements', Science 209, 547 (1980).