

Einzel-Photon Quellen

Einzel-Photon Quellen

Information kann in Form
des Polarisationszustands einzelner
Photonen übertragen werden.

Beim "Abhören" der Information
wird der Quantenzustand des
Photons zerstört

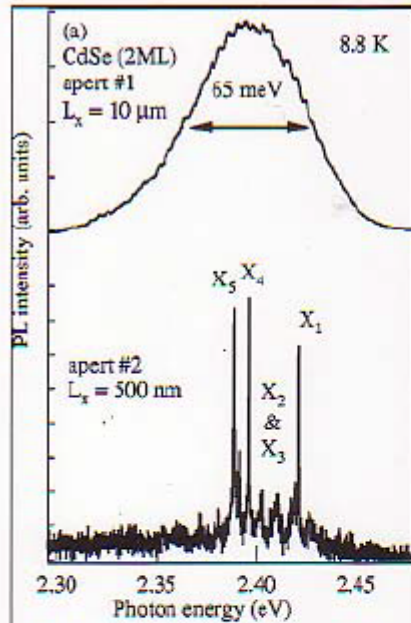
⇒ Sichere Quantenkryptographie

Herstellung von Einzelphotonen:

Abgeschwächter Laserimpuls, um allerdings
deutlich unter 1 Photon / Puls
abgeschwächt werden (~ 100 Pulse \rightarrow 1 Photon)

besser: Single Quantum Dots

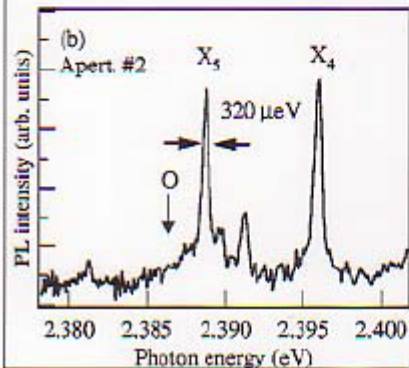
CdSe QDs



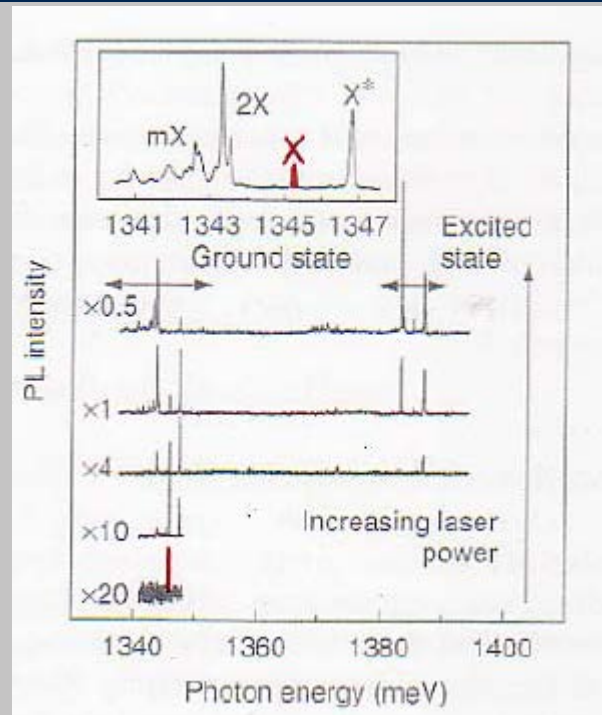
$\phi 10 \mu\text{m}$

$\phi 500 \text{ nm}$

Photolumineszenzspektrum von
 SK CdSe QDs im Zuse. Die Proben
 waren mit Metallmasken bedeckt



Exziton - Zustände



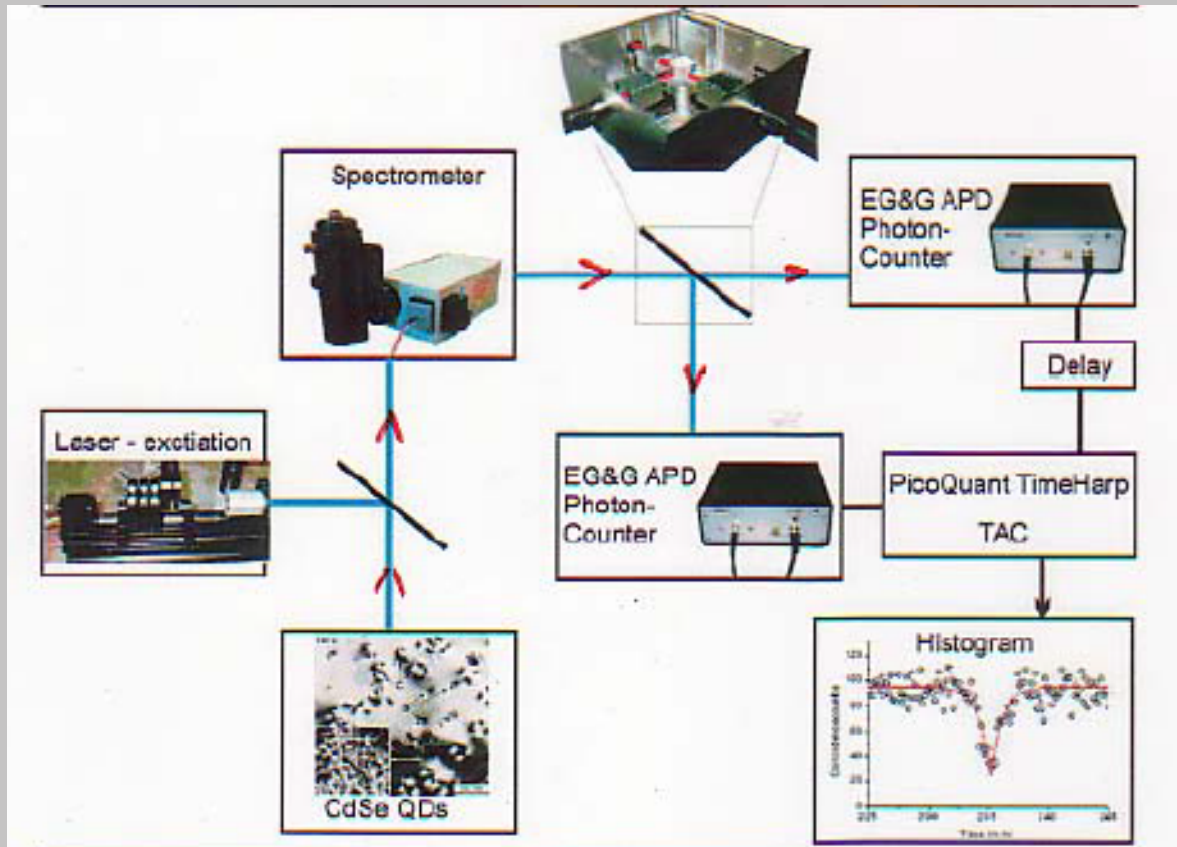
Photolum. eines einzelnen QD
als Funktion der Anregungsintens.

X = Exziton \circ

X^+ = pos. geladenes Exz. $\begin{matrix} \circ & e^- \\ \circ & h^+ \end{matrix}$

$2X$ = Biexziton $\begin{matrix} \circ \circ \\ \circ \circ \end{matrix}$

Hanbury-Brown – Twist



Messung der Autokorrelationsfunktion
von Einzelphotonquellen (QD)

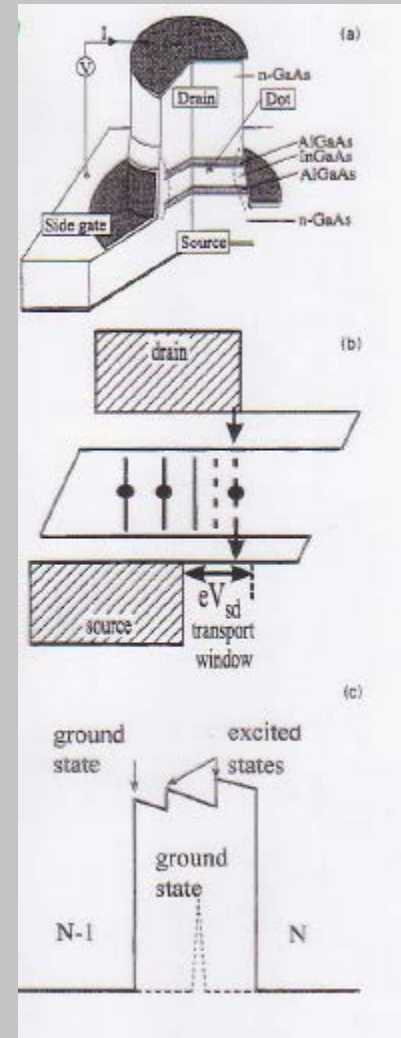
QD - transistor

Transistoren aus einem QD

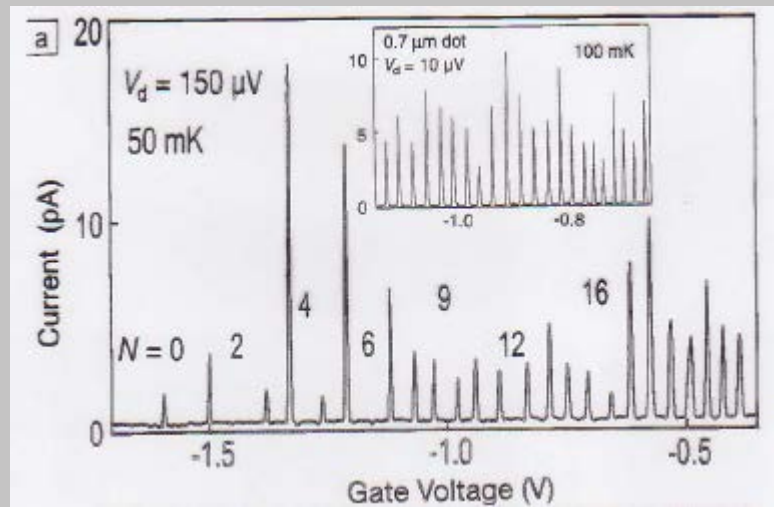
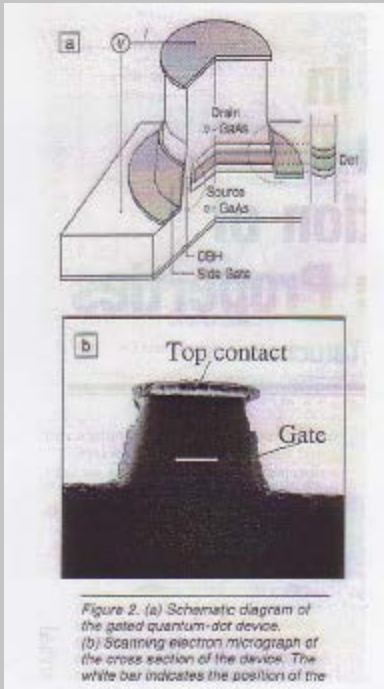
Bei Stromtransport wird die Energie wichtig, die benötigt wird um eine Elektron in den QD zu bringen

=> Coulomb Blockade

Single electron transistor



QD - transistor



Kolloidale QDs

f) Selbstorg. Bildung von kolloidalen
mikrokristallinen QDs.

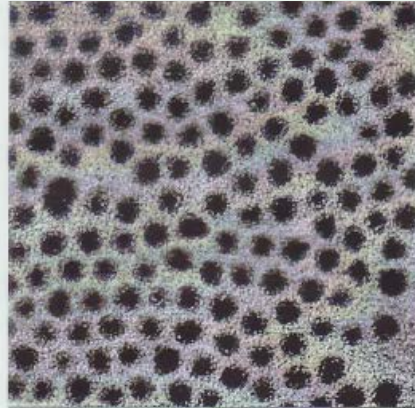


Figure 7. Transmission electron microscopy of hexagonal ordered array of 37-Å size QDs capped with octadecylthiol formed by slow evaporation of the QD colloid solution.

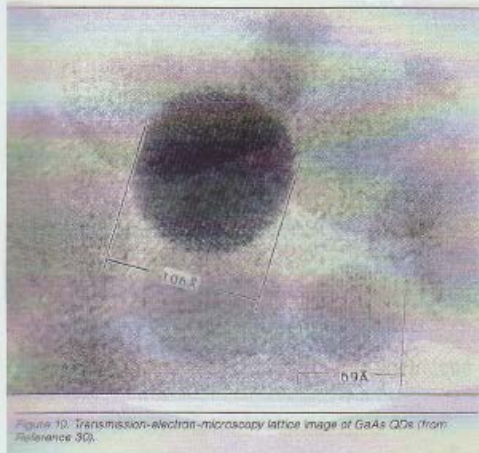
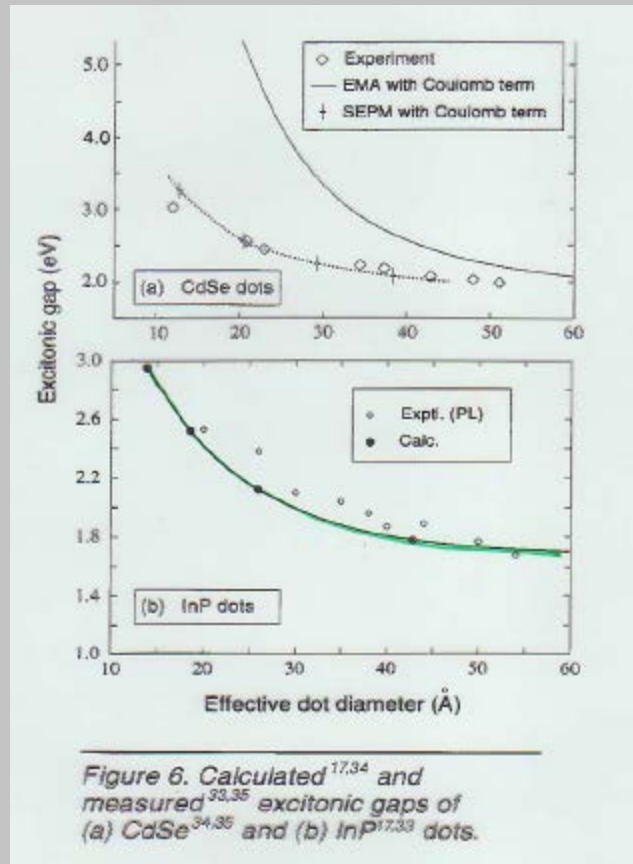


Figure 10. Transmission electron microscopy lattice image of GaAs QDs (from Reference 30).

⇒ QDs haben unterschiedliche Radien
⇒ inhomogene Verbreitung der PL

Exzitonenergie vs. Radius



Exziton - Energie vs. Radius
 von sph. QD

Linienbreite

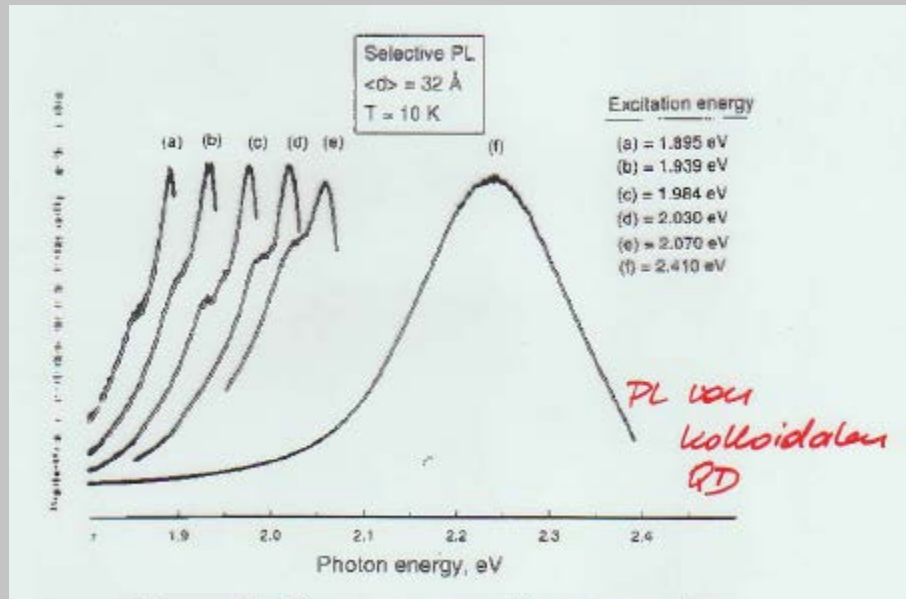
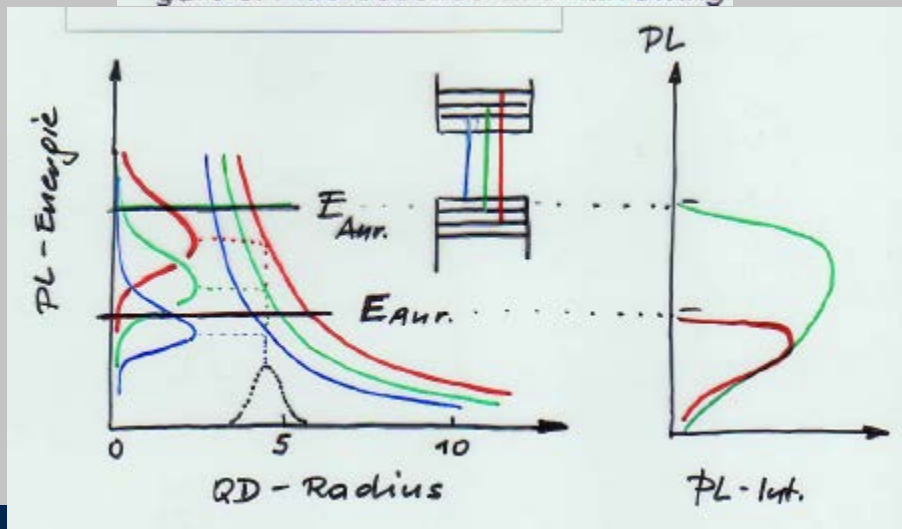


Figure 6. Fluorescence-line narrowing

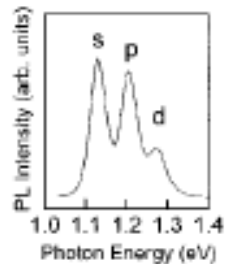


Optische Übergänge in einzelnen QDs

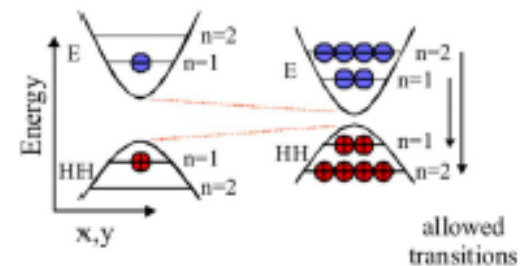
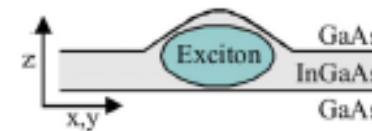
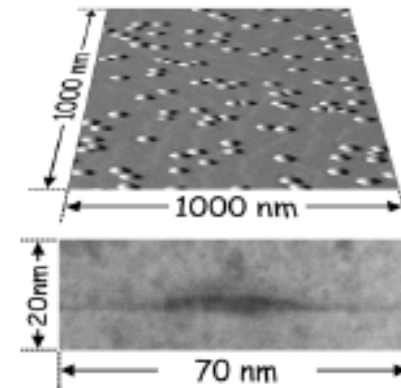
8.2. Optische Übergänge in einzelnen Quantenpunkten

Beispiel: Selbstorganisierte InGaAs Quantenpunkte in einer GaAs Matrix:

- Inhomogen verbreitetes System (als Ensemble)
(Spektrale Verbreiterung durch Fluktuationen in Größe und Zusammensetzung etwa 20 meV)



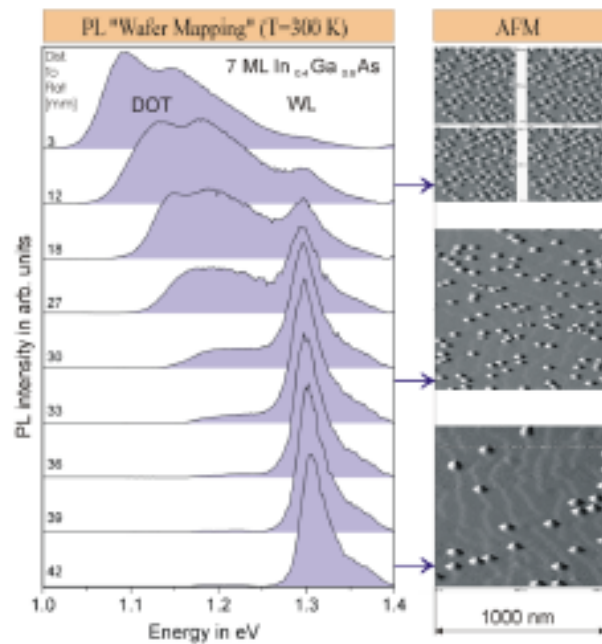
- Praktisch keine Defekte (keine Versetzungen $QE \rightarrow 1$)
- Durchmesser der Quantenpunkte (ca. 20nm) größer als deren Höhe (ca. 5nm)
→ Quantenscheiben mit Schalenentartung $\nu=2n$
($n=1, 2, 3 \dots$ entsprechend s, p, d, ...)
- Energieskalen:
Grundzustand-Exziton Energie ~ 1.3 eV
Exzitonischer Schalenabstand $[E(2 \rightarrow 2) - E(1 \rightarrow 1)]$ 30 meV bis 100 meV
- Mehrteilchen-Zustände sind renormalisiert
(durch Coulomb-, Austausch- und Korrelationsenergie)



QDs

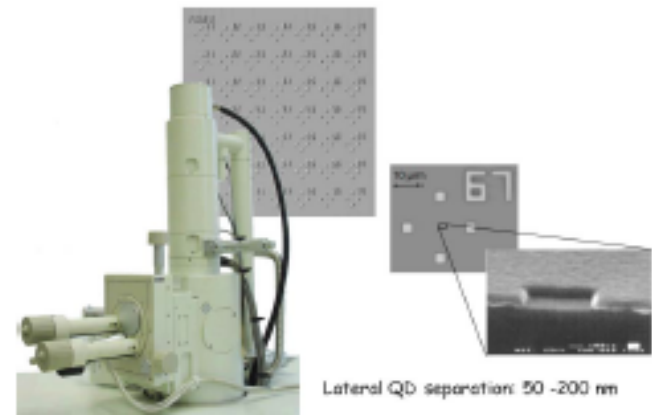
Optischer oder elektrischer Zugang zu einzelnen Quantenpunkten:

- Wachstum geringer Flächendichten von Quantenpunkten (<10 pro μm^2), Selektion durch Tieftemperatur-Mikroskopie
- Verwendung von Schattenmasken, die mittels Elektronenstrahlolithographie hergestellt sind (100 – 500 nm Durchmesser)
- Wachstum auf vorstrukturierten Templaten
- STM-induzierte Lumineszenz
- ...



Stranski-Krastanov growth by MBE
 QD-deposition: Nonrotated substrate

- In-gradient
- Variation of the QD surface density



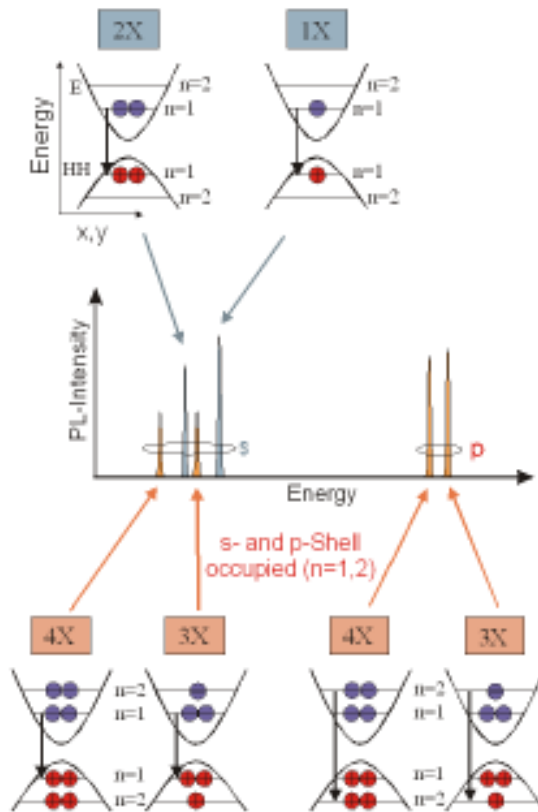
Multi-Exzitonen Zustände

Sequentieller Zerfall renormalisierter Multiexziton-Zustände:

→ Diskrete Übergangsenergien für Zerfälle aus unterschiedlichen Konfigurationen

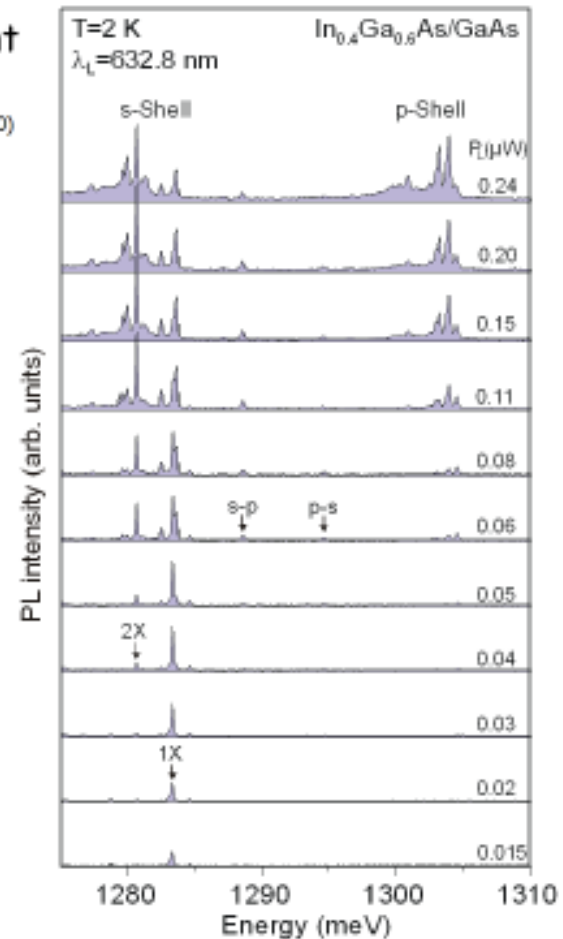
■ Schematics

Only s-Shell occupied ($n=1$)



■ Experiment

F. Findeis et al.,
SSC 114, 227 (2000)



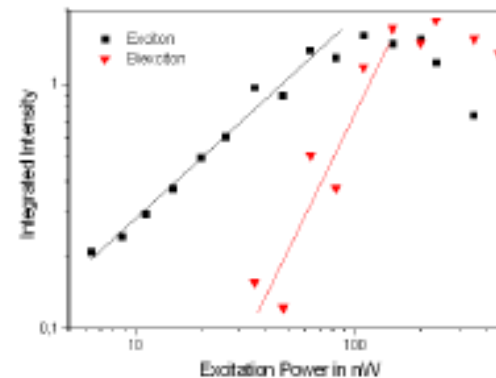
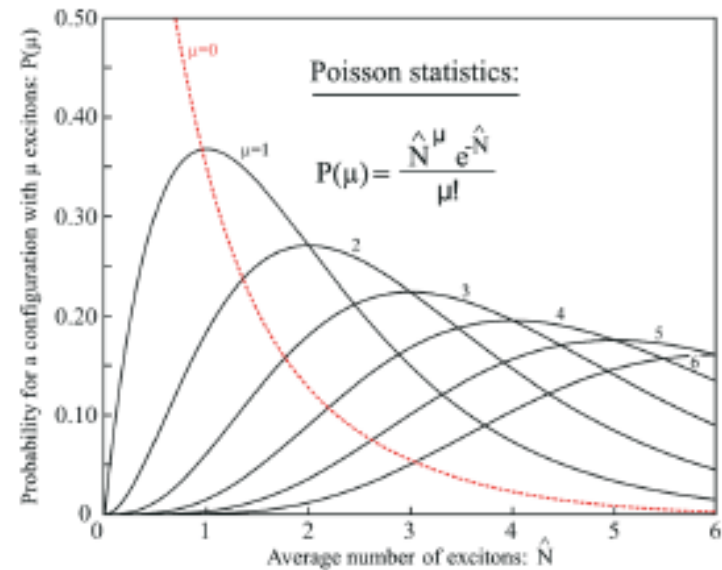
Statistik

Nicht-resonante optische Anregung:

Durch Variation der Intensität der Laseranregung kann lediglich der statistische Mittelwert der Besetzung \hat{N} eines Quantenpunkts (Besetzung mit einer bestimmten Anzahl von Exzitonen) verändert werden.

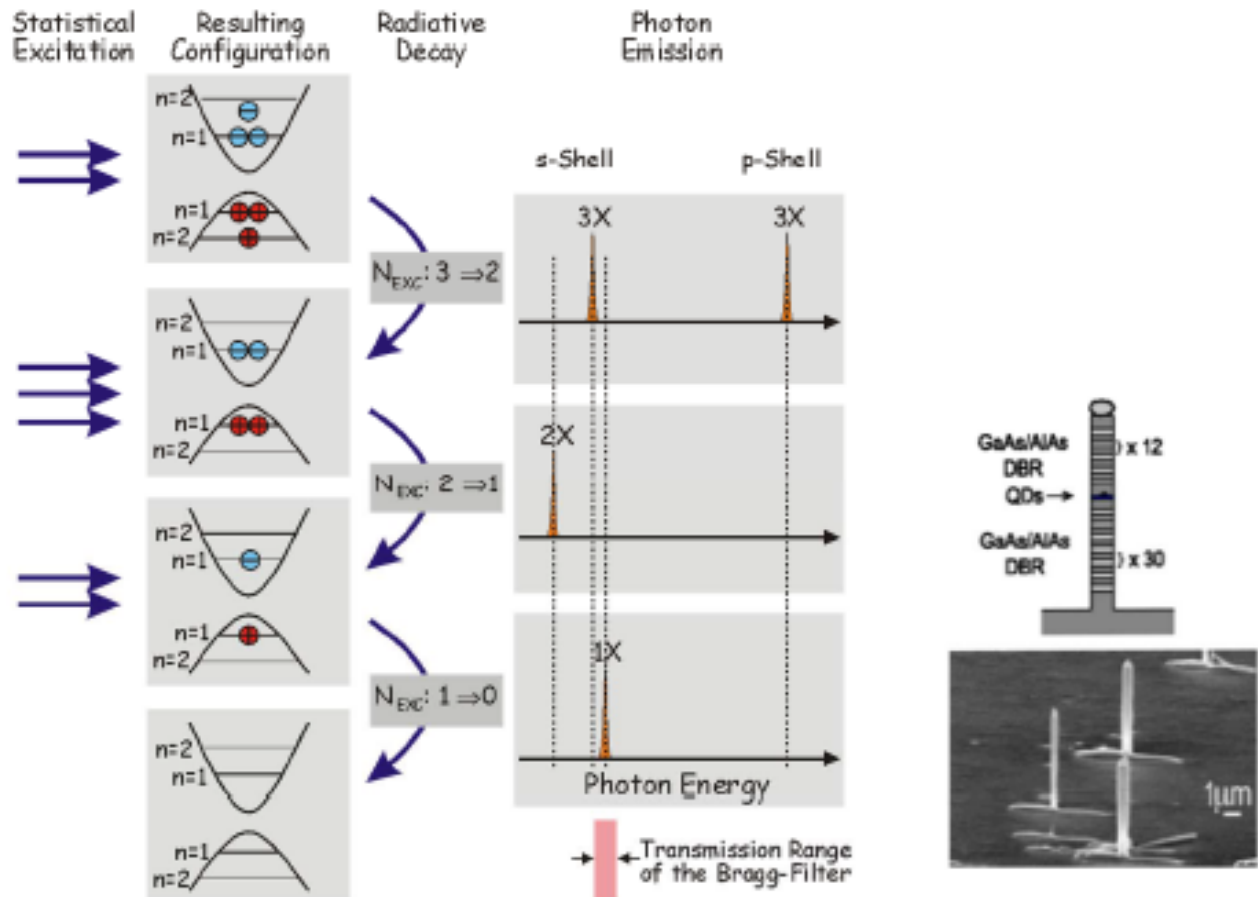
Die Wahrscheinlichkeit $P(\mu)$ für das Auftreten einer bestimmten Konfiguration mit $\mu=0, 1, 2, \dots$ Exzitonen wird durch die Poisson-Statistik beschrieben.

Das Exziton ($\mu=1$) zeigt für $\hat{N} \rightarrow 0$ eine lineare Intensitätsabhängigkeit, das Biexziton ($\mu=2$) eine quadratische Intensitätsabhängigkeit.



Prinzipdarstellung einer Einzelphoton Quelle

Prinzipdarstellung einer Einzelphoton-Quelle:

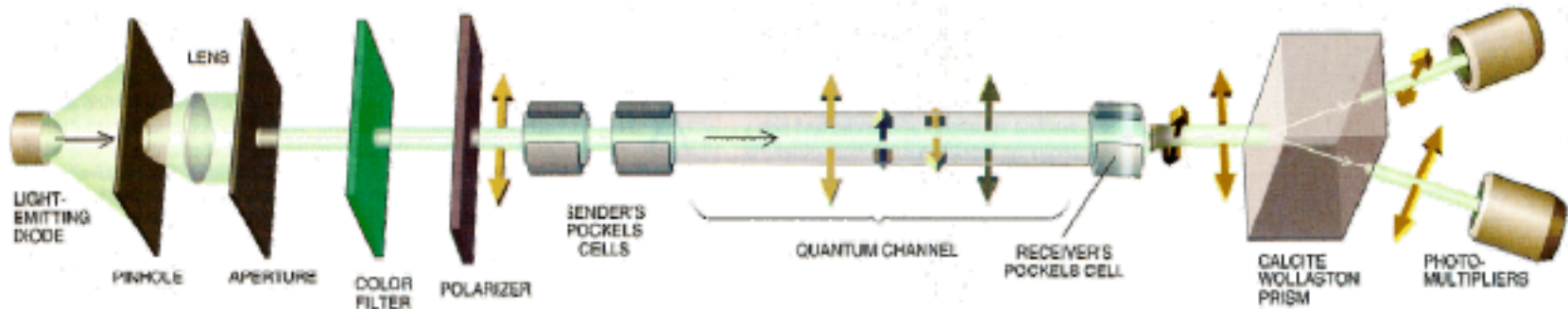


Suggested by: J. M. Gérard and B. Gyal, J. Lightwave Technol. 17, 2089 (1999)

Quanten-Kryptographie

8.3. Quanten-Kryptographie

(einfache Form nach Bennett, Prassard, Eckert, Scientific American, October 1992, p. 28)



QUANTUM SYSTEM can distribute information in perfect secrecy. The transmitter produces faint flashes of green light from a light-emitting diode. The pinhole, lens and filter create a collimated beam of dim flashes. The light is then polarized horizontally. Two Pockels cells change the polarization to 0,

45, 90 or 135 degrees. The polarized light flashes are released from the transmitter and eventually reach the receiver. There another Pockels cell shifts the polarization by either 45 degrees or not at all. The action of this Pockels cell allows the receiver to choose between measuring rectilinear or diagonal

polarization. In the rectilinear case, a horizontally polarized photon will be directed toward the right photomultiplier; a vertically polarized photon will be directed toward the left photomultiplier.

Informationsträger: Einzelne Photonen mit definiertem Polarisationszustand

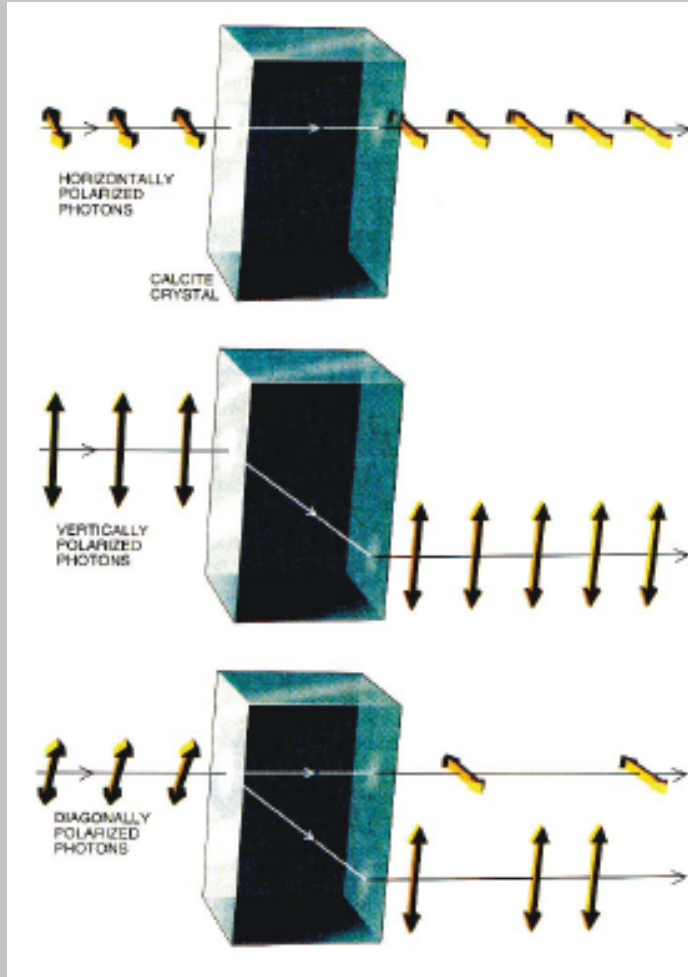
Grundlegende Eigenschaft des Einzelphoton-Emitters:

- Deterministische Emission einzelner Photonen in eine gegebene Richtung und Mode
- Die Anzahl der Photonen pro Puls (Bit) sollte eins sein, nie zwei oder mehr

Momentan gängige Lösung:

- Gedämpfte Emittter (z.B. LEDs) mit einer statistischen Emission von <0.1 Photonen pro Puls

Quantum Key Distribution



Quantum Key Distribution

A quantum cryptographic system will allow two people, say, Alice and Bob, to exchange a secret key. The system includes a transmitter and a receiver. Alice uses the transmitter to send photons in one of four polarizations: 0, 45, 90 or 135 degrees. Bob's receiver can measure the polarization. According to the laws of quantum mechanics, the receiver can distinguish between rectilinear polarizations (0 and 90), or it can quickly be reconfigured to discriminate between diagonal polarizations (45 and 135); it can never, however, distinguish both types. The key distribution requires several steps. Alice sends photons with one of four polarizations, which she has chosen at random.

For each photon, Bob chooses at random the type of measurement: either the rectilinear type (+) or the diagonal type (x).

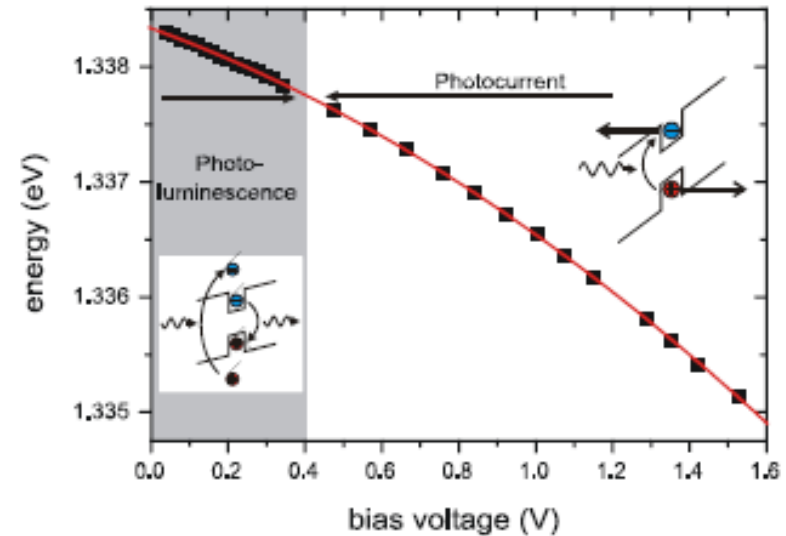
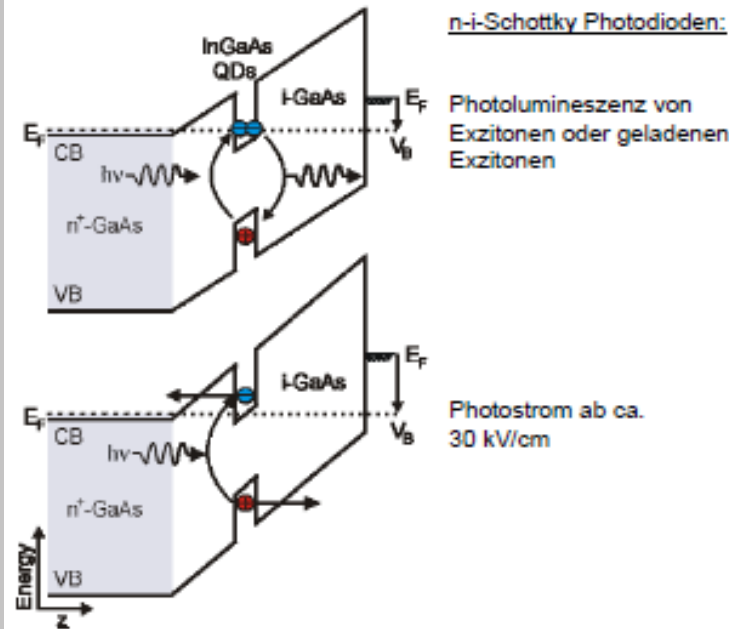
Bob records the result of his measurement but keeps it a secret.

Bob publicly announces the type of measurements he made, and Alice tells him which measurements were of the correct type.

Alice and Bob keep all cases in which Bob measured the correct type. These cases are then translated into bits (1's and 0's) and thereby become the key.

Geladenen Exzitonen

8.4. Geladene Exzitonen



$$E_{exc} = E_g + E_{conf}^e + E_{conf}^h - E_b^{eh}$$

■ Quantum confined Stark effect

$$\Delta E_{conf}^{eh} \propto -m^* F^2 L^4$$

$$E_b^{eh}(F \neq 0) < E_b^{eh}(F = 0)$$

from 2. order perturbation theory $H = H_0 + eFz$

(numerical solution required)

valid in the regime: $\langle z_{\sigma,\lambda}(F \neq 0) \rangle - \langle z_{\sigma,\lambda}(F = 0) \rangle \propto F$

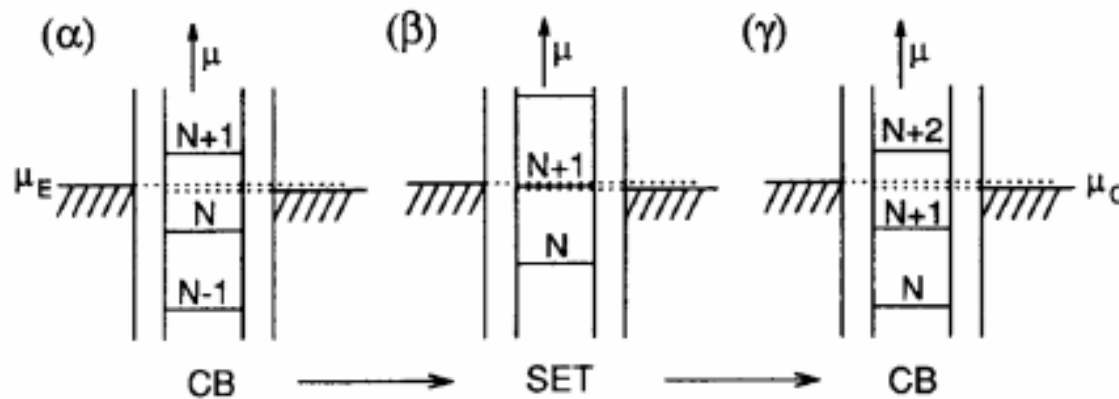
Kondensator

Energy in a condensor: $E = \frac{1}{2}CU^2$

Energy required to bring in
one more electron:

$$E_c = \frac{e^2}{2C}$$

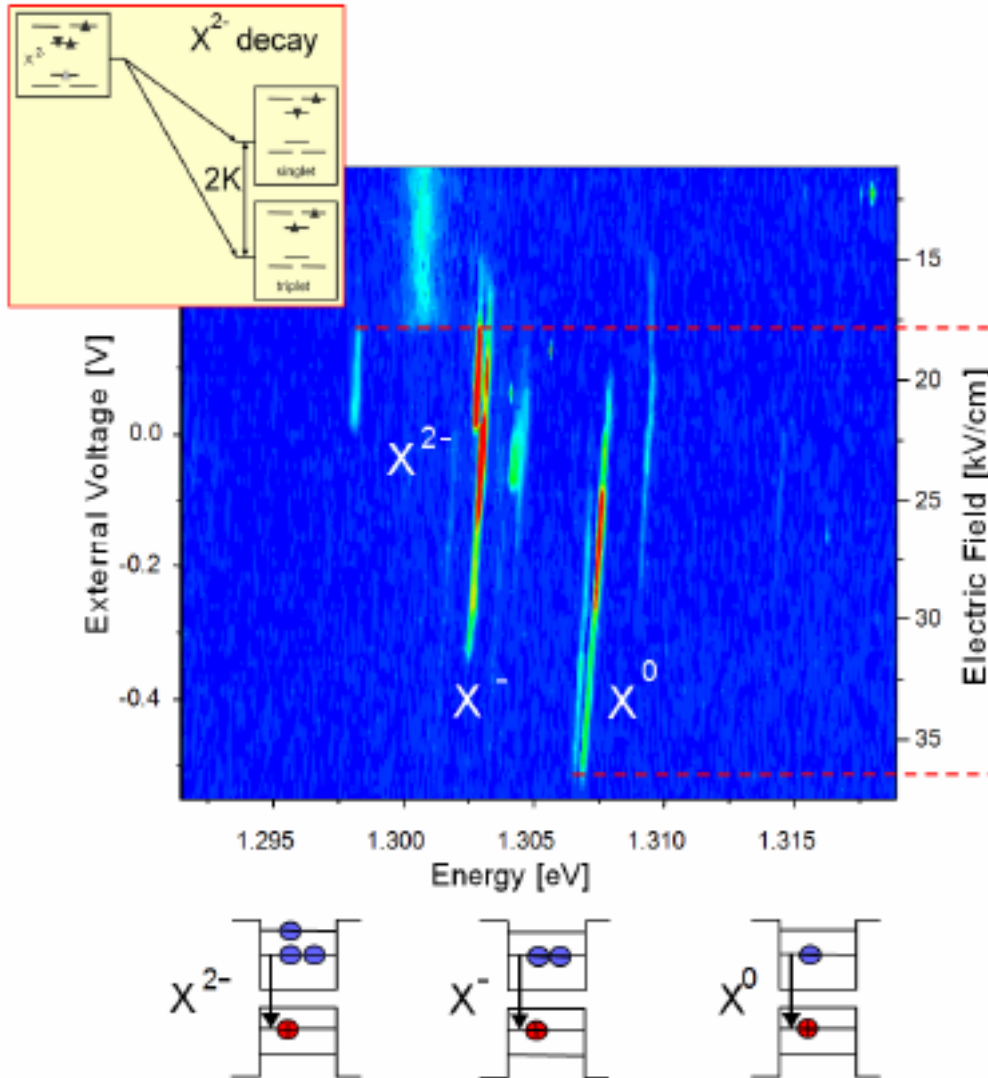
with $Q = CU$



Orderes of magnitude here:

■ $C \sim 5 \times 10^{-18} \text{ F}$

■ $E_c \sim 20 \text{ meV}$



- WL filled with electrons

- Single electron charging: neutral, single and double charged single exciton states

- Tunnel escape of the carriers before recombination
=> Photocurrent regime

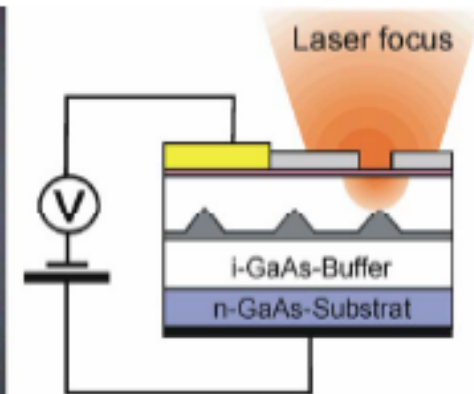
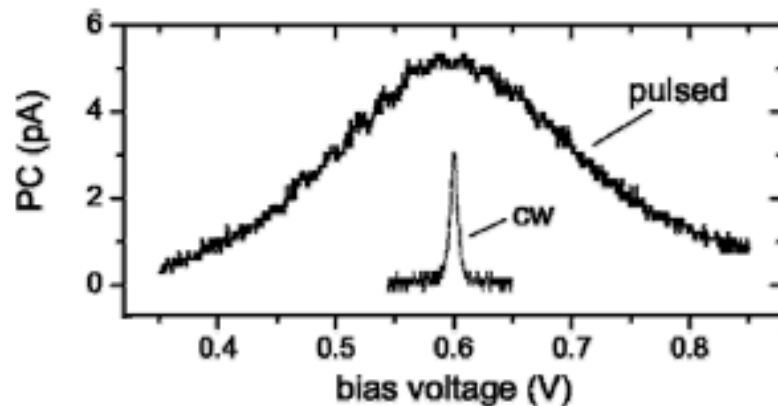
Kohärente Eigenschaften von QDs

8.5. Kohärente Eigenschaften von Quantenpunkten

Betrachtete Proben:

Einzelquantenpunkt Photodioden

Spektrale Empfindlichkeit für resonante Laseranregung:
(Detektion im Photostrom)

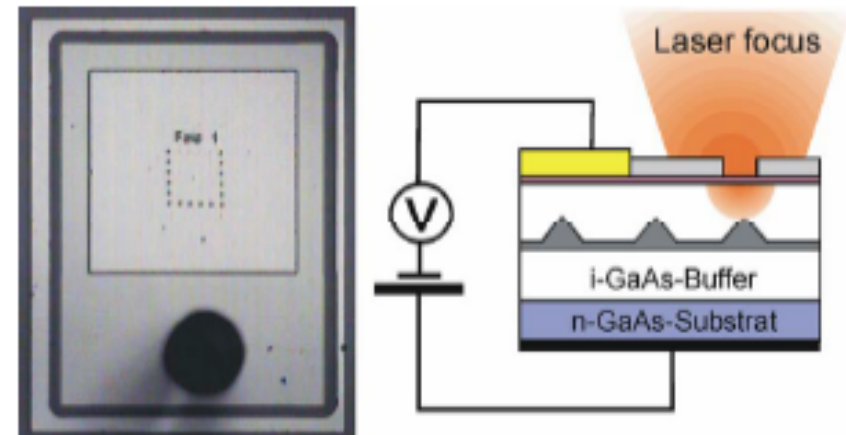
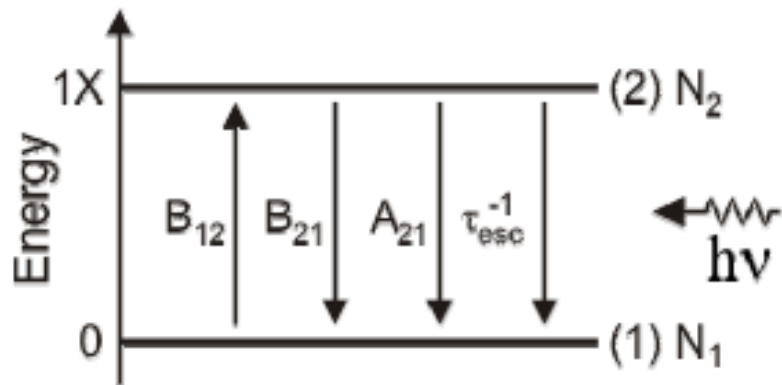


Elektrisch abstimmbarer "Spektrumsanalysator"

Abstimmung durch "quantum confined Stark effect" über Gatespannung
(Empfindlichkeit etwa 2 meV / Volt)

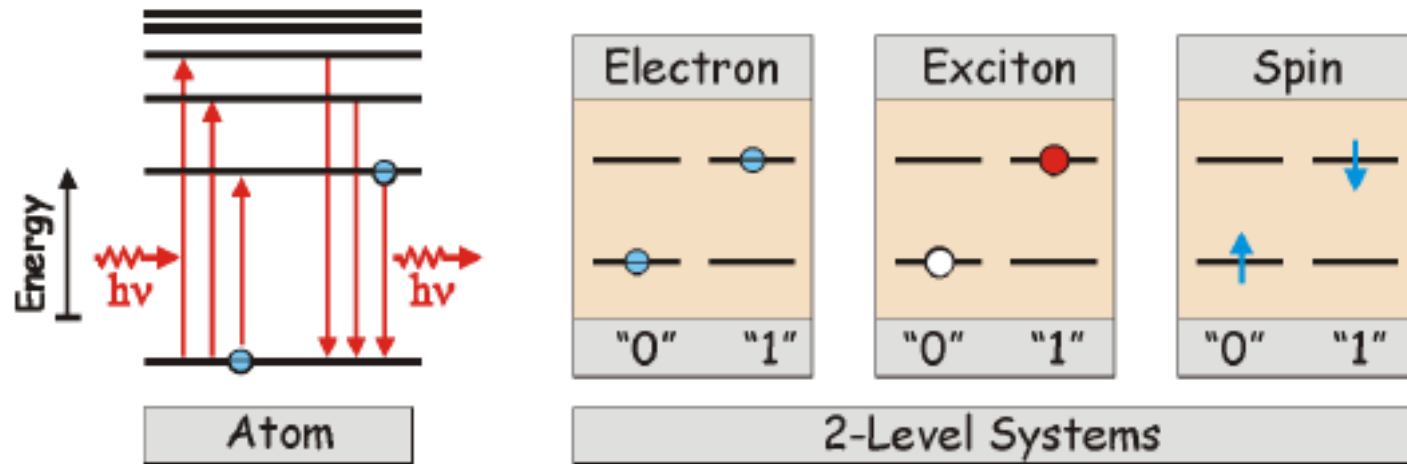
Einzelquantenpunkt Photodiode = Quantenmechanisches 2-Niveau-System mit elektrischen Kontakten

Der Exziton Grundzustands-Übergang definiert ein 2-Niveau-System



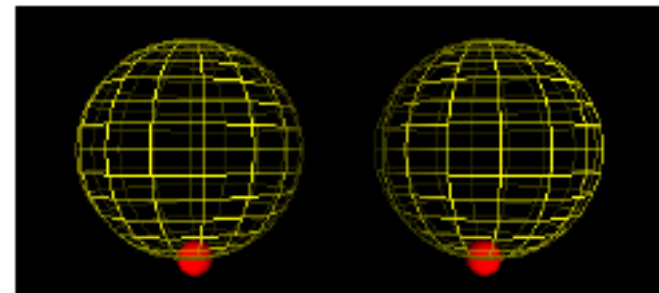
- Das 2-Niveau-System definiert ein Quantenbit (=Qubit)
- Die Messung des Qubit-Zustands (Projektion) erfolgt durch Tunneln
- Die Photostrom-Technik erlaubt eine Quantitative Messung der Besetzung

Qubit



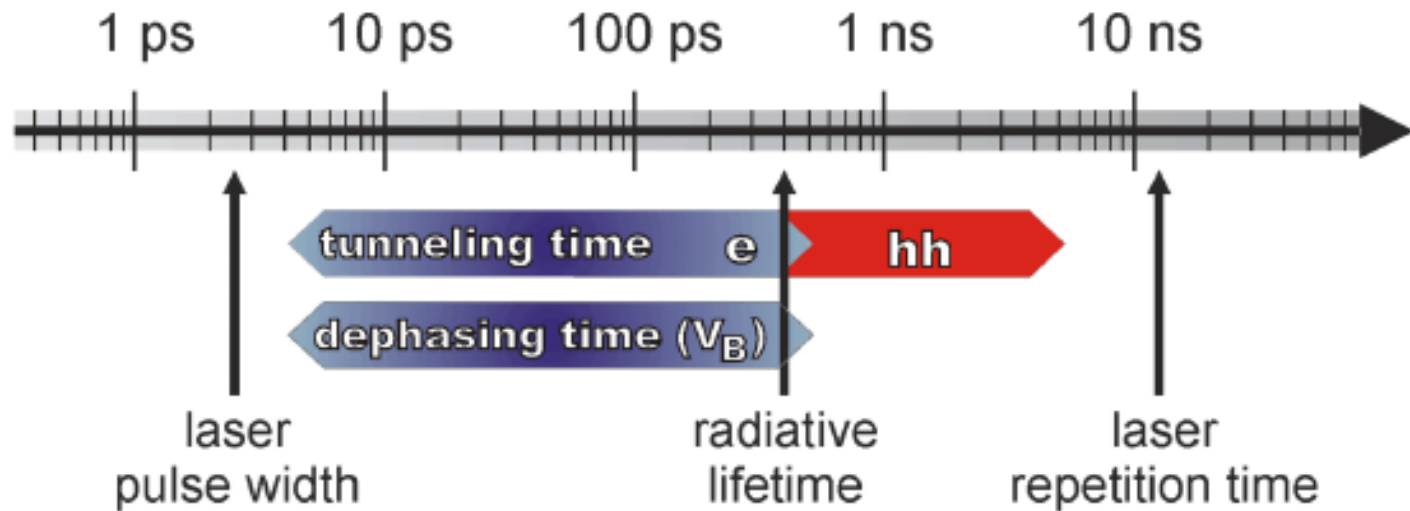
- Ein Exziton-Qubit ist eine kohärente Polarisation in einem Quantenpunkt-2-Niveau-System
- Das Exziton behält die Phase des anregenden Laserpulses (innerhalb der Dekohärenzzeit)
- Superpositionen der Zustände „0“ und „1“ sind möglich:
- Der Zustand Ψ eines Qubits kann wie folgt geschrieben werden:

$$\Psi = \alpha |0\rangle + \beta |1\rangle \quad \text{with } \alpha \text{ and } \beta \in \mathbb{C}$$



Darstellung eines Qubit-Zustands auf der Blochkugel

Time scale



Current Experiments:

■ $\tau_{\text{tunnel}}(V_B) \approx \tau_{\text{dephase}} \approx 10\text{-}300\text{ps} \rightarrow$ Coherent excitation for $\tau_{\text{laser}}=1\text{-}3\text{ ps}$

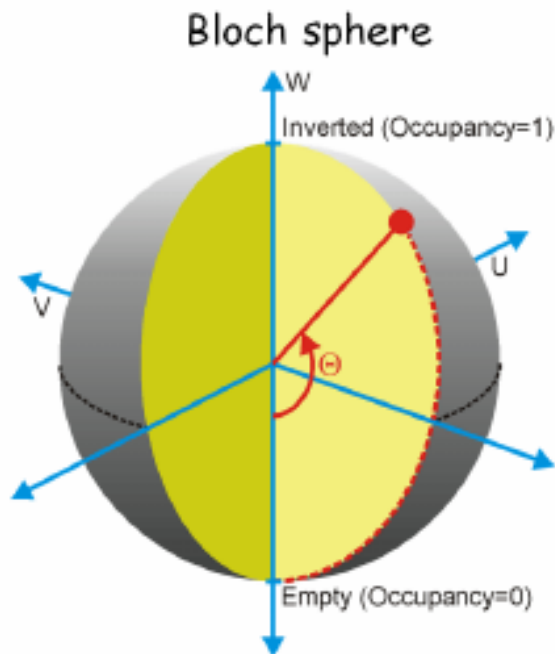
Low temperature dephasing times for InGaAs QDs: $\tau_{\text{dephase}} \approx 500\text{ ps}$ (limited by radiative decay)

P. Borri et al., Phys. Rev. Lett. **87**, 157401 (2001).

M. Bayer and A. Forchel, Phys. Rev. B **65**, 41308 (2002).

Blochkugel

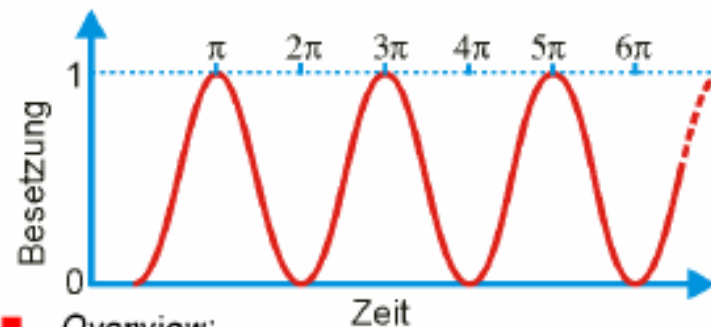
- Description in the framework of the optical Bloch theory



- Examples for "all optical" work in QDs:
 - T. H. Stievater et al., Phys. Rev. Lett. 87, 133603 (2001).
 - H. Kamada et al., Phys. Rev. Lett. 87, 247401 (2001).
 - H. Htoon et al., Phys. Rev. Lett. 88, 087401 (2002).
 - P. Borri et al., PRB 66,081306 (2002)

- Rotation angle:
 $\theta = \kappa \int E(t) dt$
 „area theorem”

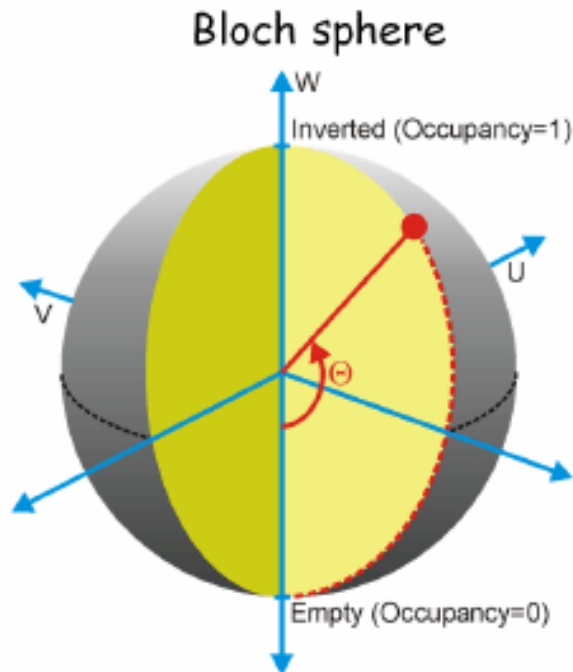
- Occupancy:
 $L = \sin^2(\theta/2)$



- Overview:
 L. Allen and J. H. Eberly, Optical Resonance and Two-Level Atoms (Wiley, New York, 1975).

π -puls

- Description in the framework of the optical Bloch theory

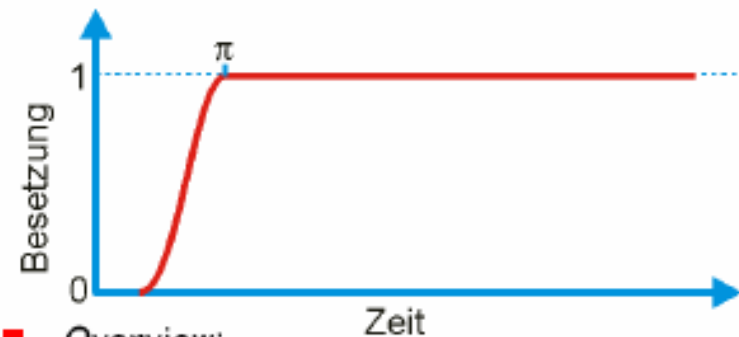
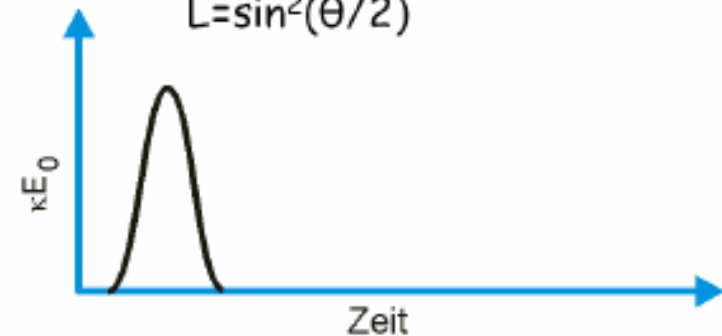


- Examples for "all optical" work in QDs:

T. H. Stievater et al., Phys. Rev. Lett. 87, 133603 (2001).
 H. Kamada et al., Phys. Rev. Lett. 87, 247401 (2001).
 H. Htoon et al., Phys. Rev. Lett. 88, 087401 (2002).
 P. Barri et al., PRB 66,081306 (2002)

- Rotation angle:
 $\Theta = \kappa \int E(t) dt$
„area theorem“

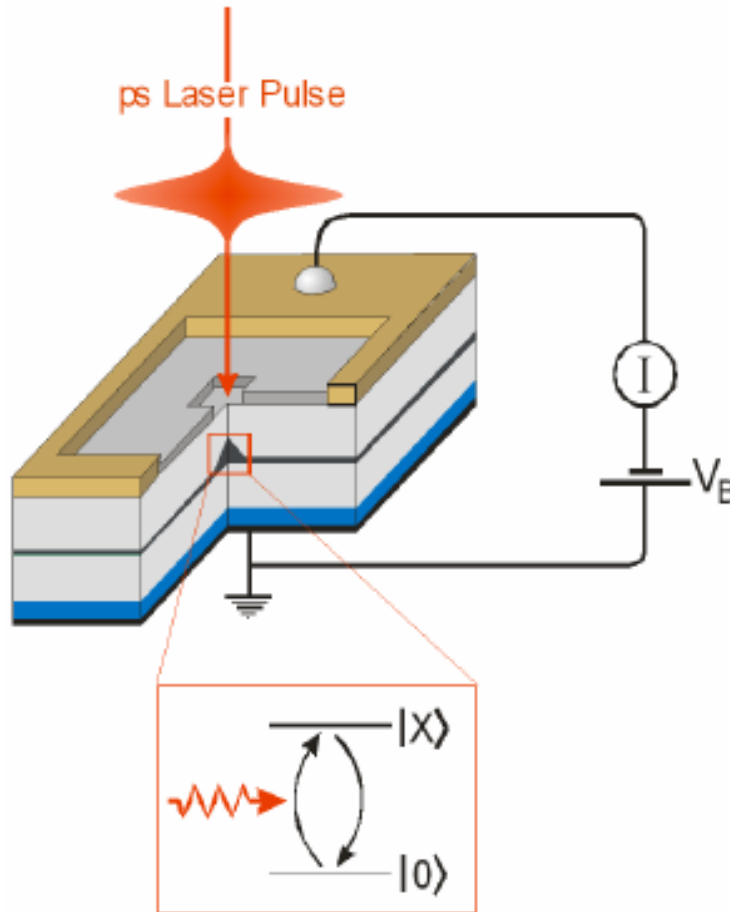
- Occupancy:
 $L = \sin^2(\Theta/2)$



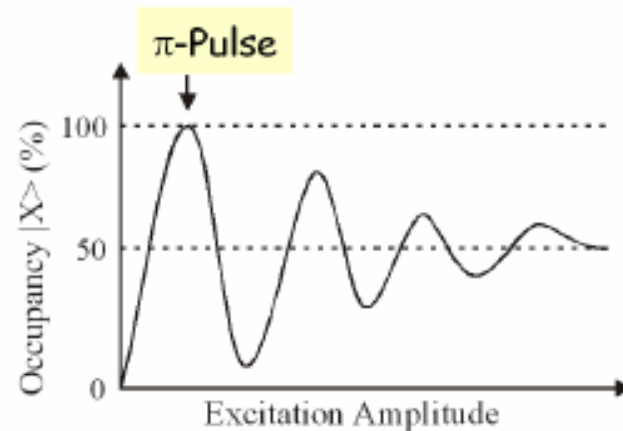
- Overview:

L. Allen and J. H. Eberly, Optical Resonance and Two-Level Atoms (Wiley, New York, 1975).

Rabi-Oszillation

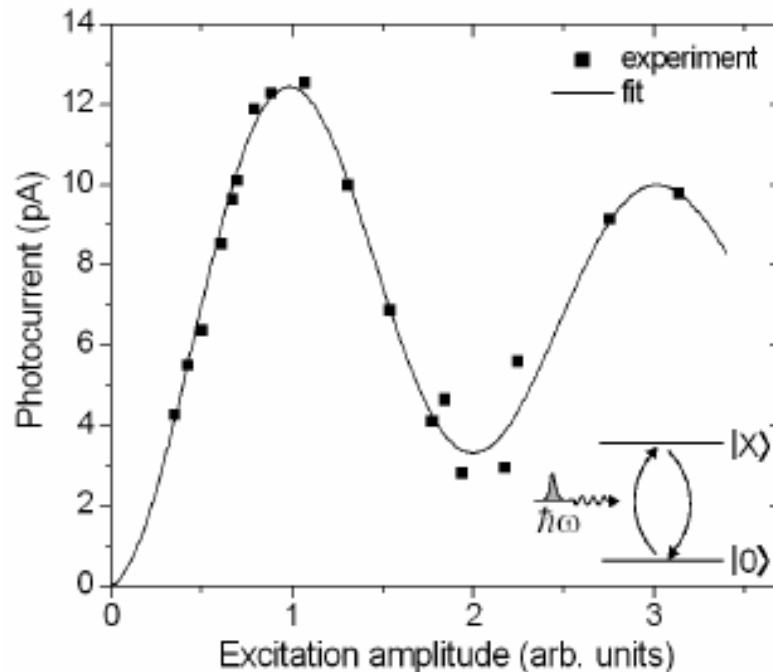


- Optical excitation with ps-pulses
 - ⇒ Rabi oscillations
 - ⇒ Deterministic photocurrent
- Excitation with π -pulses:
 $I = f e$ (f : repetition frequency)



Rabi-Oszillation

Messung der Qubit-Besetzung: Rabi-Oszillationen



Maximum possible photocurrent:

$$I = f e = 13.1 \text{ pA} \quad (f=82 \text{ MHz})$$

Measured photocurrent:

$$I = 12.6 \text{ pA}$$

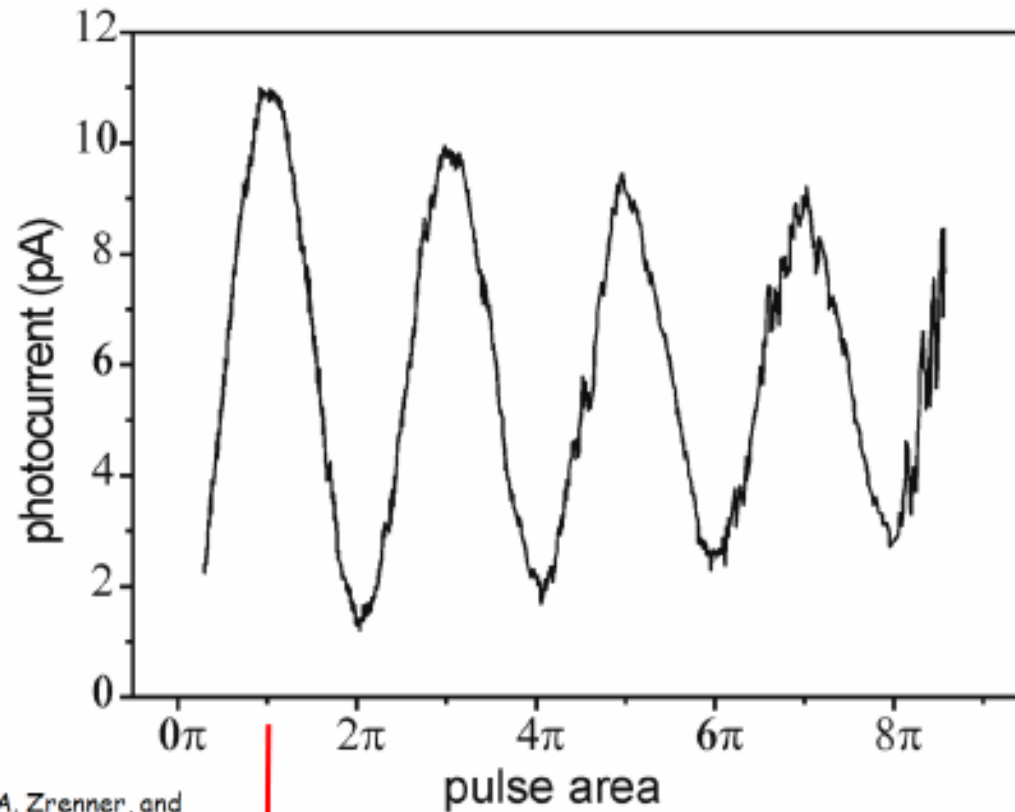
QuBit:

- ▶ Rotation by ps-pulse "0" to "1"
- ▶ Quantitative readout by tunneling
- ▶ Initialization: "X" to "0"

- Quantitative measurement of the occupancy in a single quantum system
- For π -pulse excitation: Optically triggered single electron source

A. Zrenner, E. Beham, S. Stufler, F. Findeis, M. Bichler, and G. Abstreiter, Nature 418, 612 (2002)

Rabi-Oszillation



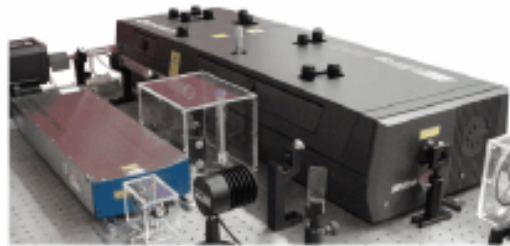
S. Stufler, P. Ester, A. Zrenner, and
M. Bichler, *Phys. Rev. B* **72**, 121301 (2005)

Damping:
J. Förstner et al., *PRL* **91**, 127401 (2003).
J.M. Villas-Boas et al., *PRL* **94** 057404 (2005):

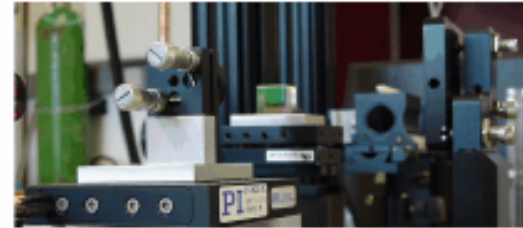
Number of photons per π pulse: 80000
(incident on top of the shadow mask)

Ramsey Experiment

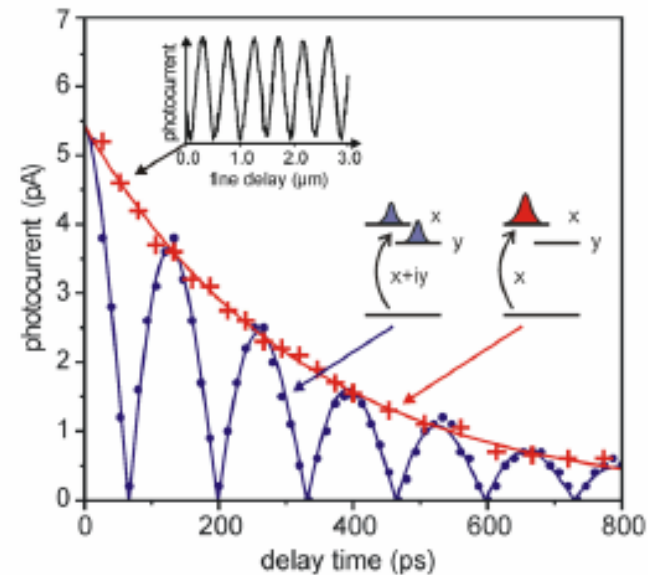
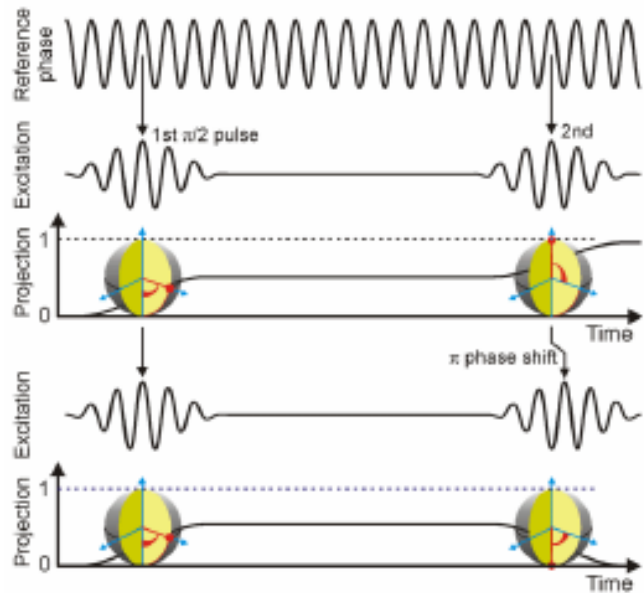
Messung der Qubit-Phase: Ramsey Experiment



ps/fs Lasersystem



Michelson Interferometer



S. Stuflier, P. Ester, A. Zrenner, and M. Bichler, Phys. Rev. B 72, 121301 (2005)

Diss Stuflier 2005: <http://digital.ub.uni-paderborn.de/hs/content/titleinfo/3921>