

# 1D und 0D Systeme

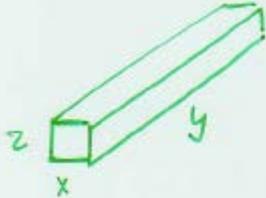
Während die 2D QW's bereits in einer Reihe von Bauelementen (QW-Laser, MODFET, HEMT) eingesetzt werden, ist dies für 1D u. 0D Systeme (noch) nicht der Fall.

Grund: 1D u. 0D sind relativ schwierig herzustellen (Nanolithographie) bei QDots gibt es in letzter Zeit Erfolge mit selbstorganisiertem Wachstum

Der Transport in 1D Systemen ist für die Grundlagenforschung sehr interessant.

Wesentlich für die Anwendung aber ist die Zustandsdichte (opt. Übergänge)

# Schrödinger Gleichung



Schrödinger gl.

$$\left( \frac{p_x^2 + p_y^2 + p_z^2}{2m^*} + V(x,z) \right) \psi(x,y,z) = E \psi(x,y,z)$$

$\psi(x,y,z)$  ... Ebene Wellenf. in y

$$\psi(x,y,z) = \frac{1}{(L_y)^{1/2}} \chi(x,z) e^{iky}$$

mit

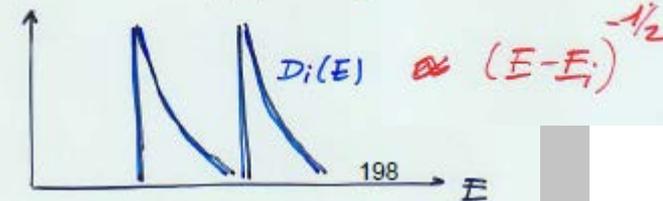
$$\left( \frac{p_x^2 + p_y^2}{2m^*} + V(x,z) \right) \chi(x,z) = E_i \chi(x,z)$$

1 dimensionale Subbänder (freie Bes. in y)

$$E_{i,k_y} = E_i + \frac{\hbar^2 k_y^2}{2m^*} \quad \left| \quad E_{i,y} = \frac{\hbar^2 k_y^2}{2m^*} \left( \frac{\hbar^2}{a_x^2} + \frac{m^2}{a_z^2} \right) \right.$$

Zustandsdichte

$$D_i(E) = \frac{2 L_y}{\pi \hbar} \sqrt{\frac{m^*}{2(E-E_i)}}$$



# Zustandsdichte

Zustandsdichte eines 1D-Systems  
"Quantum wire"

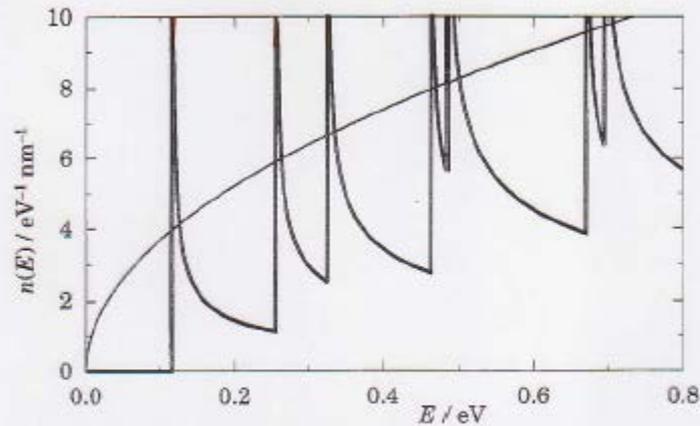


FIGURE 4.11. Density of states of a quasi-one-dimensional system. The curve was calculated for electrons in a  $9 \times 11$  nm infinitely deep well in GaAs. The thin parabola is the density of states for unconfined three-dimensional electrons.

Die "Spitzen" der Zustandsdichte  
führen zu großem Laserpump

Wenn die freie Bewegung der Ladungsträger in allen Raumdimensionen eingeschränkt wird (0D-System)

⇒ Quantum Dot (QD)  
Quantum Box

Die Energie der gebundenen Zustände wird durch 3 Quantenzahlen bestimmt

$$E_{e,n_x,n_y,n_z} = \frac{\hbar^2 \pi^2}{2m^*} \left( \frac{n_x^2}{a_x^2} + \frac{n_y^2}{a_y^2} + \frac{n_z^2}{a_z^2} \right)$$

⇒ keine Dispersion!



Die Zustandsdichte wird zur  $\delta$ -Funktion bei  $E_{e,n_x,n_y,n_z}$

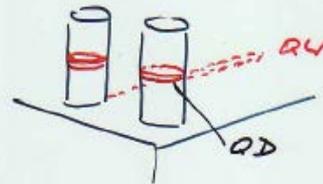
(Ähnlich Atome ⇒ "künstliche Atome")

⇒ größter Laser gain

# Herstellung von 1D und 0D Systemen

a) Einschränkung der Ladungsträger in einem QW

durch Ätzen von Streifen und Säulen  $\Rightarrow$  erste Realisierung von QD

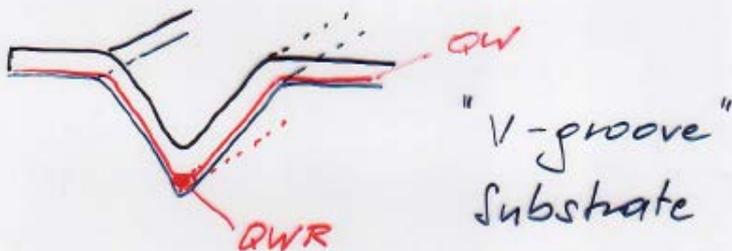
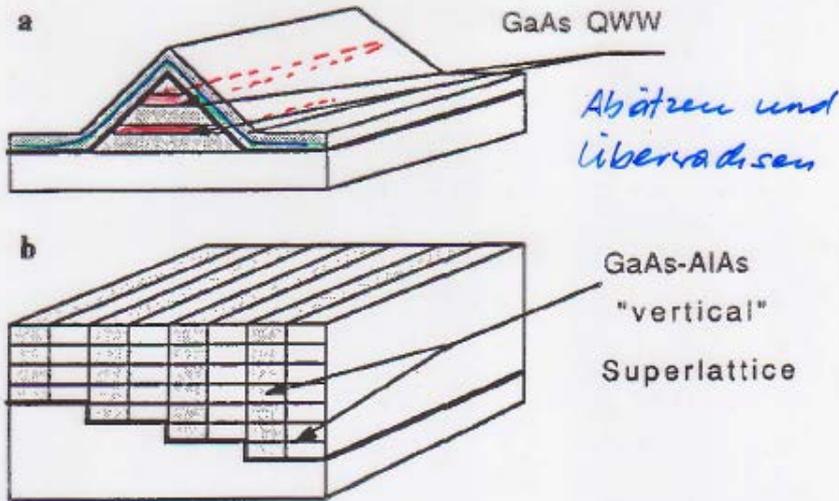


Die Methode stellt hohe Anforderungen an die Lithografie (sehr kleine Strukturen 20-30 nm  $\phi$ )

und die Ätztechnik  
meist Plasmaätzen  $\Rightarrow$  Strahlen-  
Schaden an den Säulenwänden

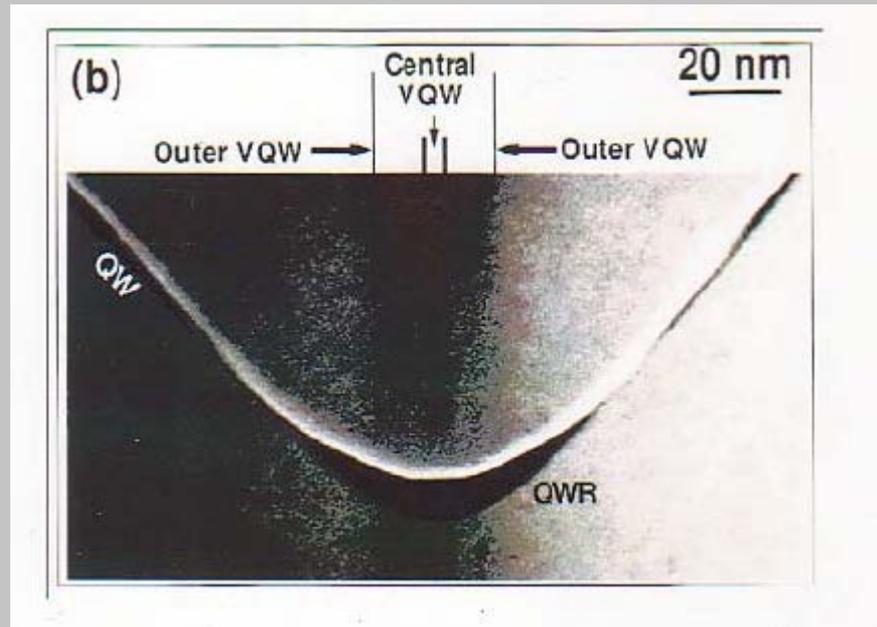
# Herstellung von 1D und 0D Systemen

b) "Überwachsen" von strukturierten Flächen



Der Quantendraht entsteht durch  
 Massentransport in den Gruben  
 => im breiten QWR sind die Bindungsenergien kleiner als im QW  
 => Konfinement

# Herstellung von 1D und 0D Systemen

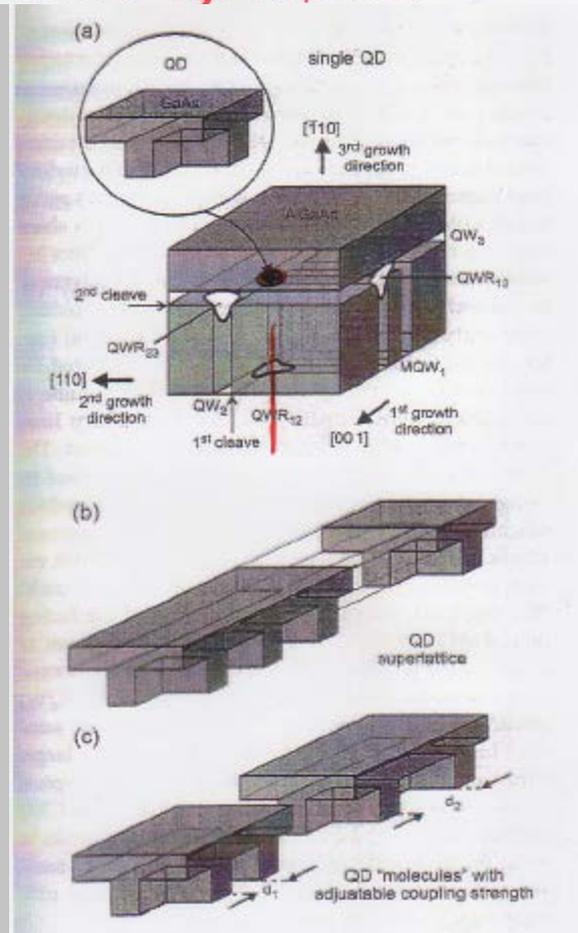


Querschnitt durch Quantendraht  
(QWR) der in einem V-Graben  
durch Epitaxie entstanden ist  
(GaAs / GaAs)

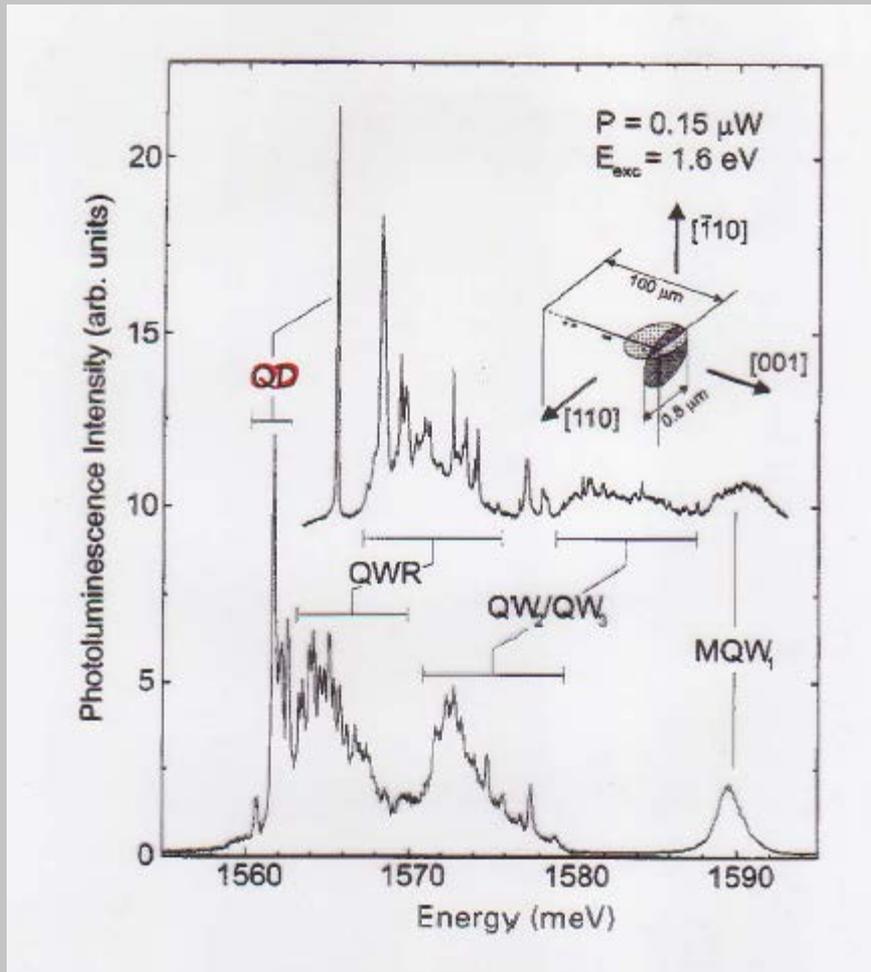
# Herstellung von 1D und 0D Systemen

c) Überwachsen von (im VHV) gespaltenen QWs

extremes exp. Aufwand



# Photolumineszenz von gespaltenen und überwachsenen QW



*extrem scharfe QD Emission  
 (Atomartig)*

*Wenn mehrere QDs angeregt werden  
 zeigt dies geringe Größenabweichung*

# Vincinale (verkippte) Substrate

d) Epitaxie auf Substraten mit Monolagen - Stufen (vicinal)

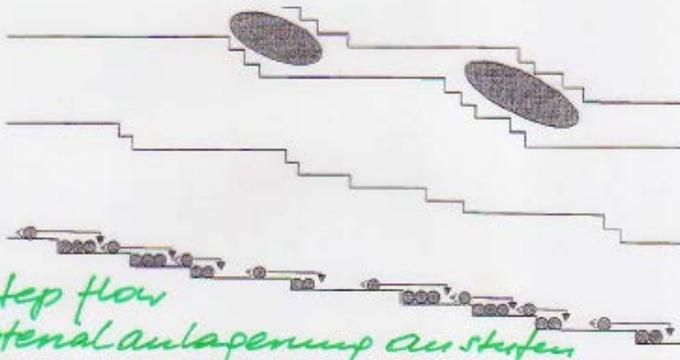


Fig. 2. Schematic illustration of step bunching using a one-dimensional step-flow model. The preferential incorporation of adatoms at step-down sites leads to an attractive interaction of step edges. In the upper part the formation of QWR on the multiaatomic step array is indicated.

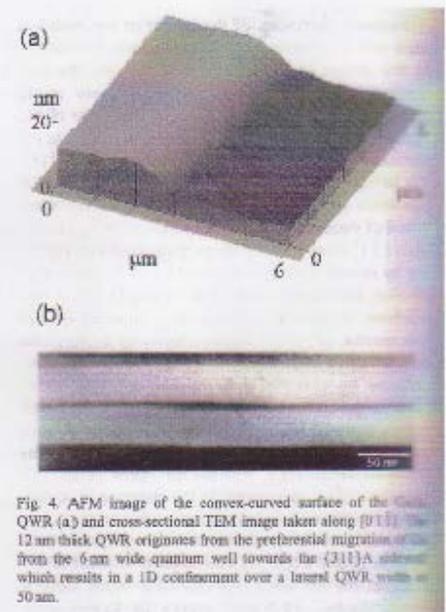
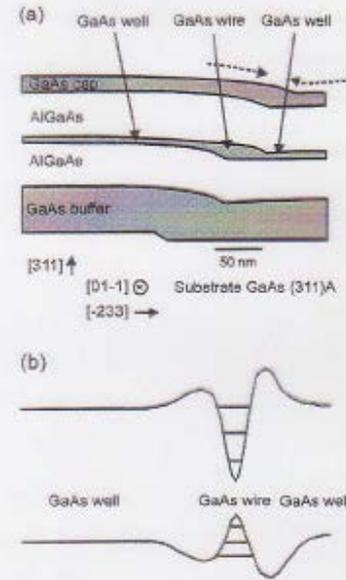


Fig. 4. AFM image of the convex-curved surface of the GaAs QWR (a) and cross-sectional TEM image taken along [01-1]. The 12 nm thick QWR originates from the preferential migration of Ga from the 6 nm wide quantum well towards the {311}A surface, which results in a 1D confinement over a lateral QWR width of 50 nm.

# Vincinale (verkippte) Substrate

gestufte Substrate (verkippt poliert)  
step flow

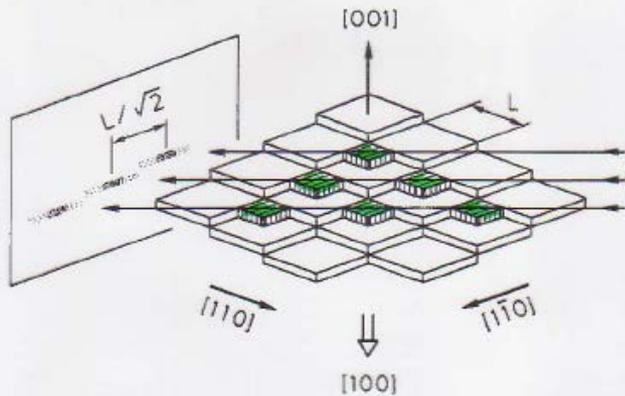
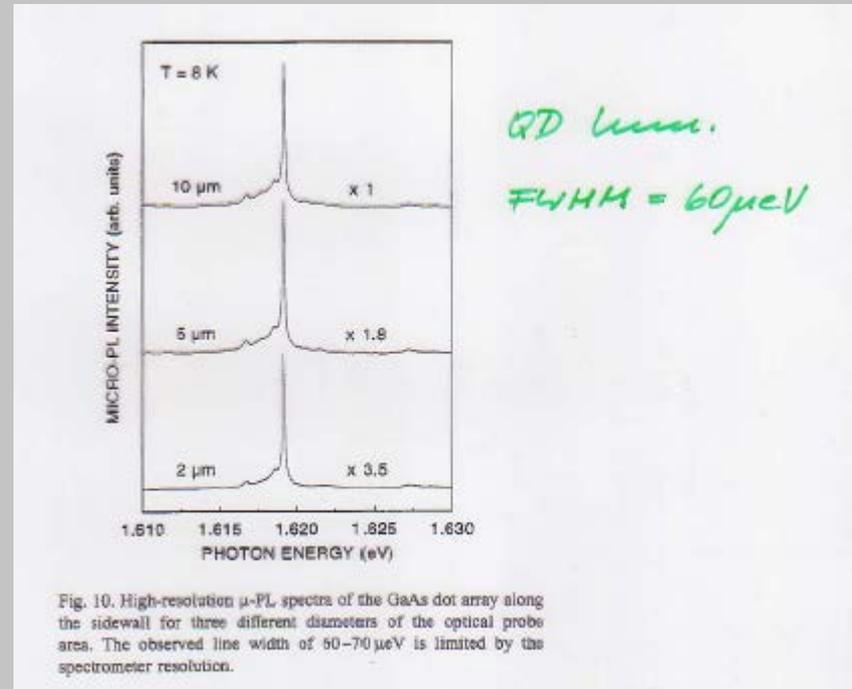
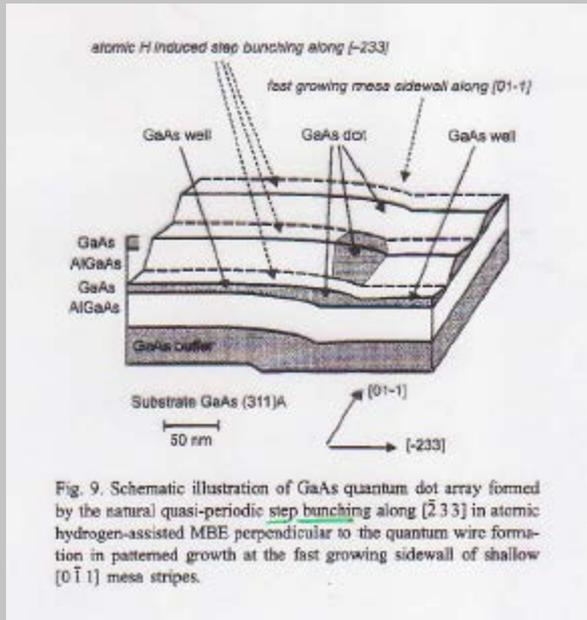


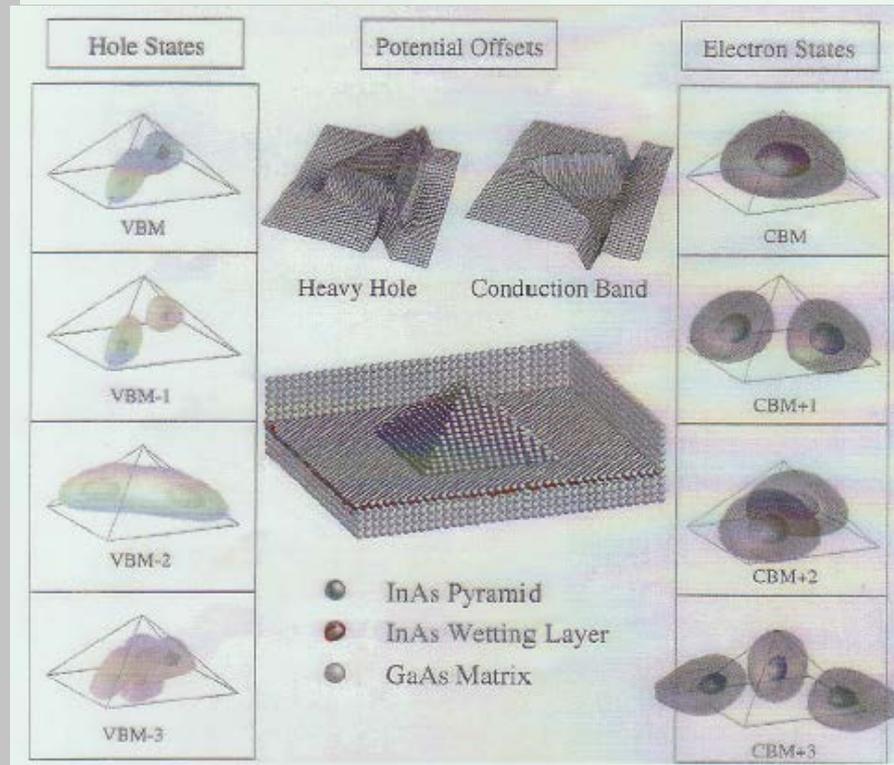
Figure 3.11 High-resolution lattice image of sample 6, consisting of ten InAs submonolayers (0.3 ML) mutually separated by 97 ML GaAs on vicinal (001)GaAs

# Vincinale (verkippte) Substrate



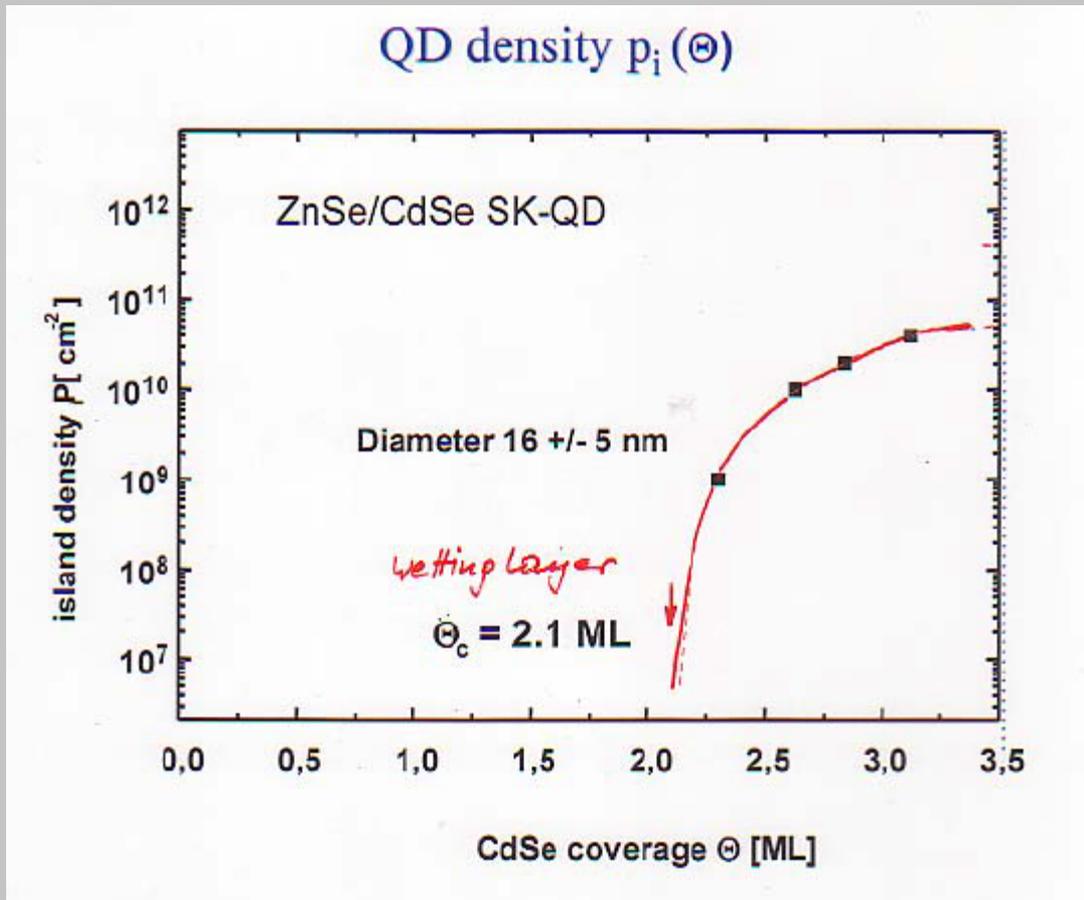
# Quantum Punkte

*e) Selbstorganisierte Bildung von QD auf verspannten Schichten*



*⇒ Bildung der Pyramiden gibt Verkleinerung der Oberflächenenergie  
Stransky-Krastanow Prozess*

# Stranski-Krastanov Quantum Punkte



phase transition:

$$P_i = P_0 (\Theta - \Theta_c)^\alpha$$

$$\alpha(\text{CdSe}) = 2.0$$

$$\alpha(\text{InAs}) = 1.8$$

# InAs/GaAs QDs

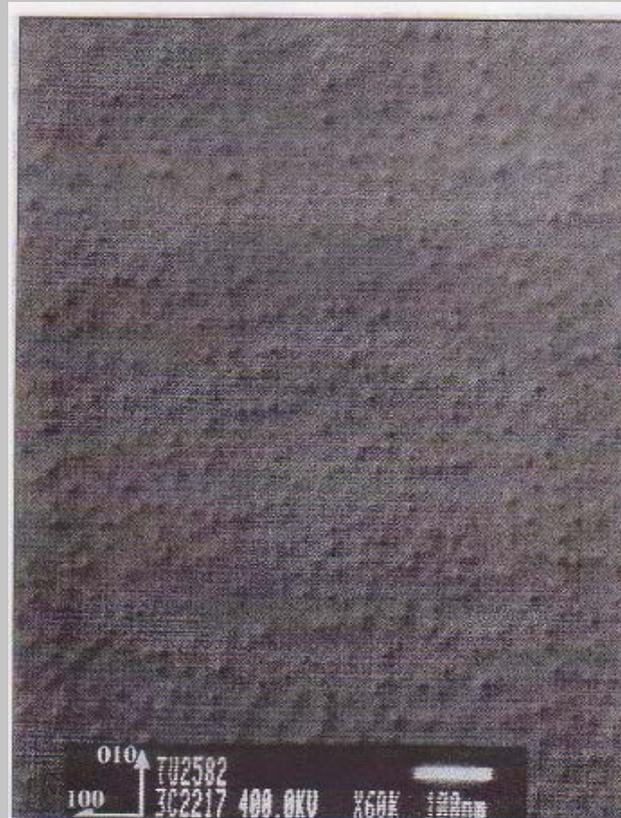
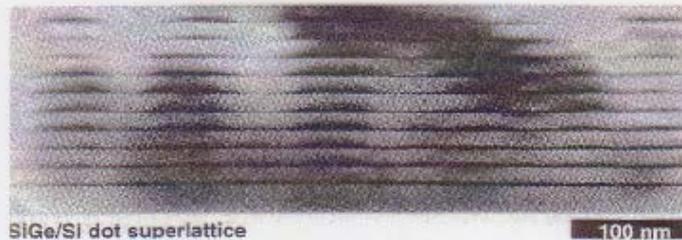


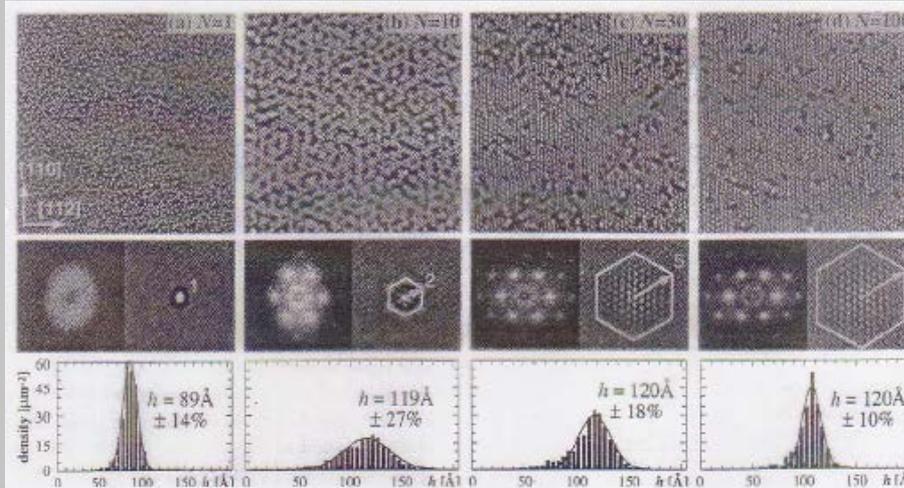
Figure 1. Plan-view transmission-electron-microscopy (TEM) image of a single sheet of metalorganic-chemical-vapor-deposition (MOCVD)-grown InAs/GaAs quantum dots (QDs) (Technische Universität Berlin). TEM: Max-Planck-Institut in Halle.

# SiGe/Si dot superlattice

geordnetes Vordatum von S-K. QD  
Die Anordnung der Dots wird durch  
Spannungsverteilung in den



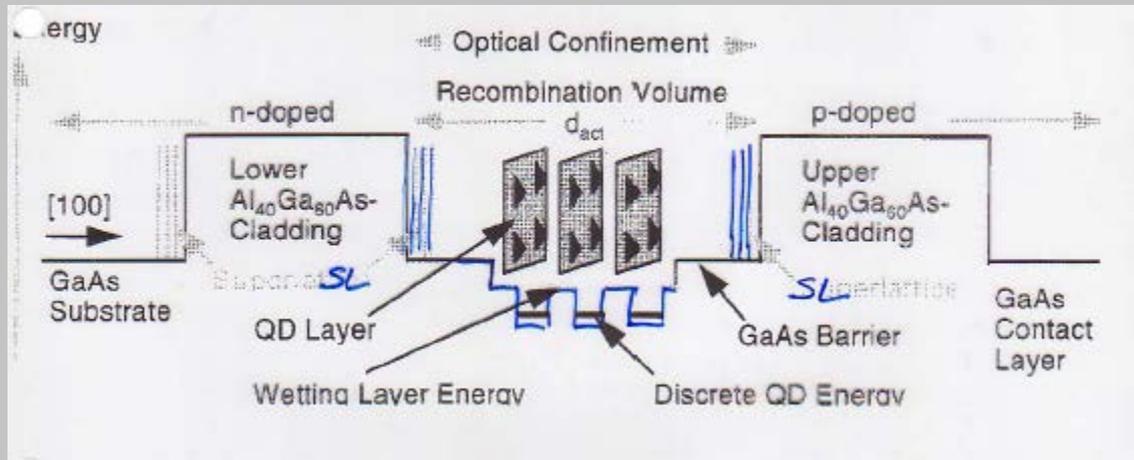
Schichten beeinflusst



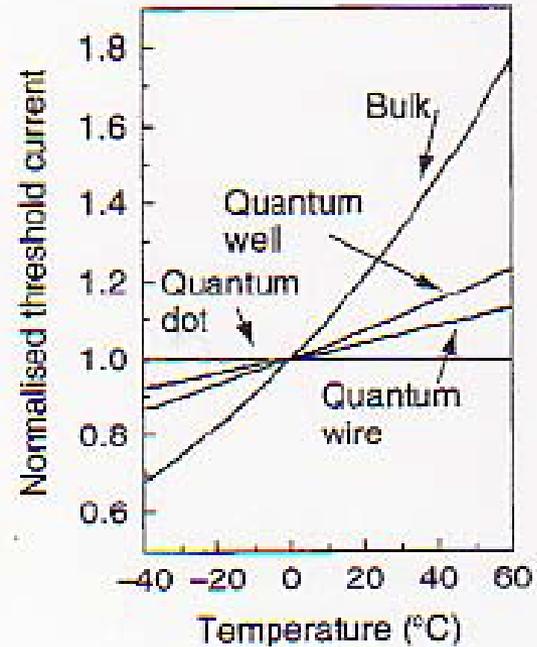
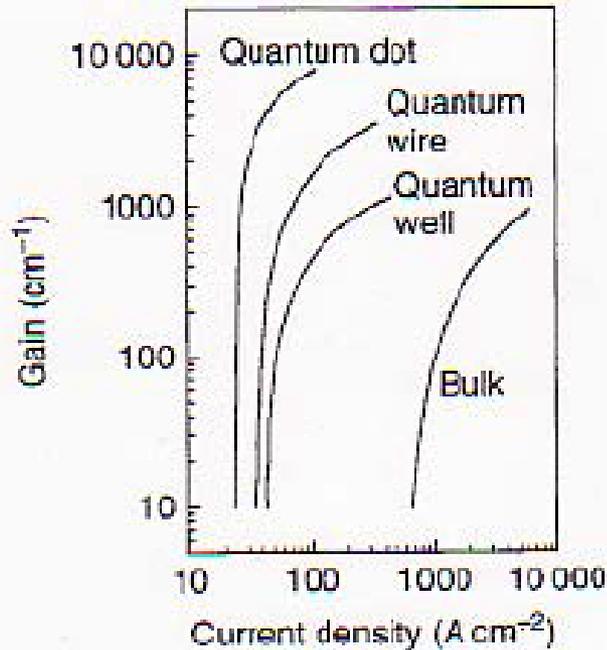
"Kristalle" aus QDs

# QD Laserstruktur

QD-laserstruktur

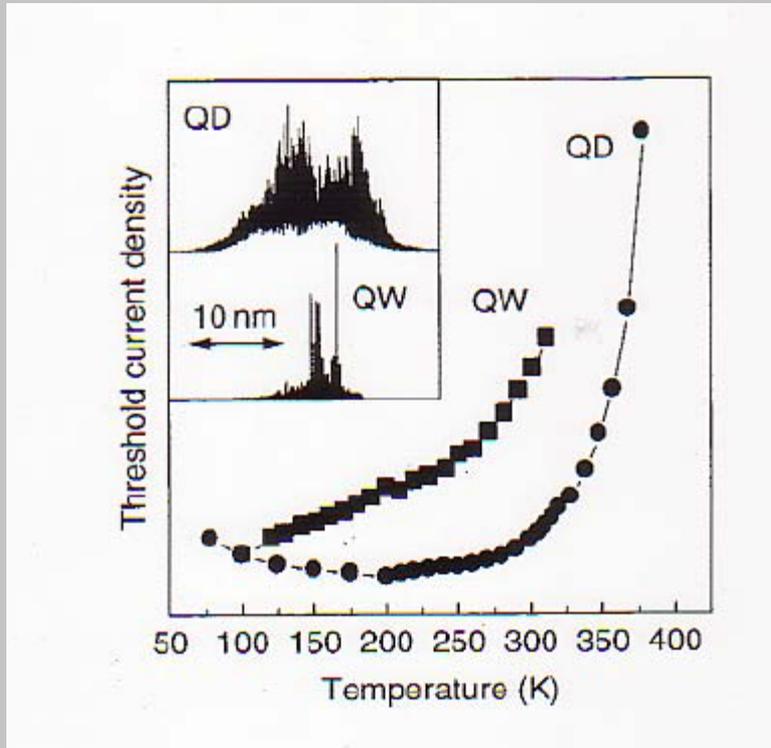


# Schwellstromdichte bei Lasern



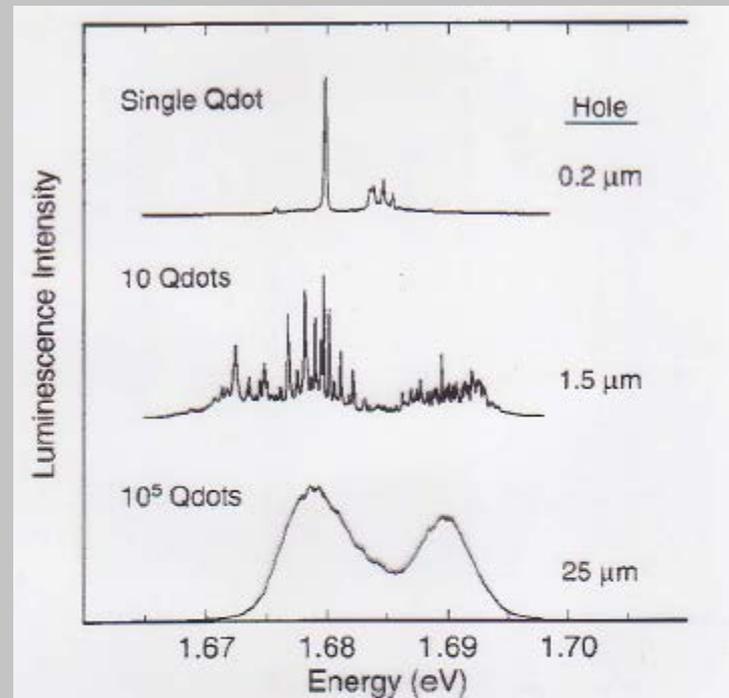
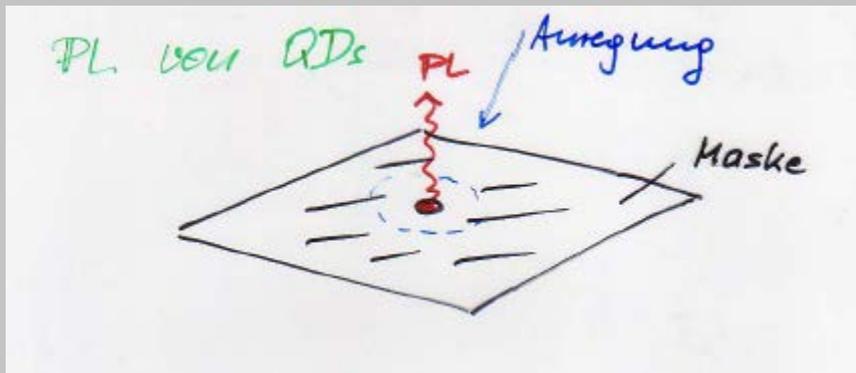
*Berechneter Gain und Schwellstromdichte  
 von verschiedenen Laserdioden*

# Temperaturabhängigkeit von QW und QD Lasern



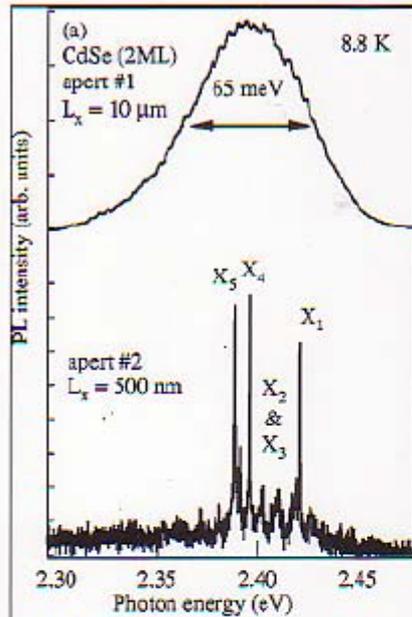
Schwellstromdichte vs. Temperatur  
eines QW-Lasers und eines  
QD Lasers mit SK-QD's  
Insert: Emissionsspektren

# PL von QDs



*Figure 1. Photoluminescence (PL) spectra excited and detected through apertures in an aluminum mask with diameters ranging from 25  $\mu\text{m}$  to 0.2  $\mu\text{m}$ . In this way, the emission from individual quantum dots (QDs) is resolved. (From Reference 10.)*

# PL von CdSe QDs



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

$\phi 500 \text{ nm}$

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

