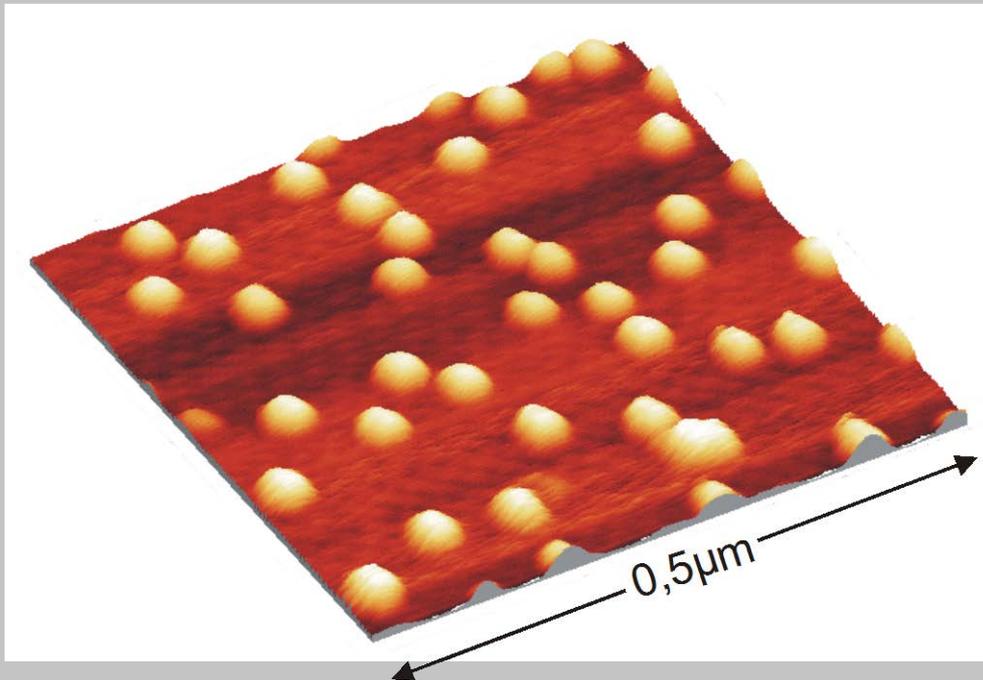


# CV-Spektroskopie

## Kapazitäts-Spannungs-Spektroskopie an Quantenpunkten

# Selbstorganisierte InAs - Quantumpunkte



Höhe: 6-7 nm, Durchmesser ~35 nm

Dichte:  $10^8 - 10^{11} \text{ cm}^{-2}$

-> 1.7 ML InAs auf GaAs(100)  
⇔ Inselbildung  
(Stranski-Krastanov)

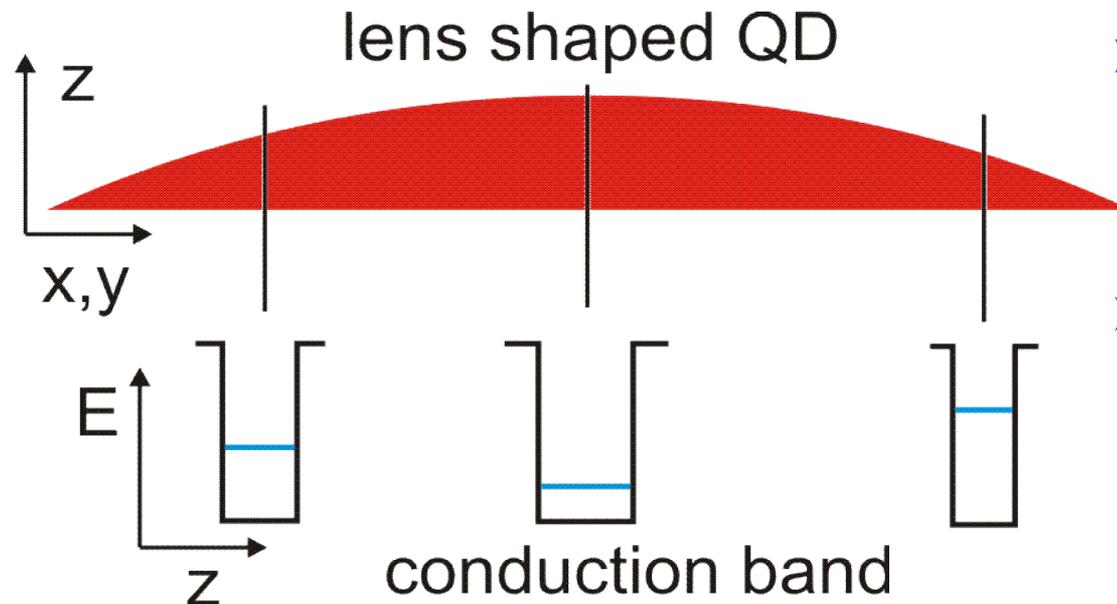
-0D-system nach Überwachsen mit GaAs (InAs-Bereich eingebettet in GaAs)



-diskrete Energieniveaus  
(„künstliche Atome“)

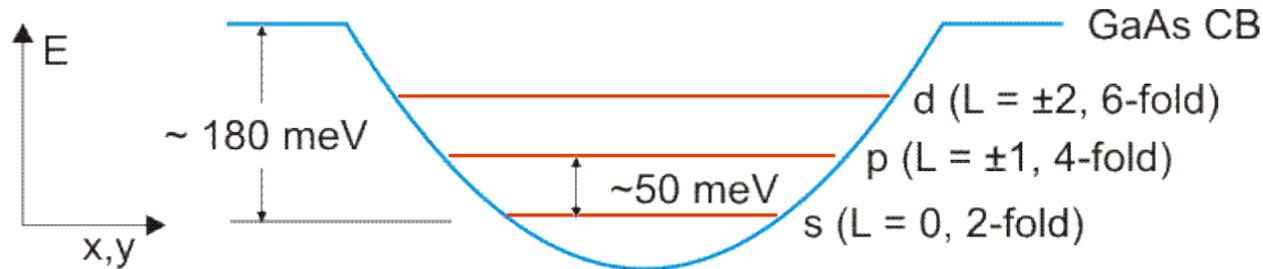
# Adiabatische Näherung

Einschluss in Wachstumsrichtung deutlich stärker  
 => adiabatische Näherung:  $X(x,y,z) = \phi(x,y)\zeta(z)$



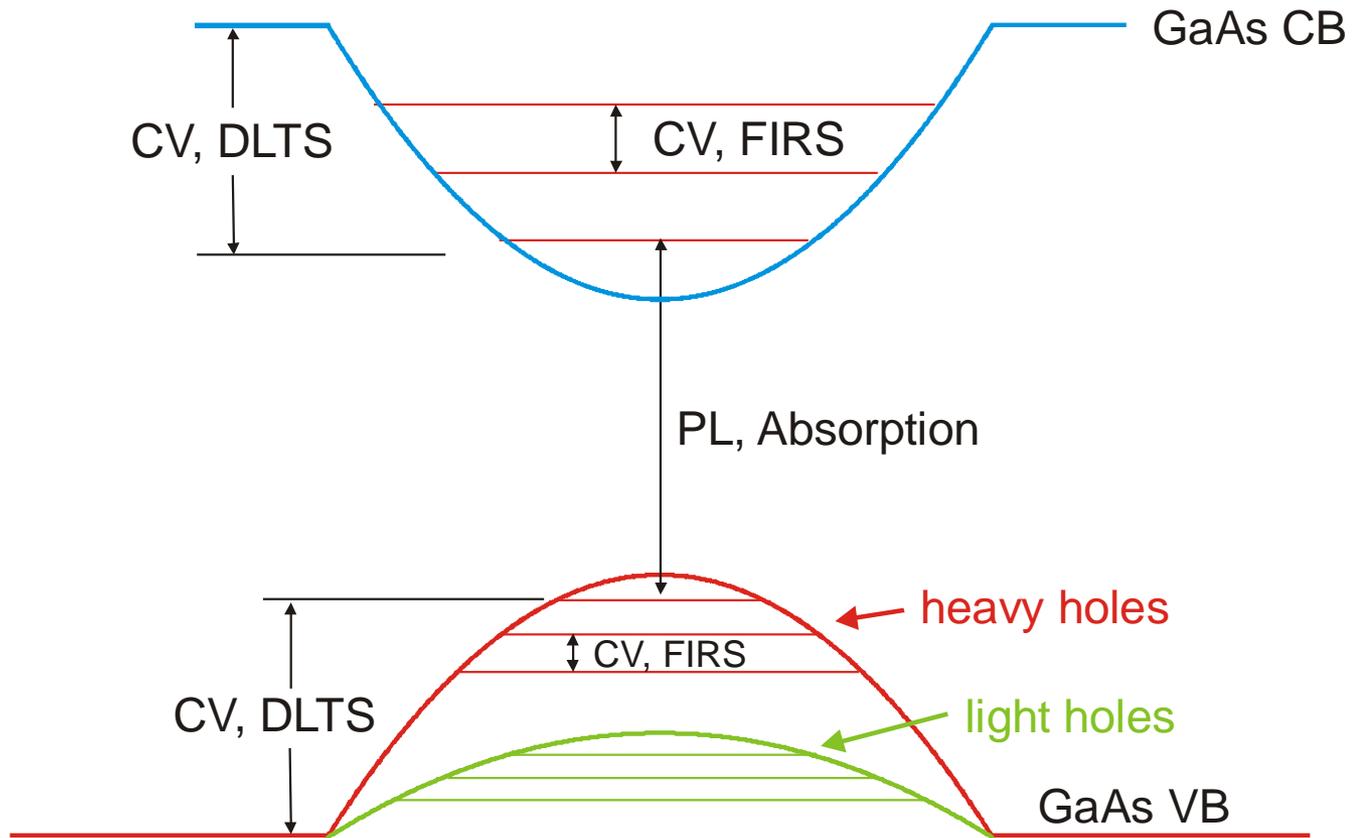
- Variation der QW Grundzustandsenergie bestimmt das laterale Einschlusspotenzial
- Laterales Potenzial kann durch 2dim harmonischen Oszillator genähert werden (Form und Zusammensetzung)

# Harmonische Potentialnäherung und effektive Massennäherung



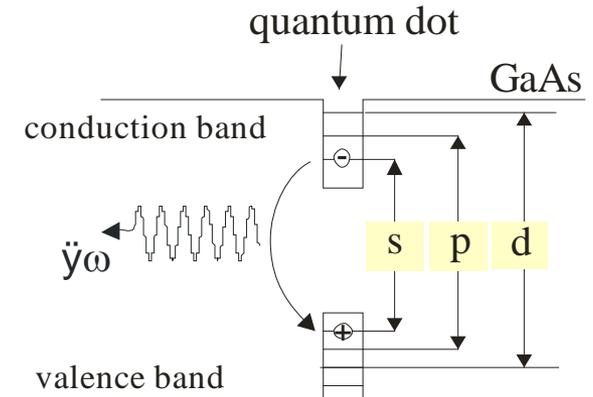
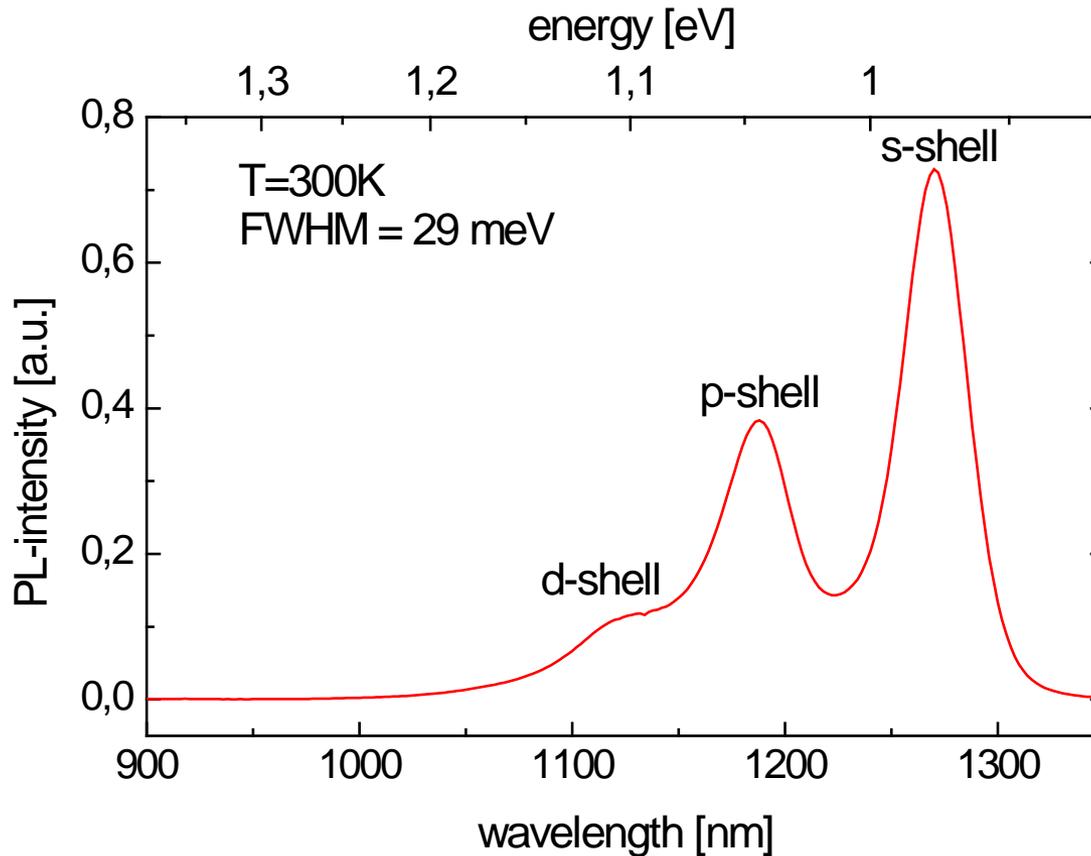
- Äquidistante Energiezustände
- Analytische Ausdrücke für die Wellenfunktionen
- Ladungsträgerwechselwirkungen über Störungstheorie
- Asymmetrien durch Form oder Kristallstruktur heben Entartungen auf
- Energiewerte hängen von der Form und Zusammensetzung des Quantenpunktes ab!

## Energieniveaus in Leitungs- und Valenzband



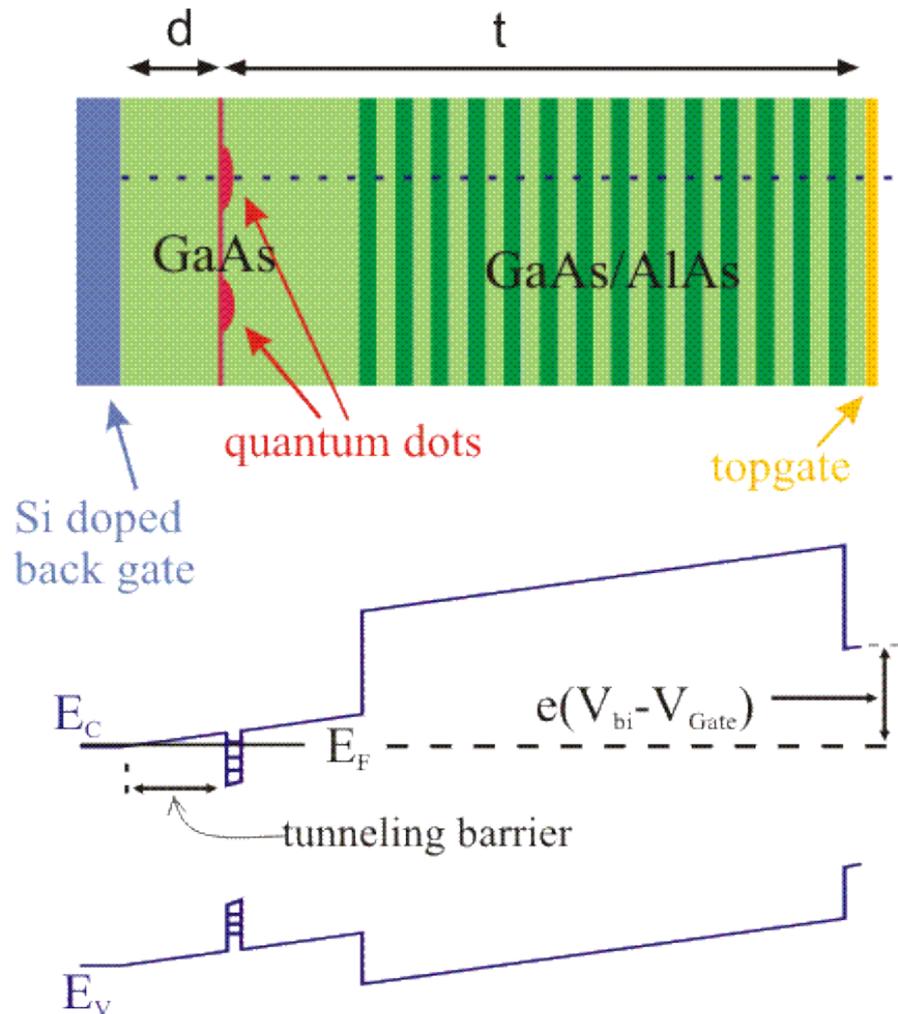
Eigenschaften hängen von der Form und Zusammensetzung ab!!

# Photolumineszenz-Spektroskopie



- Äquidistante Abstände zwischen den Peaks
- Peaks inhomogen verbreitert

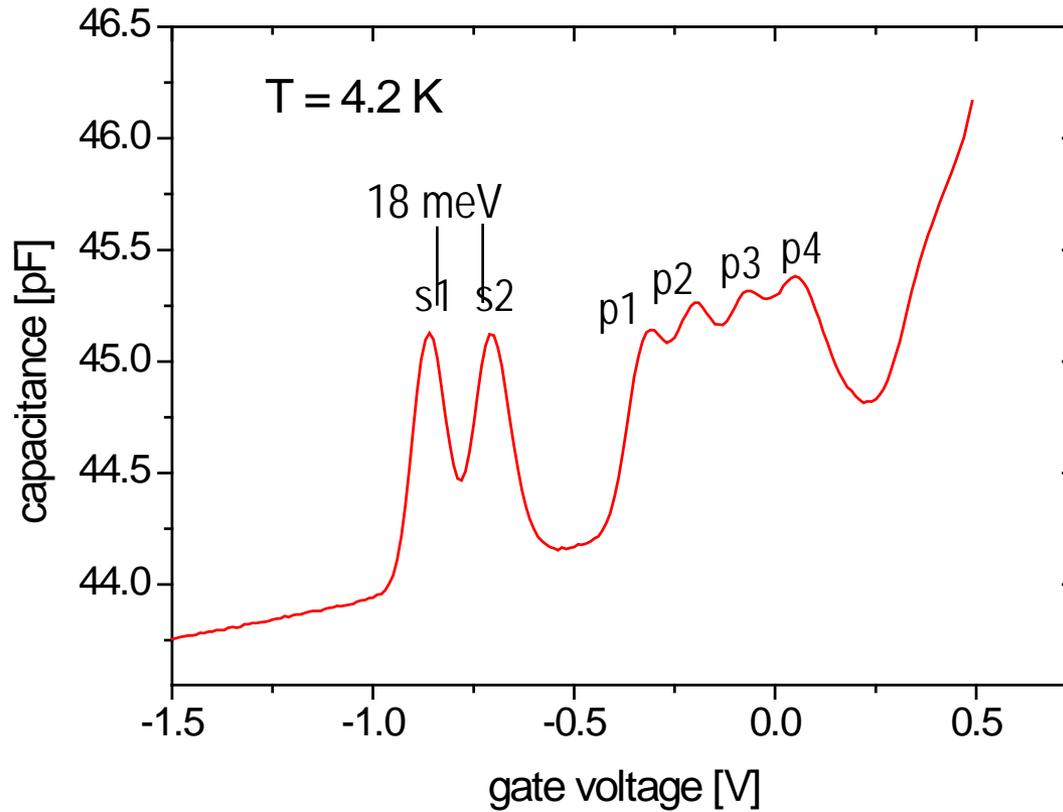
# CV-Spektroskopie



- QDs werden schrittweise durch Anlegen einer DC-Spannung  $V_G$  geladen
- $C$  als Funktion von  $V_G$  wird gemessen
- Resonanzbedingung erfüllt  
=>  
Maximum in  $C$  (Ladepik)
  - $d \sim 25-40$  nm for electrons
  - $d \sim 15-21$  nm for holes

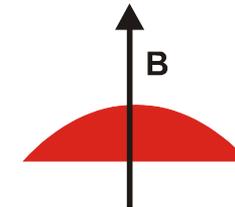
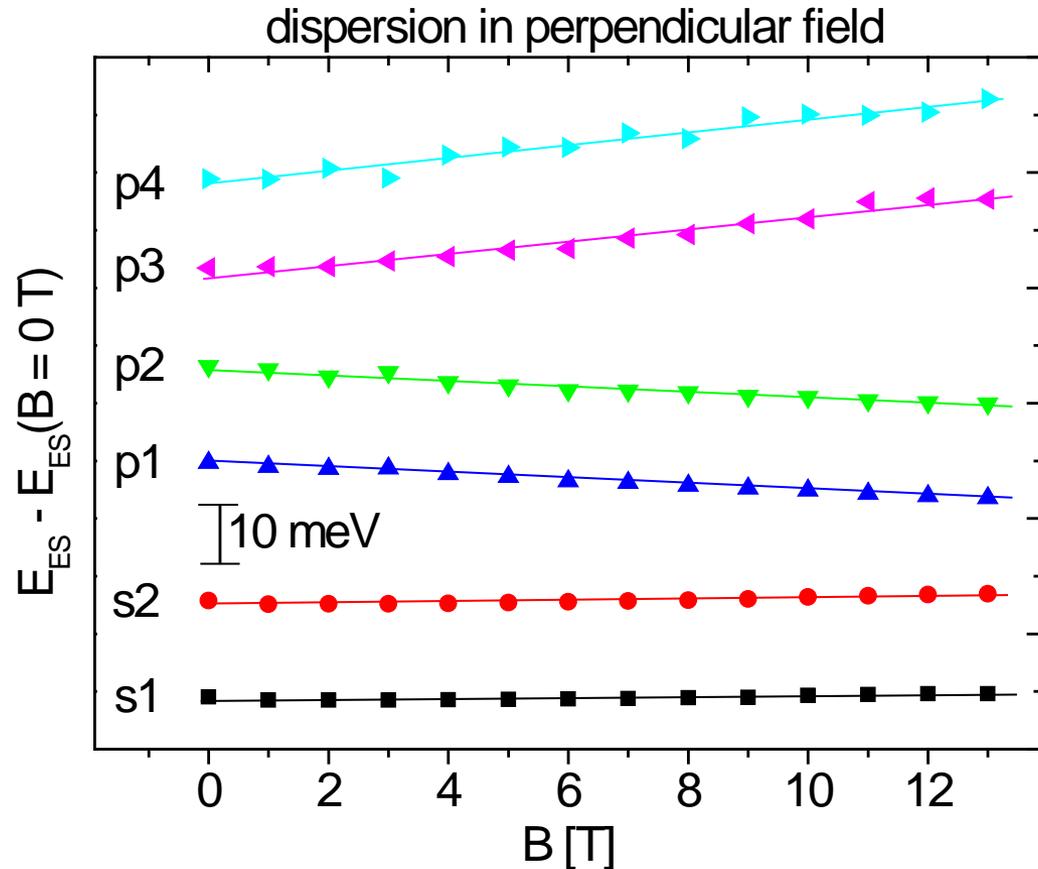
**CV-Spektroskopie misst das Ladespektrum und keine Einteilchenenergien!**

# CV-Spektroskopie



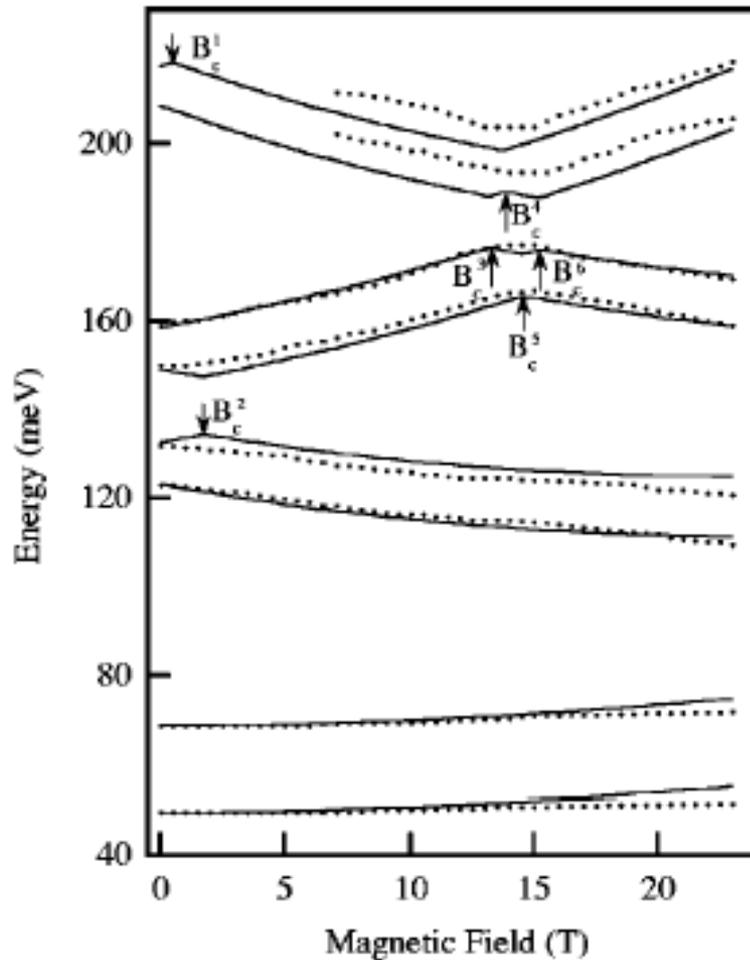
Schalenartige Energieniveaustuktur ("artificial atoms")

# Magneto-CV-Spektroskopie - Leitungsbandzustände



- Fock-Darwin beschreibt Dispersion
- s-artiger Grundzustand ohne orbitales Moment
- p-Schale wird nicht nach der Hundschen Regel gefüllt => elliptische Form des QDs hebt Entartung auf

# Magneto-CV-Spektroskopie - Leitungsbandzustände



- Kreuzen von p- und d-Schale
- Solche Manipulationsmöglichkeiten gibt es in "echten" Atomen nicht!

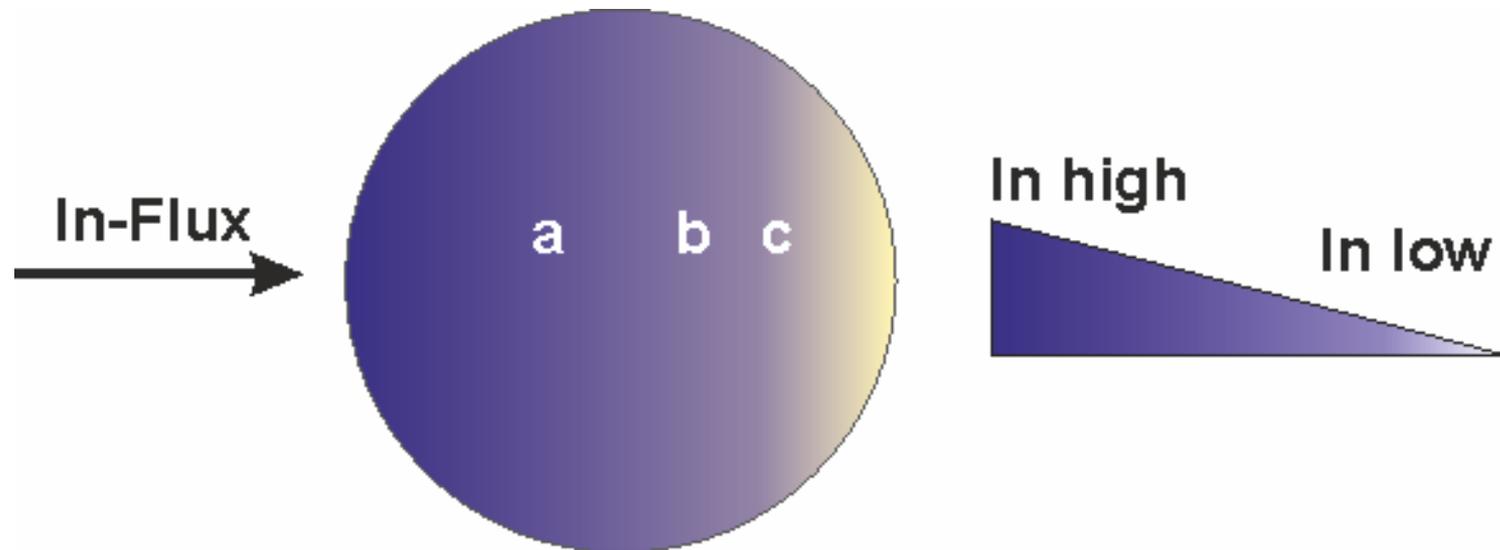
R. J. Warburton et al. , Phys. Rev. B 58, 16221 (1998)

# Quantenpunkt-Tuning

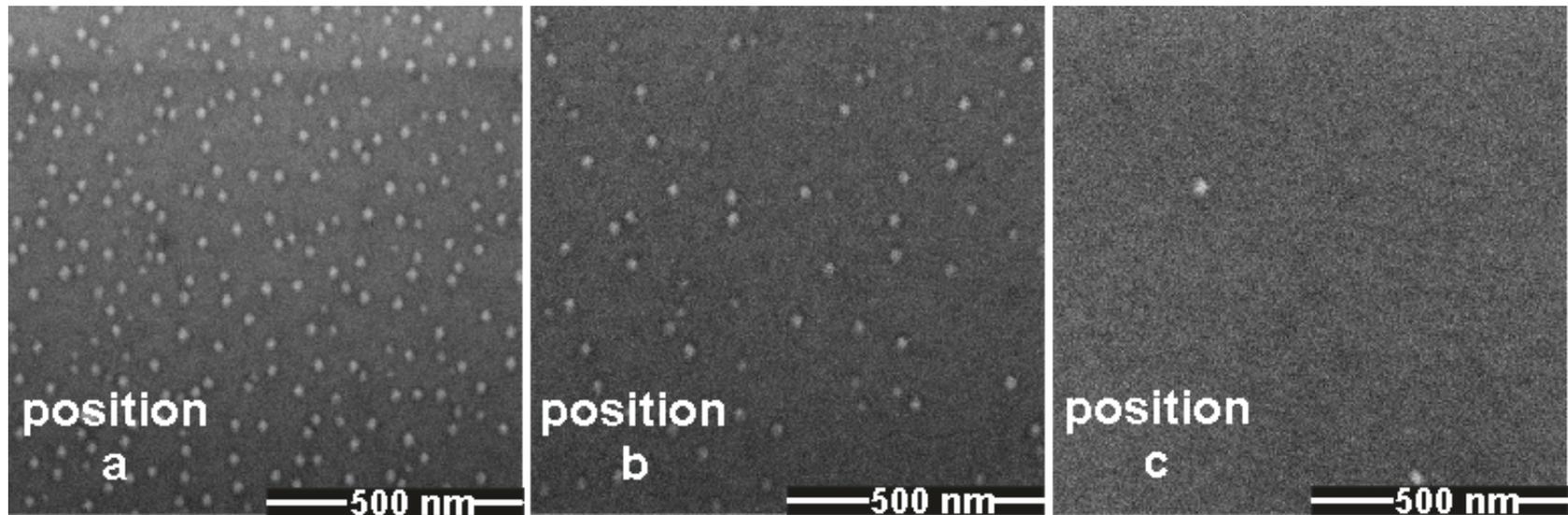
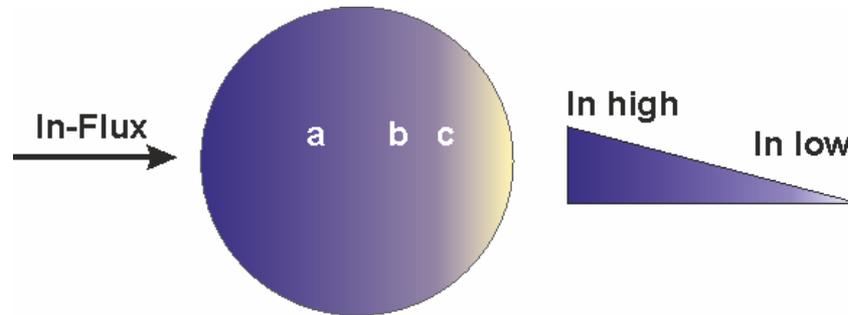
- Niedrige Dichte für Einzeldotspektroskopie
- Grundzustandsemission im geeigneten Spektralbereich für effektive Pumplaser und Detektoren ( $< 950$  nm)
- Ladezustand soll sich kontrolliert einstellen lassen
- .....

## Niedrige Quantenpunktdichten

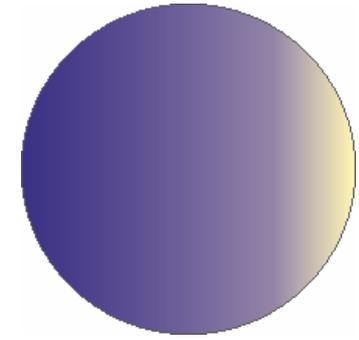
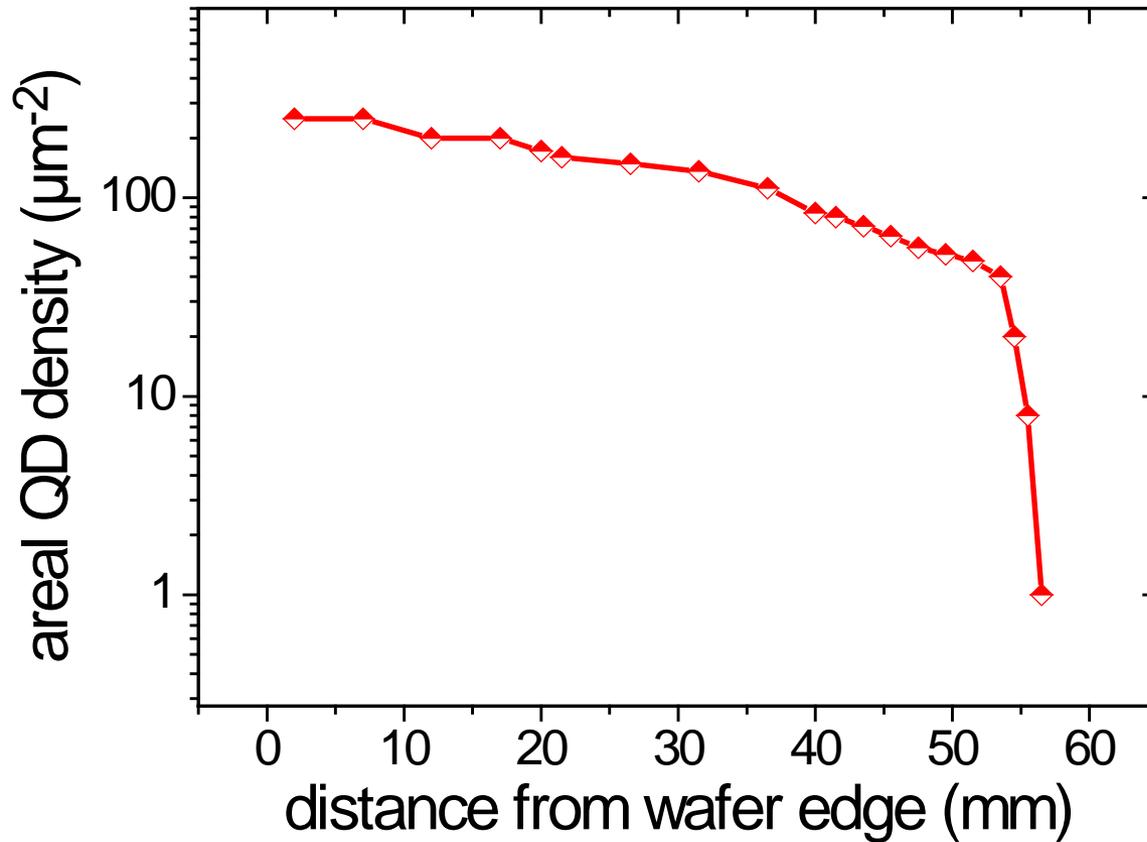
- $\sim 1 \text{ QD}/\mu\text{m}^2$  gewünscht
- So niedrige Dichten lassen sich nicht homogen über den ganzen Wafer herstellen
- In-Gradient über die Probe (10-25 % von Rand zu Rand))



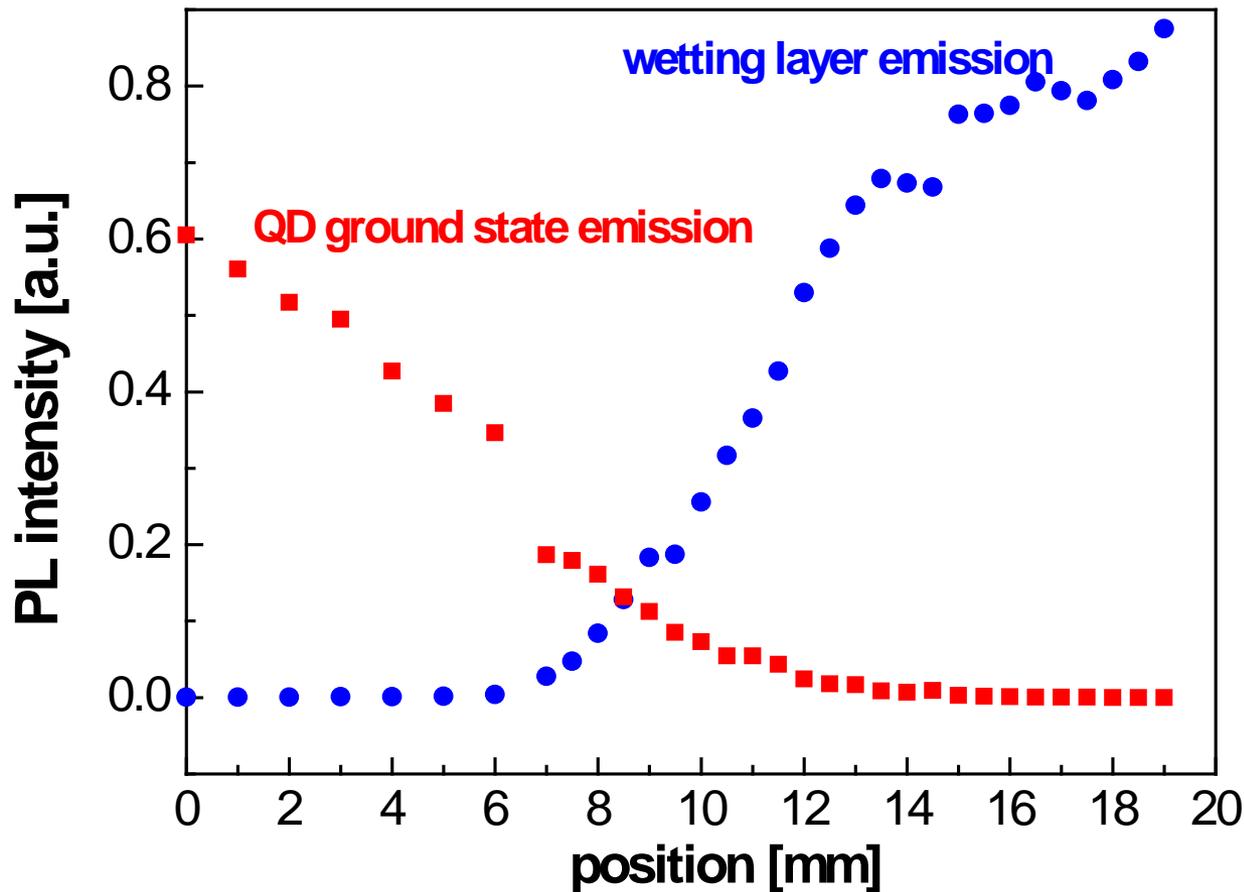
# Niedrige Quantenpunktdichten



## Niedrige Quantenpunktdichten



## Niedrige Quantenpunktdichten

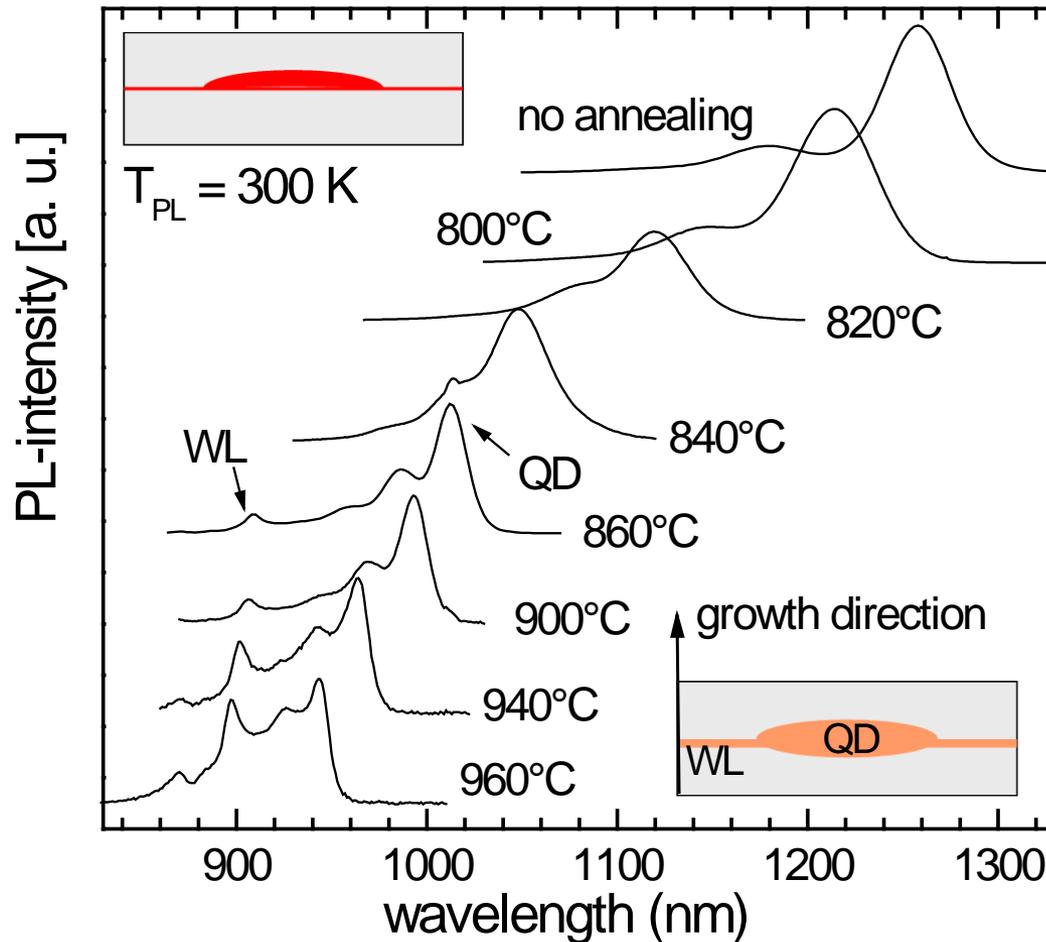


PL erlaubt eine Dichteabschätzung für vergrabene Quantenpunkte

# Grundzustandslumineszenz

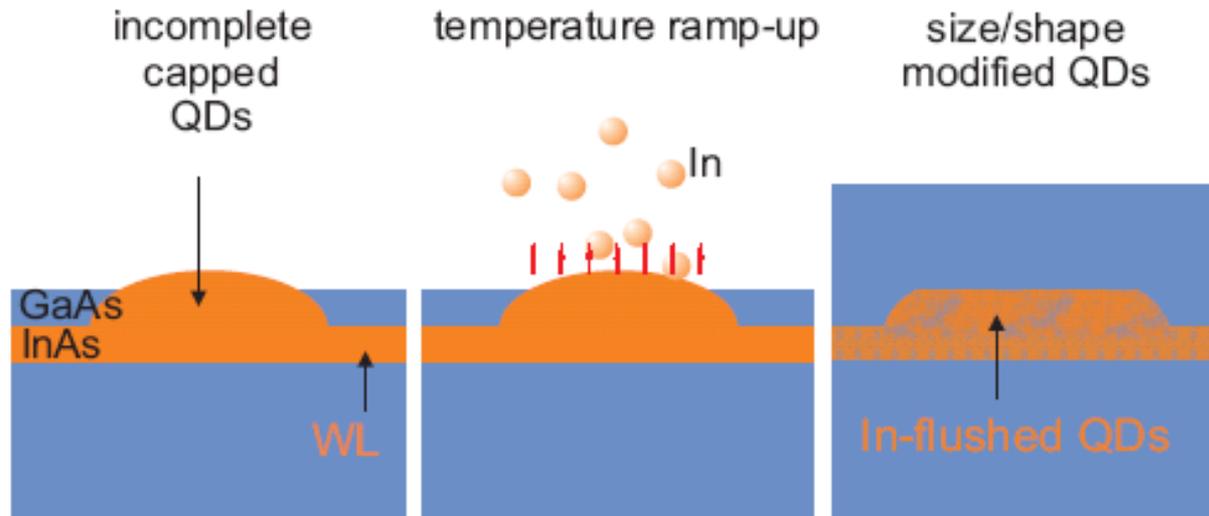
- kein (!) optisches C-Band, aber Si-CCD-Detektoren und Ti-Saphir Laser
- **post-growth tempern**
- Veränderung des Wachstums:  $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$  oder **In-Flush**

## Grundzustandslumineszenz bei < 950nm: post-growth Tempern



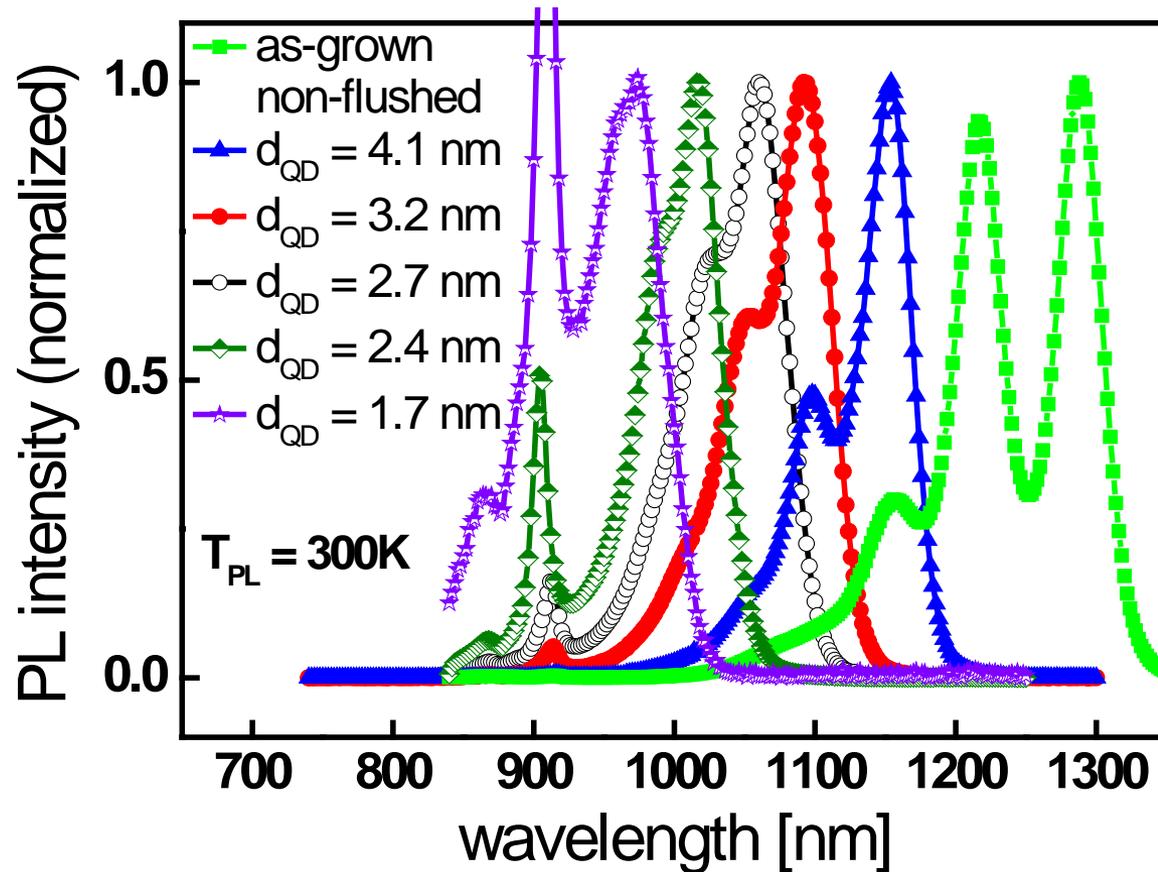
- Standard MBE-Wachstum von InAs-QDs
- Post-growth Tempern von kleinen Stücken
- Temperzeit 30 s

## Grundzustandslumineszenz bei $< 950$ nm: In-Flush



- In-Flush führt zur Blauverschiebung der Emission
- Kein post-growth Tempern erforderlich (thermal budget)

## Grundzustandslumineszenz bei $< 950$ nm: In-Flush

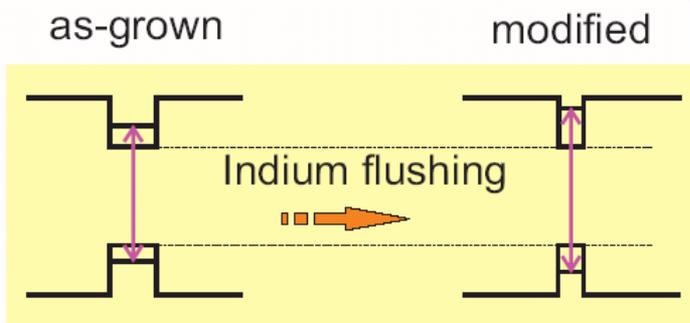


- Blauverschiebung bis 930 nm bei  $T = 4.2$  K
- FWHM bleibt konstant

## In-Flush vs. Post-growth Tempern

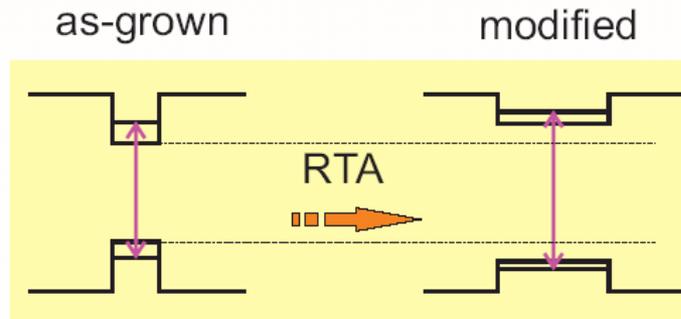
- In beiden Fällen Blauverschiebung der PL-Emission
- aber komplett unterschiedliche Form und Zusammensetzung

### Indium flushing



- increased confinement in growth direction

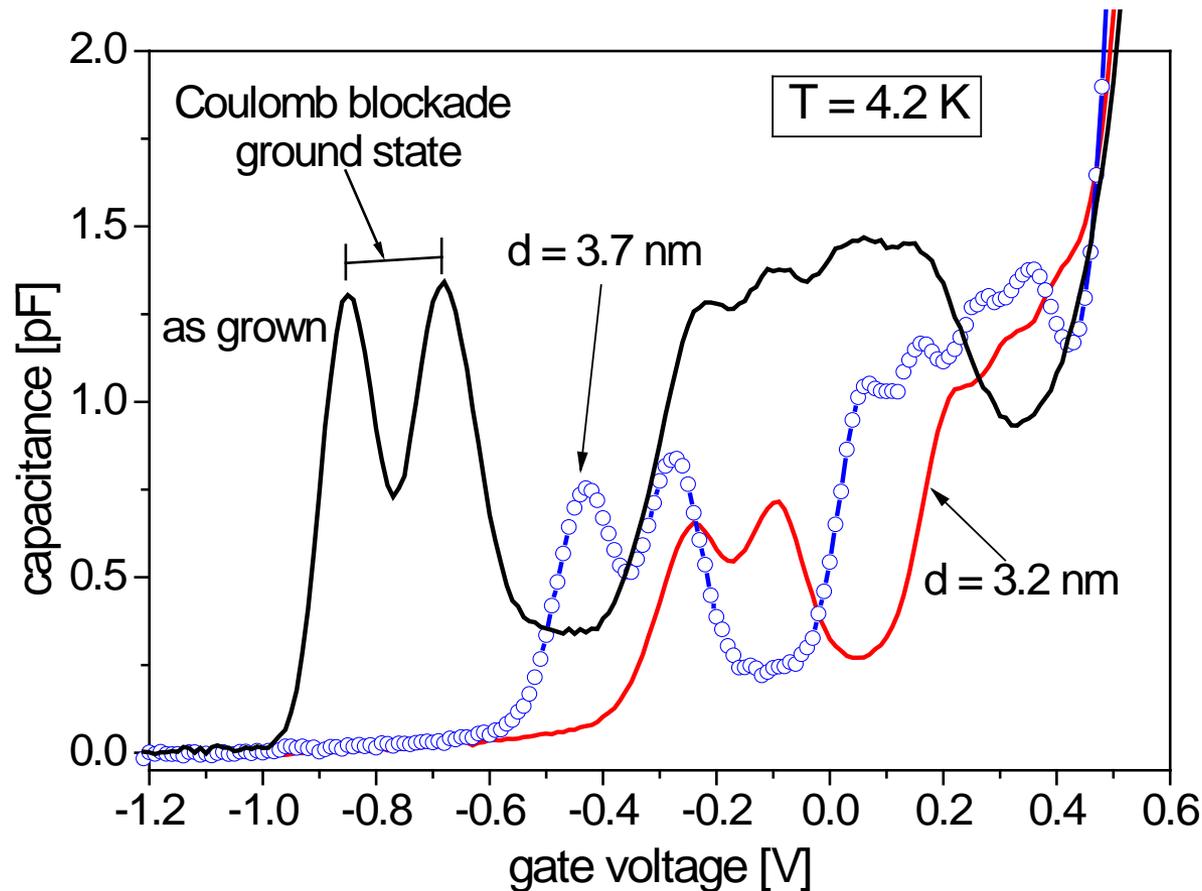
### Rapid Thermal Annealing



- decreased confinement in growth direction
- Ga rich QDs due to thermal diffusion

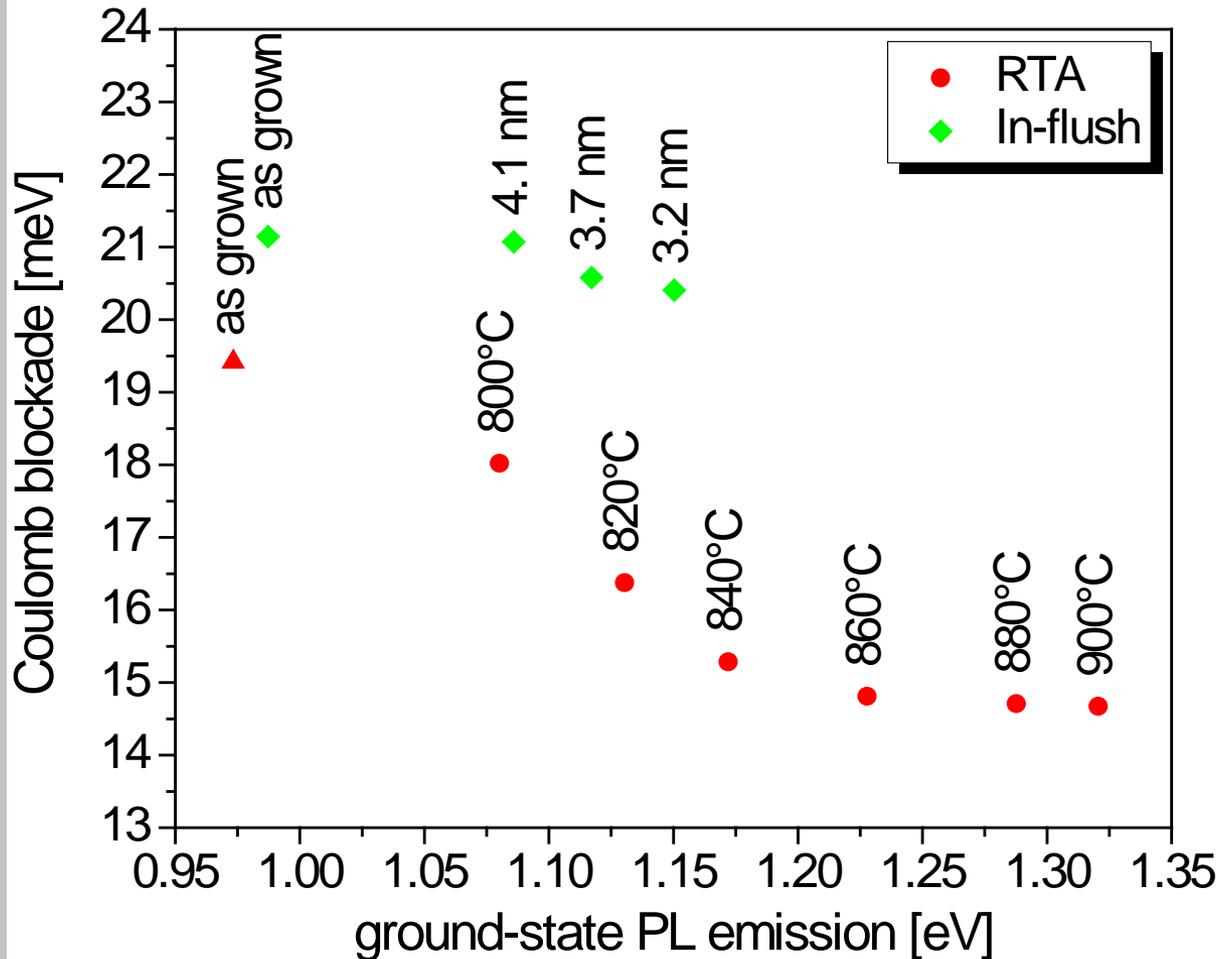
- Ladungsträgerwechselwirkung?

# In-Flush: CV-Spektroskopie



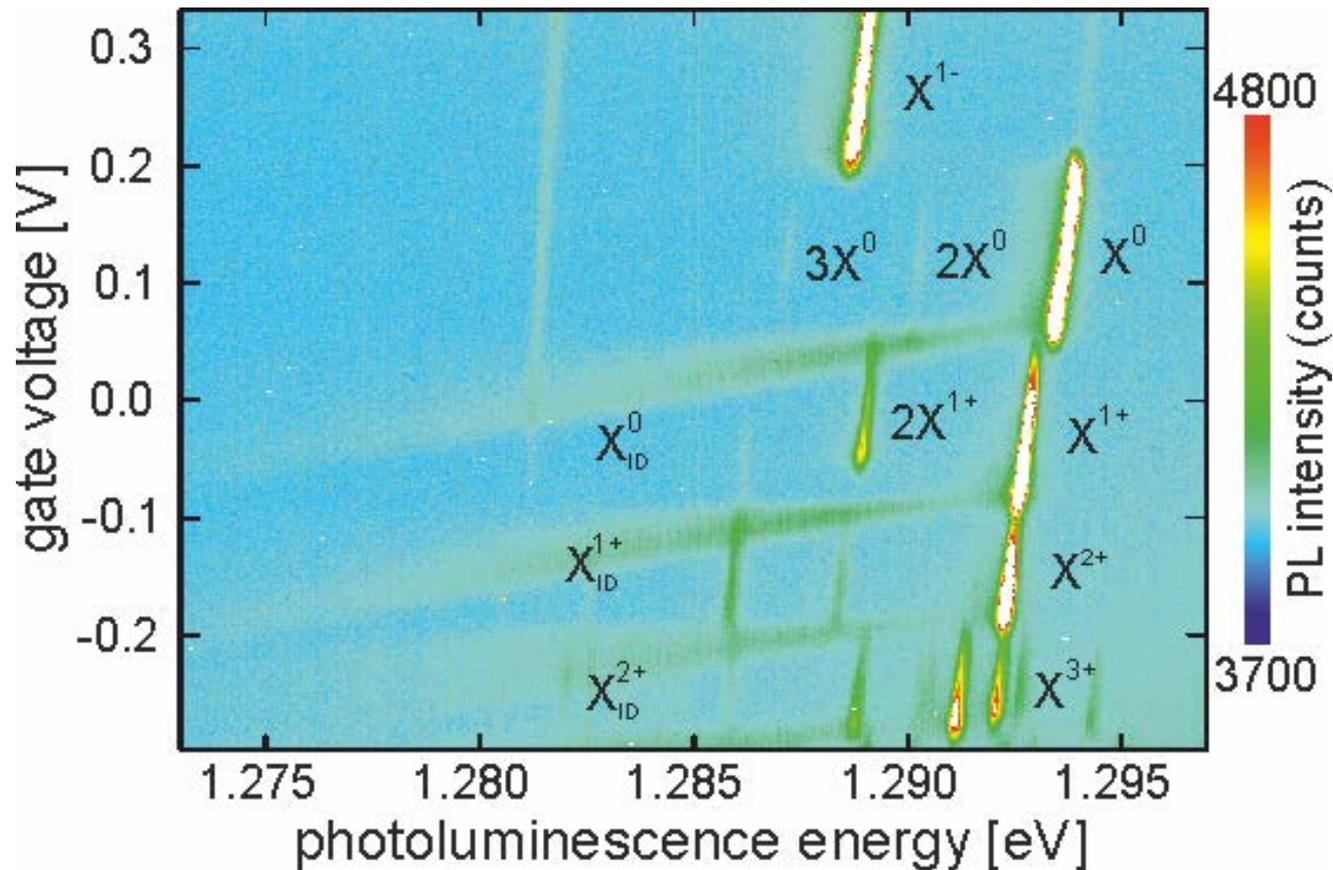
- Grundzustand nähert sich dem Leitungsband
- Es passen immer weniger Ladungsträger hinein
- Coulomb-Blockade im Grundzustand scheint sich nicht zu ändern

## In-flush vs. Post-growth Tempern



- Coulomb blockade nimmt stark ab für Blauverschiebung durch post-growth Tempern
- Coulomb blockade bleibt nahezu konstant für Blauverschiebung durch In-Flush
- Überlapp der Wellenfunktionen stärker für In-Flush samples

## Einstellung des Ladungszustandes



mit Artur Zrenner und Simon Gordon

## Zusammenfassung

- InAs Quantenpunkte lassen sich durch verspannungsinduziertes selbstorganisiertes Wachstum herstellen
- Atomar scharfe Energieniveaus und schalenartige Energiestruktur (“künstliche Atome”)
- 2-dim harmonisches Potenzial ist gute Näherung für den lateralen Einschluss
- C-V-Spektroskopie zeigt starke Ladungsträgerwechselwirkung
- Lumineszenzenergien und Ladungsträgerwechselwirkungen können durch Veränderung des Wachstumsprozesses oder post-growth Tempern eingestellt werden

# CV-Spektroskopie

