Kapazitätsspektroskopie an selbstorganisierten Quantenpunkten

A. Rack, R. Wetzler, A. Wacker, E. Schöll
Institut für Theoretische Physik, TU Berlin
C.M.A. Kapteyn, R.Heitz, D. Bimberg
Institut für Festkörperphysik, TU Berlin

- Motivation
- Experiment
- Theorie
- Numerisches Verfahren
- Ergebnisse
  - InAs Quantenpunkte
  - Ge Quantenpunkte
- Zusammenfassung

Motivation

Experiment:

CV-Kennlinie von Quantenpunkt-Bauelementen

Theorie:

CV-Kennlinie aus stationärer selbstkonsistenter Lösung der Poisson-Gleichung

Vergleich

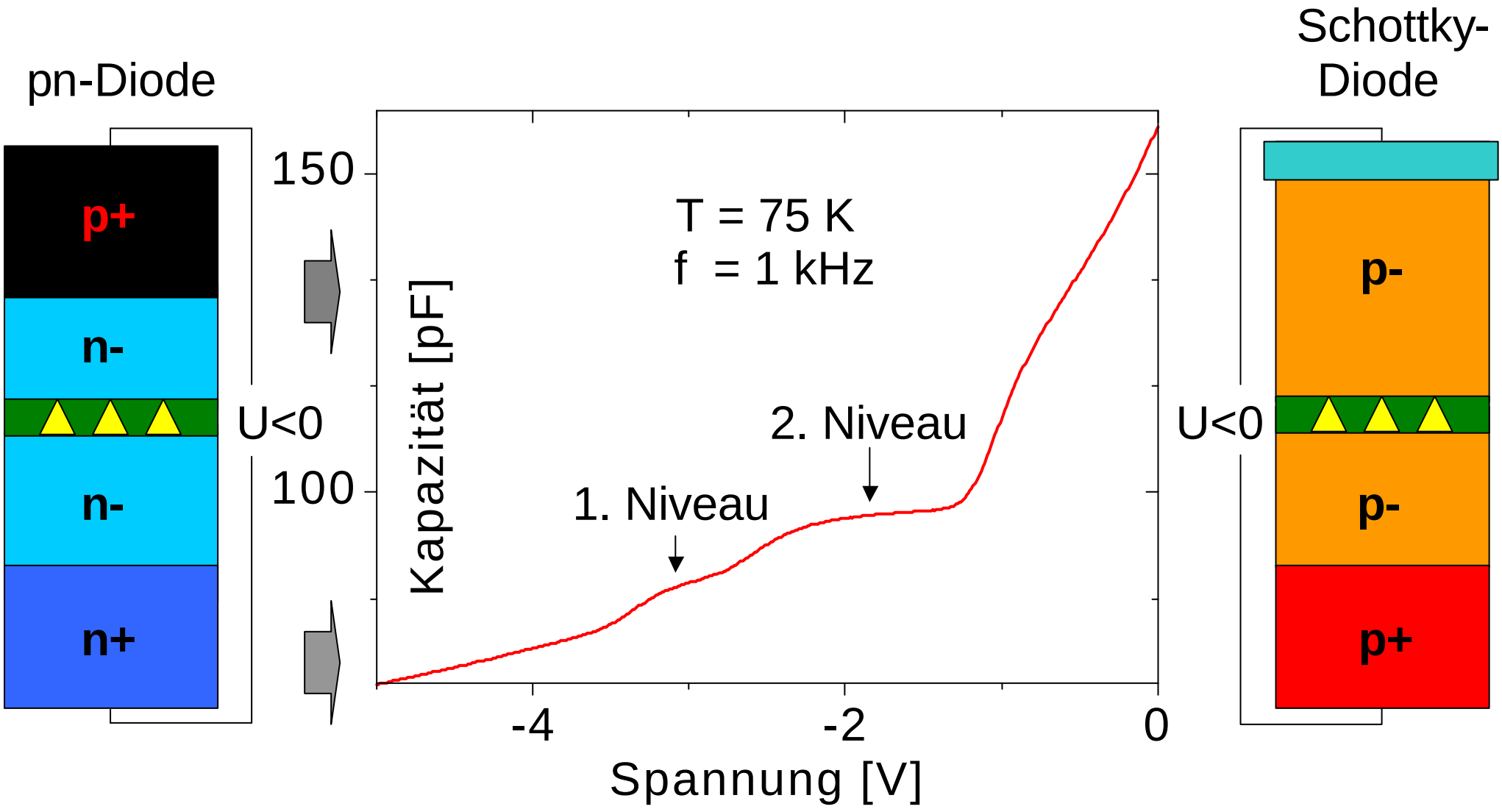
Energieniveaus

inhomogene Verbreiterung

Einfluß von Wachstumsparametern

Wechselwirkung Quantenpunkte mit Umgebung

Experiment



Wetzler, Kapteyn et al., APL 2000

Theorie

Poisson-Gleichung

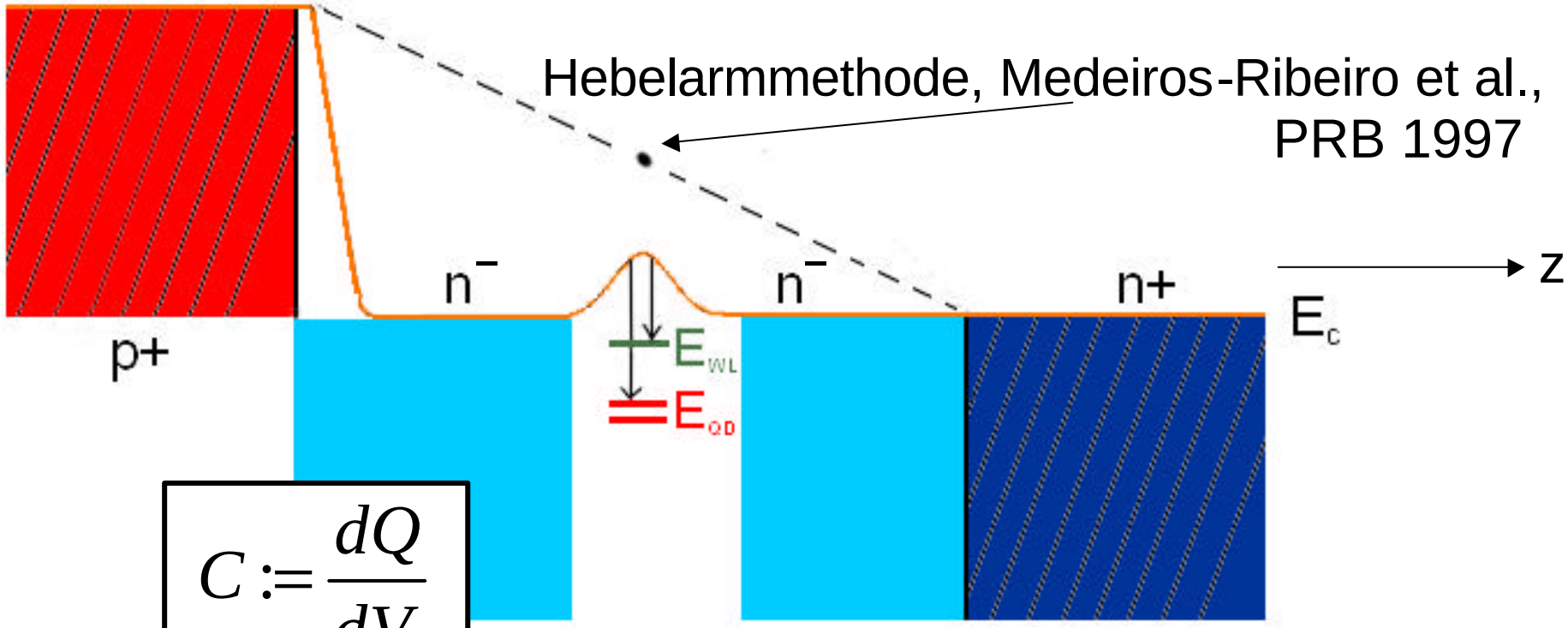
$$e_0 \cdot e \cdot \partial_z^2 \Phi(z) = -r(z)$$

Stromgleichungen

$$\partial_z j_{n,p}(z) = 0$$

$$r(z) = e \cdot \left[p^{3d} - n^{3d} + N_D^+ - N_A^- + p^{QD} - n^{QD} + p^{WL} - n^{WL} \right]$$

Hebelarmmethode, Medeiros-Ribeiro et al., PRB 1997



$$C := \frac{dQ}{dV}$$

Theorie

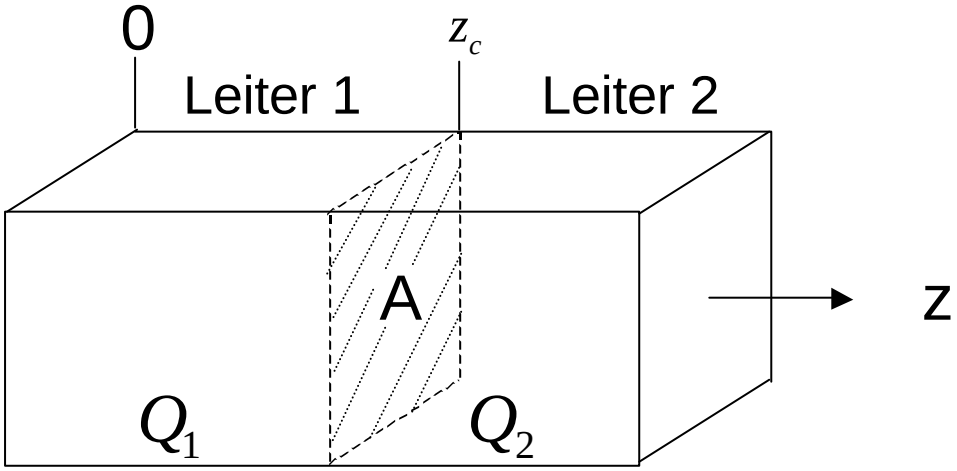
Gauß'scher Satz:

$$\frac{1}{e \cdot e_0} \cdot Q = \int_V divE \quad d^3r$$

$$= A \cdot \int_0^{z_c} \partial_z E \quad dz$$

$$= A \cdot (E|_{z_c} - E|_0)$$

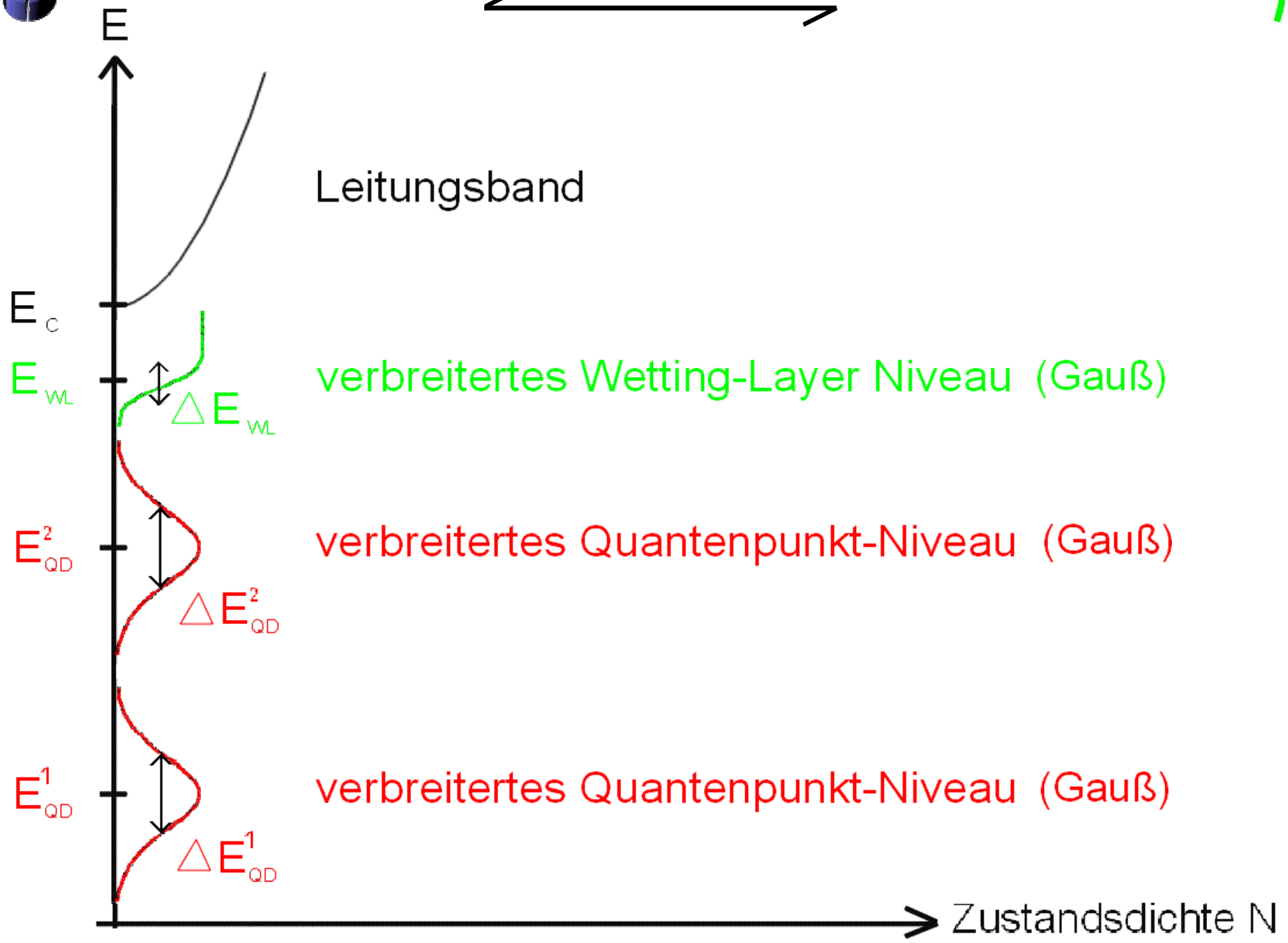
$$= A \cdot |\partial_z \Phi|_{z_c}$$



$$|Q_1| = |Q_2| = Q$$

$$\Leftrightarrow \boxed{Q = e \cdot e_0 \cdot A \cdot |\partial_z \Phi|_{z_c}} \quad \Rightarrow \quad C = \frac{dQ}{dV}$$

Theorie


E
Leitungsband
E_C
E_{WL}
ΔE_{WL}
verbreitertes Wetting-Layer Niveau (Gauß)
E^2_{QD}
ΔE^2_{QD}
verbreitertes Quantenpunkt-Niveau (Gauß)
E^1_{QD}
ΔE^1_{QD}
verbreitertes Quantenpunkt-Niveau (Gauß)
Zustandsdichte N

Theorie

verbreiterte Quantenpunkt-Niveaus (Gauß)

$$n^{QD} = \frac{N_{QD}}{d_{QD}} \cdot \sum_j \frac{a_j}{s_j \sqrt{2\Pi}} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{(E - \overline{E}_C + E_j)^2}{2 s_j^2} \right) \cdot f\left(E - \overline{E}_{Fn}\right) dE$$

verbreitertes Wetting-Layer Niveau (Gauß)

$$n^{WL} = N_c^{2d} \cdot \frac{1}{d_{QD}} \cdot \frac{1}{s\sqrt{2\Pi}} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} F_0\left(\frac{E_{Fn} - E_{WL}}{k_b T} \right) \cdot \exp\left(-\frac{(E - \overline{E}_C + E_{WL})^2}{2 s^2} \right) dE$$

Numerisches Verfahren

Struktur des Bauteils

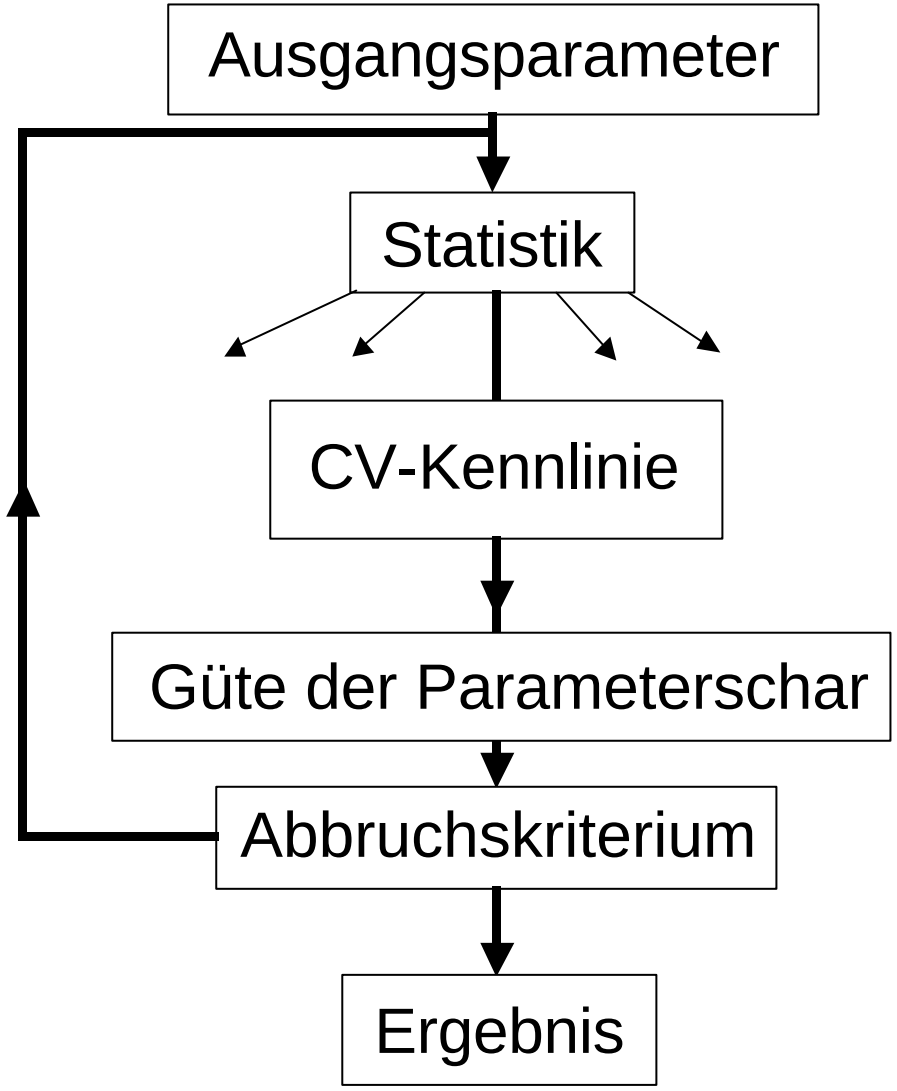
- Schichtdicken
- Dotierungsdichten der Kontakte

Parameter

- $E_{QD}^{1..N}$, $\Delta E_{QD}^{1..N}$
- E_{WL}, ΔE_{WL}
- Dotierungsdichten
- verschiedene Wachstumseinflüsse
- Quantenpunktdichte

Numerisches Verfahren

Evolutions-algorithmus*



0. Generation

Mutation

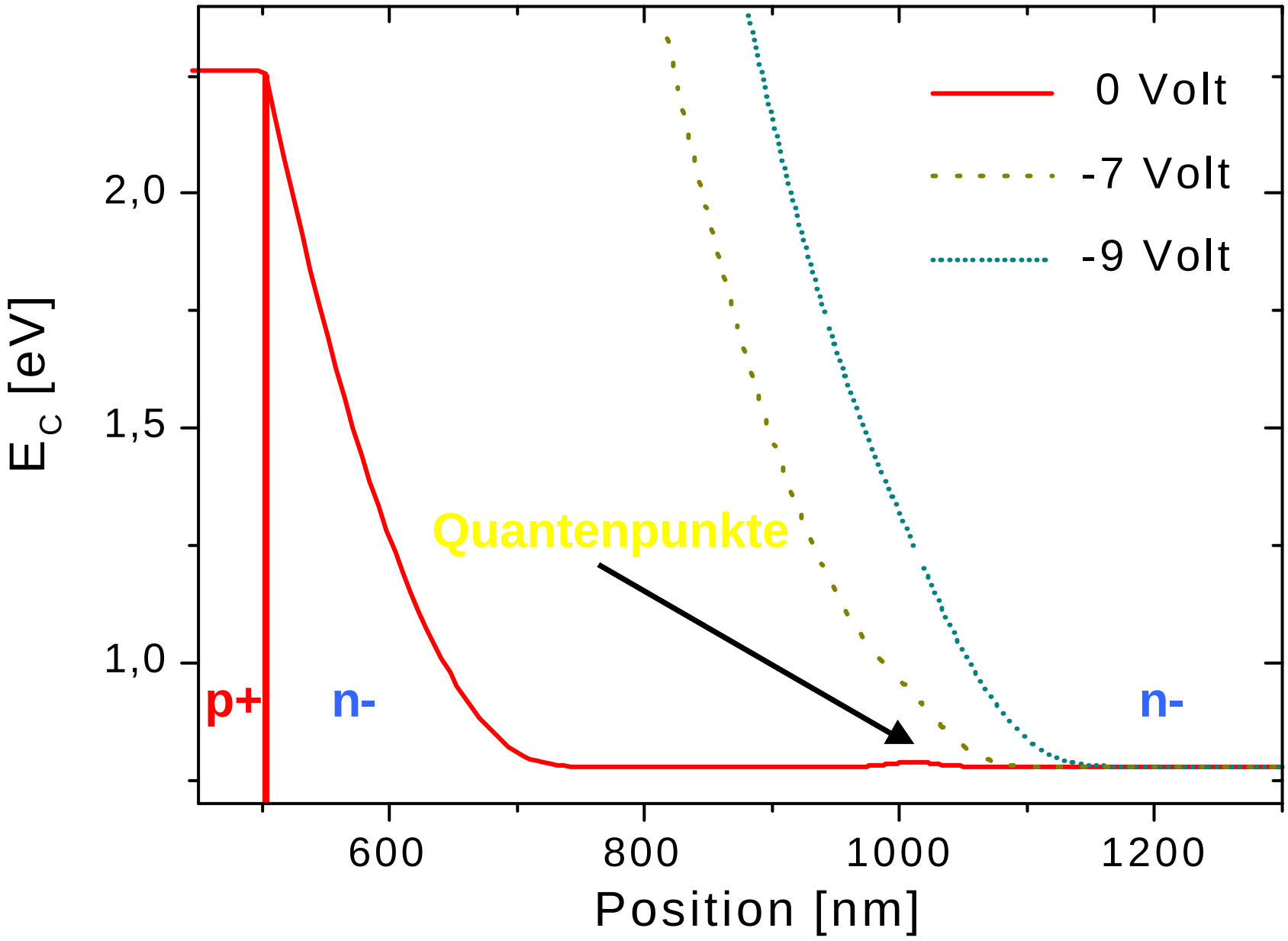
Generation X
(l Kinder)

Selektion

* Ostermeier, Gawelczyk, Hansen, TR-93-003, 1993

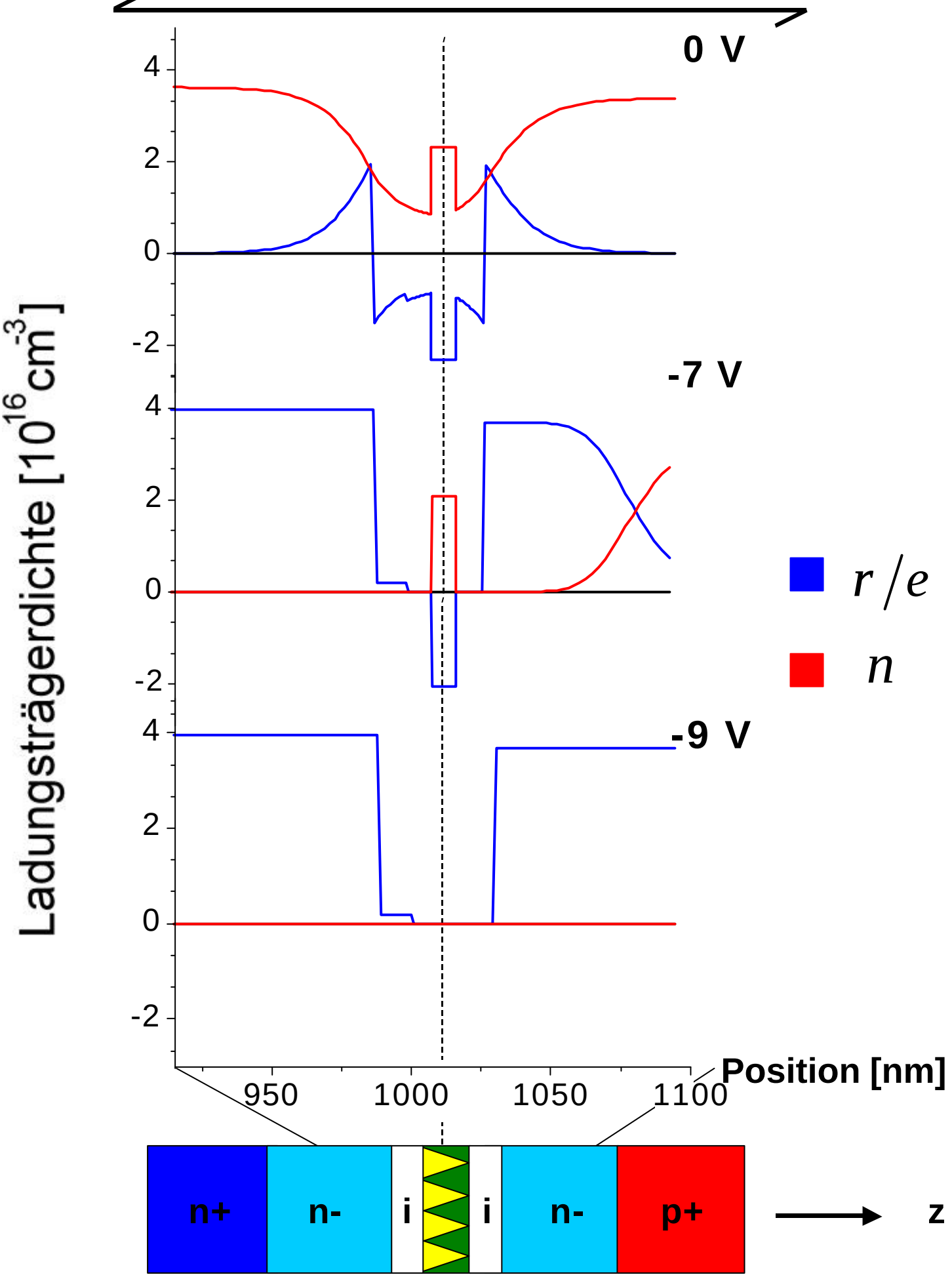
Leitungsband

S1: InAs Quantenpunkte in pnin-Diode



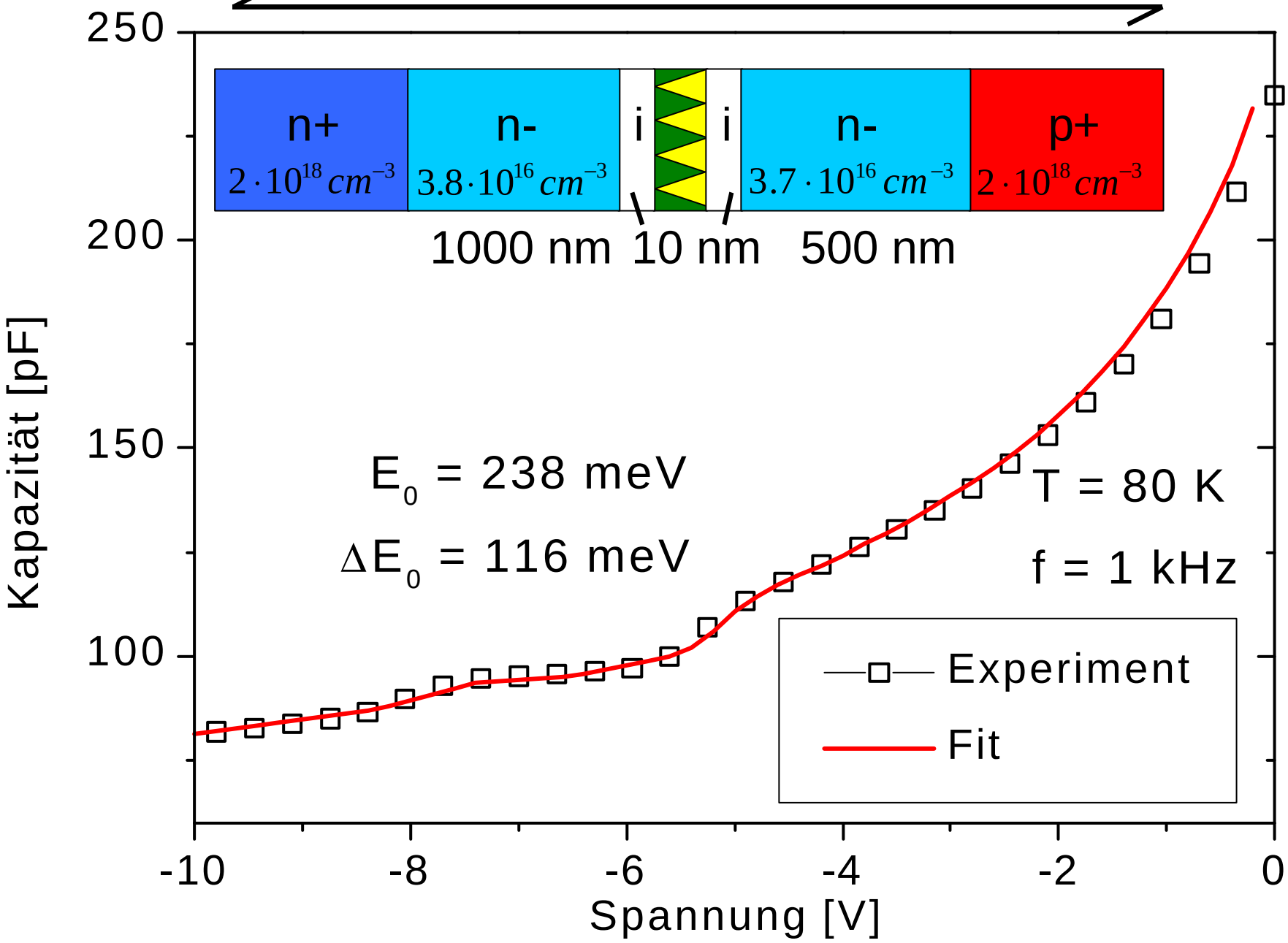
Räumliche Ladungsträgerverteilung

S1: InAs Quantenpunkte in pnin-Diode



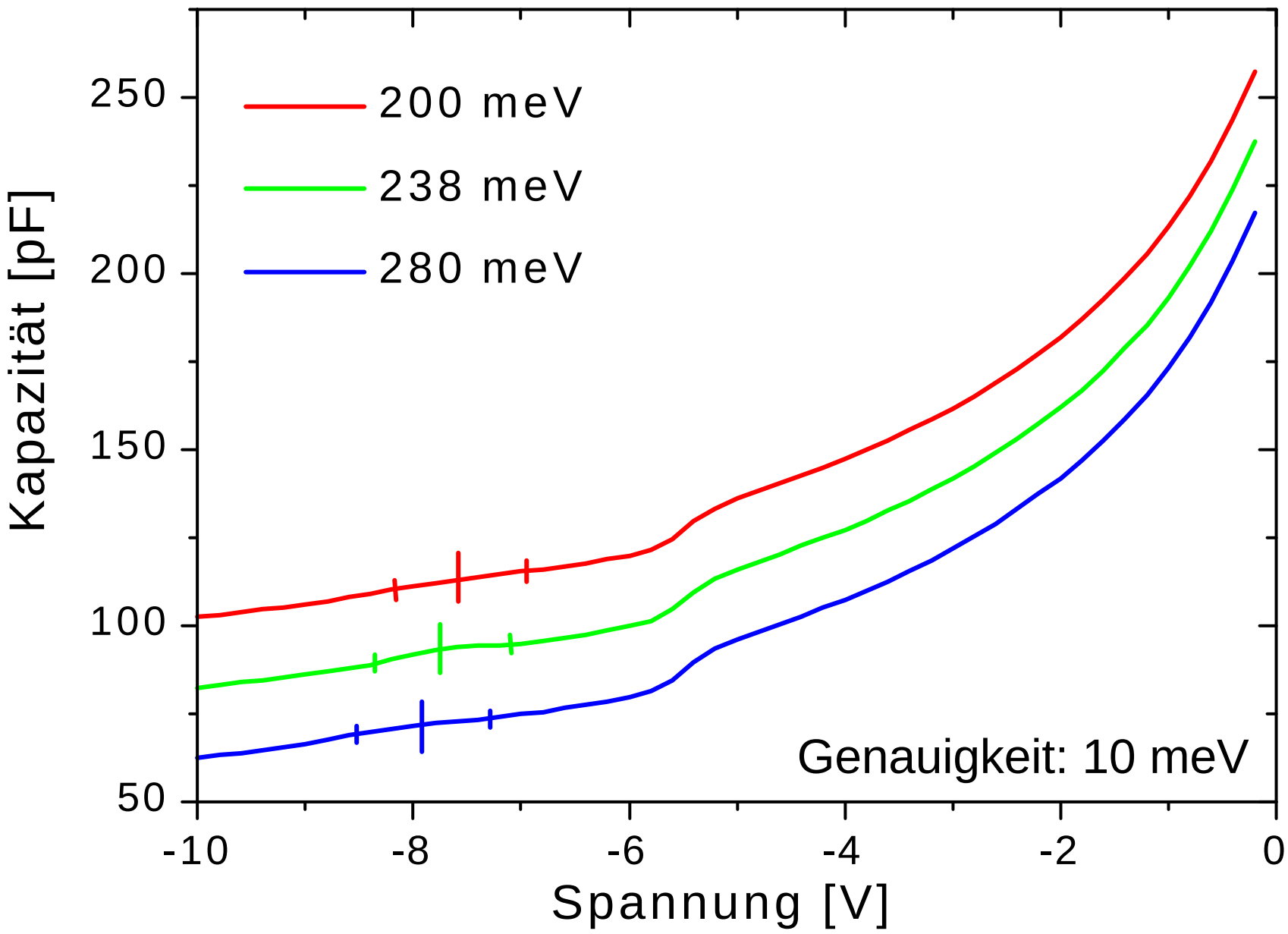
Ergebnisse

S1: InAs Quantenpunkte in pnin-Diode



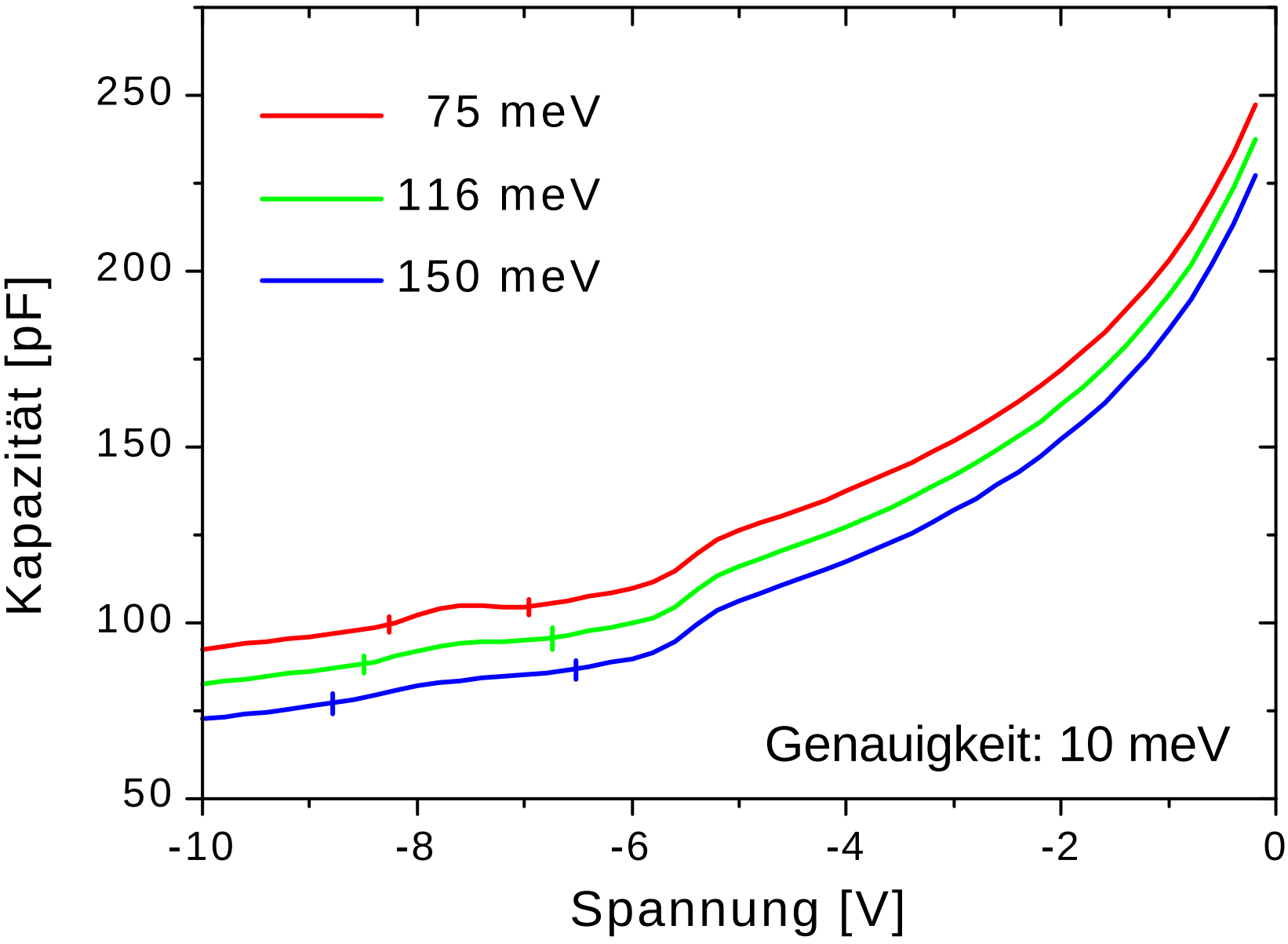
Einfluß der Energieniveaus

S1: InAs Quantenpunkte in pnin-Diode



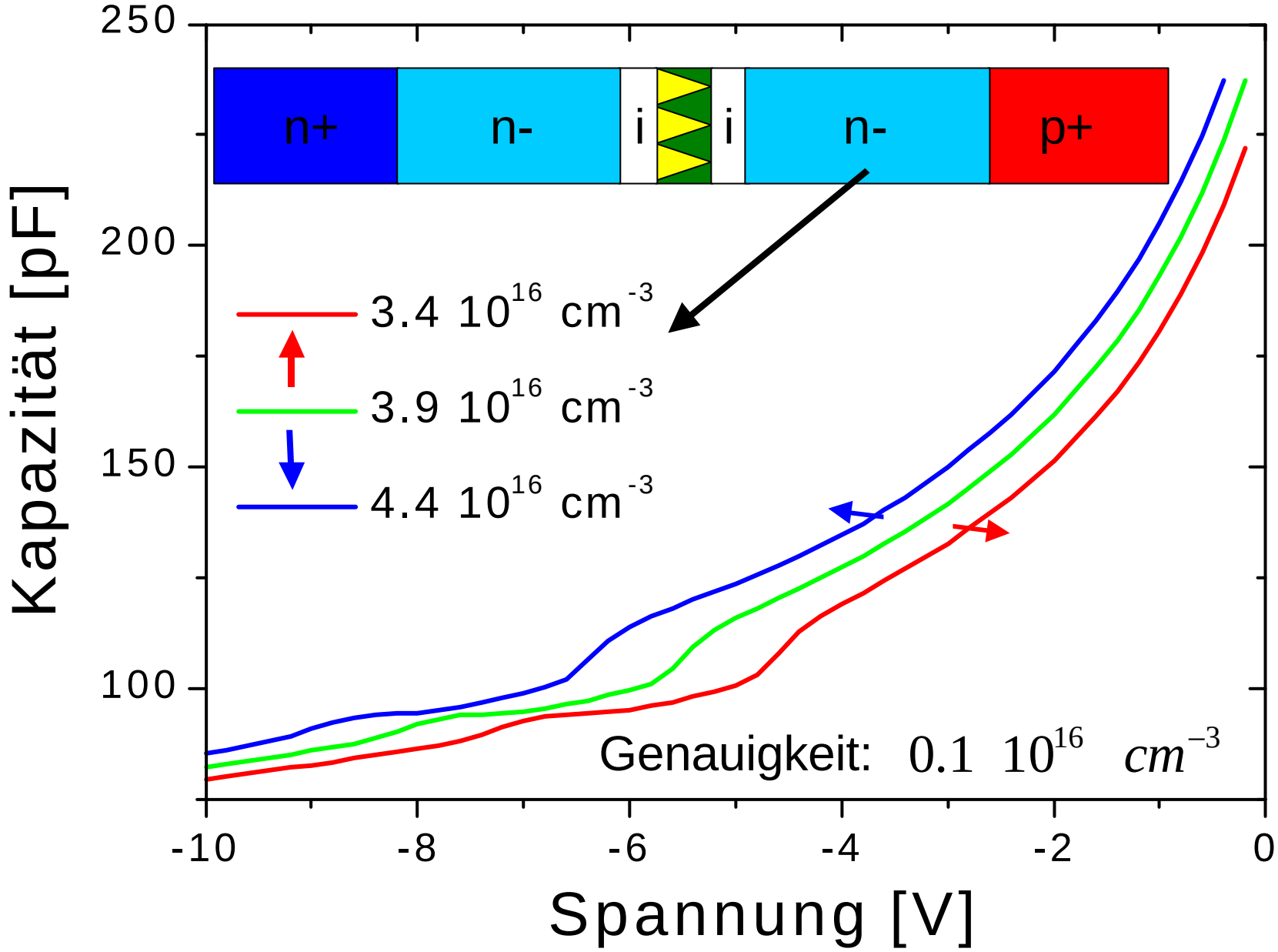
Einfluß der Verbreiterung (Gauß)

S1: InAs Quantenpunkte in pnin-Diode



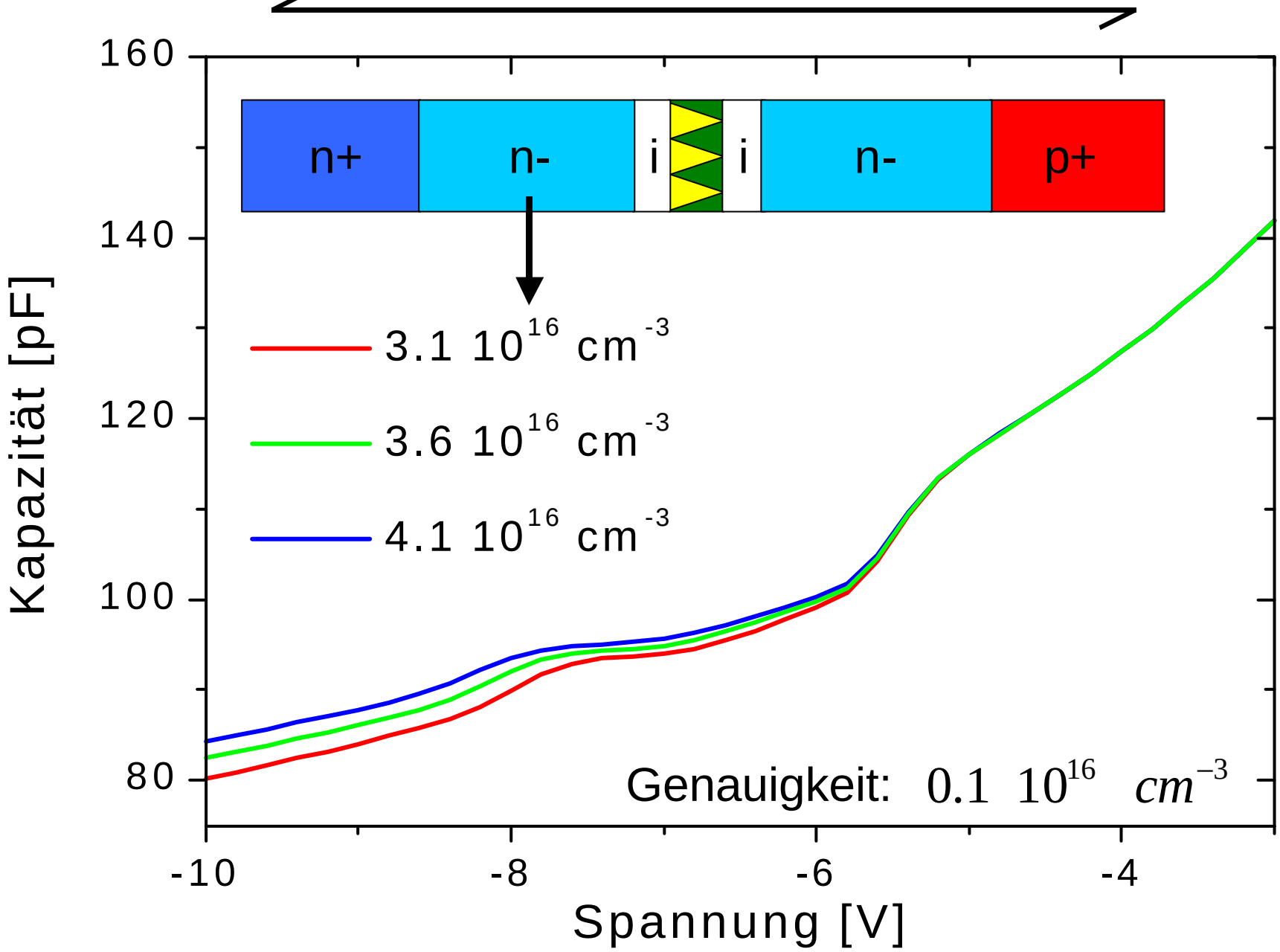
Einfluß der Dotierung

S1: InAs Quantenpunkte in pnin-Diode



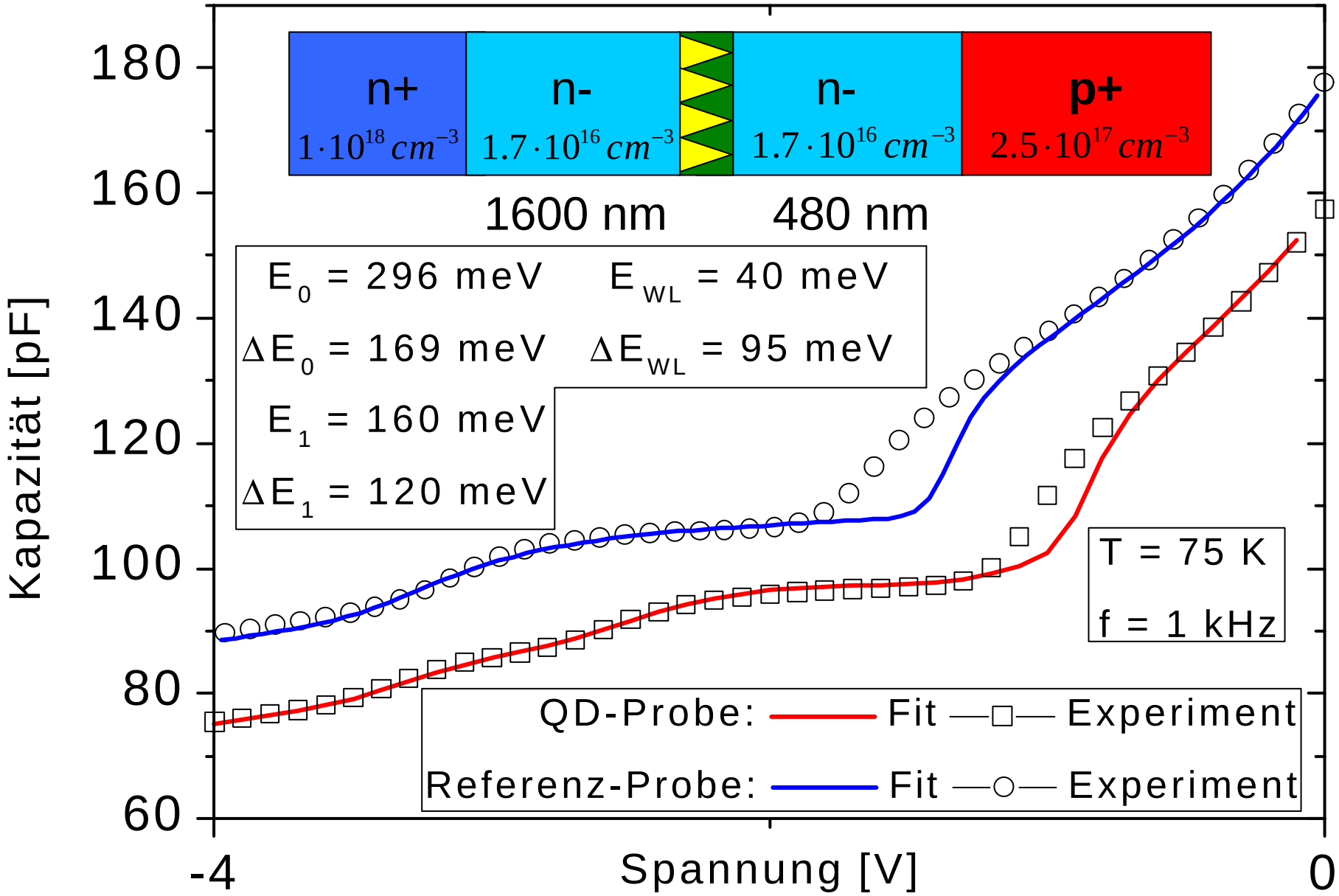
Einfluß der Dotierung

S1: InAs Quantenpunkte in pnin-Diode



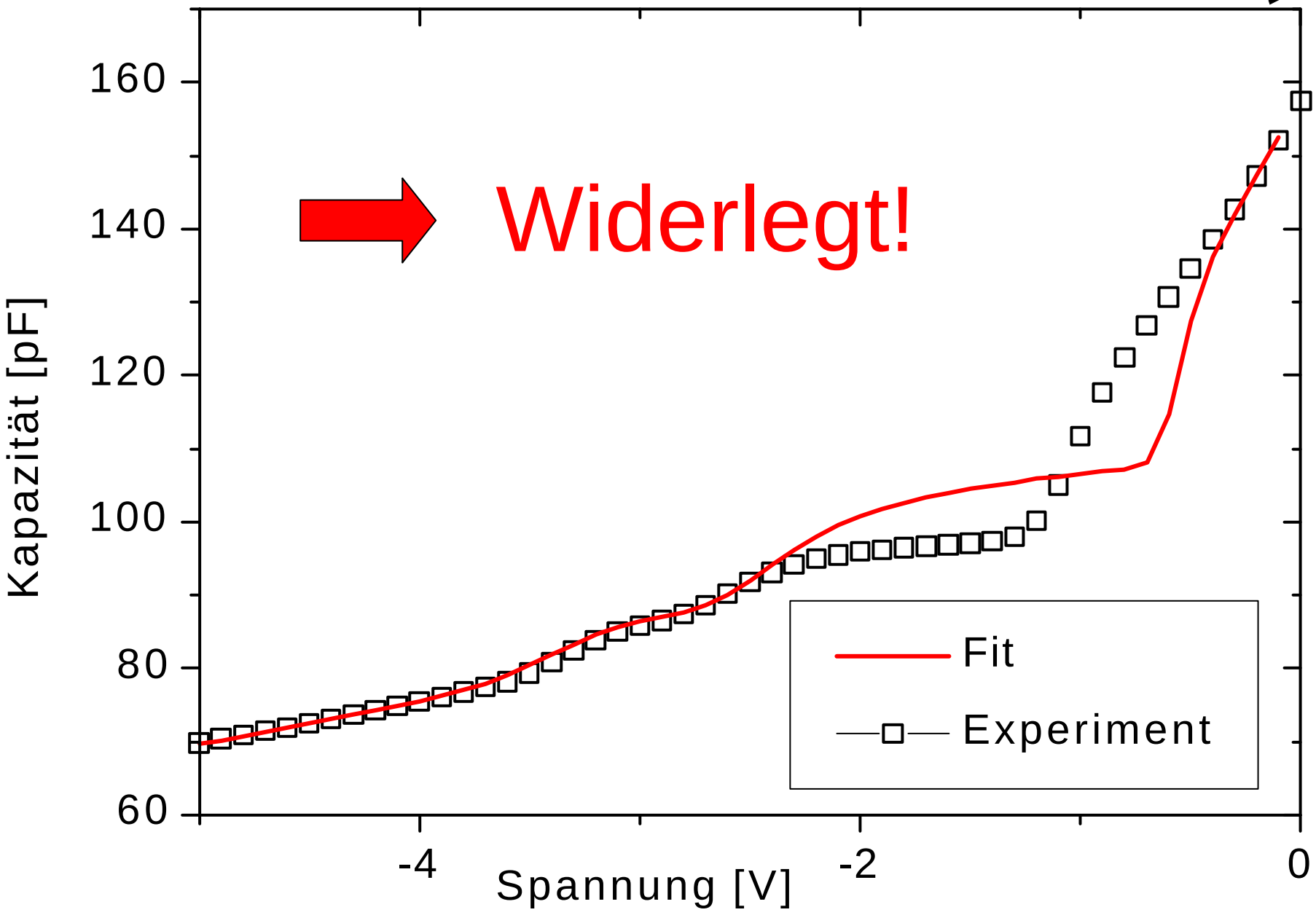
Ergebnisse

S2: InAs Quantenpunkte in pn-Diode



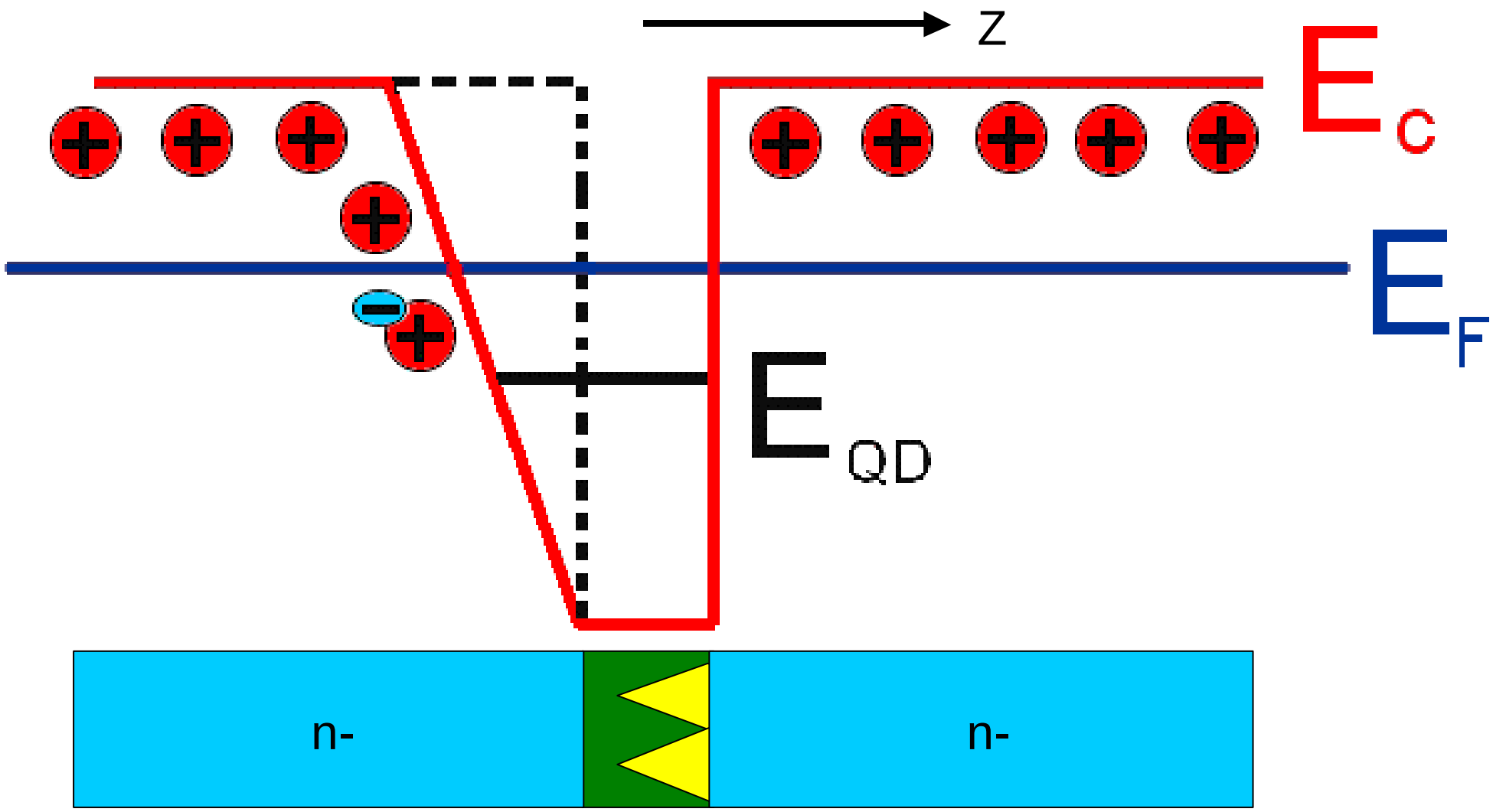
Ergebnisse

S2: Einfluß des Wetting-Layer ohne In-Diffsuion



Theorie

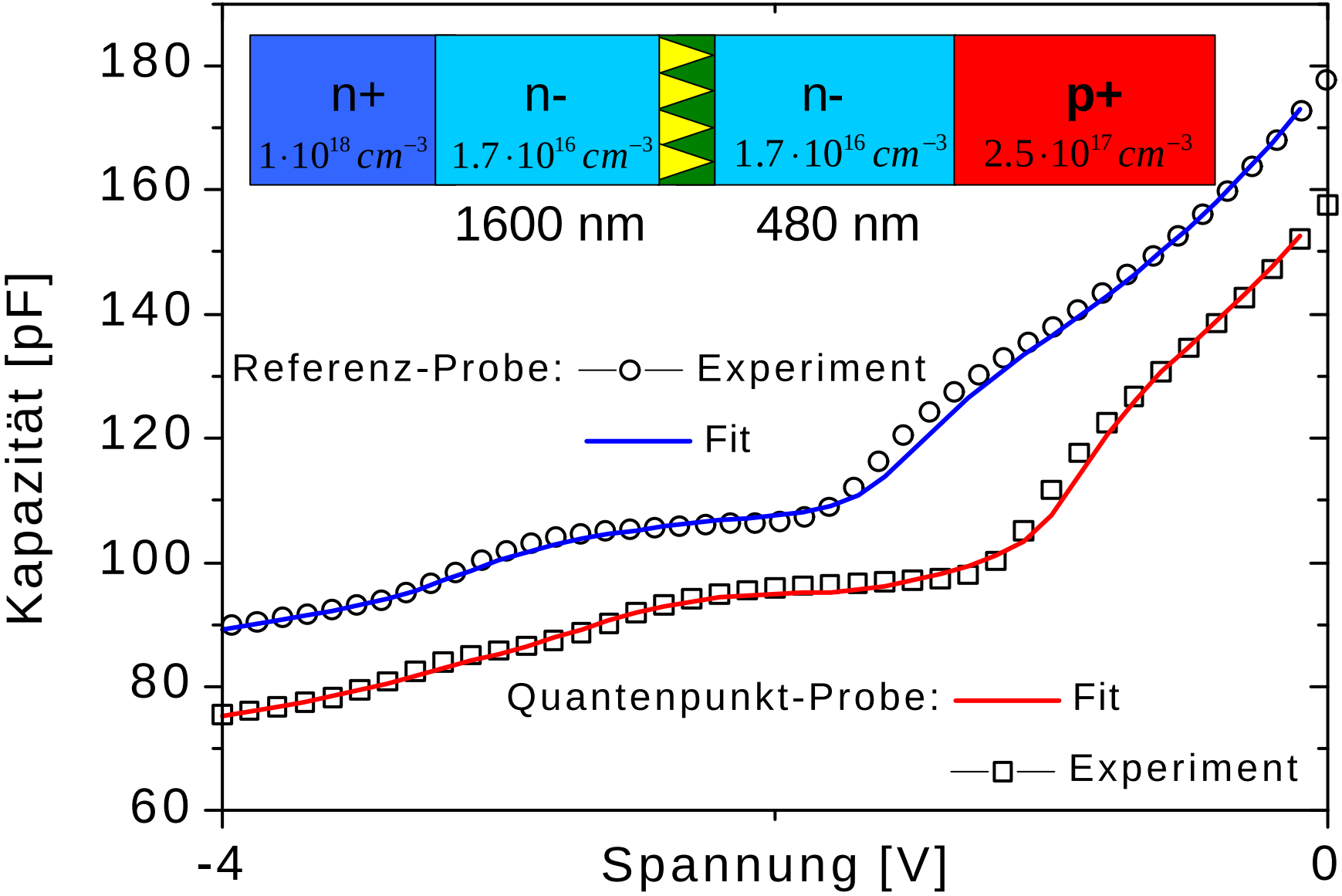
(XSTM, z.B. P.M. Koenraad, ICPS-25)



Ergebnisse

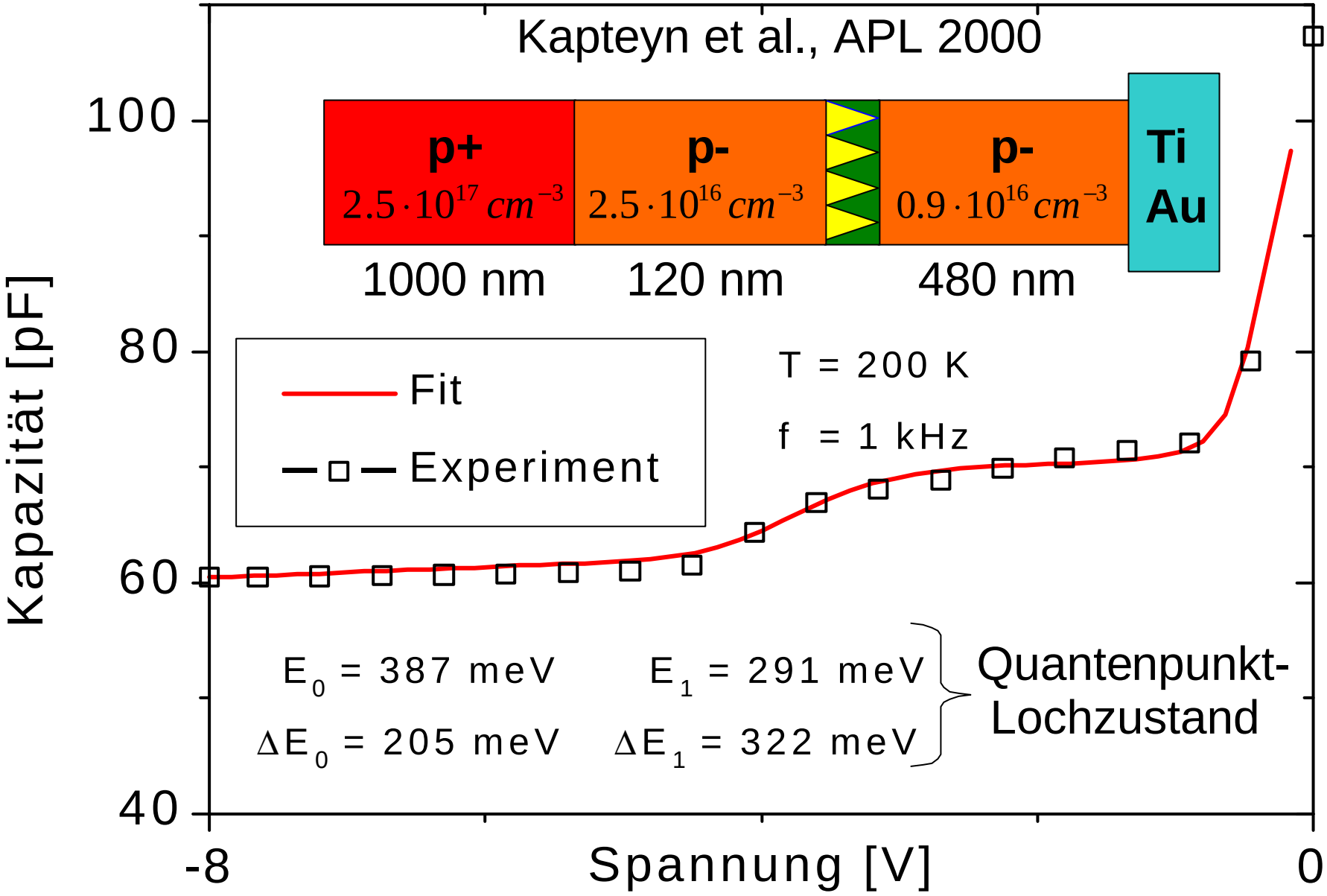
Berücksichtigung der In-Diffusion

(XSTM, z.B. P.M. Koenraad, ICPS-25)



Ergebnisse

S3: Ge Quantenpunkte in Schottky-Diode



Zusammenfassung

- Bestimmung der Energieniveaus von Quantenpunkt- und Wetting-Layer Zuständen und deren Verbreiterung
- Verschiedene Bauteil Strukturen: pnin-Diode, pn-Diode und Schottky-Diode
- Verschiedene Materialsysteme: Quantenpunkt-Elektron- und Lochzustände
- Einfluß von In-Diffusion und Dotierung mit detailliertem Modell

Danksagung:

Volker Türck, TU Berlin - Fitroutine Evolutions-Strategie
Jörg Ehehalt, TU Berlin - Messung InAs-Quantenpunkte S1