

# Quantenbauelemente der Optoelektronik

---

**Dozent:**

**Dr. Georg Bastian**

**LTI, Raum 224, Tel.: 0721-608-2541  
Georg.Bastian@lti.uni-karlsruhe.de**

**Termin: ab 2005-04-18**

**Montags 9:45-11:15**

**Skript: Powerpoint-Präsentation zum Download von der Homepage  
oder als Ausdruck?**

**Vorteilhafte Vorkenntnisse: Optoelektronik I, Halbleiterbauelemente,  
Mikrosystemtechnik I**

# Quantenbauelemente der Optoelektronik

---

## Literatur:

„Nanoelectronics and Information Technology“ von Rainer Waser (Ed.), Wiley (2003), 1001 Seiten, 74,90€

„Nanophysik und Nanotechnologie“ von Horst-Günter Rubahn, Teubner (2002), 246 Seiten, 24,90€

„Nano-Optoelectronics“ von Marius Grundmann, Springer (2002), 415 Seiten, 85,55€

„Photonic Crystals“ von John D. Joannopoulos, Princeton University Press (1995), 137 Seiten, 46,91€

„Photonic Crystals: Advances in Design, Fabrication, and Characterization“, K. Busch et al., Wiley (2004), 380 Seiten, 150\$

„Springer Handbook of Nanotechnology“, Bharat Bhushan, Springer (2004), 1500 Seiten, 199\$

„Technologieanalyse Quantenoptik“, G. Reuscher und D. Holtmannspötter, VDI Technologiezentrum (2004)

Zeitschriften: z.B. „IEEE Photonics Technology Letters“, „Nanotechnology“, „Physica E“

# Inhalte der Vorlesung

---

## **1 Einführung**

### **Quantenbauelemente**

- 1.1 Kohärenz und Interferenz
- 1.2 Quantisierung/ Quantenmechanik
- 1.3 Tunneln und Streuung
- 1.4 Nanotechnologie

## **2 Halbleiter-Heterostrukturen**

- 2.1 Quantentopf, -draht, -punkt
- 2.2 Herstellung von Quantenpunkten, Wachsen und Überwachsen
- 2.3 Si-Laser
- 2.4 Halbleiter-Übergitter, THz Emitter
- 2.5 Quanten-Kaskaden-Laser

## **3 Supraleiter**

- 3.1 Tunnelemente
- 3.2 Filter und Detektoren

## **4 Nanopartikel**

- 4.1 Kolloide
- 4.2 Nanotubes
- 4.3 AR- und andere Coatings
- 4.4 Moderne Thermoelektrizität

## **5 Photonische Kristalle**

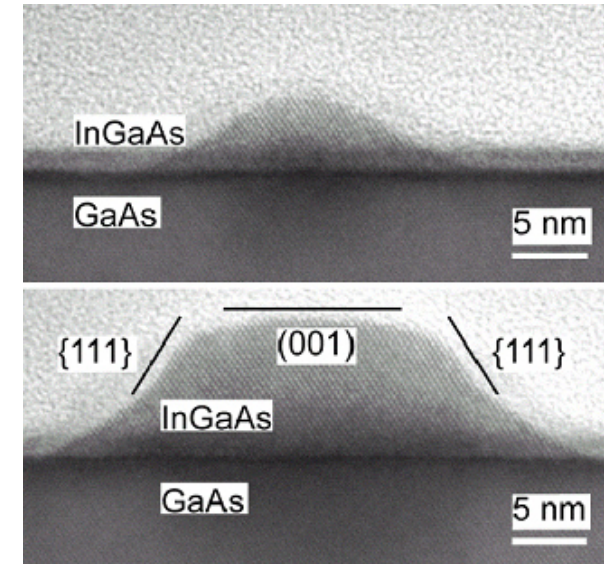
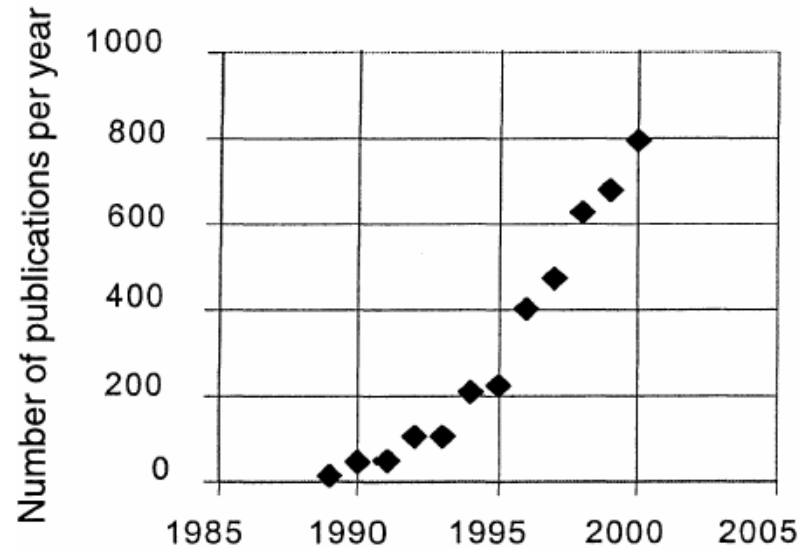
- 5.1 Photonische Bandlücke
- 5.2 Modifizierte Dispersion
- 5.3 Periodisch gepolte Materialien

## **6 Quantenoptik und Quantenmechanik**

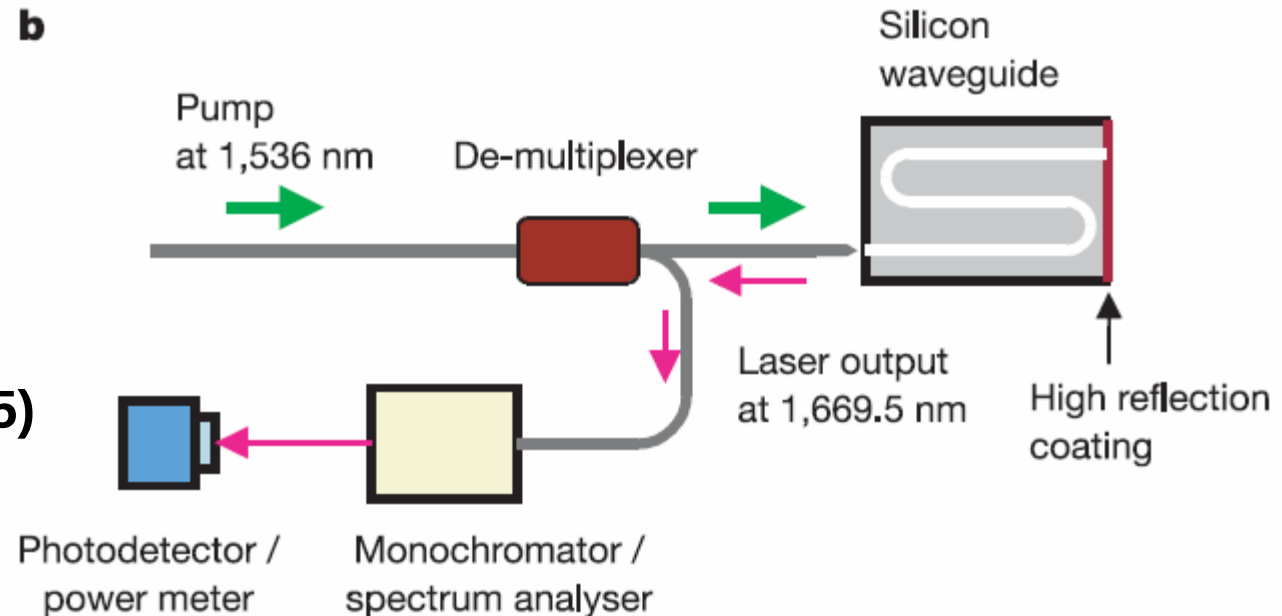
- 6.1 Gequetschtes Licht
- 6.2 Quantencryptografie

# 1. Einführung

**Aktualität des  
Themas: Beispiel  
Quantenpunkte**

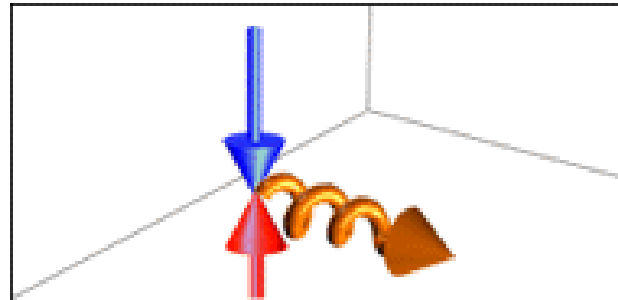


**Aktualität des  
Themas: Beispiel  
Siliziumlaser  
(Nature Januar 2005)**

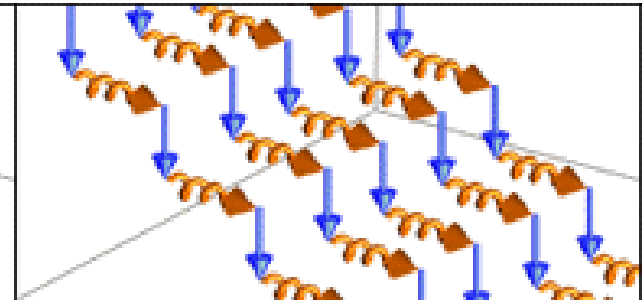


# 1. Einführung

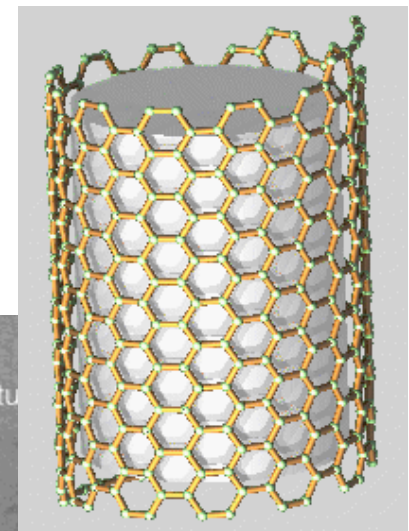
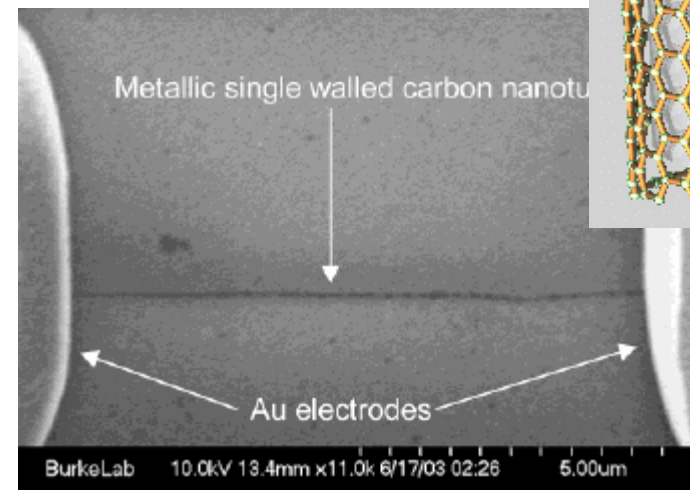
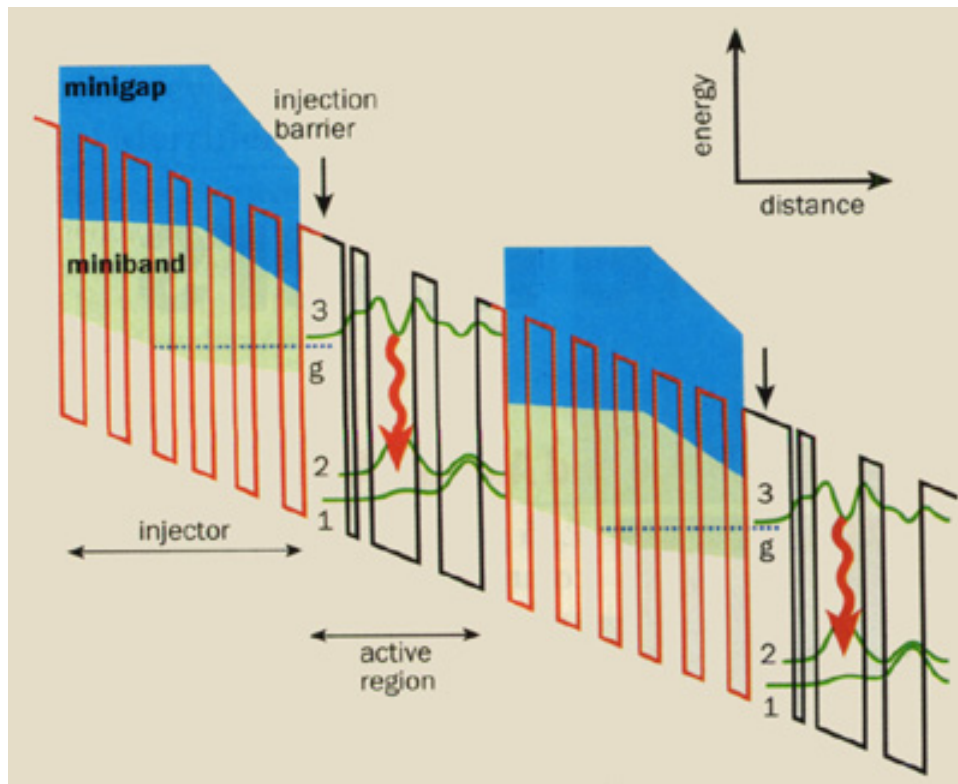
## Bunte Beispiele



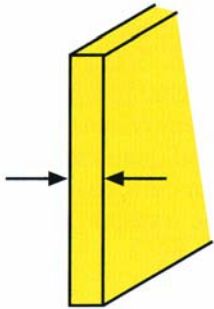
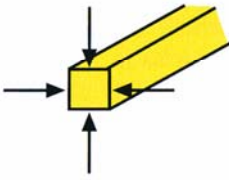
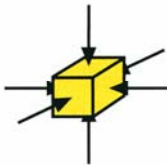
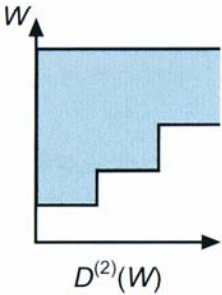
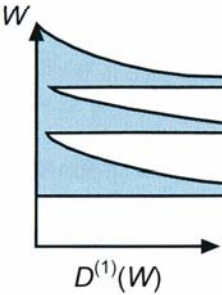
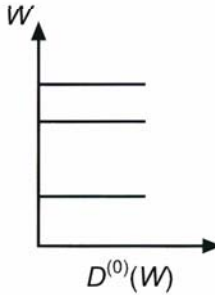
convetional laser

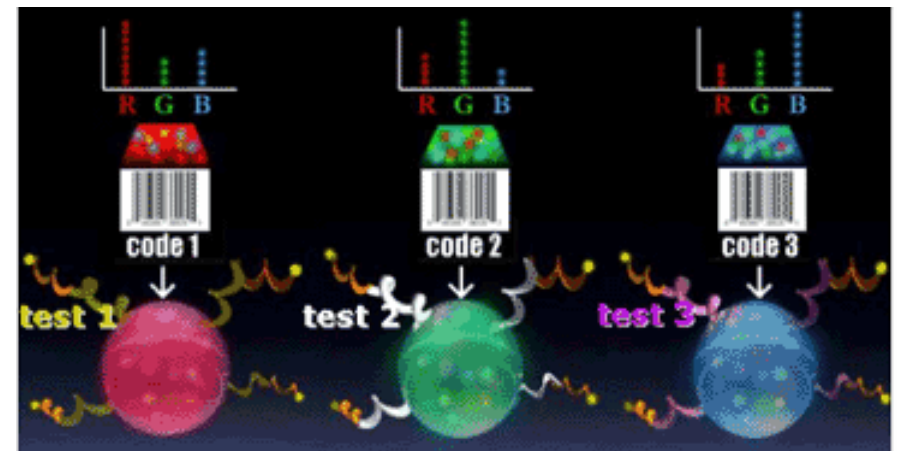
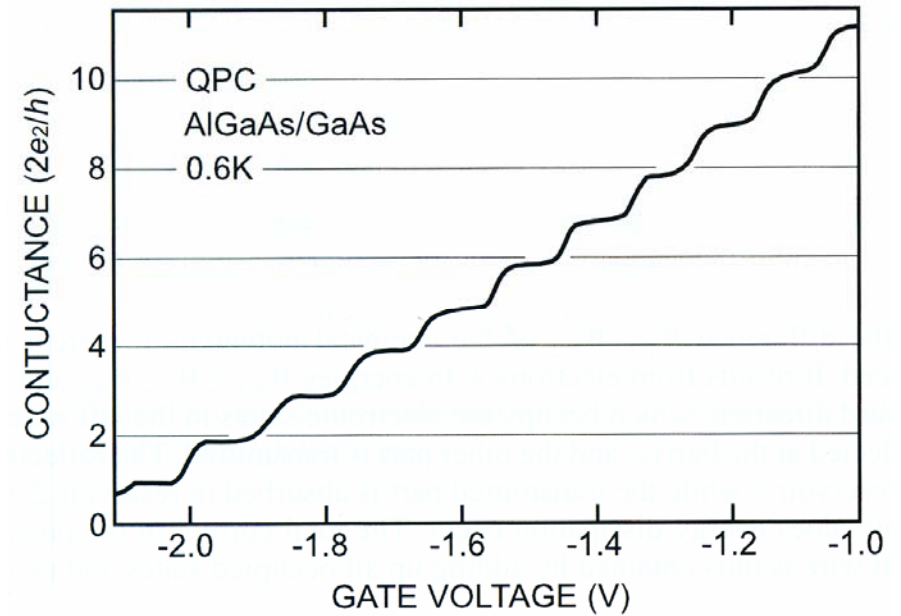


quantum cascade laser

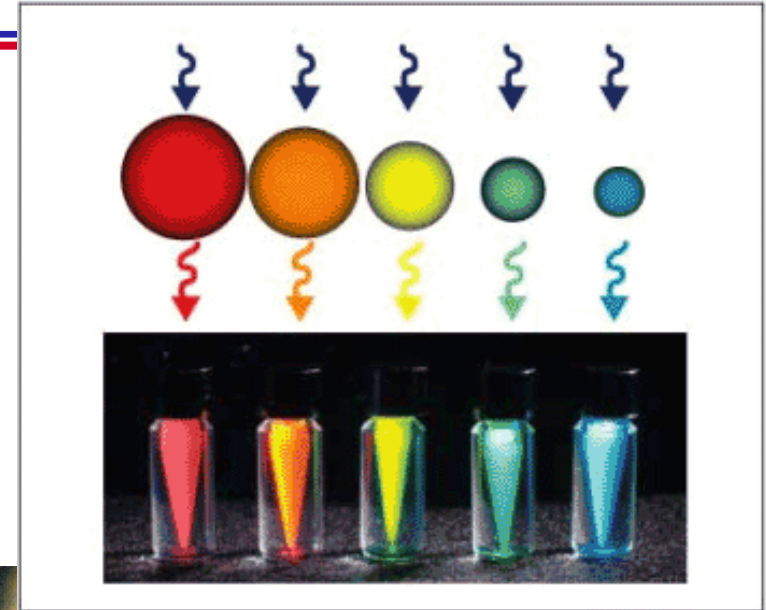
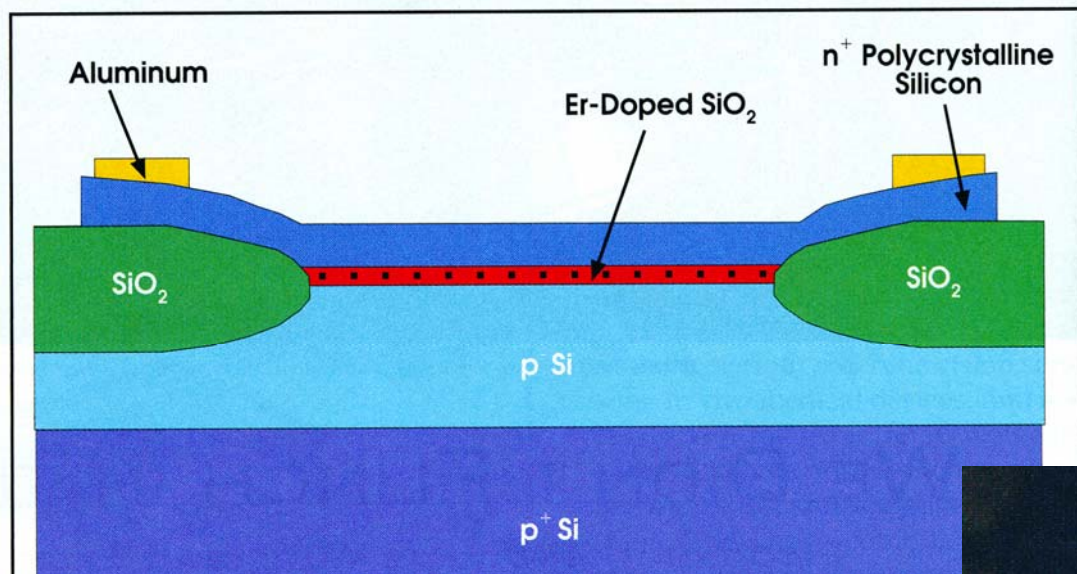


# 1. Einführung

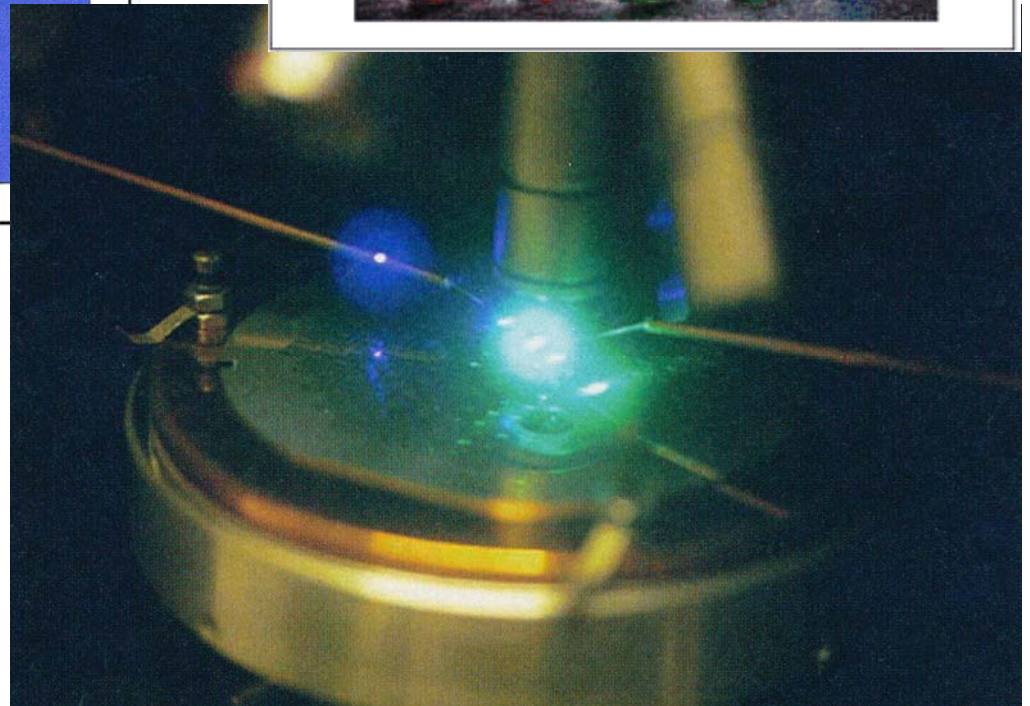
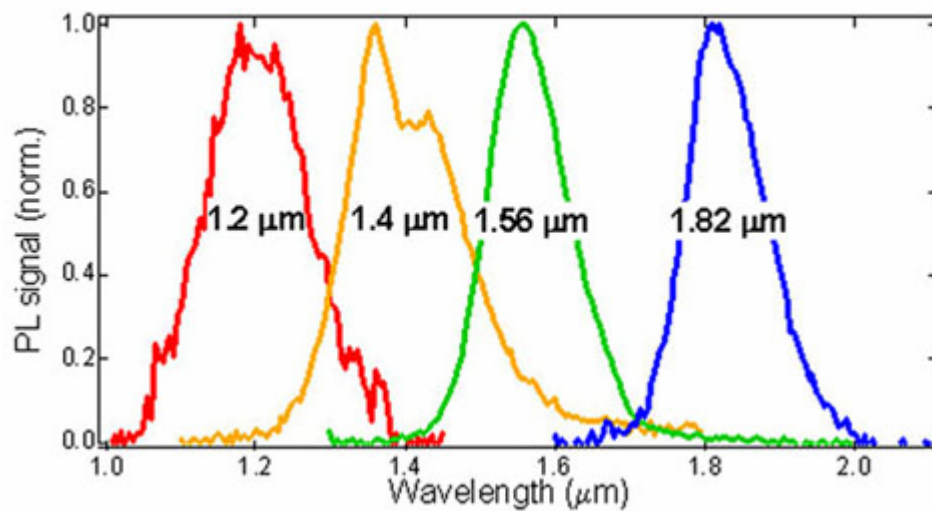
| 2-dimensional                                                                                                    | 1-dimensional                                                                                                     | 0-dimensional                                                                                                      |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>a)</p>  <p>quantum film</p>  | <p>b)</p>  <p>quantum wire</p>   | <p>c)</p>  <p>quantum dot</p>     |
|  <p><math>D^{(2)}(W)</math></p> |  <p><math>D^{(1)}(W)</math></p> |  <p><math>D^{(0)}(W)</math></p> |



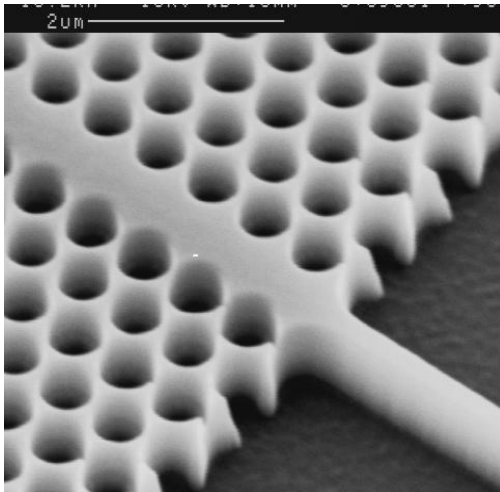
# 1. Einführung



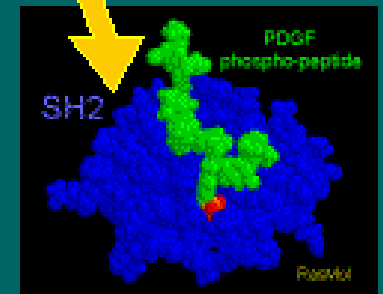
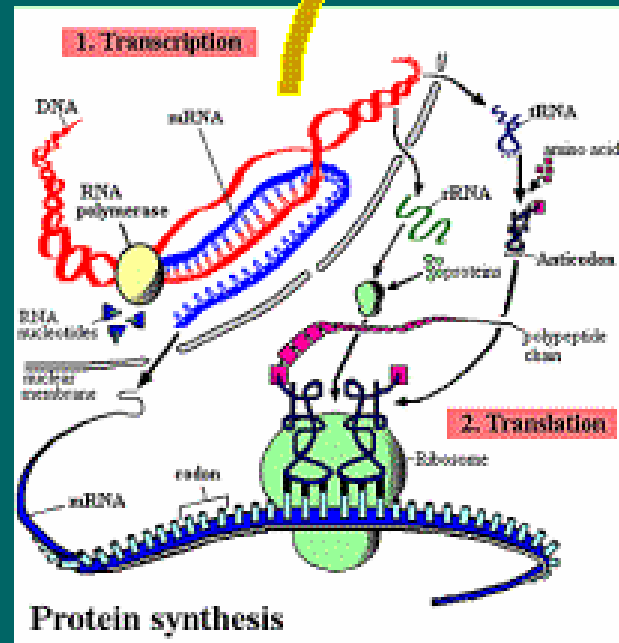
**PbSe Q-dot size series photoluminescence spectra**



# 1. Einführung



3D-Nano-  
structures  
Photonic  
Crystals  
and  
Applications

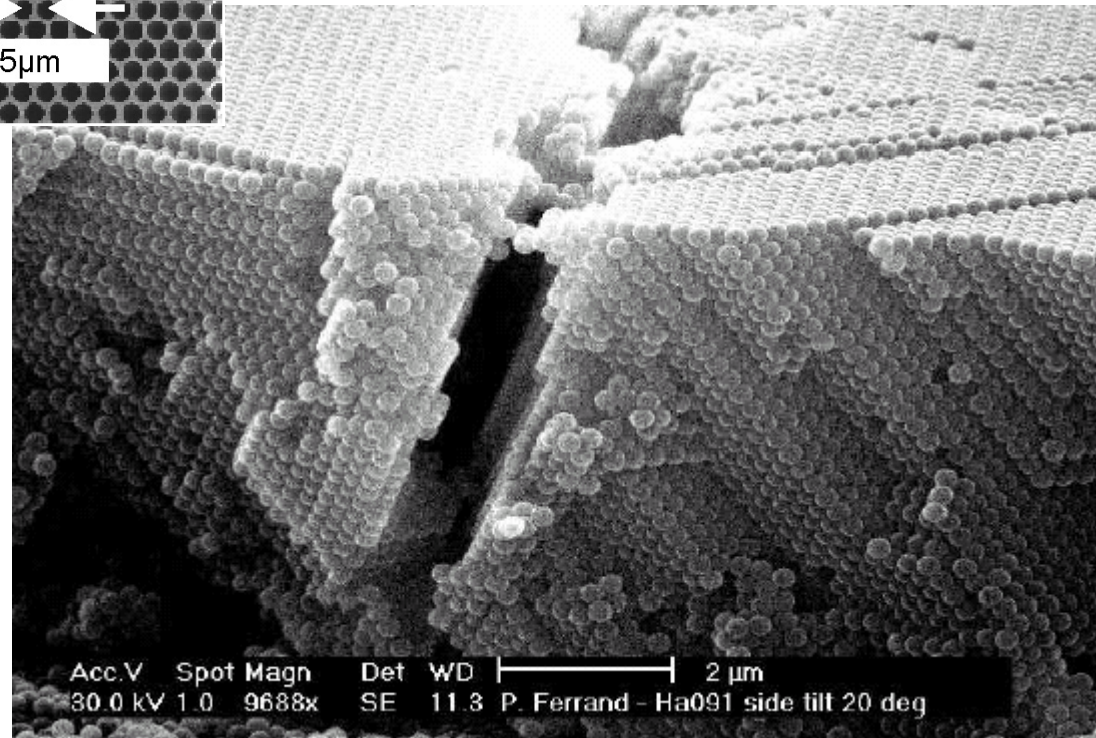
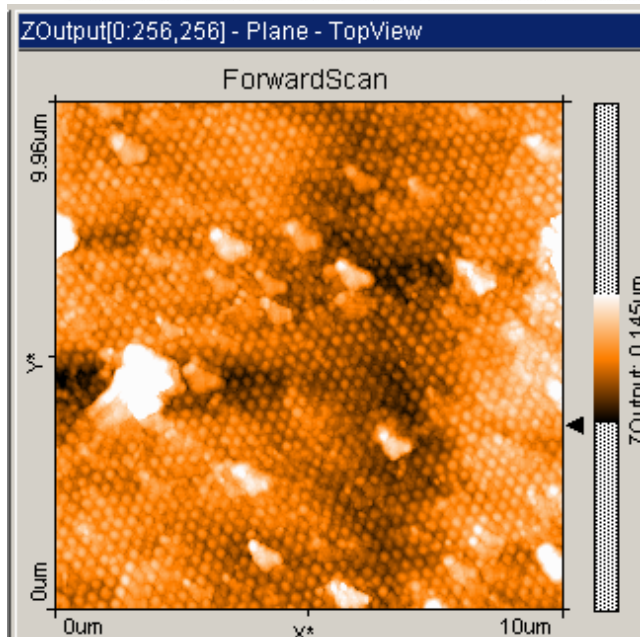
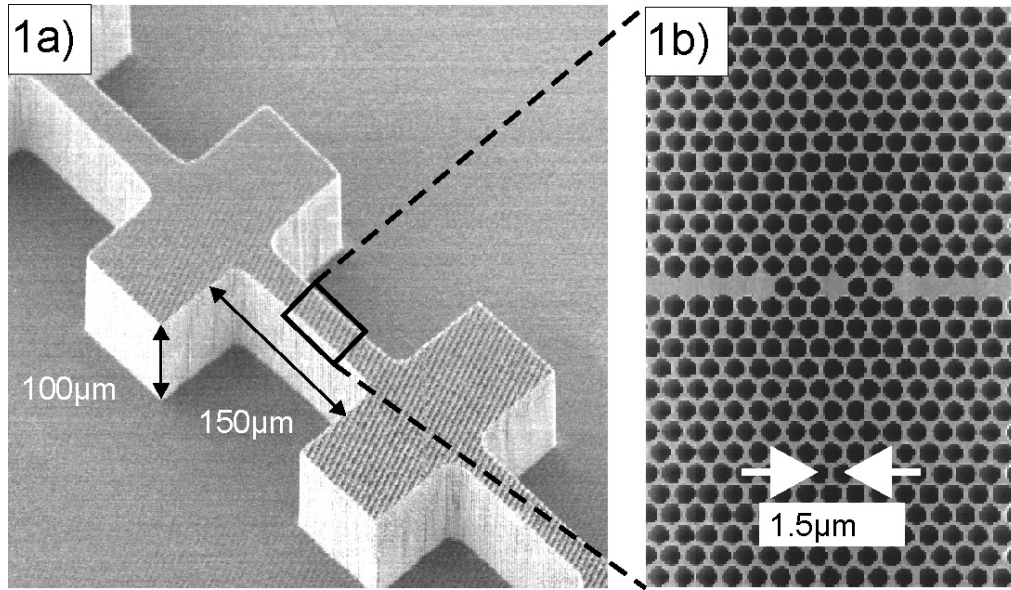


th

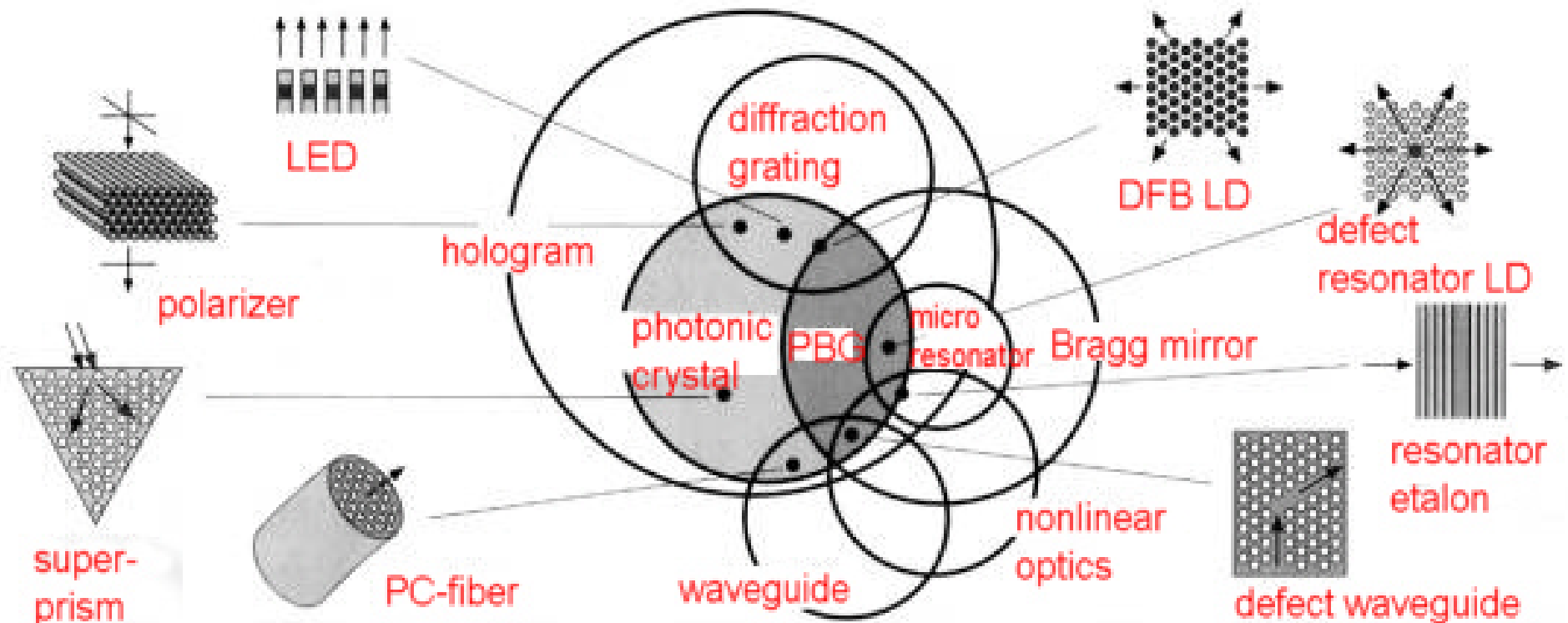
T. Doll  
TU Ilmenau

Far Future: Use of Macromolecular  
Replication for Nano-Structures

# 1. Einführung

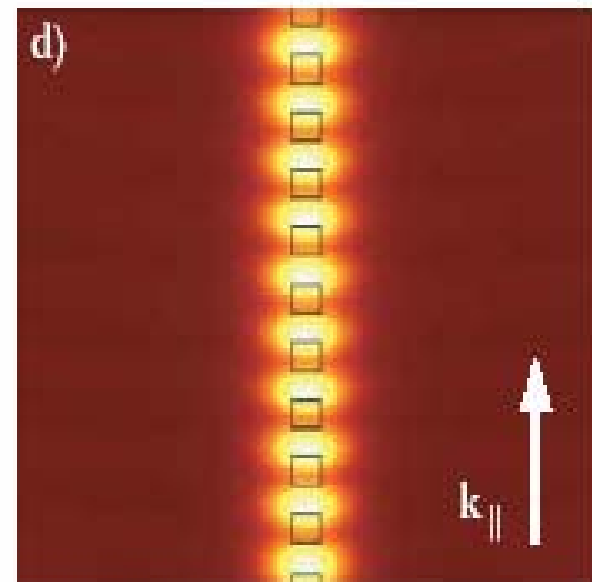
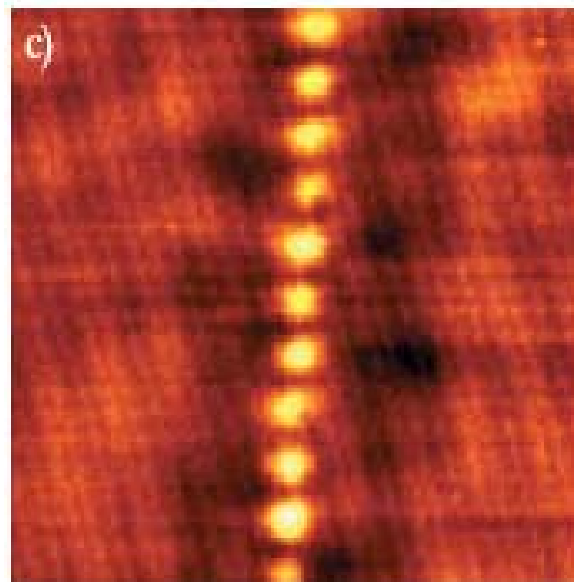
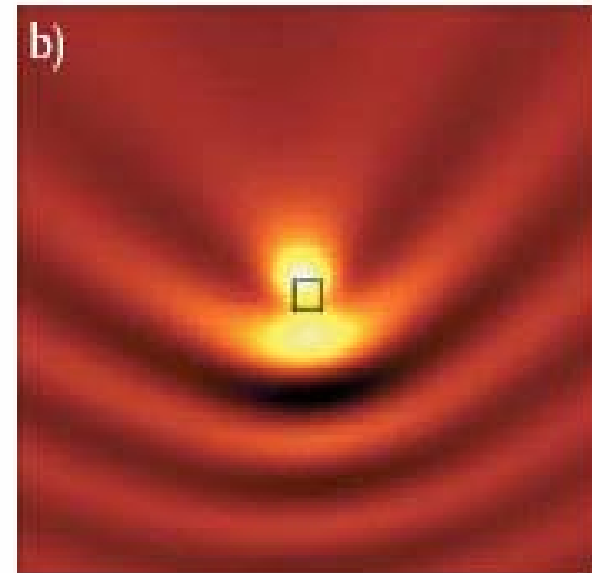
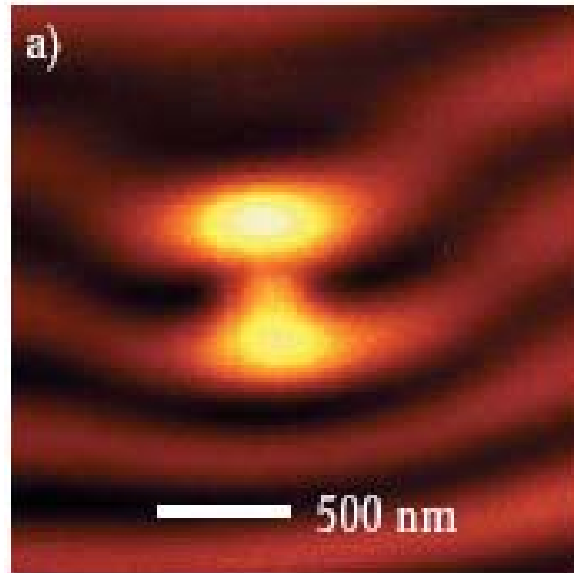


# 1. Einführung



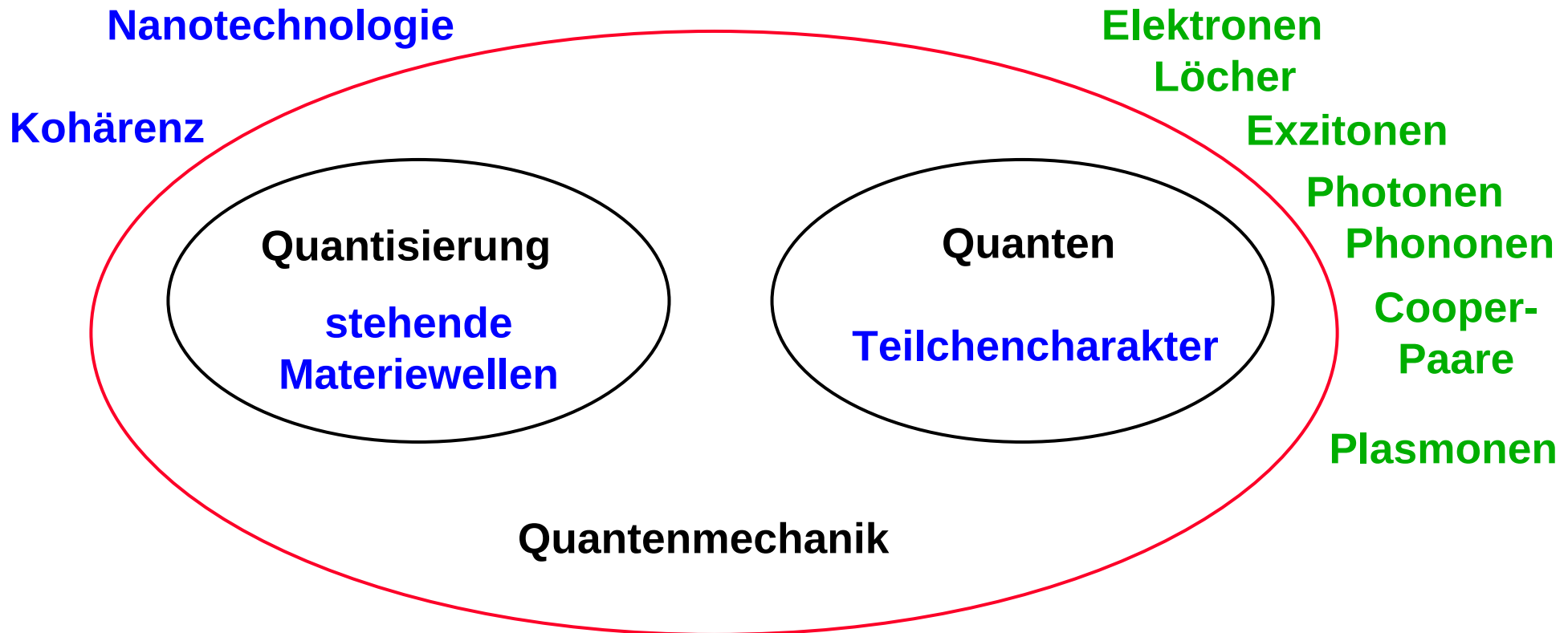
# 1. Einführung

Optische  
Wellenleiter aus  
Metallen



# 1. Einführung

Was sind **Quanten**bauelemente der Optoelektronik?



# 1. Einführung

---

**Problem: Alles lässt sich quantenmechanisch beschreiben**

**Quantenbauelemente: Alles was man nur quantenmechanisch verstehen kann**

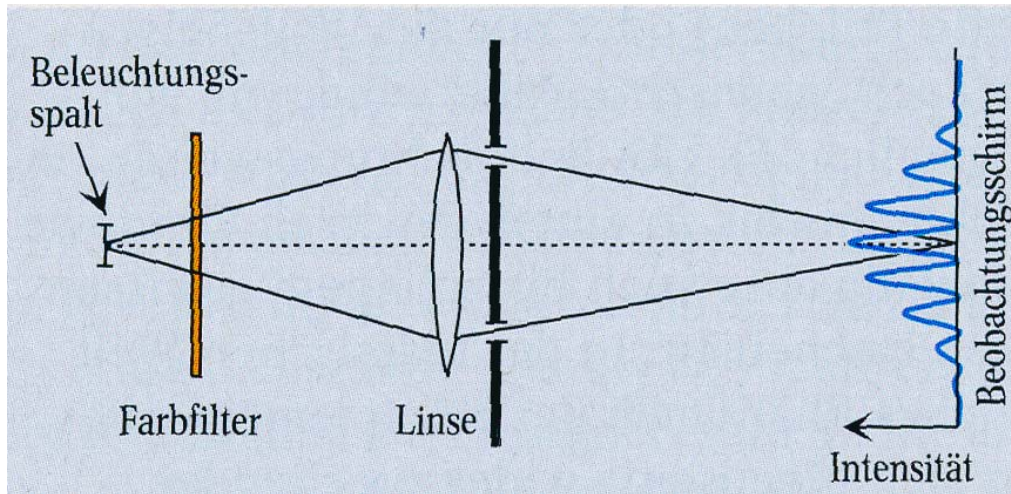
**Problem: Quantenmechanik kann man nicht verstehen\***

\* Jedenfalls nicht so, wie man klassische Effekte verstehen kann

# 1.1 Kohärenz und Interferenz

Experiment um zu verstehen, dass man Quantenmechanik nicht verstehen kann (Young 1801)

## 1. Messung



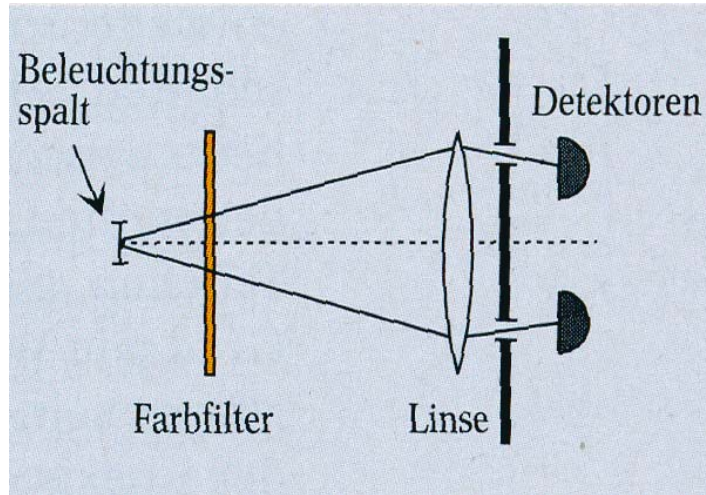
Intensitätsmessung  
auf dem Schirm:  
Interferenzmuster  
sichtbar.

- ➡ Licht hat Wellencharakter
- ➡ Licht tritt durch beide Spalte gleichzeitig
- ➡ Licht interferiert konstruktiv ( $I=4I_0$ ) und destruktiv ( $I=0$ )
- ➡ Interferenzmuster wird stärker mit schärferem Farbfilter

# 1.1 Kohärenz und Interferenz

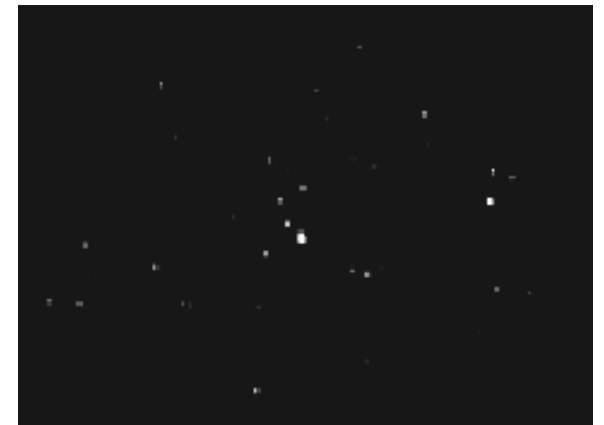
Experiment um zu verstehen, dass man Quantenmechanik nicht verstehen kann  
(Young 1801)

## 2. Messung



Schnelle Messung  
bzw. wenig Intensität:  
Es gibt immer nur bei  
einem der Detektoren  
ein Signal.

- ➡ Licht ist ein Strom aus raum-zeitlich lokalisierbaren Teilchen
- ➡ Licht tritt **nicht** durch beide Spalte gleichzeitig

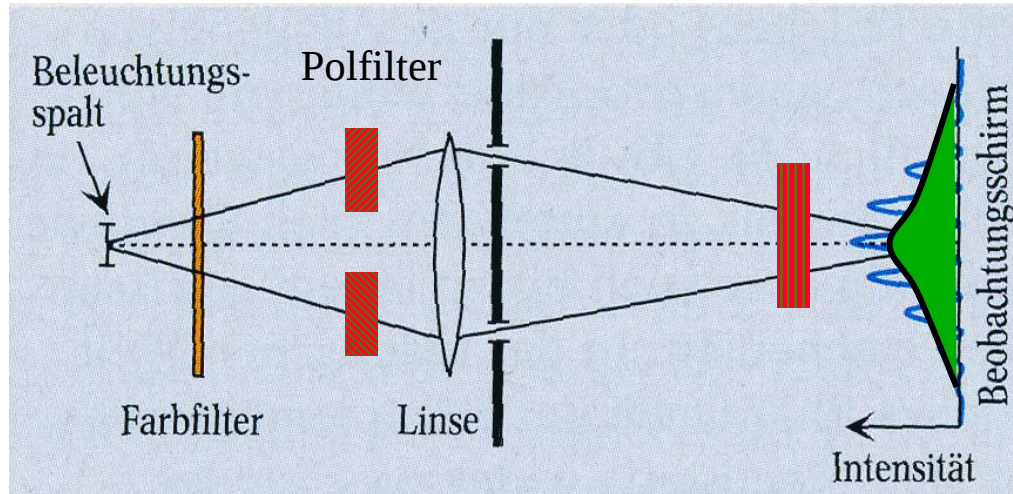


Körnigkeit und Interferenz

# 1.1 Kohärenz und Interferenz

Experiment um zu verstehen, dass man Quantenmechanik nicht verstehen kann (Young 1801)

## 3. Messung



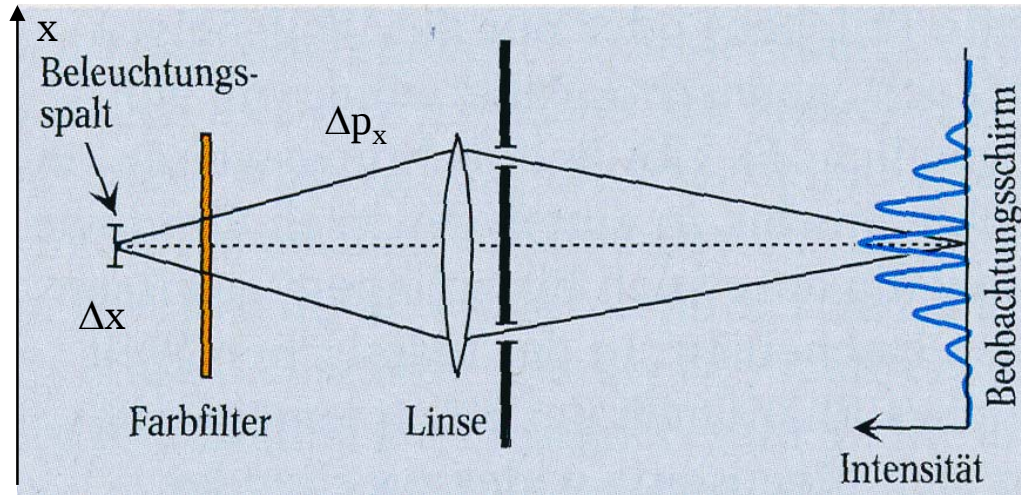
Intensitätsmessung auf dem Schirm: Interferenz tritt je nach Stellung des Polfilters auf.

- ➡ Keine Interferenz bei orthogonal polarisierten Filtern vor den Spalten
- ➡ Interferenz tritt auf mit weiterem 45° Polfilter vor dem Schirm
- ➡ Wenn man unterscheiden kann, durch welchen Spalt das Licht ging, gibt es keine Interferenzmuster!

# 1.1 Kohärenz und Interferenz

Experiment um zu verstehen, dass man Quantenmechanik nicht verstehen kann (Young 1801)

## 4. Messung



Intensitätsmessung auf dem Schirm:  
Interferenzstärke hängt von der Beleuchtungsspaltbreite ab

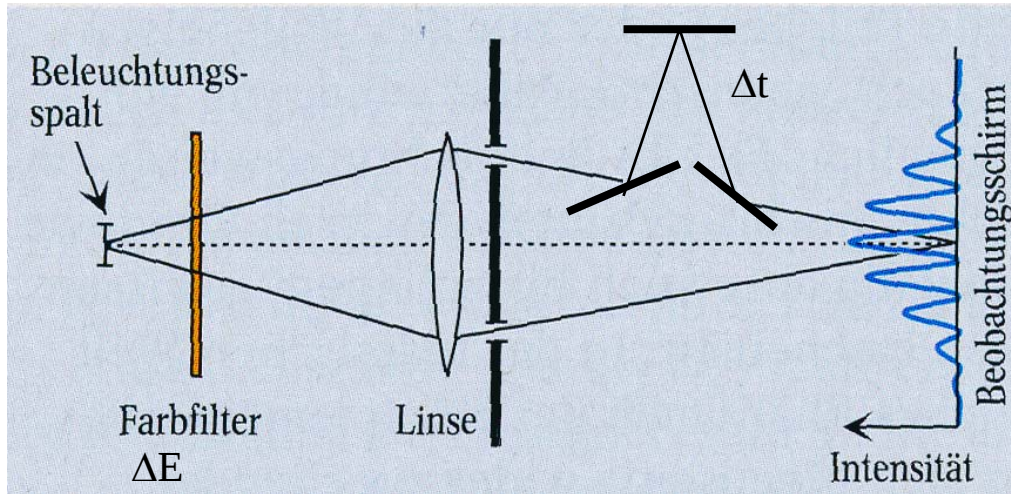
- ➡ Interferenz wird schwächer bei größerem  $\Delta x$
- ➡ Interferenz hängt vom Sehinkel ab,  $\Delta p_x$
- ➡ Zusammenhang zwischen  $\Delta p_x$  und  $\Delta x$
- ➡ Übergang Quantenwelt- klassische Welt je nach räumlicher Kohärenz

$$\Delta x \cdot \Delta p_x = h / 4\pi$$

# 1.1 Kohärenz und Interferenz

Experiment um zu verstehen, dass man Quantenmechanik nicht verstehen kann  
(Young 1801)

## 5. Messung



Intensitätsmessung  
auf dem Schirm:  
Interferenz hängt von  
der zeitlichen  
Verzögerung ab.

- ➡ Interferenz wird schwächer bei größerem  $\Delta t$
- ➡ Interferenz hängt vom Farbfilter ab,  $\Delta E$
- ➡ Zusammenhang zwischen  $\Delta E$  und  $\Delta t$
- ➡ Übergang Quantenwelt- klassische Welt je nach zeitlicher Kohärenz

$$\Delta E \cdot \Delta t = h / 4\pi$$

# 1.1 Kohärenz und Interferenz

---

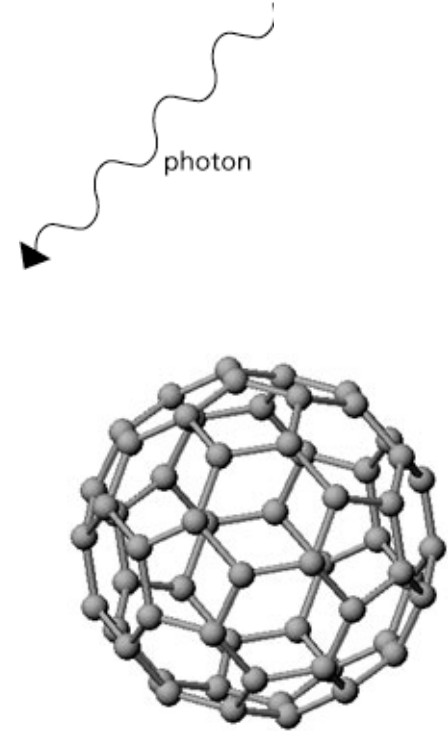
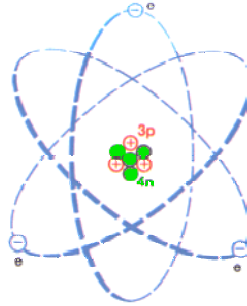
## Zusammenfassung des Versuchs:

- ➡ Licht kann wie ein Teilchen oder wie eine Welle erscheinen
- ➡ Die Messung beeinflusst den Zustand der Teilchen
- ➡ Beobachtung von reinem Teilchen- und reinem Wellencharakter schließt sich gegenseitig aus (Komplementarität)
- ➡ Interferenzerscheinungen treten in kohärenten Systemen auf
- ➡ Kohärenz hat etwas mit dem Erhalt der Phase von Wellen zu tun

# 1.1 Kohärenz und Interferenz

Das Experiment funktioniert u.a. mit

- Licht (Photonen)
- Elektronen
- Neutronen
- Atomen
- Fullerenen



- ➡ Quantenmechanik gilt immer, unabhängig von der Größe der Quanten
- ➡ Quantenmechanische Beschreibung ist allerdings nicht immer sinnvoll

# 1.2 Quantisierung und Quantenmechanik

Quantisierte Zustände kann man als stehende (Materie)-Wellen auffassen, sie entstehen unter kohärenten Bedingungen

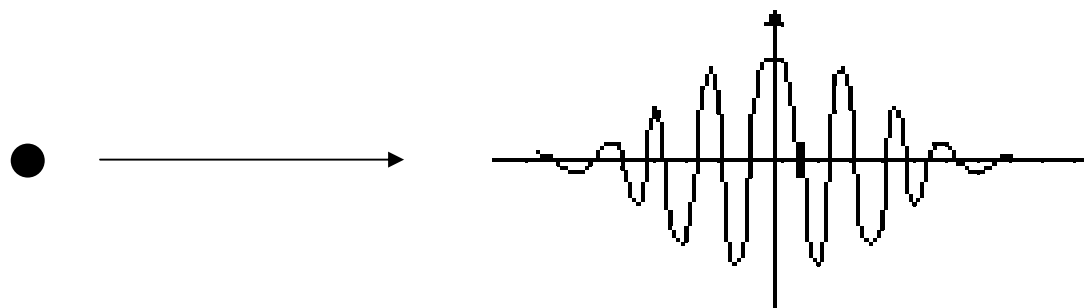
De Broglie-Wellenlänge eines Teilchens:

$$\lambda = \frac{h}{mv}$$

Mit Impuls  $p = mv = \hbar k$

und Wellenvektor  $k$

sowie der Energie  $E = (\hbar k)^2 / 2m$



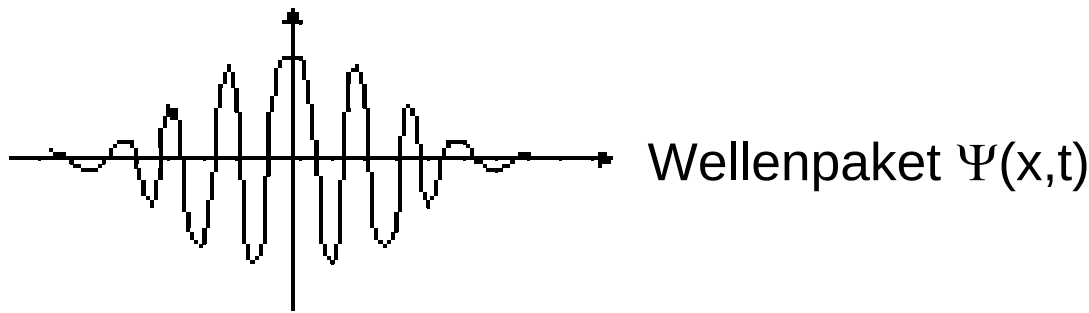
Massepunkt

Wellenpaket  $\Psi(x,t)$

# 1.2 Quantisierung und Quantenmechanik

Ebene Welle:  $\tilde{\psi}(x, t) = \psi_0 e^{j(kx - \omega t)}$

Wahrscheinlichkeitsamplitude  $|\tilde{\psi}(x, t)|^2$



Überlagerung mehrerer ebener  
Wellen beschreibt ein Wellenpaket

$$\tilde{\psi}(x, t) = \int dk \cdot a(k) e^{j(kx - \omega t)}$$

Z.B. mit einer Gaußschen Einhüllenden  $a(k) = e^{-\left(\frac{k - k_0}{2\Delta k}\right)^2}$

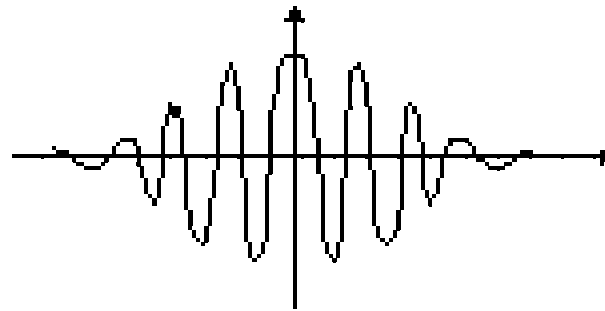
# 1.2 Quantisierung und Quantenmechanik

Ein Wellenpaket hat eine räumliche Ausdehnung und eine zugehörige Breite von Wellenvektoren  $k$ .

Damit lässt sich der Wellencharakter und der Teilchencharakter gemeinsam beschreiben.

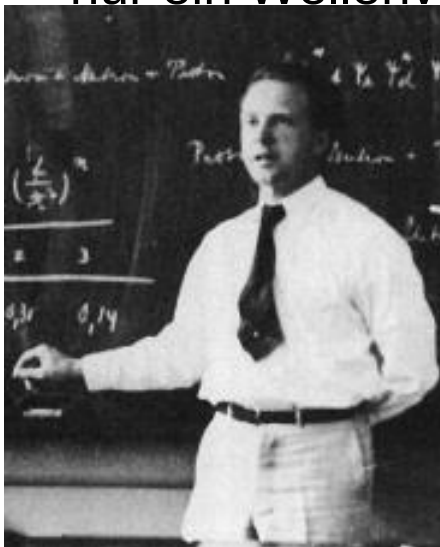
## Extremfall ebene Welle

- nur Wellencharakter
- unendlich ausgedehnt
- nur ein Wellenvektor



## Extremfall Puls

- nur Teilchencharakter
- räumlich lokalisiert
- alle Wellenvektoren



$$\Delta x \cdot \Delta k > 1 \Leftrightarrow \Delta x \cdot \Delta p_x > \hbar$$

**Heisenbergsche Unschärferelation**

# 1.2 Quantisierung und Quantenmechanik

**Welche Materiewellen existieren in einem gegebenen Potenzial  $V(x,t)$ ?**

Erinnerung:

Wellengleichung für Materiewellen ist die Schrödingergleichung

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \Delta \tilde{\psi}(x,t) + V(x,t) \cdot \tilde{\psi}(x,t) = j\hbar \frac{\partial \tilde{\psi}(x,t)}{\partial t}$$

Die Energie von quantisierten Zuständen (keine Zeitabhängigkeit) erhält man aus der zeitunabhängigen Schrödingergleichung:

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \Delta \psi(x) + V(x) \cdot \psi(x) = E \cdot \psi(x)$$

$$\text{mit } \tilde{\psi}(x,t) = \psi(x) e^{-j\omega t} \quad \text{und} \quad \omega = \frac{E}{\hbar}$$

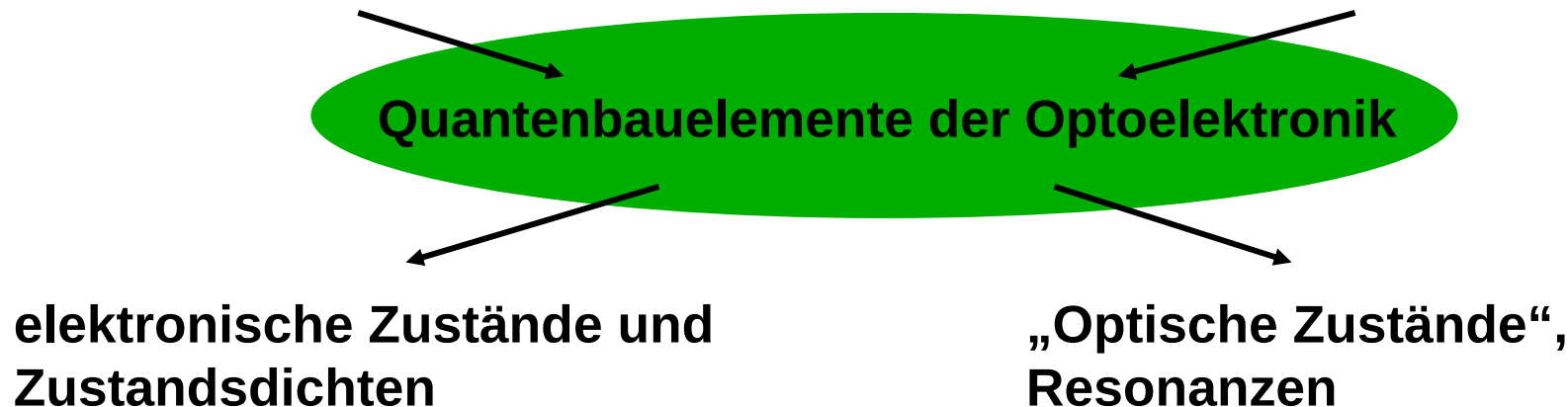
# 1.2 Quantisierung und Quantenmechanik

## Regime für Ladungstransport

- Diffusiv, aber (phasen)kohärent
- Ballistisch
- Quantisierung
- Tunneln

## Regime für Lichtpropagation

- Kohärentes Licht, Interferenz
- Freistrahloptik, ebene Wellen
- Cavity, Fabry-Perot etc.
- Tunneln, evaneszentes Licht



**Vorsicht: Statistik (Boson/Fermion) und Wechselwirkung ist völlig anders**

# 1.2 Quantisierung und Quantenmechanik

---

**Beliebte, aber falsche übliche Behauptungen zum Auftreten von quantisierten Zuständen:**

- De Broglie-Wellenlänge muss so groß sein wie die Abmessungen der Probe/ des Systems
- Streuung zerstört Kohärenz
- Abmessungen müssen kleiner sein als die mittlere freie Weglänge

**FALSCH!!!**

**Gegenbeispiele:**

- Supraleiter, Josephson-Effekt (Nobelpreis 1973)
- Quanten-Hall-Effekt (Nobelpreise 1985 und 1998)
- Aharonov-Bohm-Effekt (in großen Ringen)
- Dauerströme in normalleitenden Ringen

# 1.2 Quantisierung und Quantenmechanik

---

**Quantenmechanik war nützlich, um natürliche Vorgänge zu verstehen:**

- Atomspektren
- Radioaktivität
- Halbleiter

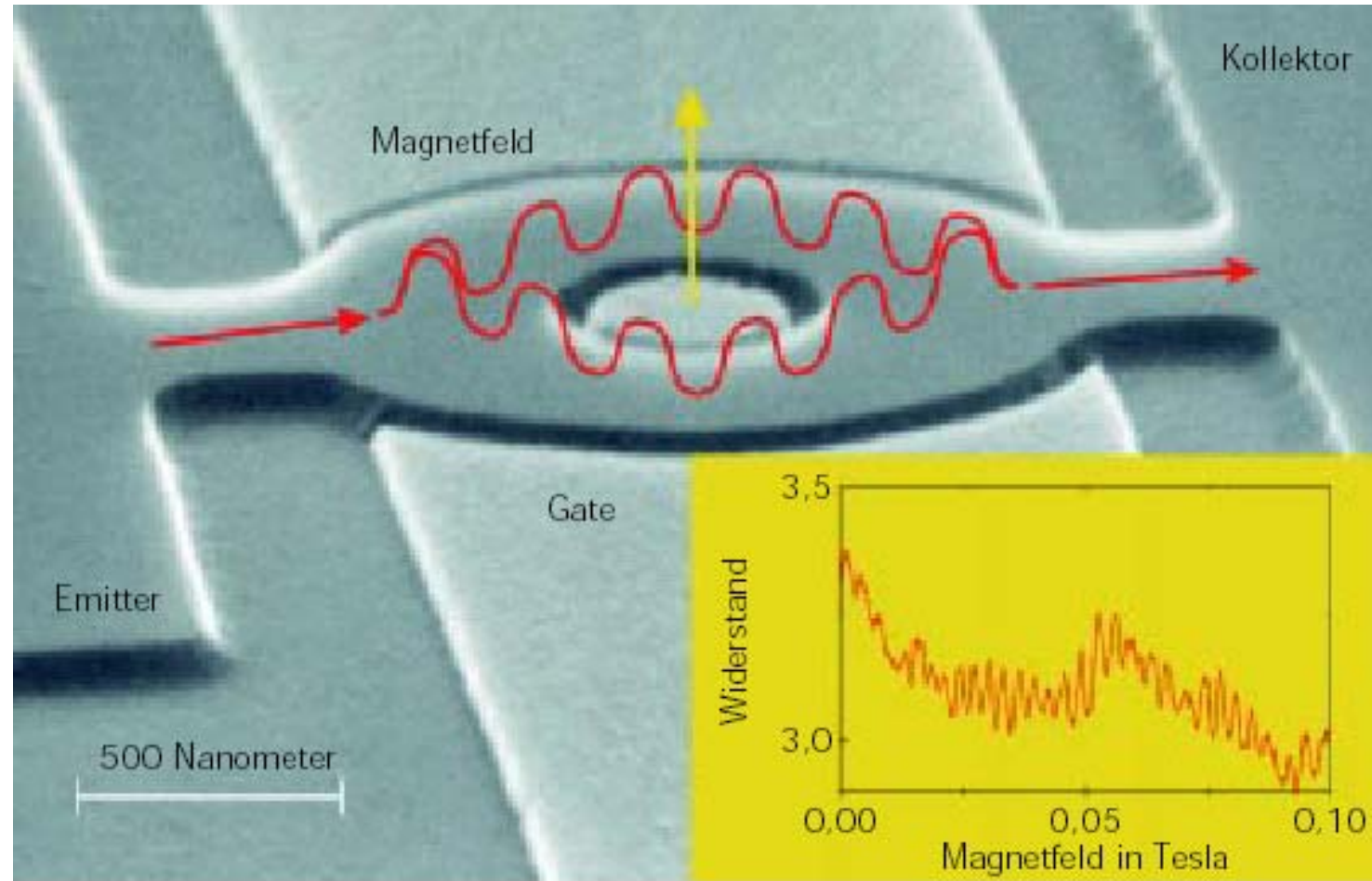
**Quantenmechanik ist nützlich, um künstlich eine Umgebung herzustellen und neue Effekte zu erhalten:**

- Halbleiter-Heterostrukturen
- Nanotechnologie
- ...

Nobelpreis 2000: "for developing semiconductor heterostructures used in high-speed- and opto-electronics" an Zhores Alferov und Herb Kroemer

# 1.2 Quantisierung und Quantenmechanik

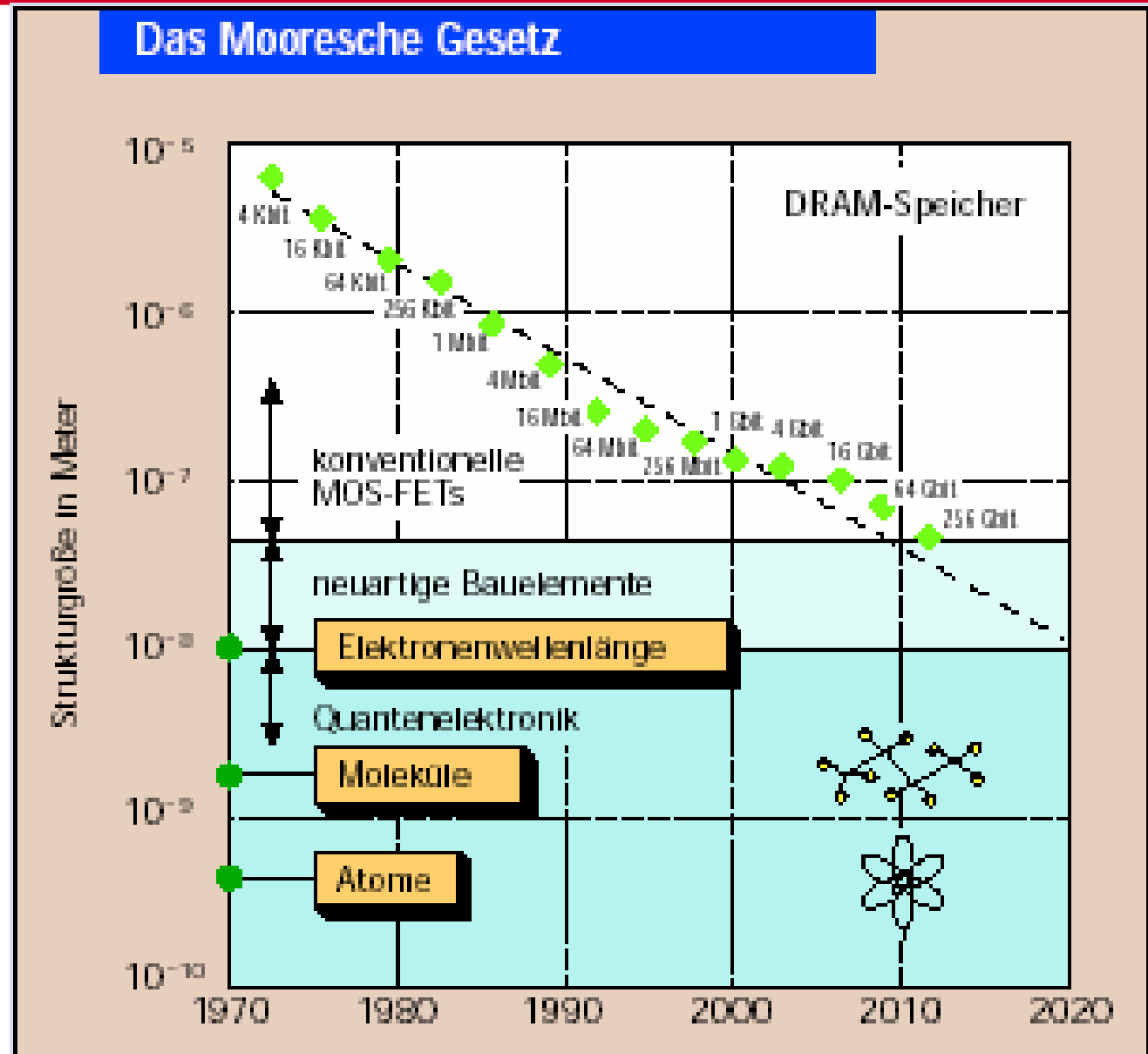
Beispiel für ein Bauelement, das mit stehenden Elektronenwellen funktioniert



Ein Aharonov-Bohm-Ring aus einer Aluminiumgalliumarsenid/Galliumarsenid-Heterostruktur. Über die beiden Kontakte der Steuerelektrode (Gate) wird die Elektronenwellenlänge verändert (schematisch wurden Wellen in beiden Ringhälften eingezeichnet). Der Graph rechts unten zeigt die Widerstandsoszillationen, wenn ein Magnetfeld senkrecht zum Ring angelegt wird.

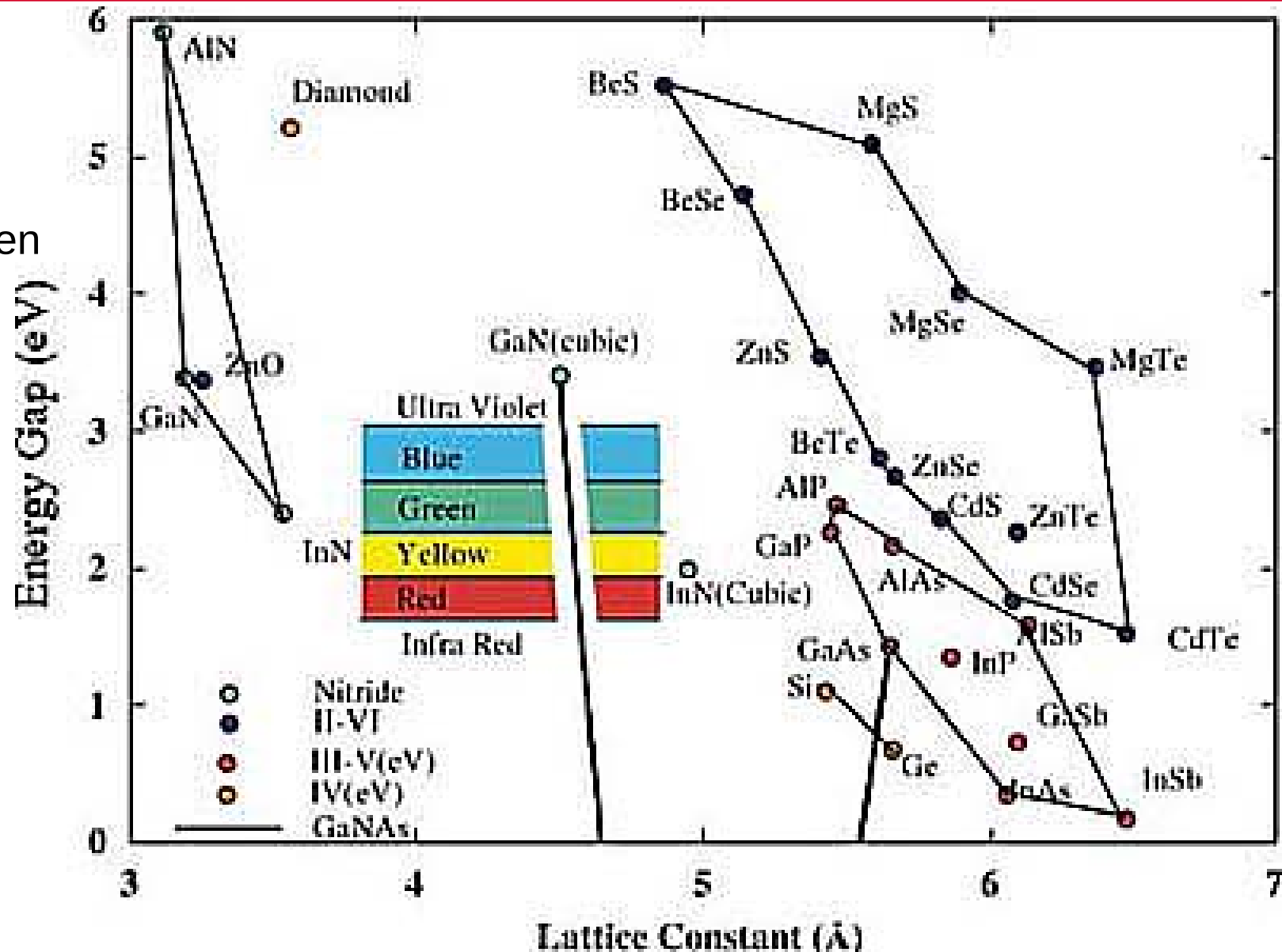
# 1.2 Quantisierung und Quantenmechanik

Zeitliche  
Entwicklung und  
Vergleich von  
Quanten-  
bauelementen  
und klassischen  
Bauelementen



# 1.2 Quantisierung und Quantenmechanik

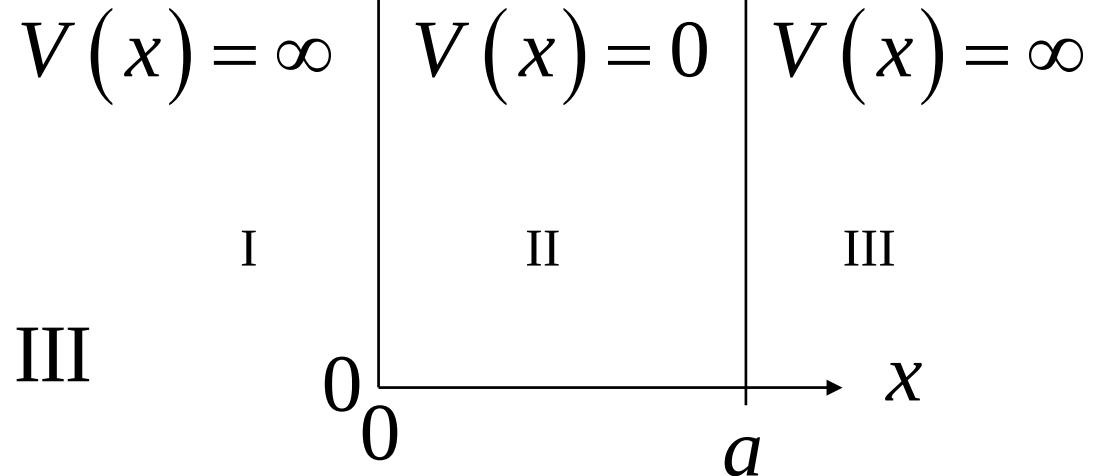
Künstliche  
Quantisierung  
mit Halbleiter-  
Heterostrukturen



# 1.2 Quantisierung und Quantenmechanik

Welche Quantisierungsenergien treten auf?

Der unendlich hohe  
Potentialtopf



$\psi(x) = 0$  im Bereich I und III

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \Delta \psi(x) + V(x) \cdot \psi(x) = E \cdot \psi(x)$$

$$-\frac{\hbar}{2m} \frac{\partial^2 \psi(x)}{\partial x^2} = E \psi(x) \text{ im Bereich II}$$

# 1.2 Quantisierung und Quantenmechanik

Wir suchen nach einer stehenden Welle und wählen als Ansatz für die DGL:

$$\psi(x) = Ae^{j(kx-\omega t)} + Be^{-j(kx+\omega t)}$$

Wie kommt man an die Parameter A und B?

Stetigkeit der Wellenfunktion muss gegeben sein:

$$\psi_I(0) = \psi_{II}(0) = 0 \Rightarrow A = -B$$

$$\psi_{II}(a) = \psi_{III}(a) = 0 \stackrel{asa}{\Rightarrow} ka = n \cdot \pi \text{ mit } n = 1, 2, 3, \dots$$

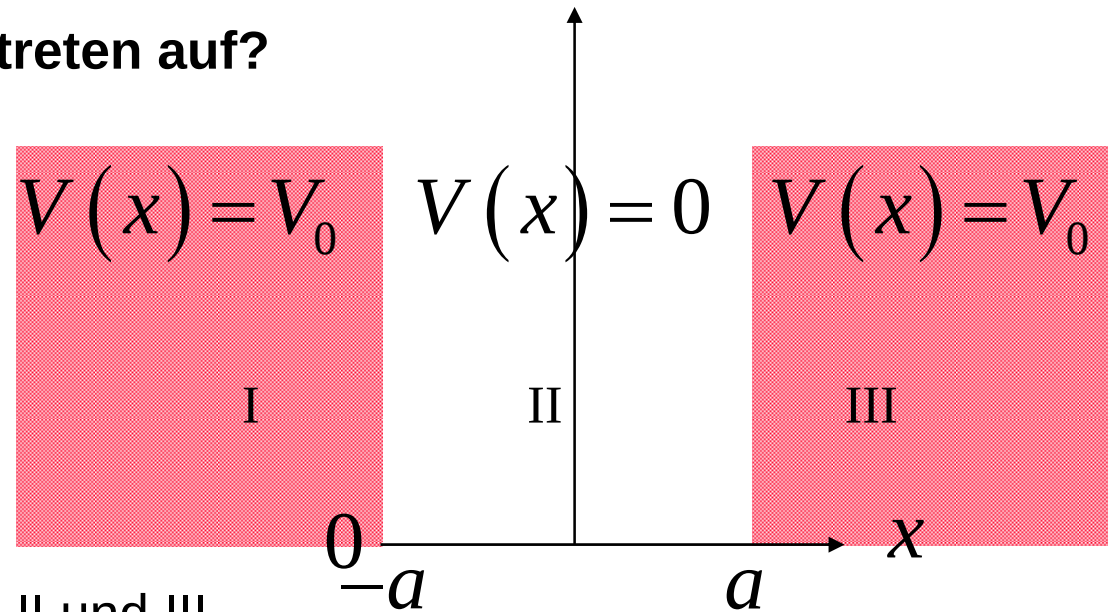
$$\Rightarrow E_n = \frac{n^2 \hbar^2 \pi^2}{2ma^2}$$

# 1.2 Quantisierung und Quantenmechanik

Welche Quantisierungsenergien treten auf?

Der endlich hohe  
Potentialtopf

„Confinement“



- Lösen der DGL in Bereichen I, II und III

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \Delta \psi(x) + V(x) \cdot \psi(x) = E \cdot \psi(x)$$

- Bestimmung der freien Parameter aus Stetigkeitsbedingungen
- Numerisches Berechnen der Lösungen der Gleichungen vom Typ

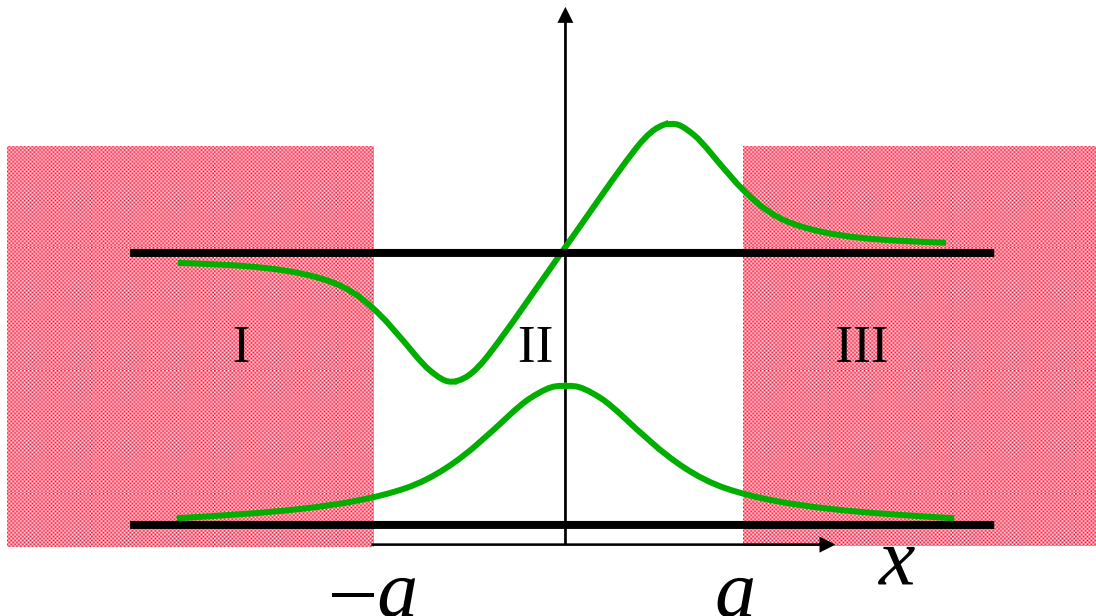
$$k \cdot \tan ka = \kappa \quad \text{und} \quad \eta = \xi \tan \xi \quad \wedge \quad \eta = -\xi \cot \xi$$

$$\text{mit } \kappa^2 = \frac{2m}{\hbar^2} E$$

# 1.2 Quantisierung und Quantenmechanik

Die Wellenfunktionen haben die Form

$$\psi_g(x) = \begin{cases} \exp(\kappa x) & \text{für I} \\ \frac{\exp(-\kappa a)}{\cos \kappa a} \cos kx & \text{für II} \\ \exp(-\kappa x) & \text{für III} \end{cases} \quad \psi_u(x) = \begin{cases} \exp(\kappa x) & \text{für I} \\ \frac{-\exp(-\kappa a)}{\sin \kappa a} \sin kx & \text{für II} \\ -\exp(-\kappa x) & \text{für III} \end{cases}$$



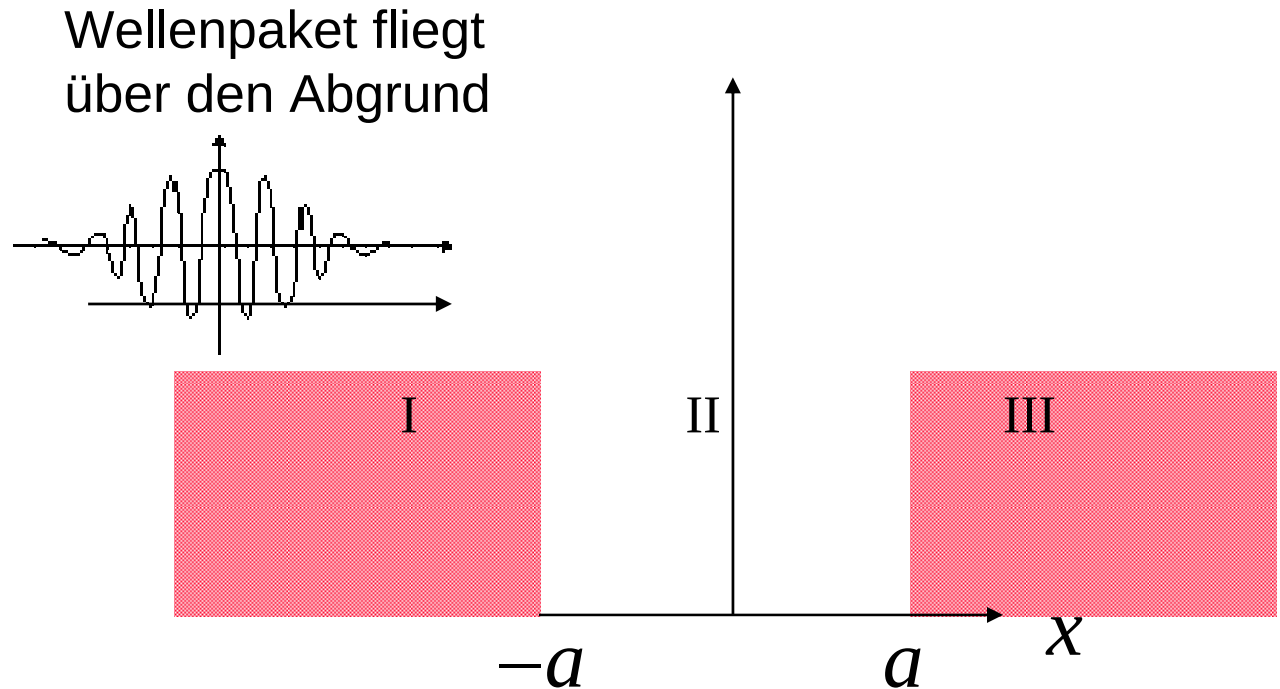
Immer noch stehende Materiewellen (aber mit wackelig festgemachten Enden)

- Evaneszente Felder
- Wie beim Goos-Hänchen-Shift
- Effektive Modendurchmesser

# 1.3 Tunneln und Streuung

## Streuzustände

Was passiert oberhalb von  $V_0$ ?

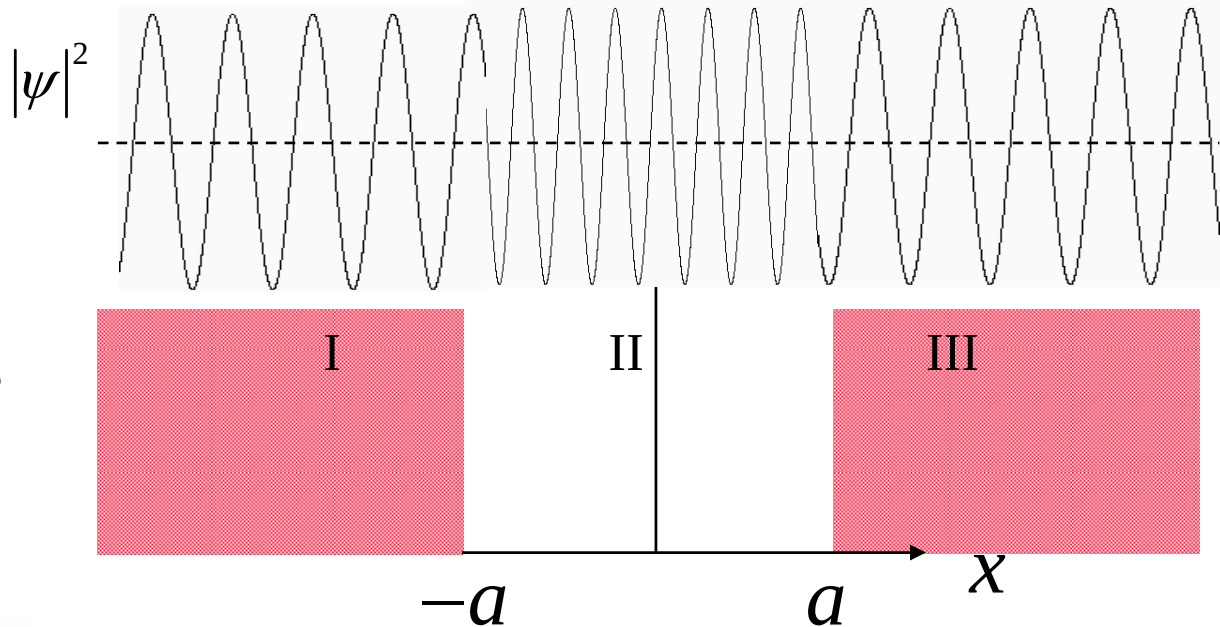


- Reflexion bei  $-a$  und bei  $a$  ist möglich
- Ausbreitung bei Energien oberhalb von  $V_0$  ist beeinflusst
- Transmissionswahrscheinlichkeit hängt von der Energie und der Breite des Topfes ab, es gibt Resonanzen

# 1.3 Tunneln und Streuung

## Ebene Welle

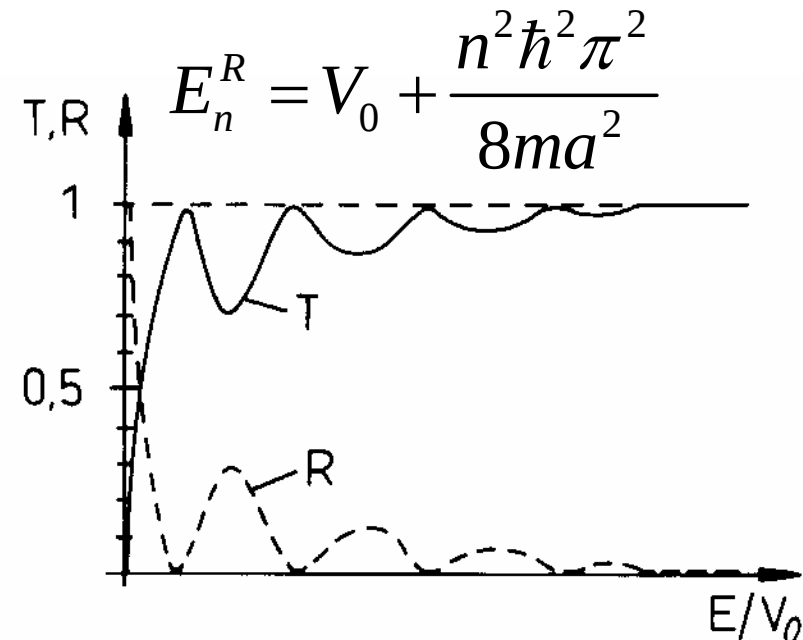
Anschaulich: Energie über dem Abgrund in II ist höher, damit ist auch die de Broglie Wellenlänge kleiner



Rückreflektierte Wellen von  $-a$  und  $a$  interferieren bei passendem Gangunterschied (mit Phasensprung)

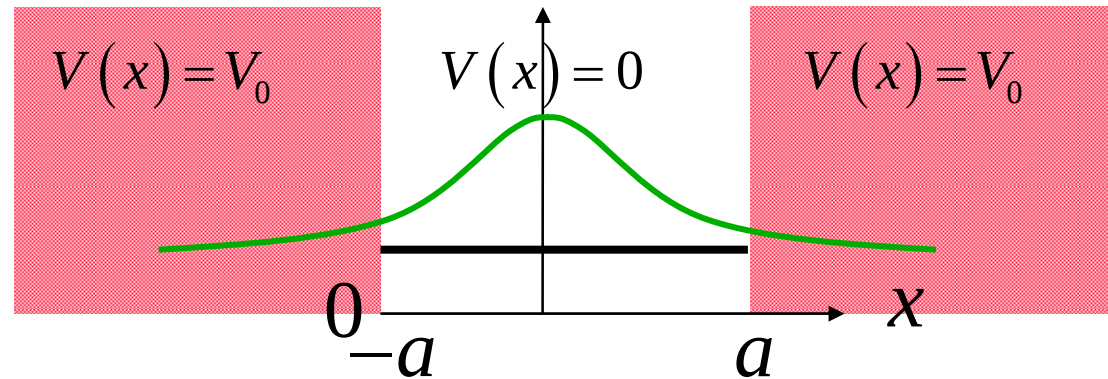
$$2ka = (2n + 1) \frac{\pi}{2}$$

- Wie beim unendlich hohen Potenzialtopf
- Wie bei Fabry-Perot Resonanzen

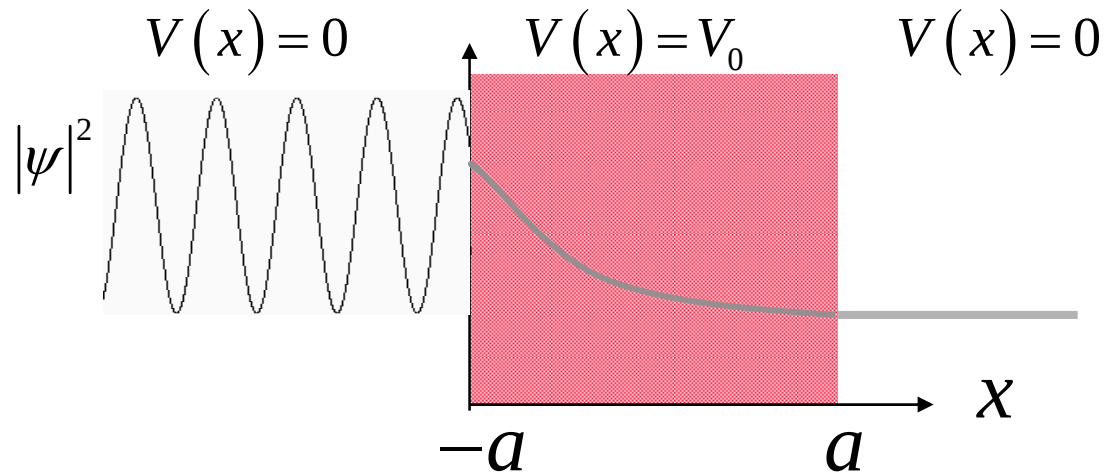


# 1.3 Tunneln und Streuung

**Gebundene Zustände  
im Potentialtopf**



**Streuung am Potenzialwall**

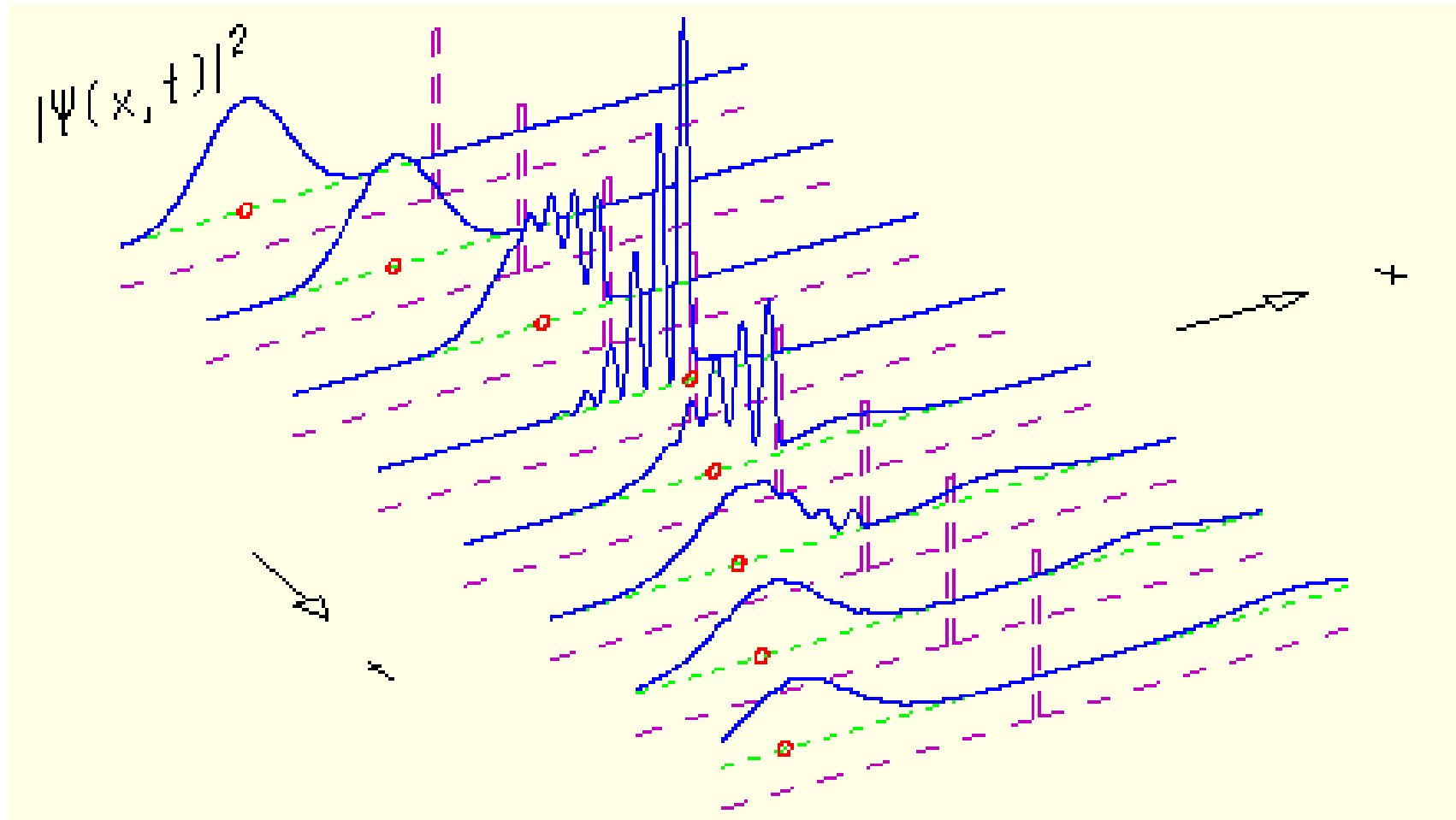


Der Tunneleffekt

$$T(E) \approx \frac{16E(V_0 - E)}{V_0^2} \exp\left(-\frac{4}{\hbar} \sqrt{2m(V_0 - E)}a\right) = 0$$

# 1.3 Tunneln und Streuung

## Streuung an Potenzialwällen



# 1.3 Tunneln und Streuung

## Charakteristische Größen für quantenmechanische Effekte

(ganz grobe Hausnummern für Elektronen in Halbleiterstrukturen bei tiefen Temperaturen)

~10 $\mu$ m Kohärenzlänge



Gebundene Zustände

~1 $\mu$ m Mittlere freie Weglänge



Ballistischer Transport

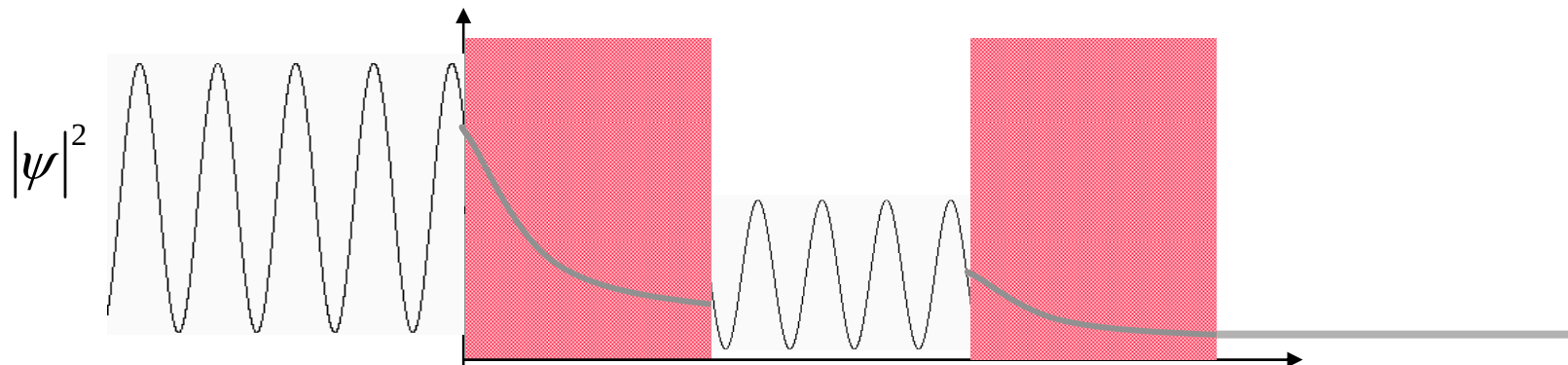
~10nm Dicke einer Tunnelbarriere/  
Abstand von Potenzialtöpfen



Gekoppelte Zustände

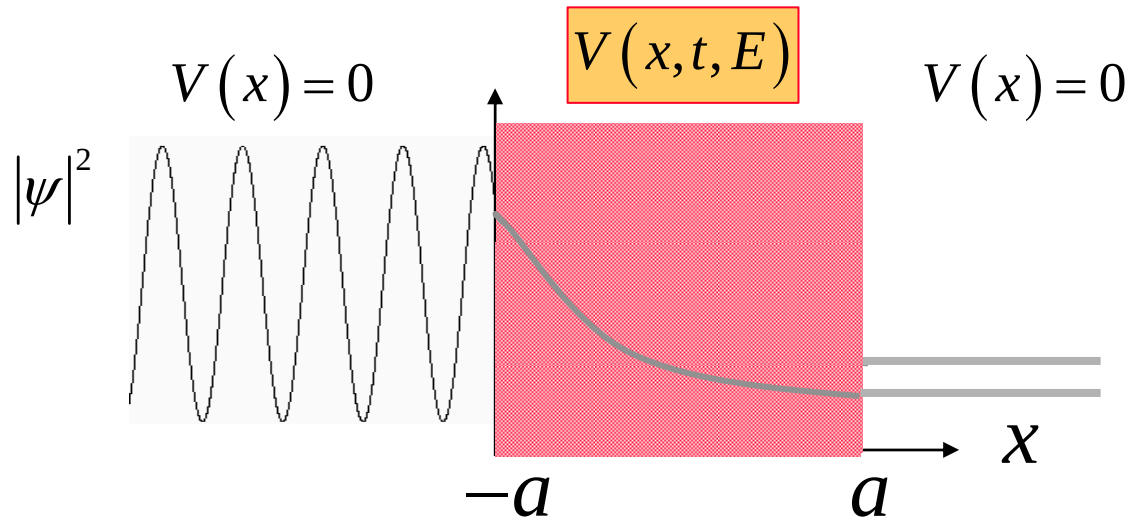
**Körnigkeit von Halbleiter-Heterostrukturen: Gitterabstand 0,5nm**

Doppelbarriere, Bänder in Halbleitern und resonante Tunneldioden



# 1.3 Tunneln und Streuung

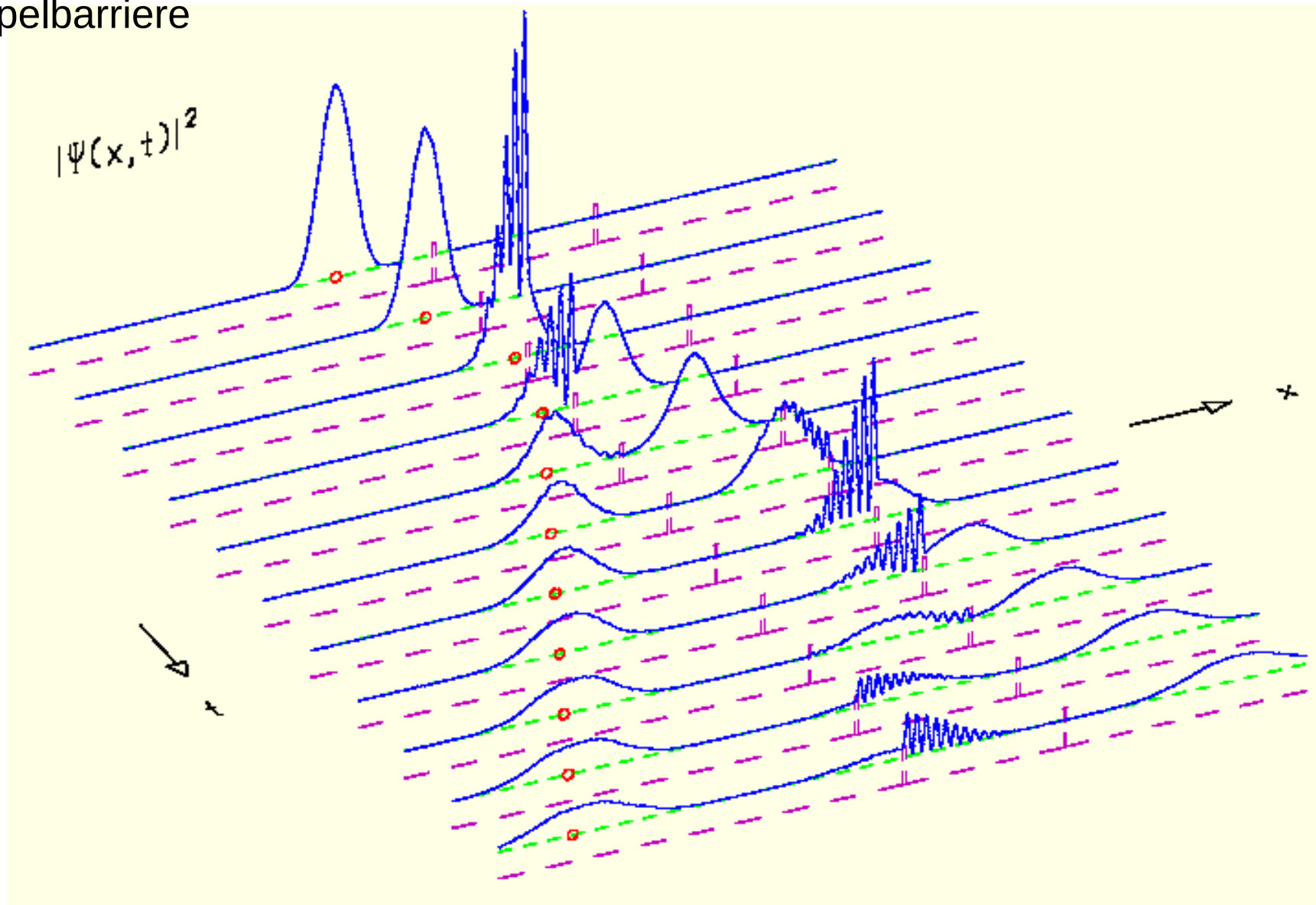
Warum ist das Koppeln von Zuständen interessant?



- Tunneln ist schaltbar (kleine Ursache, große Wirkung – vgl. MOSFET)
- Tunneln kann vom elektrischen Feld abhängen (interessante Kennlinien)
- Kombination von Quantisierung und Steuerung ermöglicht Oszillatoren und Filter

# 1.3 Tunneln und Streuung

Doppelbarriere



# 1.3 Tunneln und Streuung

---

Was kann noch Streuen?

**Streuung von Ladungsträgern bei gegebener Potenzialverteilung  $V(x,t)$ :**

- Keine Dissipation, nur Änderung von Ausbreitungsrichtungen

**Streuung mit Phononen und Ladungsträgern untereinander:**

- Dissipation möglich, Aufheizen des Elektronen- und Phononensystems
- Energetische Relaxation von optisch angeregten Ladungsträgern
- Ausborgen von Impulsen, um andere elektronische Zustände zu erreichen

# 1.4 Nanotechnologie

Wie kann die Quantenmechanik in Bauteilen genutzt werden?

Wie kann man Probleme bei der Realisierung quantenmechanisch verstehen?

**Nanotechnologie und Potenzialtöpfe (idealisiert und tatsächlich)**

Lithographie

Strukturierung

Epitaxie

Selbstorganisation

Laterales Confinement

Elektrostatisch (Gate)

Verspannung (Epitaxie und Schall)

Rauheit

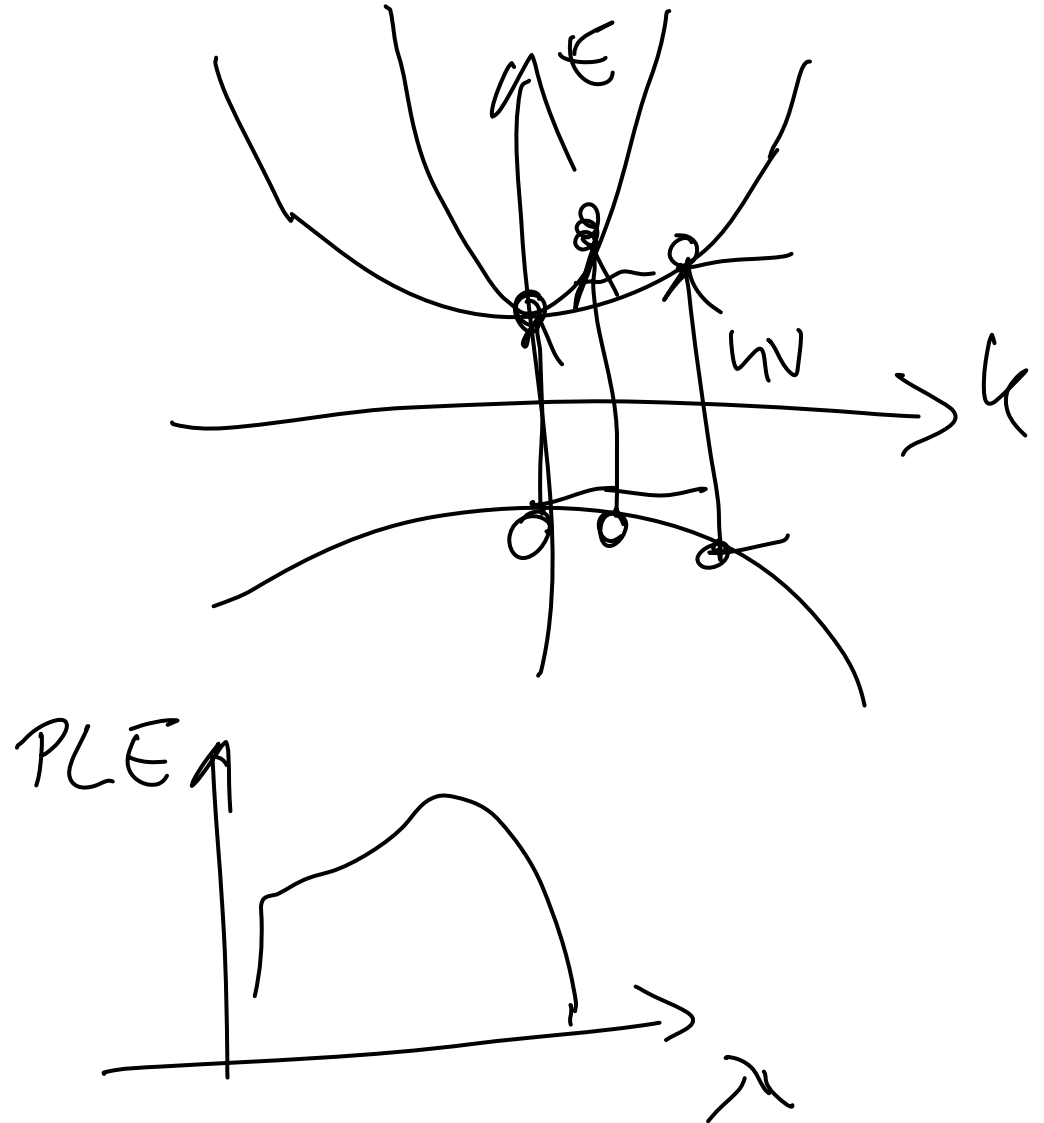
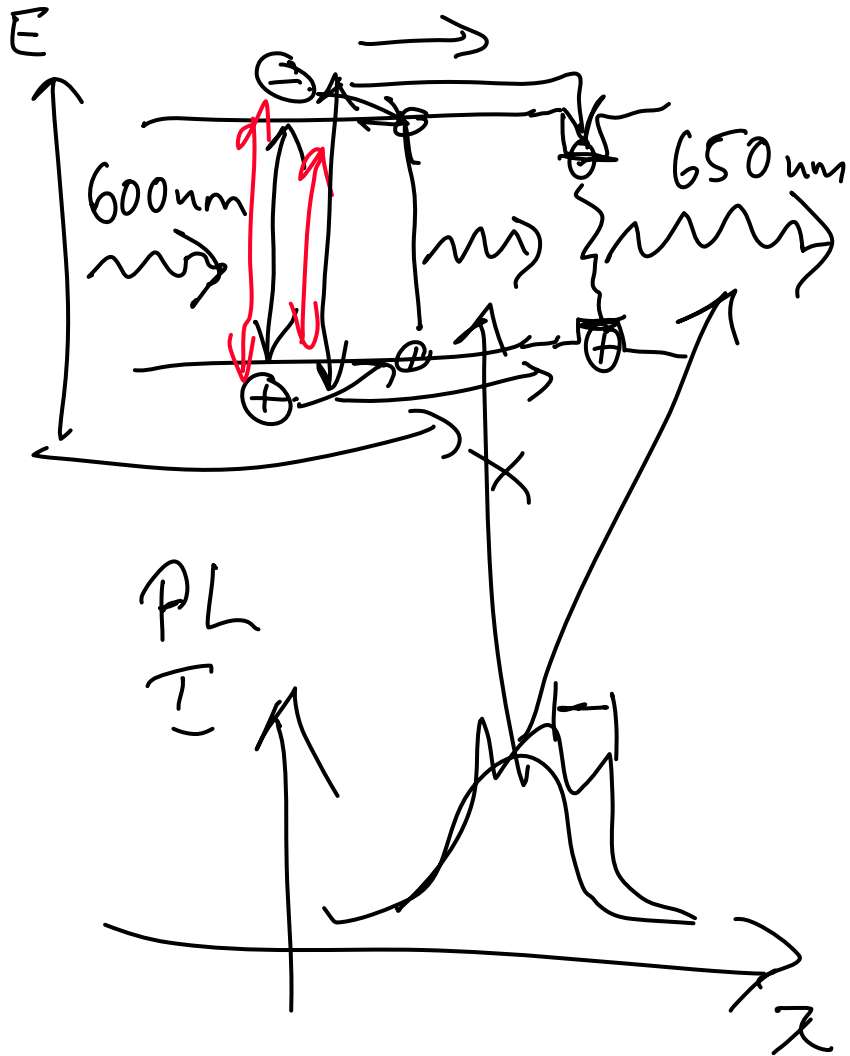
Heterostruktur

Selbstorganisation

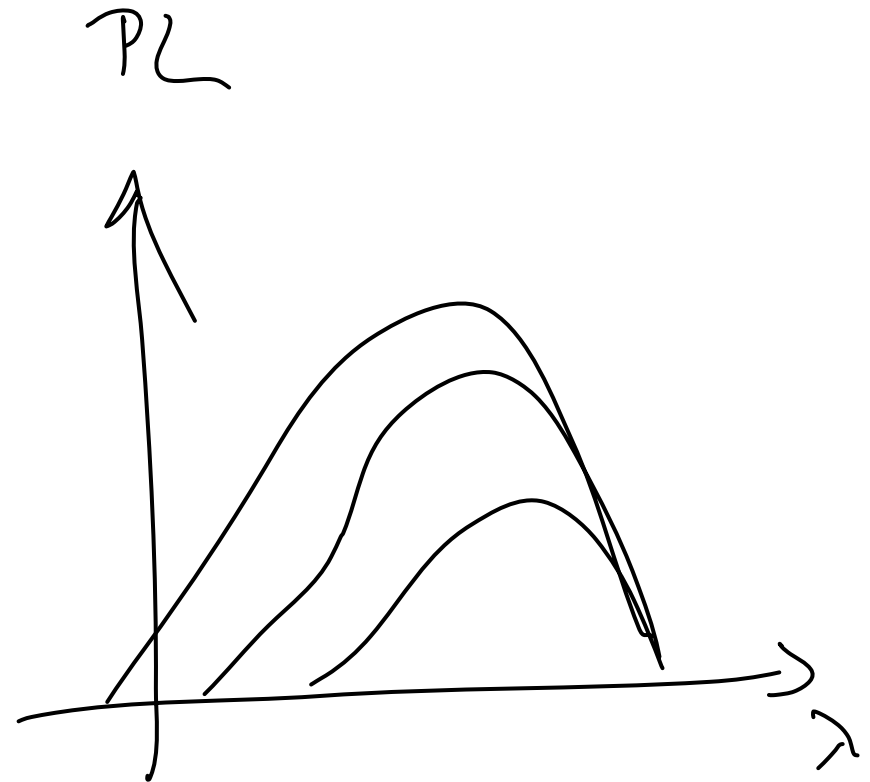
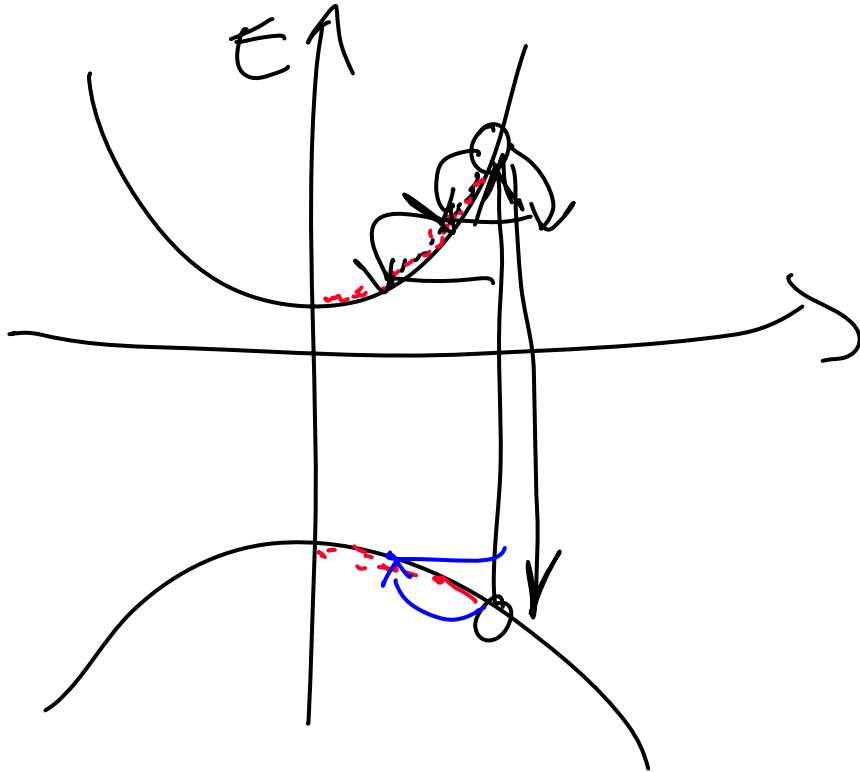
Größenhomogenität

Monolagenfluktuation

# Einschub Relaxation, Rekombination



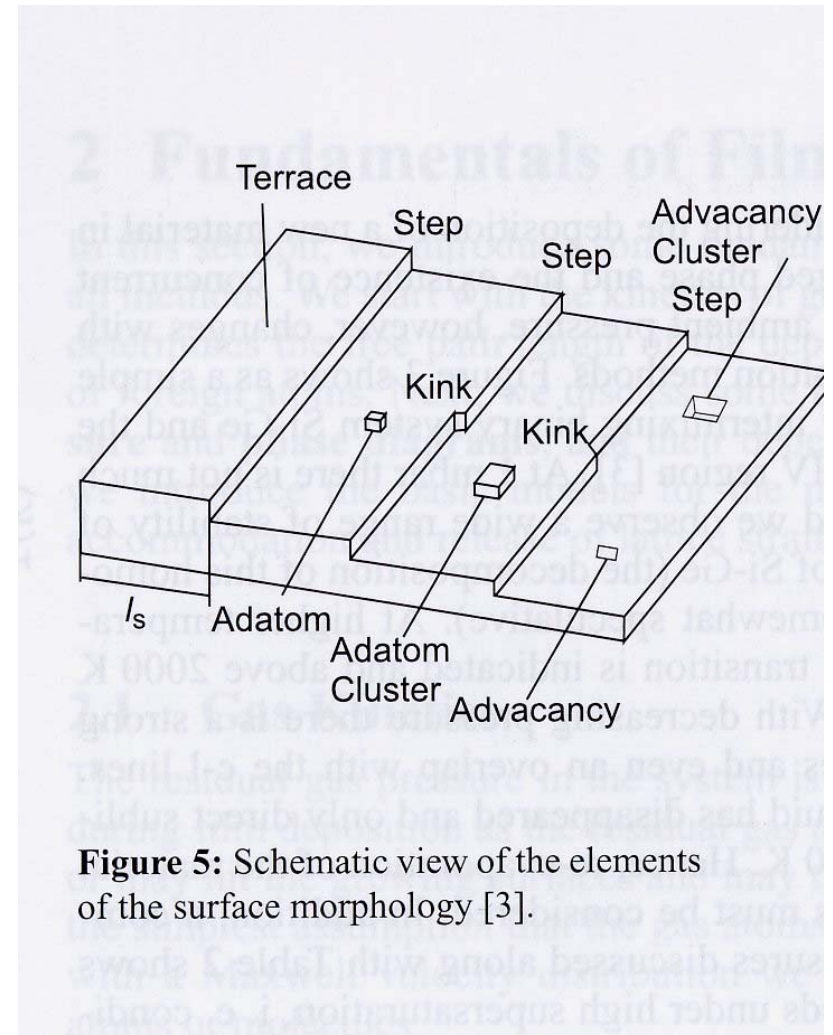
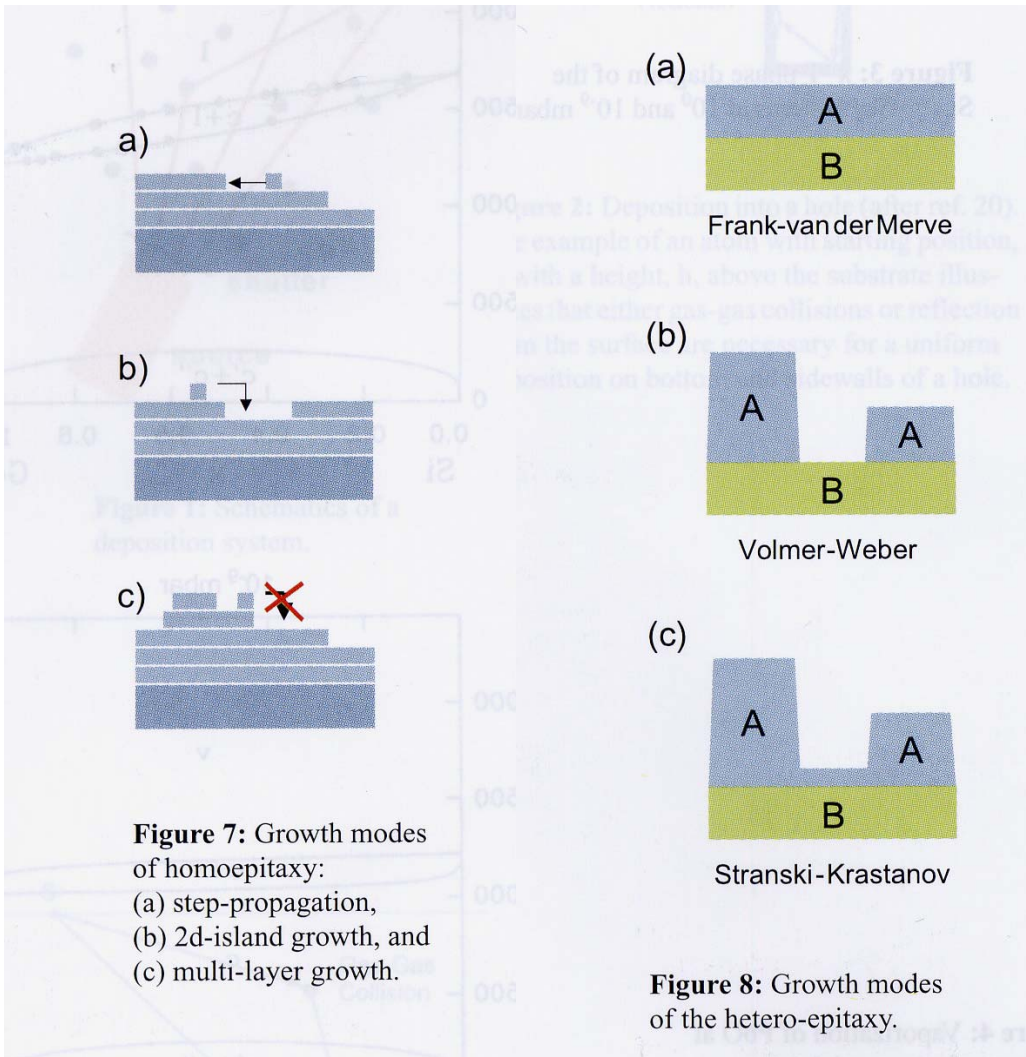
# Einschub Relaxation, Rekombination



# 1.4 Nanotechnology

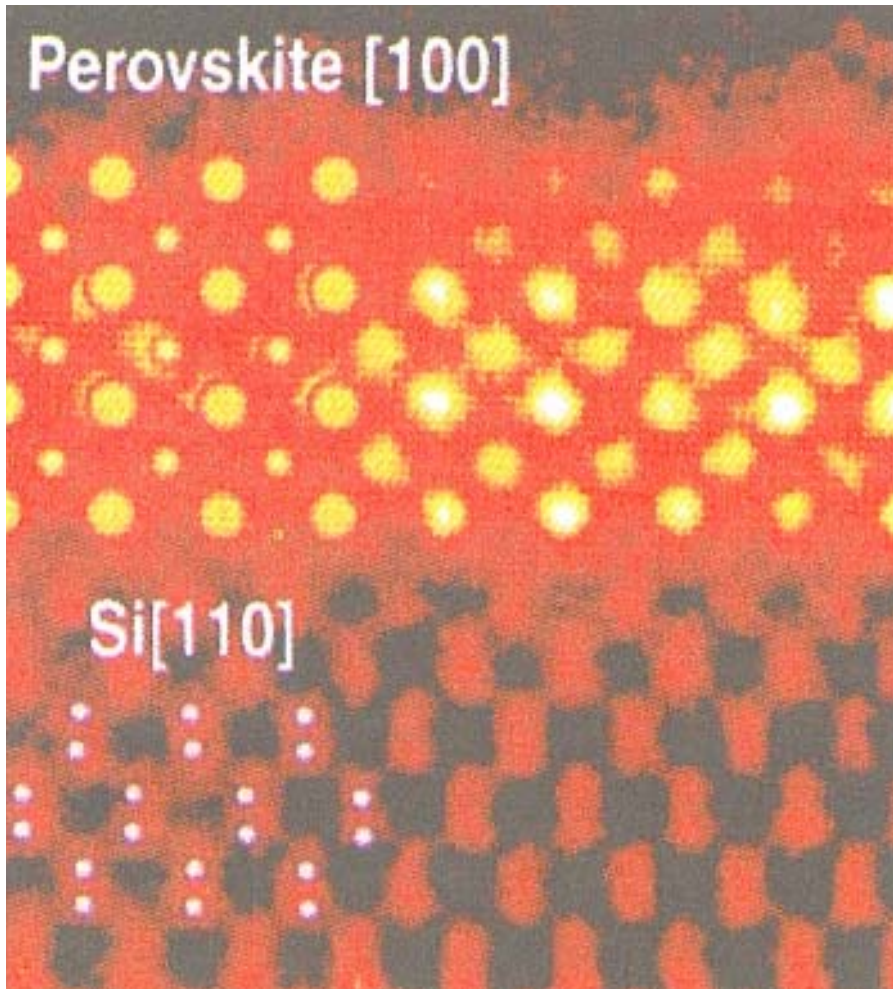
Erinnerung: Epitaxie

Wie wächst eine Heterostruktur



# 1.4 Nanotechnologie

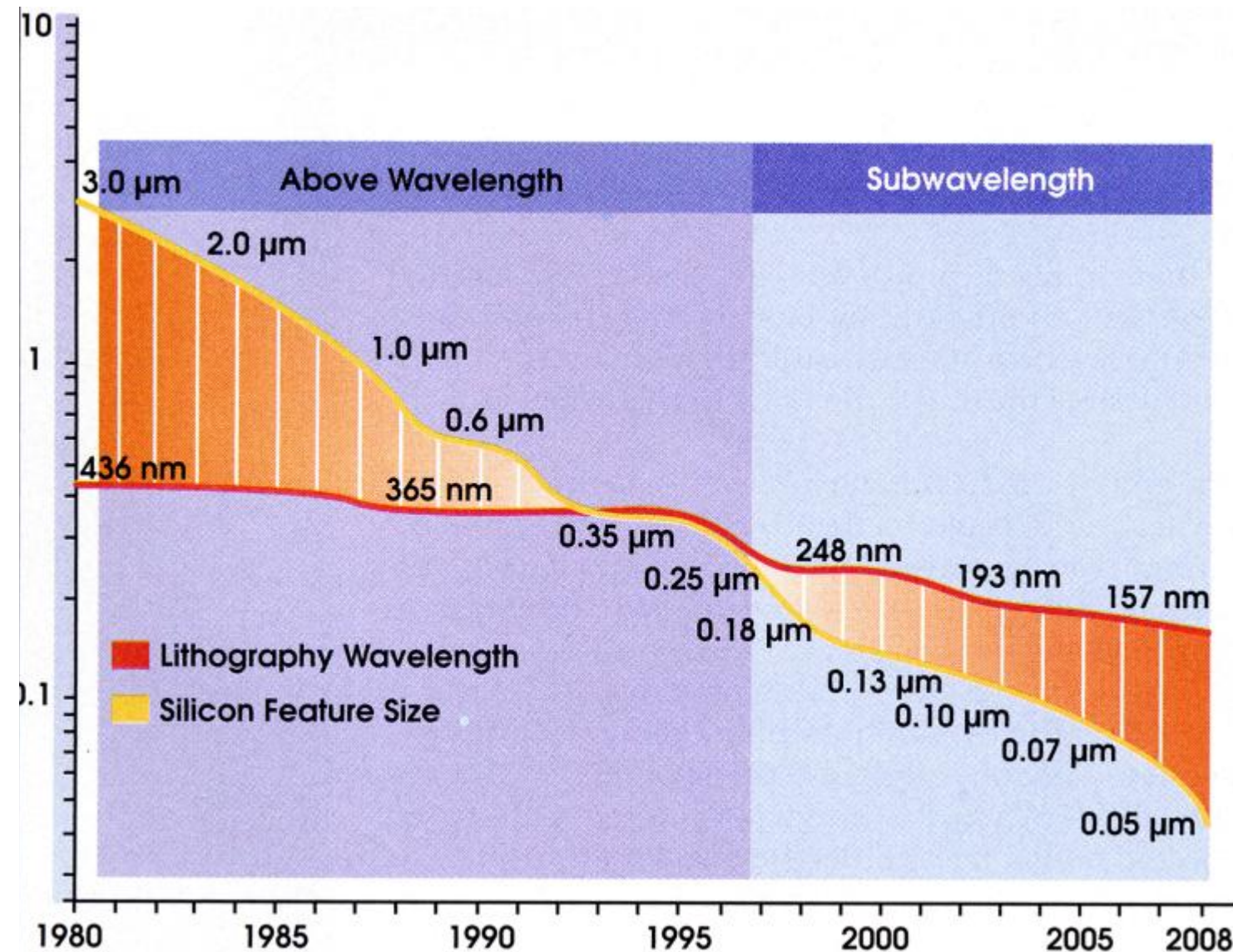
So sehen Grenzflächen zweier Kristallgitter aus



Töpfe und Barrieren überall durch

- Stufen, Löcher und Buckel beim Wachsen
- Legierungsunordnung
- Fremdatome

# 1.4 Nanotechnology

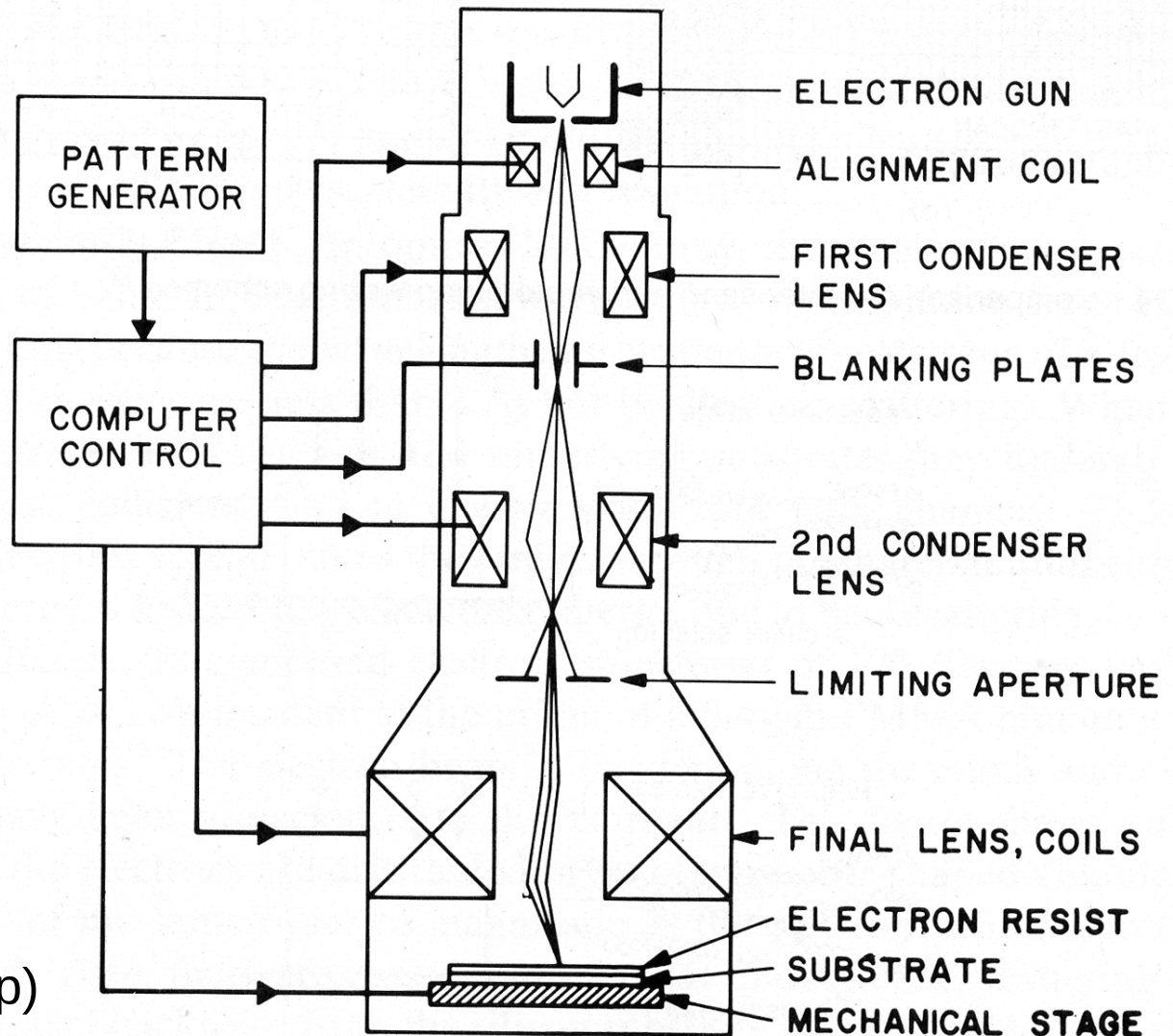


Die mit optischer Litho erreichbaren Strukturgrößen hängen sowohl von der Belichtungswellenlänge als auch vom verwendeten Maskenkonzept ab.

# 1.4 Nanotechnologie

Maskenschreiben mit Elektronenstrahl-Lithographie dauert lange, weil es ein serielles Verfahren ist.

Elektronenstrahl-schreiber  
(oder auch Elektronenmikroskop)

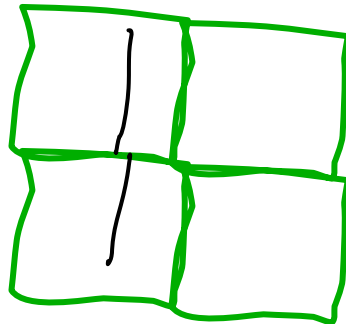
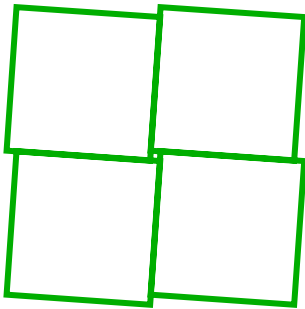


# 1.4 Nanotechnologie



Einzelnes Schreibfeld  
(100 $\mu$ m x 100 $\mu$ m)

Gesamtes Layout  
(bis Pizza-Größe)



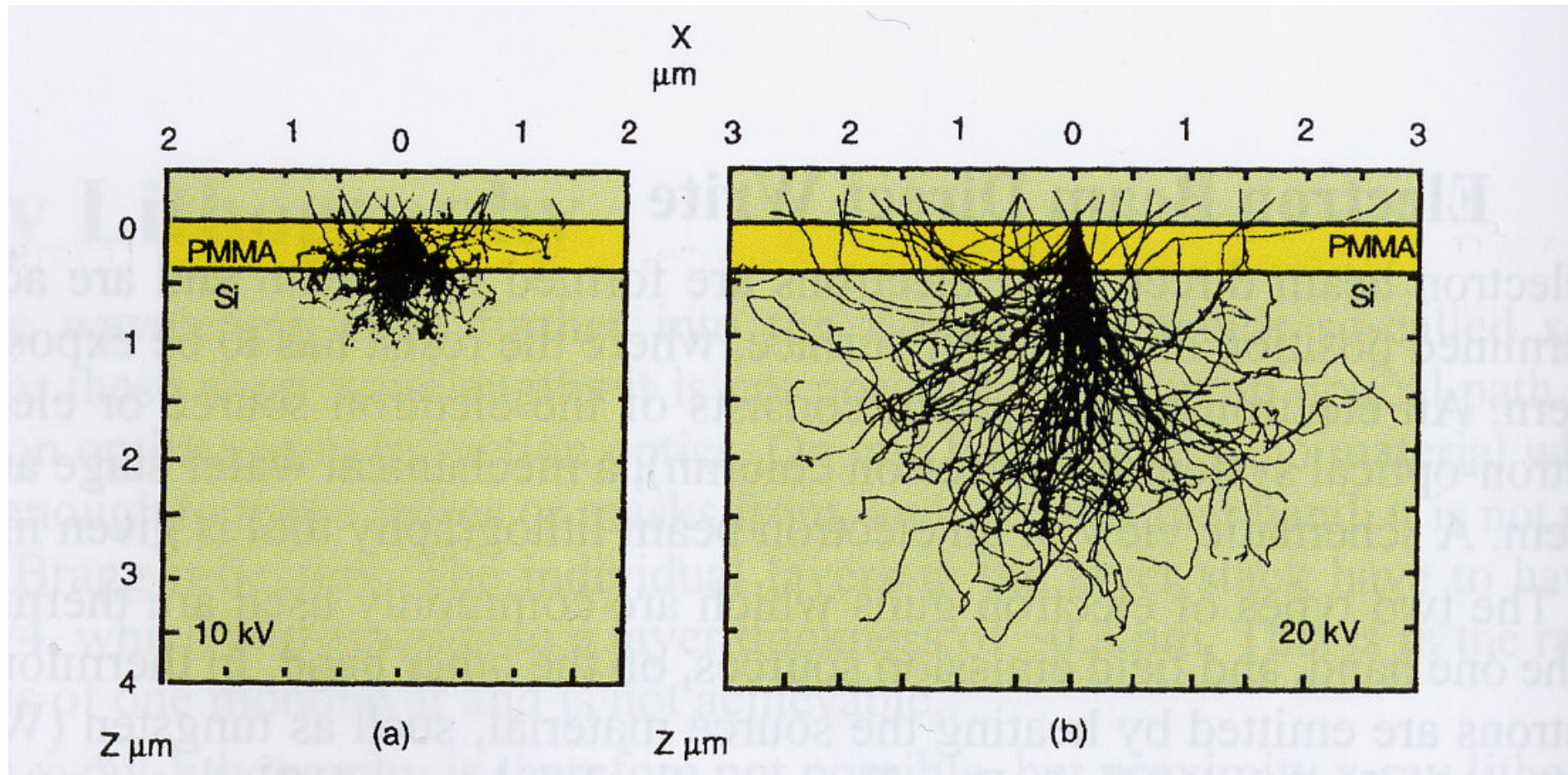
Typische „Patchwork“-Probleme  
(Stichingfehler)!

# 1.4 Nanotechnologie

Limitierend für das Auflösungsvermögen bei Elektronenstrahl-Litho:

~~Die Wellenlänge des Elektrons~~

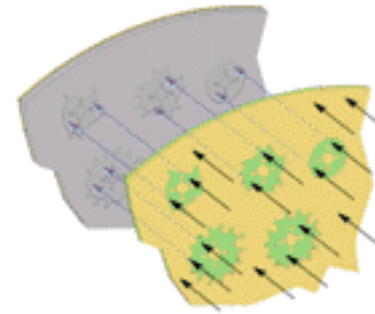
Der Proximity-Effekt



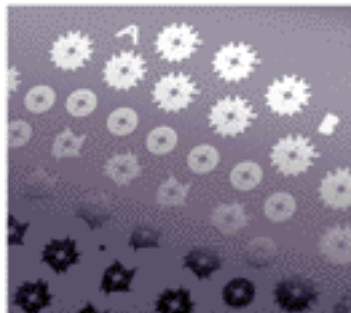
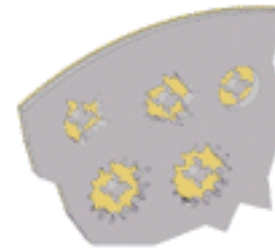
# 1.4 Nanotechnologie

## LIGA (Lithografie Galvanoformung Abformung)

- X-rays from a synchrotron are incident on a mask patterned with high Z absorbers. X-rays are used to expose a pattern in PMMA, normally supported on a metallized substrate.

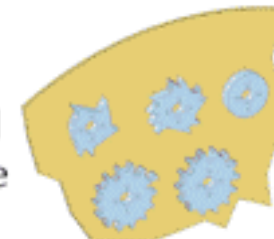
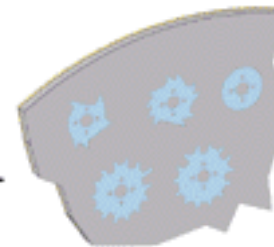


- The PMMA is chemically developed to create a high aspect ratio, parallel wall mold.



photograph of chrome mask

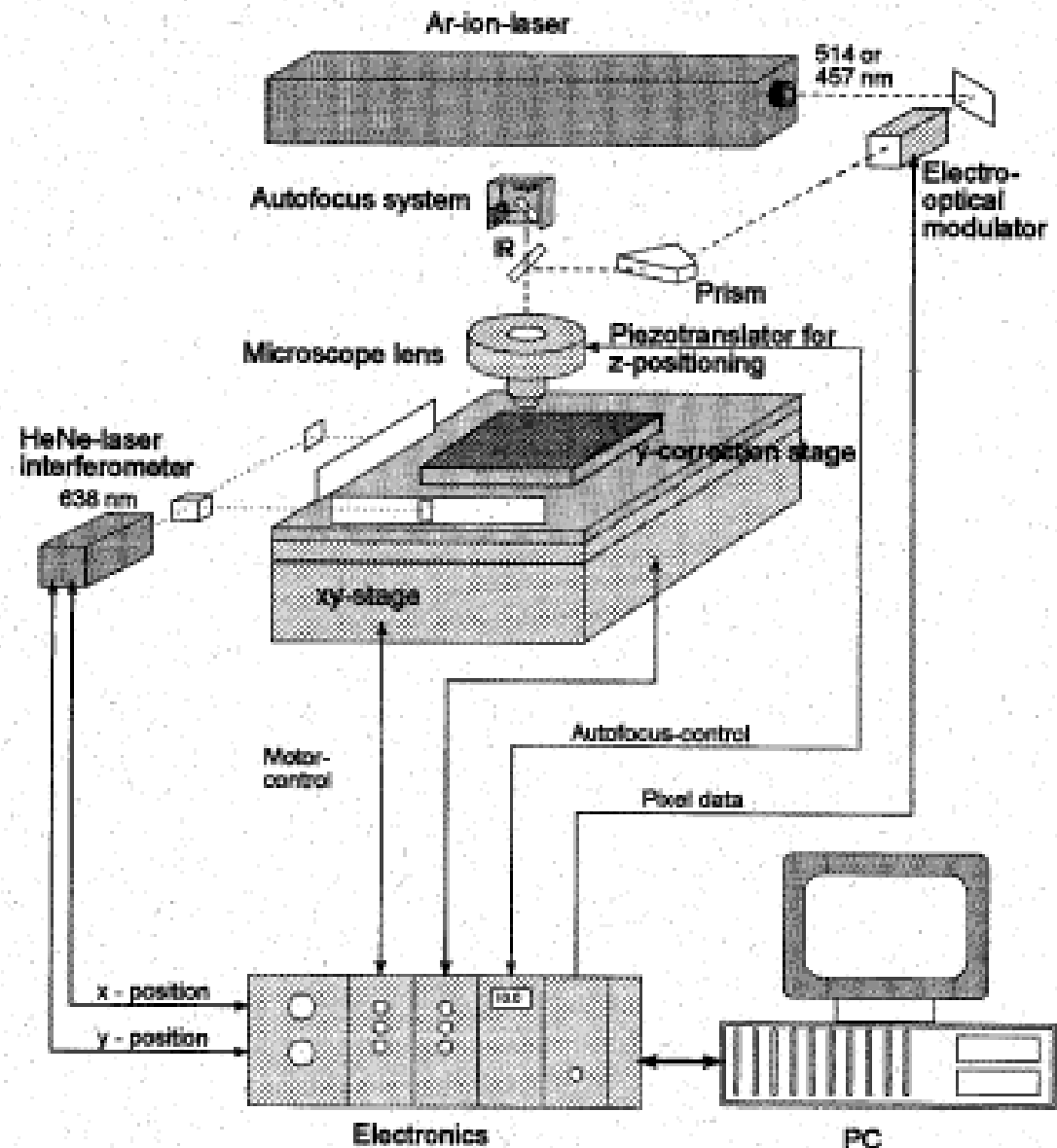
- A metal or alloy is electroplated in the PMMA mold to create a metal micropart.
- The PMMA is dissolved leaving a three dimensional metal micropart. Individual microparts can be separated from the base plate if desired.



# 1.4 Nanotechnology

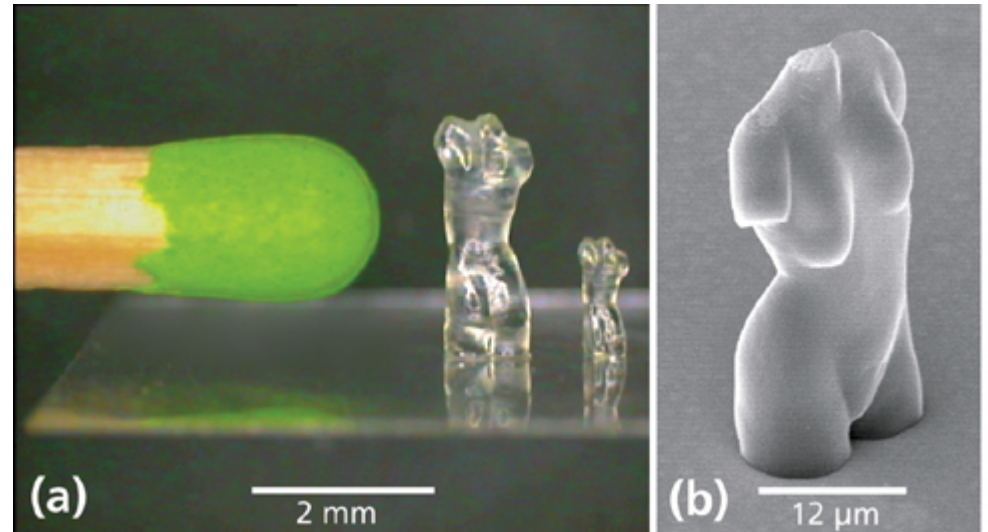
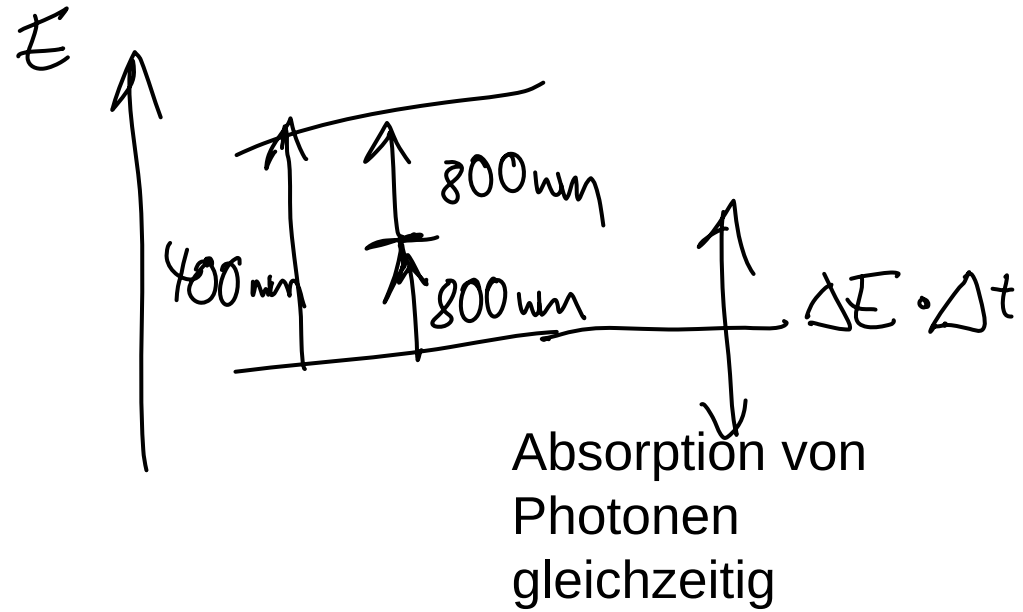
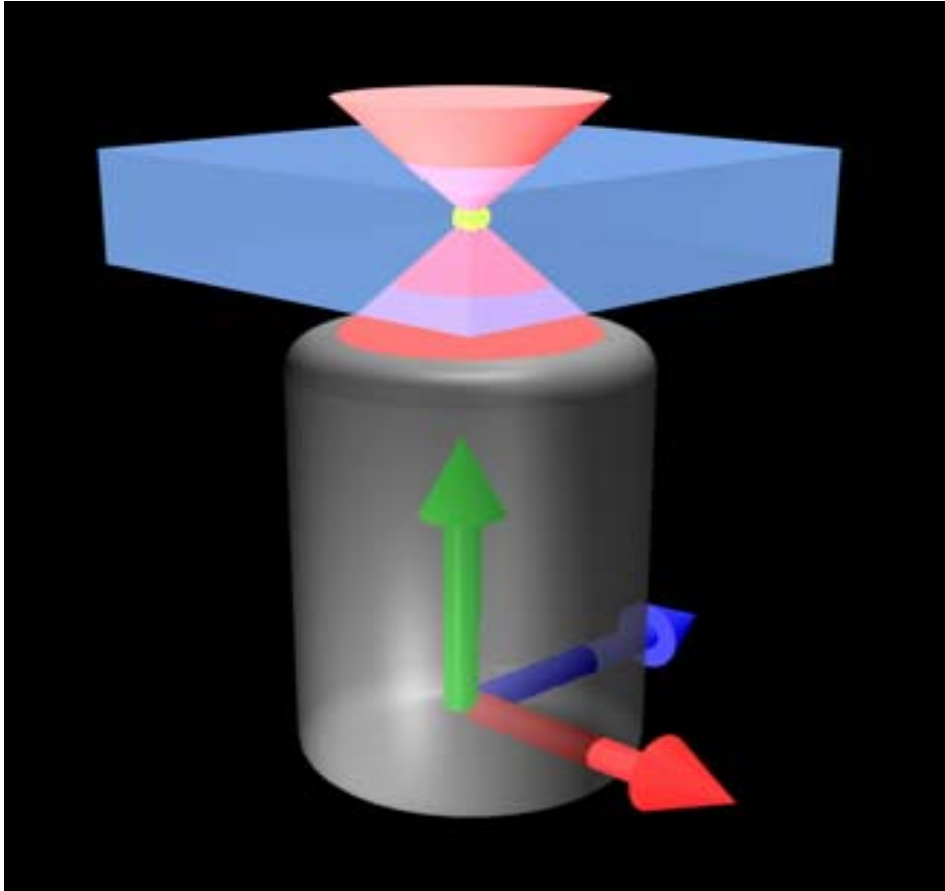
## Laserlithographie

### Serielles Abrastern der Probe



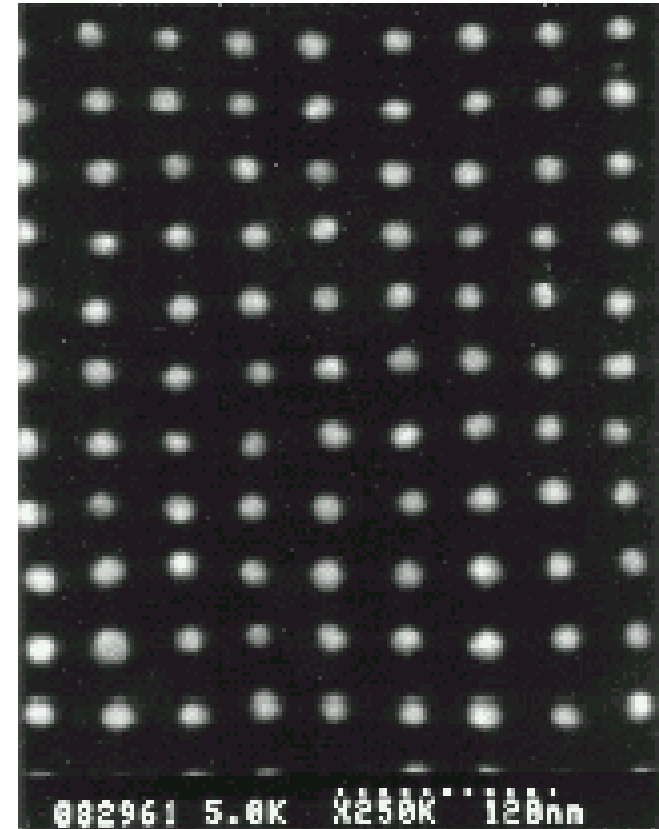
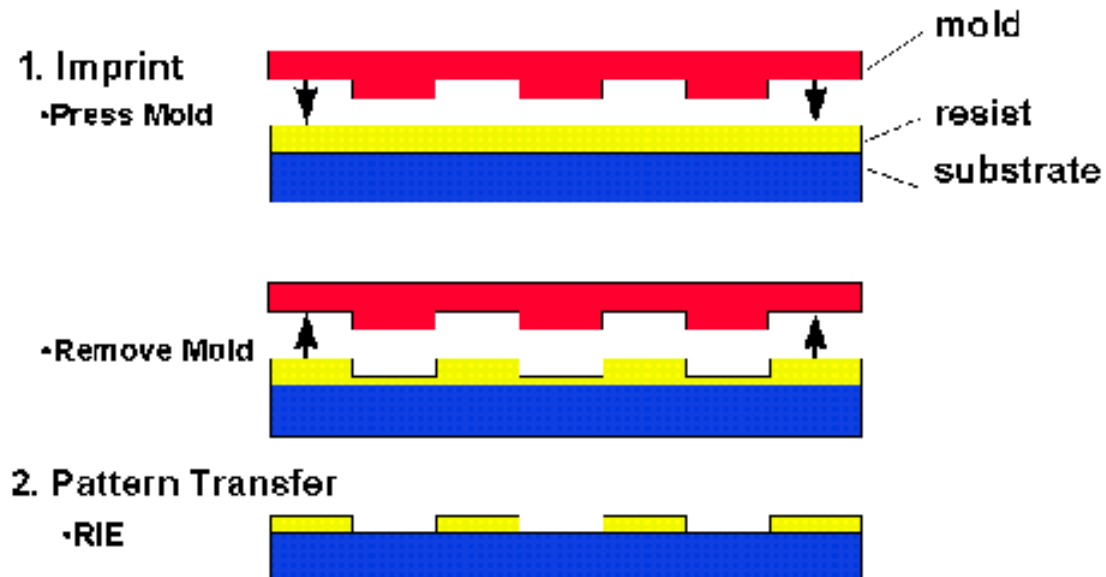
# 1.4 Nanotechnologie

## Laserlithographie 3D



# 1.4 Nanotechnologie

## Nano-Imprint - Embossing



*10nm Punkte!  
(Uni Princeton)*

# 1.4 Nanotechnology

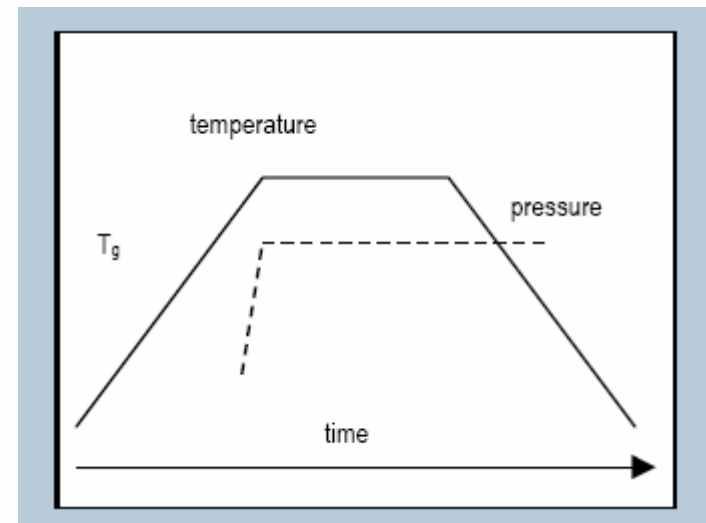
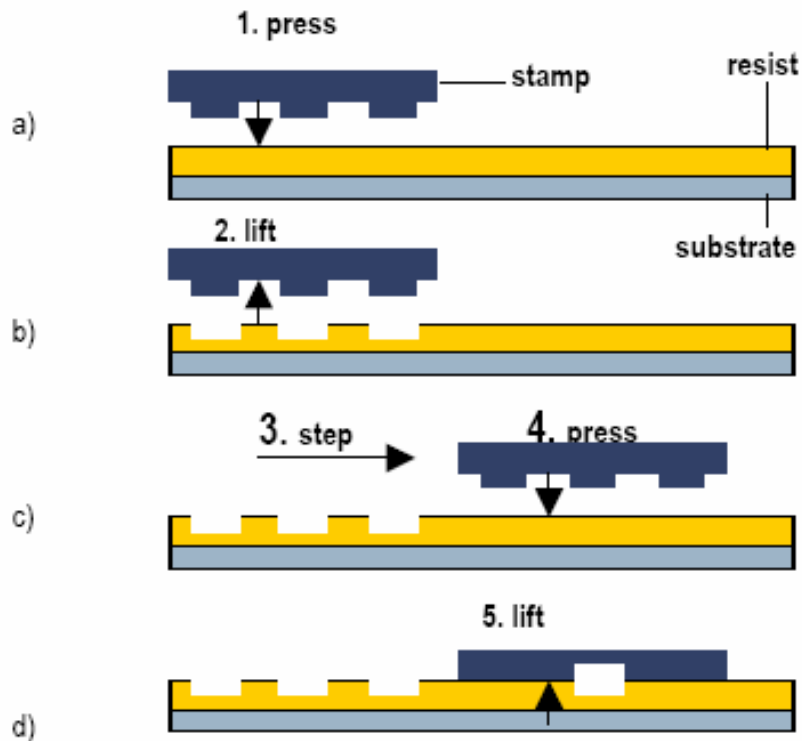
## Heissprägen

Hoher Druck und hohe Temperaturen

## Kaltprägen

Geringer Druck und UV-Belichtung

- (a) Press the heated stamp on the resist.  
(b) Cool the stamp below the glass transition temperature of the resist and lift the stamp  
(c) and (d) Repeat.



# 1.4 Nanotechnologie

## Kaltprägen

(a) Optical micrograph of a matrix of 2x3 elements imprinted on the 100 nm PPM resist. The size of each chip is 5x5 mm<sup>2</sup> and the space between chips is 300  $\mu$ m.

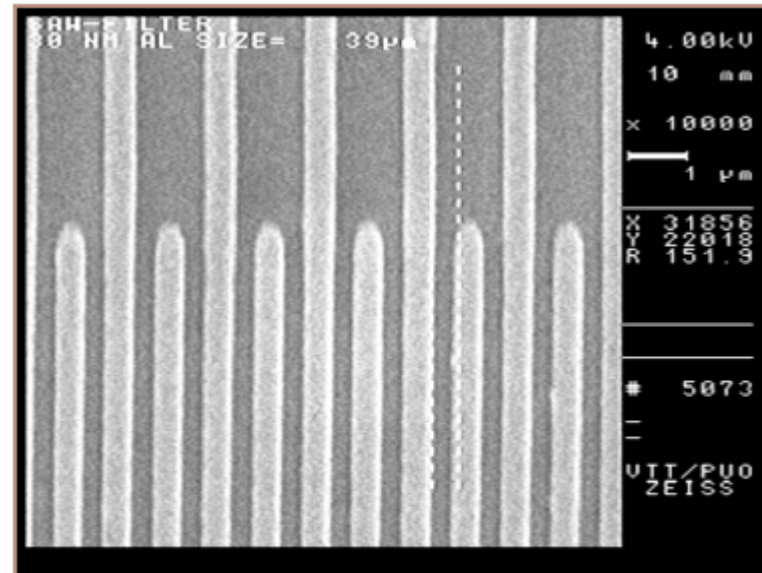
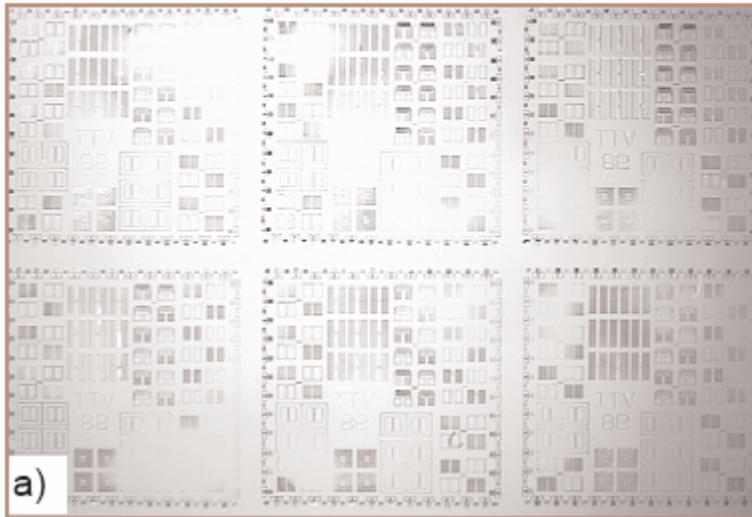


Figure 7. SEM image of 400 nm wide interdigitated fingers after aluminum lift-off.

Verwendung von Stempeln: >1000mal  
Kosten eines Nanoimprinters: ~100000€

Interessant für mittlere Stückzahlen und kleinste Strukturen / Abstände

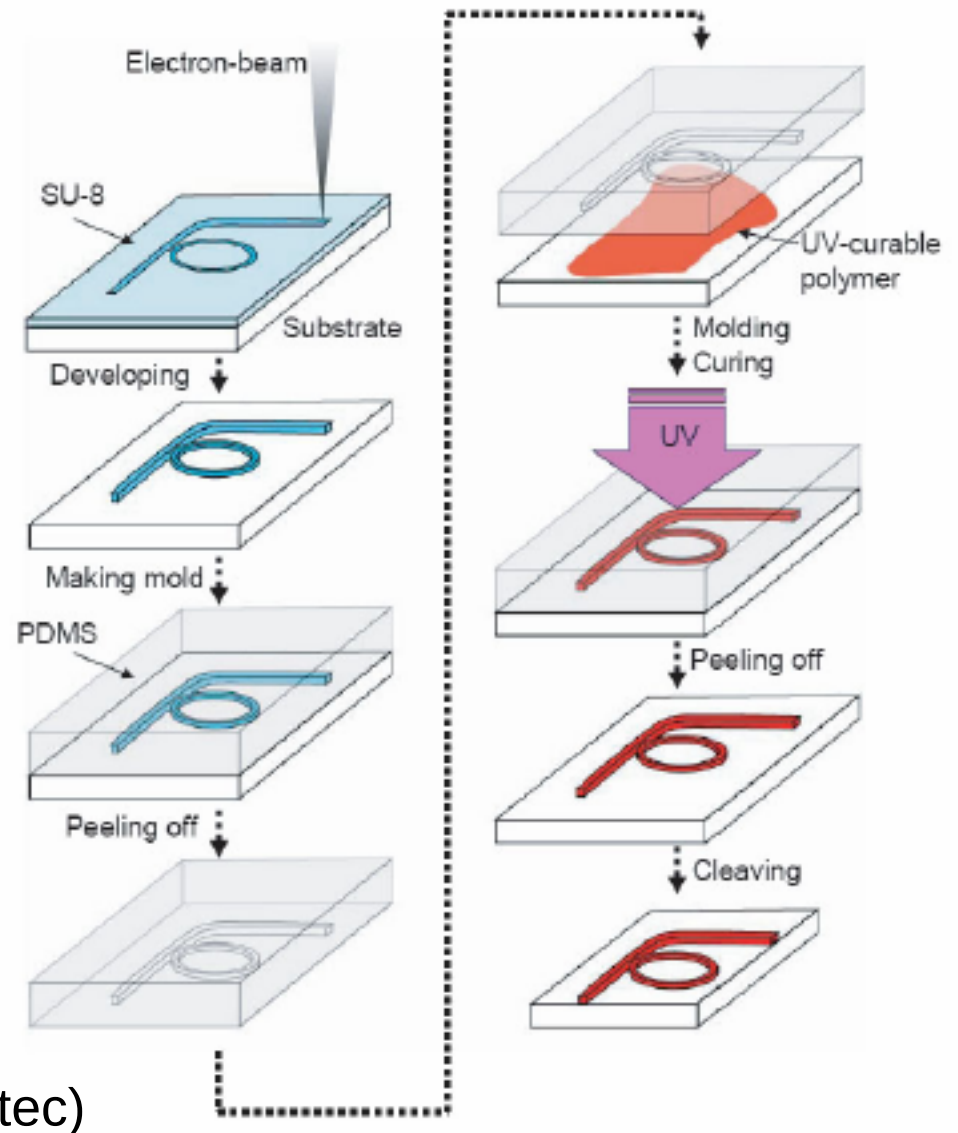
# 1.4 Nanotechnology

## Kaltprägen – Beispiel Ringresonator

Herstellung der Stempel:  
Klassisch mit E-beam

Drucken der Strukturen mit definiert  
geringen Abständen

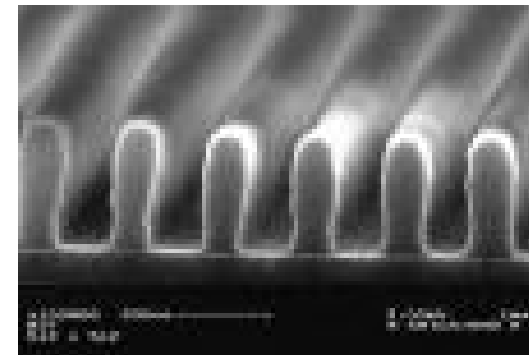
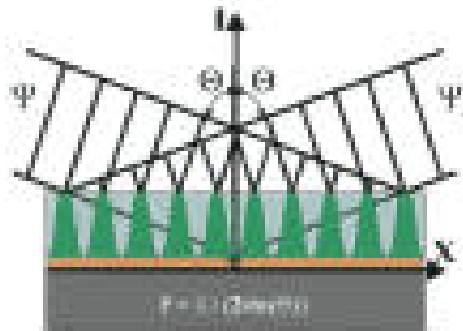
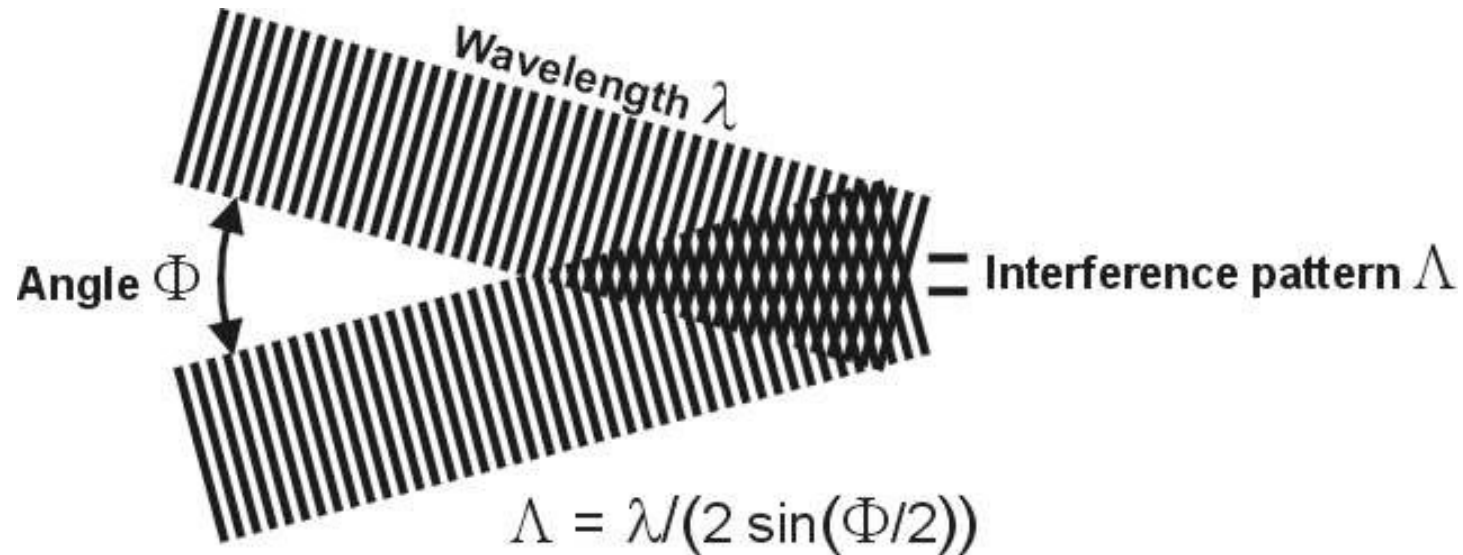
Poly(di-methylsiloxane) (PDMS)



# 1.4 Nanotechnology

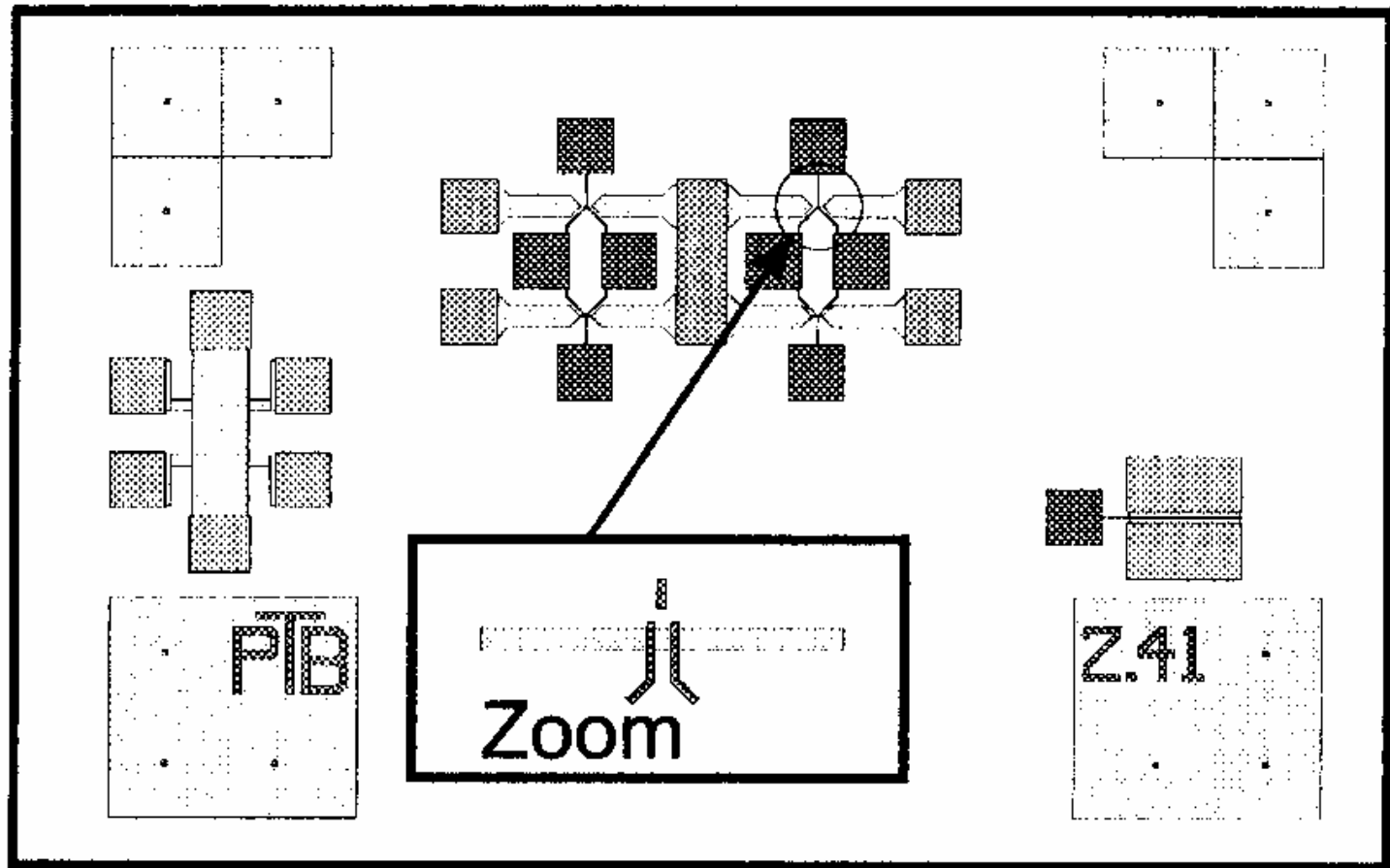
## Interferenzlithografie:

Strukturgrößen unterhalb der Belichtungswellenlänge



# 1.4 Nanotechnologie

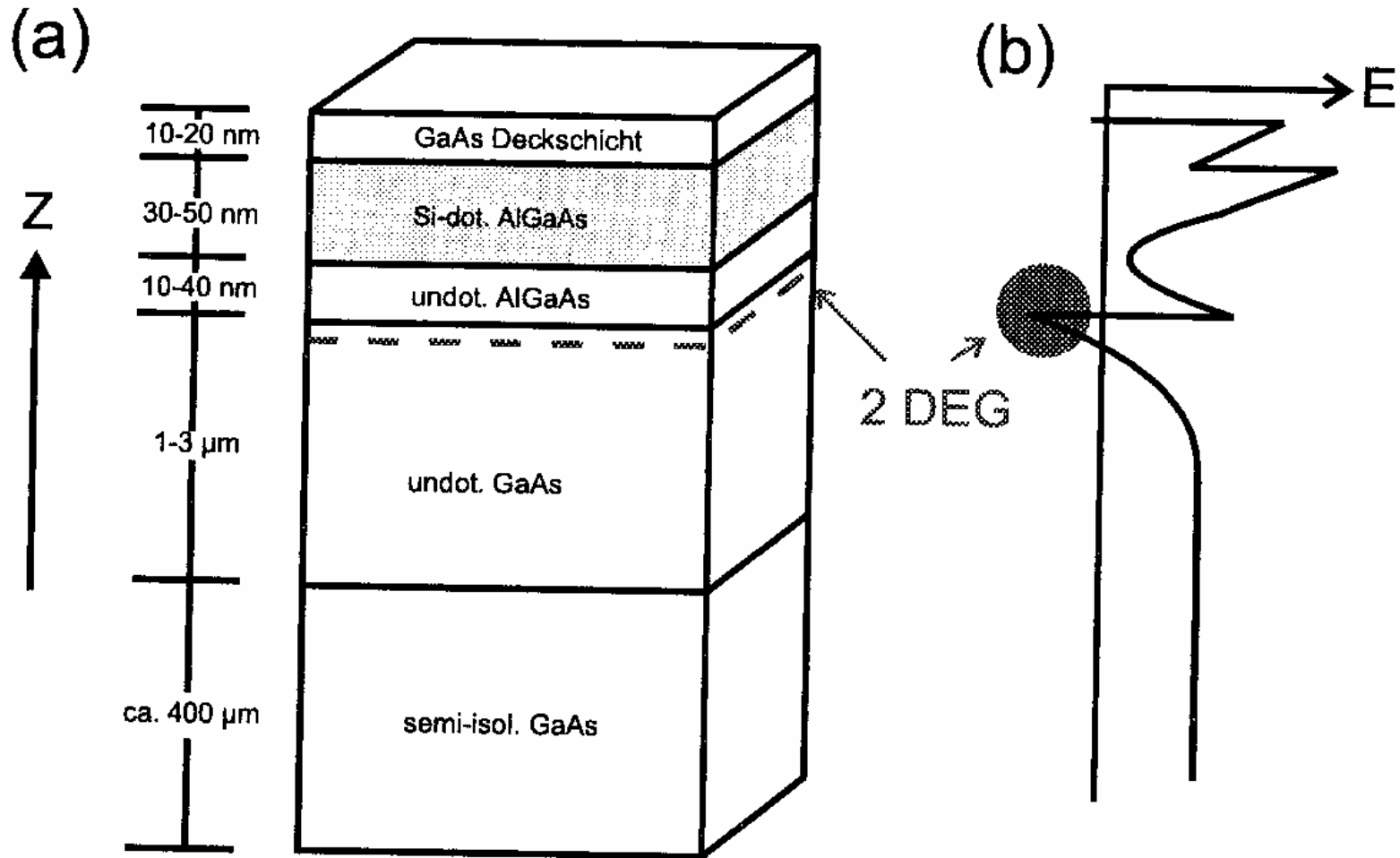
**Beispiel:** Wir machen eine quantenelektronische Struktur -  
Elektrostatisch und strukturell definierter Einzelektronentransistor in einer  
Halbleiter-Heterostruktur



Layout eines Chips

# 1.4 Nanotechnologie

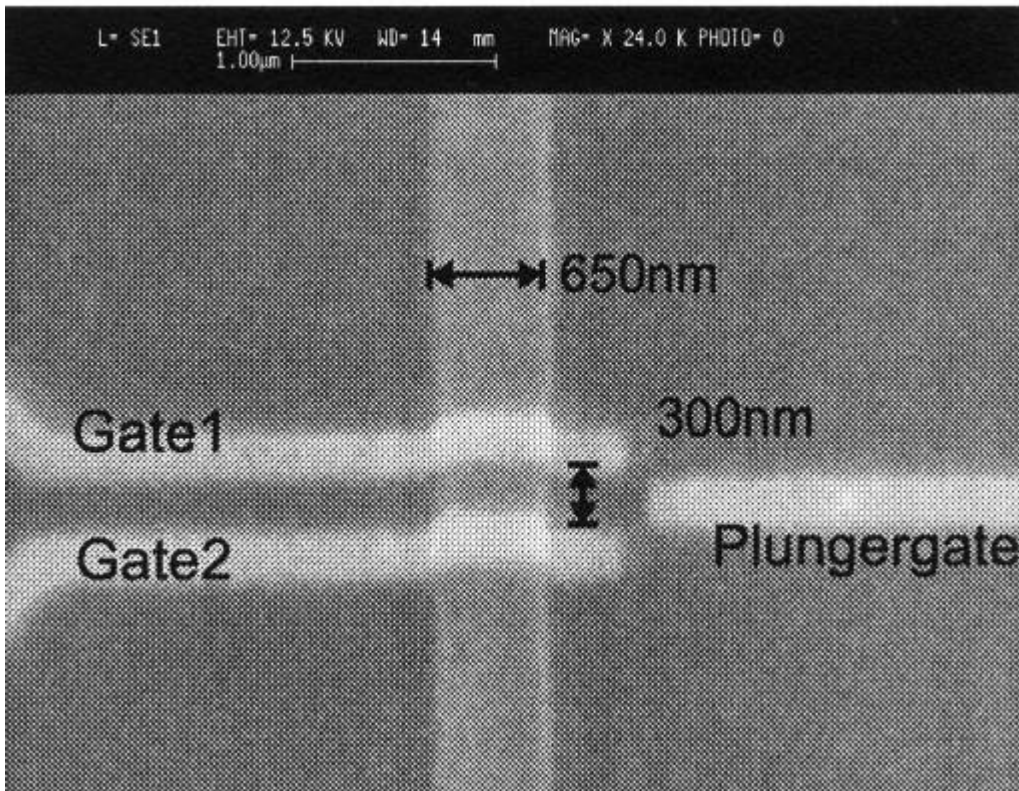
Die zugrundeliegende Heterostruktur



Confinement der Ladungsträger in eine Ebene (2DEG)

# 1.4 Nanotechnologie

Ein Blick auf den Elektronenkanal



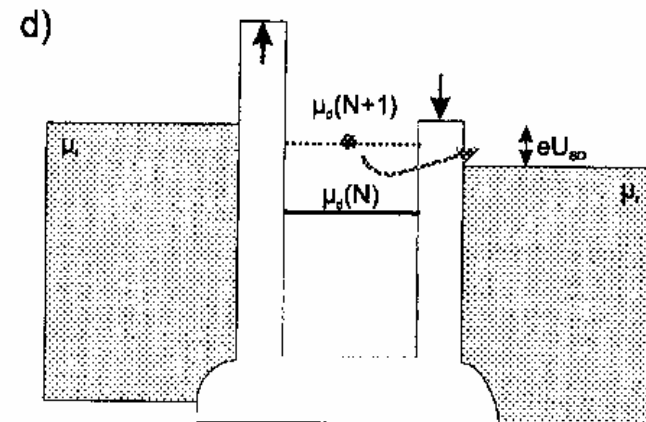
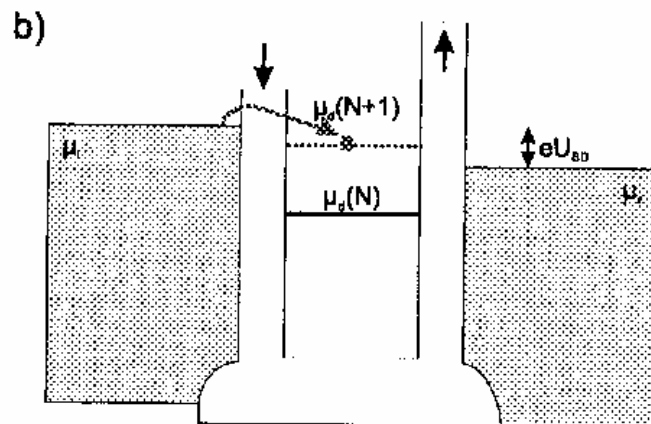
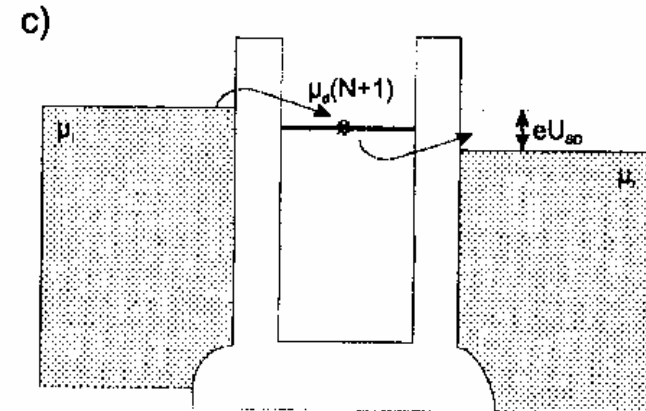
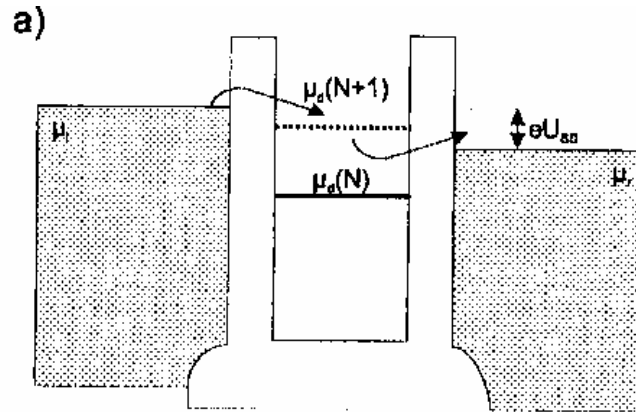
Confinement lateral durch Ätzen  
und elektrostatische Gates



# 1.4 Nanotechnologie

Transport funktioniert mit

- regelbarem Tunneln
- Zuständen zwischen Barrieren

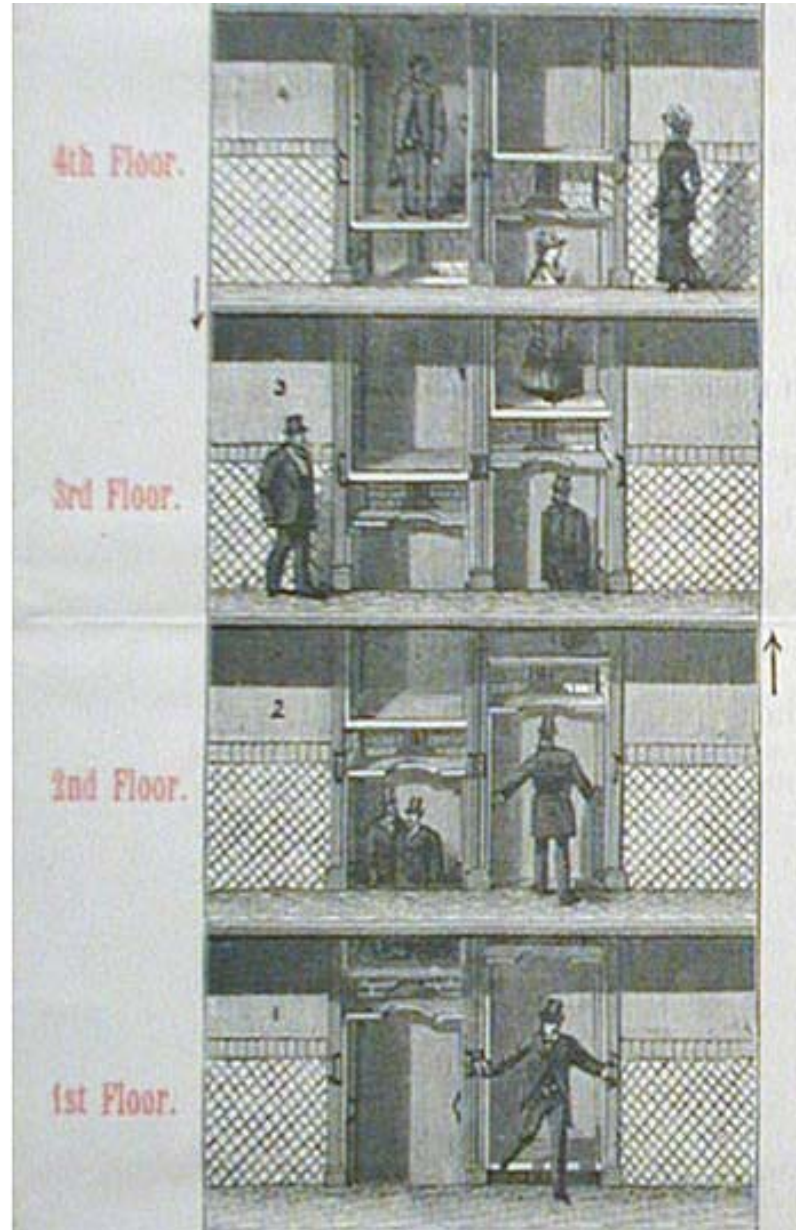


# 1.4 Nanotechnologie

## Einzelelektronentransistoren

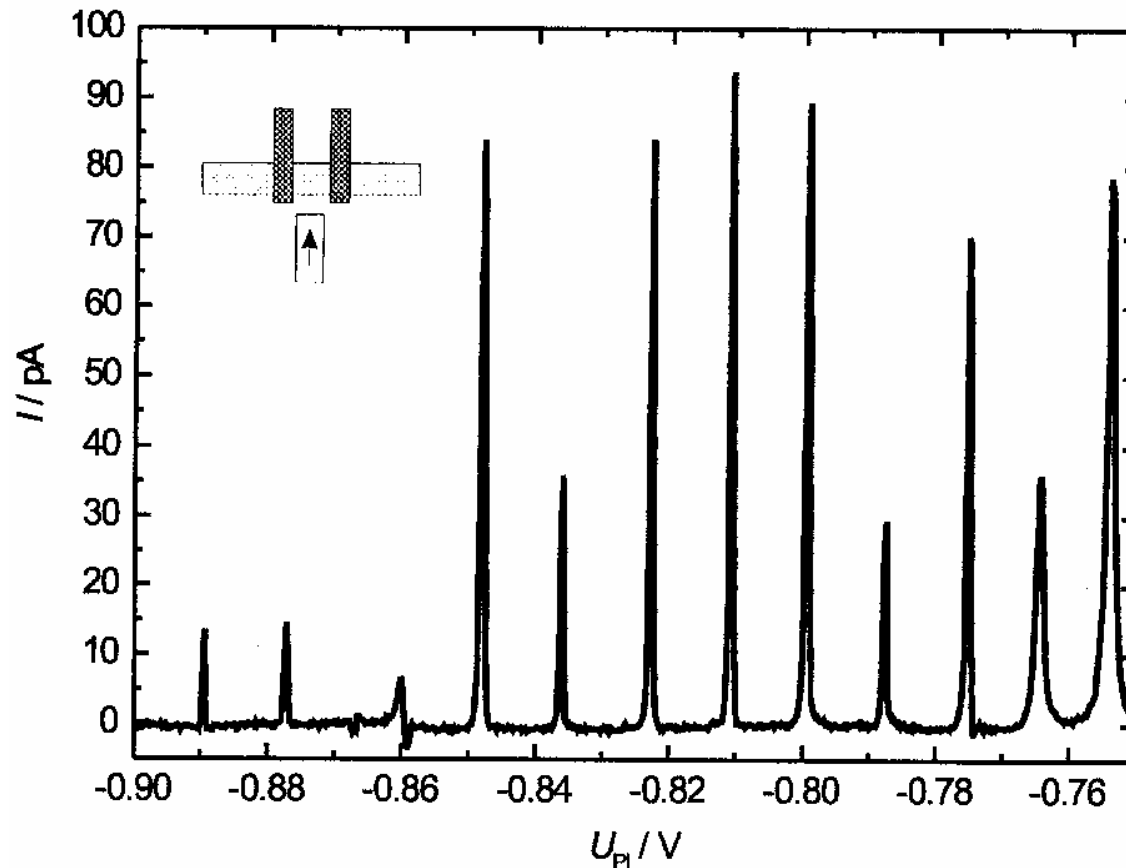
Ein Paternoster für Ladungen

Wenn das Niveau von Source oder Drain mit der Insel übereinstimmt, kann ein Transport stattfinden



# 1.4 Nanotechnologie

## Resultierende Charakteristik



Vorsicht: Peaks kommen von Zuständen zwischen den Barrieren, die haben aber nichts mit gebundenen Zuständen zu tun, sondern mit Coulomb-Blockade

# 1.4 Nanotechnologie

Weitere kritische Größe für Quanteneffekte:

Coulumb-Blockade-Regime

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

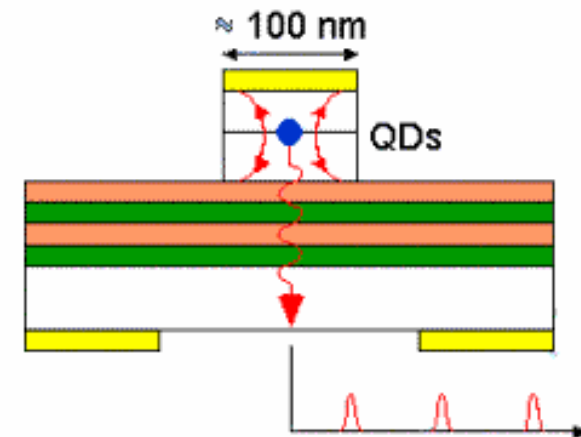
Energie zum Beladen einer Kapazität mit einem (weiteren) Elektron

Normalerweise unerheblich klein und viel kleiner als die thermische Energie

Kühlen

C klein machen  
(Nanotechnologie)

Anwendungen für Optoelektronik: Einzel-Photon-Emitter und Einzel-Photon-Detektor



# 1.4 Nanotechnologie

---

## Zusammenfassung

Kleinste Strukturen lassen sich herstellen mit

- Epitaxie
- Elektronenstrahlolithografie
- Nanoimprint
- Interferenzbelichtung
- Selbstorganisation
- Chemie (bottom-up)
- ...