

Nanostrukturen und Nanotechnologie: Ein Blick über den Horizont

Herbert Kroemer
ECE Department and Materials Department
University of California
Santa Barbara, CA 93106

Nanostrukturen und Nanotechnologie: Ein Blick über den Horizont?

Herbert Kroemer
ECE Department and Materials Department
University of California
Santa Barbara, CA 93106

Nanostrukturen und Nanotechnologie: Ein Blick über den Horizont?

Herbert Kroemer
ECE Department and Materials Department
University of California
Santa Barbara, CA 93106

Der Fall Kolumbus



Warum über “Nano” reden?

Warum über “Nano” reden?






Eine der Schlüsseltechnologien des neuen Jahrhunderts

Warum über “Nano” reden?

-  Eine der Schlüsseltechnologien des neuen Jahrhunderts
-  Aktives Forschungsthema überall

Warum über “Nano” reden?

-  Eine der Schlüsseltechnologien des neuen Jahrhunderts
 -  Aktives Forschungsthema überall
-  Aber auch: Der große Medien-Hype des neuen Jahrhunderts

Warum über “Nano” reden?

- Eine der Schlüsseltechnologien des neuen Jahrhunderts
 - Aktives Forschungsthema überall
- Aber auch: Der große Medien-Hype des neuen Jahrhunderts
 - Jahrzehnte alte Technologien werden zur Nanotechnologie hochgejubelt, ohne daß etwas qualitativ Neues eingetreten ist









Warum über “Nano” reden?

- Eine der Schlüsseltechnologien des neuen Jahrhunderts
 - Aktives Forschungsthema überall
- Aber auch: Der große Medien-Hype des neuen Jahrhunderts
 - Jahrzehnte alte Technologien werden zur Nanotechnologie hochgejubelt, ohne daß etwas qualitativ Neues eingetreten ist
 - SCHÜLER: "Doch ein Begriff muß bei dem Worte sein"
 - MEPHISTO: "Schon gut! Nur muß man sich nicht allzu änstlich quälen; Denn eben wo Begriffe fehlen, da stellt ein Wort zur rechten Zeit sich ein"

Warum über “Nano” reden?

- Eine der Schlüsseltechnologien des neuen Jahrhunderts
 - Aktives Forschungsthema überall
- Aber auch: Der große Medien-Hype des neuen Jahrhunderts
 - Jahrzehnte alte Technologien werden zur Nanotechnologie hochgejubelt, ohne daß etwas qualitativ Neues eingetreten ist
 - SCHÜLER: "Doch ein Begriff muß bei dem Worte sein"
 - MEPHISTO: "Schon gut! Nur muß man sich nicht allzu änstlich quälen; Denn eben wo Begriffe fehlen, da stellt ein Wort zur rechten Zeit sich ein"
 - Phantastische Versprechungen über zukünftige Anwendungen, im Stil populärer Zukunftsromane

Warum über “Nano” reden?

-  Eine der Schlüsseltechnologien des neuen Jahrhunderts
 -  Aktives Forschungsthema überall
-  Aber auch: Der große Medien-Hype des neuen Jahrhunderts
 -  Jahrzehnte alte Technologien werden zur Nanotechnologie hochgejubelt, ohne daß etwas qualitativ Neues eingetreten ist
 -  SCHÜLER: "Doch ein Begriff muß bei dem Worte sein"
 -  MEPHISTO: "Schon gut! Nur muß man sich nicht allzu änstlich quälen; Denn eben wo Begriffe fehlen, da stellt ein Wort zur rechten Zeit sich ein"
 -  Phantastische Versprechungen über zukünftige Anwendungen, im Stil populärer Zukunftsromane
-  Eine Injektion von Realismus tut not

Was ist Nanotechnologie? Ein erster Blick

Was ist Nanotechnologie?



Ein erster Blick



- Grob vereinfacht: Nanotechnologie ist Technologie auf der Größenskala von “ein paar” Nanometern
- Ein Nanometer ist ein millionstel Millimeter
- Von größerer Relevanz: $1 \text{ nm} \approx 4 \text{ Atomdurchmesser}$
Zum Beispiel: Silizium = $0,235 \text{ nm}$

Was ist Nanotechnologie?

Ein erster Blick

-  Grob vereinfacht: Nanotechnologie ist Technologie auf der Größenskala von “ein paar” Nanometern
 - Ein Nanometer ist ein millionstel Millimeter
 - Von größerer Relevanz: 1 nm \approx 4 Atomdurchmesser
Zum Beispiel: Silizium = 0,235 nm
-  Nicht einzelne Atome, sondern 3-D Strukturen wo mindestens eine kritische Dimension von der Größenordnung von ein paar Atomdurchmessern ist:
 - Nanoschichten (Halbleiter-Epitaxieschichten)
 - Nanodrähte (Kohlenstoff-Nanoröhren)
 - Nanoteilchen (Kolloide und Emulsionen)



Ein genauere Blick

Ein genauerer Blick



Nanostrukturen – im Sinne von Nanotechnologie – sind synthetische Strukturen, die kontrolliert hergestellte kritischen Dimensionen auf Nanometer Skala enthalten, und in denen diese kritischen Dimensionen für interessante neue Eigenschaften verantwortlich sind und ausgenutzt werden.

Ein genauerer Blick

-  Nanostrukturen – im Sinne von Nanotechnologie – sind synthetische Strukturen, die kontrolliert hergestellte kritischen Dimensionen auf Nanometer Skala enthalten, und in denen diese kritischen Dimensionen für interessante neue Eigenschaften verantwortlich sind und ausgenutzt werden.
-  Die treibende Kraft: Quantisierungs-Effekte



Wo kommt NT her?

Wo kommt NT her?



Nicht aus dem Nichts entsprungen, sondern eine natürliche Weiterentwicklung bestehender Technologien aus früheren Jahrhunderten – eine Entwicklung die auch weiter fortschreitet

Wo kommt NT her?

-  Nicht aus dem Nichts entsprungen, sondern eine natürliche Weiterentwicklung bestehender Technologien aus früheren Jahrhunderten – eine Entwicklung die auch weiter fortschreitet
-  Das eigentlich Neue: Ein Zusammenwachsen verschiedener Technologien aus früher getrennten Bereichen der Naturwissenschaften: Physik, Chemie, und Biologie

Das Zentrale *Lemma* über Anwendungen Neuer Technologie

Die *entscheidenden* Anwendungen
jeder hinreichend neuen und innovativen Technologie
waren immer Anwendungen
die von der Technologie selbst erst *erschaffen* wurden
—
und das wird auch in der Zukunft so bleiben

Das Zentrale *Lemma* über Anwendungen Neuer Technologie

Die *entscheidenden* Anwendungen
jeder hinreichend neuen und innovativen Technologie
waren immer Anwendungen
die von der Technologie selbst erst *erschaffen* wurden
—
und das wird auch in der Zukunft so bleiben

Revolution — nicht Evolution!

Das Große Dilemma

Revolutionäre Anwendungen neuer Technologien sind *prinzipiell*
nahezu unvorhersehbar

—

und sind auch historisch fast nie korrekt vorhergesagt worden

Beispiele “v. N.” (= vor Nano)



Der Transistor



Der Halbleiter Laser



Flüssigkristalle



Kernspinresonanz



.....

Der Transistor

Der Transistor



Erschaffte den modernen Computer

Der Transistor






Erschaffte den modernen Computer

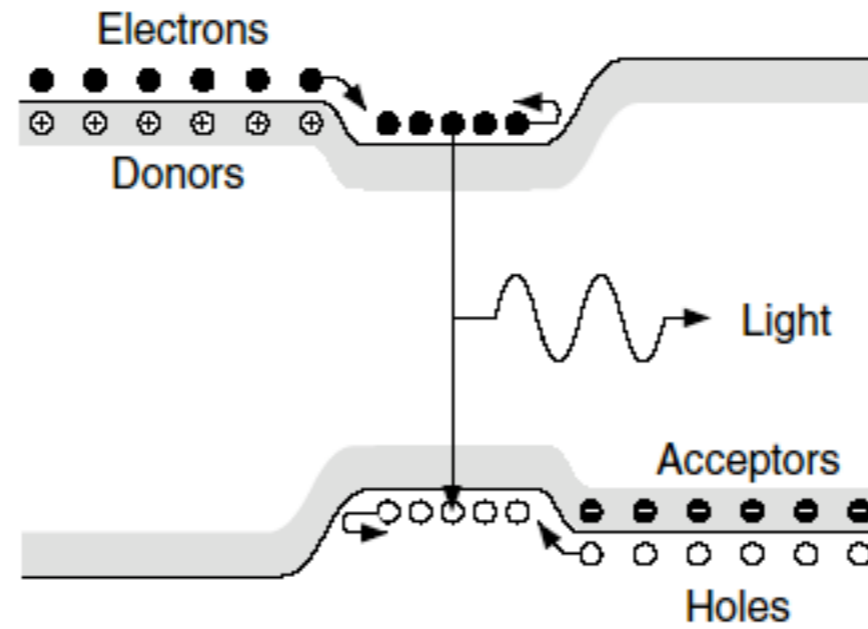


Umwege: Vom Ge Bipolar-Transistor zu Si CMOS

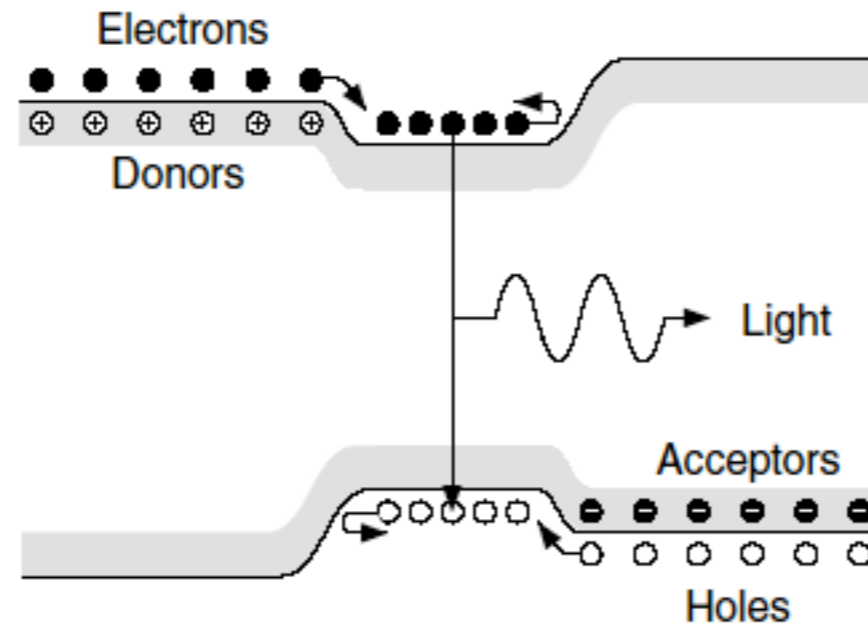
Der Transistor

-  *Erschaffte* den modernen Computer
-  *Umwege:* Vom Ge Bipolar-Transistor zu Si CMOS
-  *Nach dem Durchbruch:* Transistoren überall

Der Halbleiter Laser

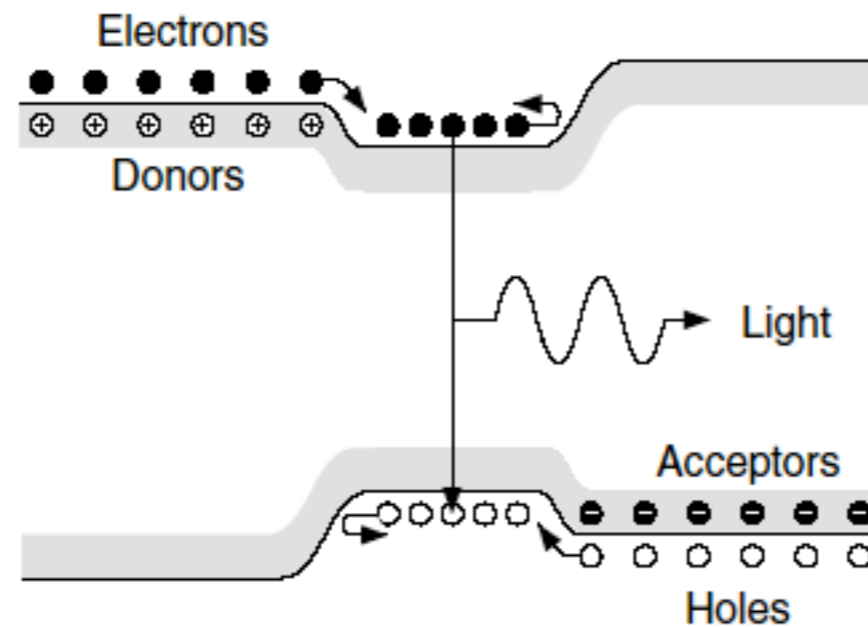


Der Halbleiter Laser



Erschaffte die CD

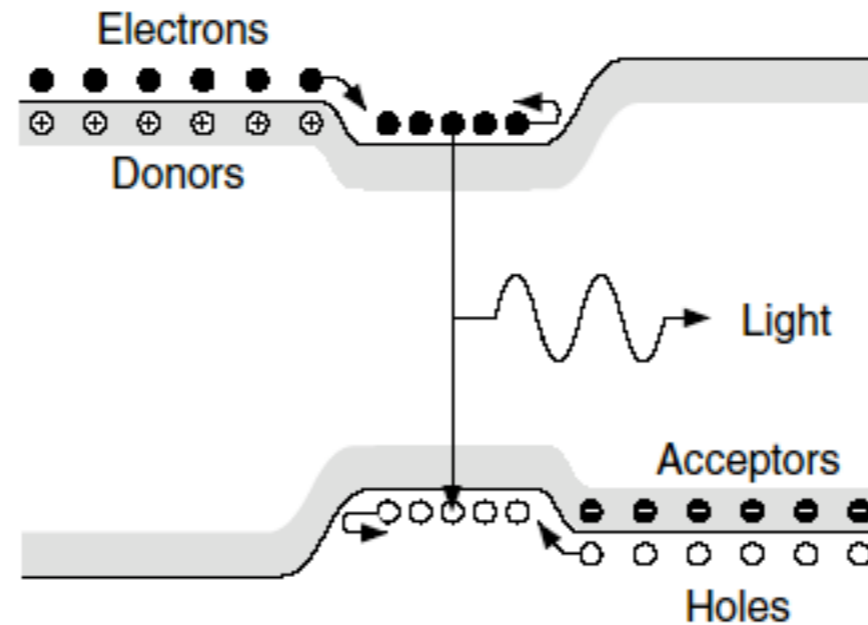
Der Halbleiter Laser



 *Erschaffte* die CD

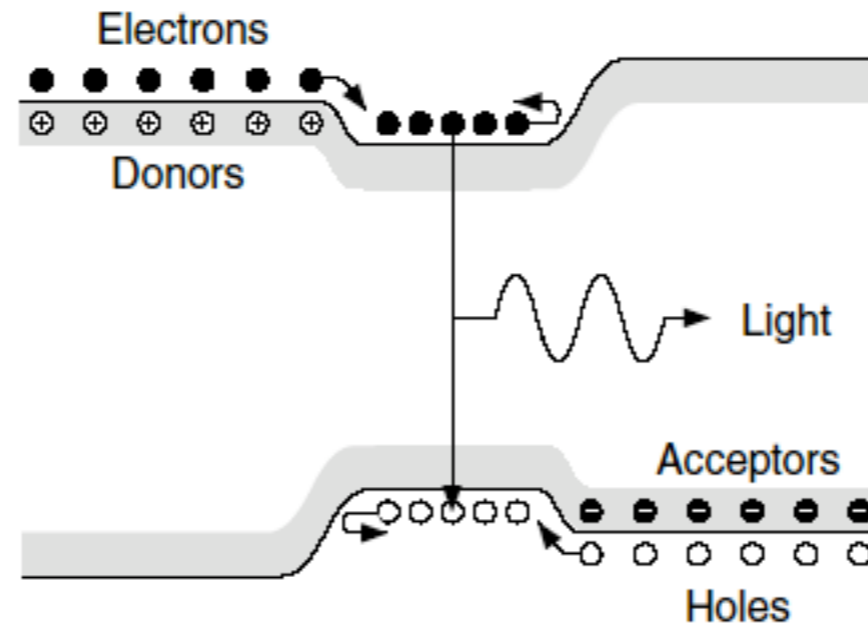
 *Ermöglichte* Glasfaser-Kommunikation





Der Halbleiter Laser



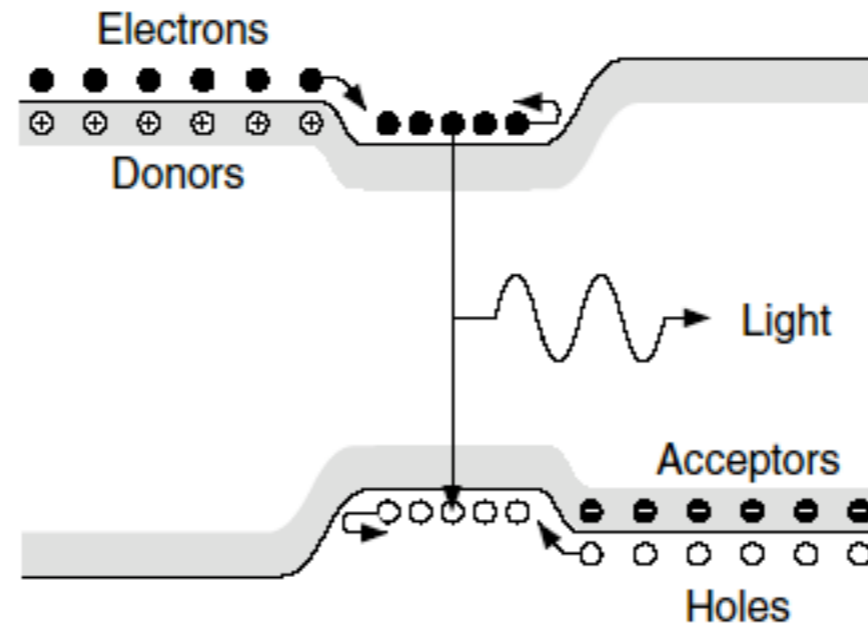
- 📌 *Erschaffte* die CD
- 📌 *Ermöglichte* Glasfaser-Kommunikation
- 📀 Laser x Glasfaser = Multi-Technologie **Synergismus**

Der Halbleiter Laser



-  **Erschaffte** die CD
-  **Ermöglichte** Glasfaser-Kommunikation
 -  Laser x Glasfaser = Multi-Technologie **Synergismus**
 -  Das Internet

Der Halbleiter Laser



- *Erschaffte* die CD
- *Ermöglichte* Glasfaser-Kommunikation
 - Laser x Glasfaser = Multi-Technologie **Synergismus**
 - Das Internet
- *Nach dem Durchbruch:* Leuchtdioden für alles
 - das Ende der Glühlampe

Zurück zum Zentralen Lemma:

Der Weg von Wissenschaft und Technologie
zu Anwendungen ist
opportunistisch, nicht ***deterministisch***



Konsequenzen

Konsequenzen






Wir können spezifische entscheidende Anwendungen nicht vorhersagen, aber wir können Forschungs-***Richtungen*** identifizieren, die mit hoher Wahrscheinlichkeit zu solchen Anwendungen führen werden





Konsequenzen

-  Wir können spezifische entscheidende Anwendungen nicht vorhersagen, aber wir können Forschungs-***Richtungen*** identifizieren, die mit hoher Wahrscheinlichkeit zu solchen Anwendungen führen werden
-  Auswahl Kriterium: Reichtum an neuen physikalischen Phänomenen

Konsequenzen

-  Wir können spezifische entscheidende Anwendungen nicht vorhersagen, aber wir können Forschungs-**Richtungen** identifizieren, die mit hoher Wahrscheinlichkeit zu solchen Anwendungen führen werden
-  Auswahl Kriterium: Reichtum an neuen physikalischen Phänomenen
-  Wir können es nicht vorhersagen, wohin und wie weit uns diese Richtungen letztthin führen werden, und auch nicht welche von ihnen sich als die fruchtbarsten erweisen werden

Konsequenzen

-  Wir können spezifische entscheidende Anwendungen nicht vorhersagen, aber wir können Forschungs-**Richtungen** identifizieren, die mit hoher Wahrscheinlichkeit zu solchen Anwendungen führen werden
-  Auswahl Kriterium: Reichtum an neuen physikalischen Phänomenen
-  Wir können es nicht vorhersagen, wohin und wie weit uns diese Richtungen letztthin führen werden, und auch nicht welche von ihnen sich als die fruchtbarsten erweisen werden
-  Aber dieser “**Strategische Opportunismus**” hat eine höhere Wahrscheinlichkeit, zu entscheidenden Anwendungen zu führen, als das Verfolgen von

Die Illusion der “*Strategischen*”

Ein Druck, die Forschung auf vorhersagbare
Anwendungen zu konzentrieren
verzögert den Fortschritt statt ihn zu beschleunigen

Die Illusion der “*Strategischen*”

Ein Druck, die Forschung auf vorhersagbare
Anwendungen zu konzentrieren
verzögert den Fortschritt statt ihn zu beschleunigen

Mermin's Wunschtraum:

“Ich erwarte den Tag wo die Leute sich daran erinnern,
daß Entdeckung nicht dadurch stattfindet
daß man entscheidet was man will — und es dann entdeckt”

David Mermin in *Physics Today*, August 1999 (p.11)

Wurzeln der Nano-Technologie

Wurzeln der Nano-Technologie








Physik: Halbleiter Heterostrukturen

- Molekularstrahl-Epitaxie (MBE)

- Neue Instrumentation









Wurzeln der Nano-Technologie

-  Physik: Halbleiter Heterostrukturen
 -  Molekularstrahl-Epitaxie (MBE)
 -  Neue Instrumentation
-  Chemie: Kolloid- und Emulsions-Chemie
 -  Quantisierungs-Effekte

Wurzeln der Nano-Technologie

- 🔍 Physik: Halbleiter Heterostrukturen
 - Molekularstrahl-Epitaxie (MBE)
 - Neue Instrumentation
- 🔍 Chemie: Kolloid- und Emulsions-Chemie
 - Quantisierungs-Effekte
- 🔍 Biologie: DNA Sequenzierung
 - Nanotechnologie per se

Wurzeln der Nano-Technologie

-  Physik: Halbleiter Heterostrukturen
 -  Molekularstrahl-Epitaxie (MBE)
 -  Neue Instrumentation
-  Chemie: Kolloid- und Emulsions-Chemie
 -  Quantisierungs-Effekte
-  Biologie: DNA Sequenzierung
 -  Nanotechnologie per se
- 

Halbleiter-Heterostrukturen

Material-Systeme

Ein Blick auf die Mitte des Periodischen Systems:

Halbleiter-Heterostrukturen

Material-Systeme

Ein Blick auf die Mitte des Periodischen Systems:

II	III	IV	V	VI
		Si		
		Ge		

Si: Die “Mutter
aller Halbleiter”

(Es fing ursprünglich
mit Ge an)

Halbleiter-Heterostrukturen

Material-Systeme

Ein Blick auf die Mitte des Periodischen Systems:

II	III	IV	V	VI
			N	
	Al	Si	P	
	Ga	Ge	As	
	In		Sb	

Si: Die "Mutter
aller Halbleiter"

(Es fing ursprünglich
mit Ge an)

III-V Verbindungen

Halbleiter-Heterostrukturen

Material-Systeme

Ein Blick auf die Mitte des Periodischen Systems:

II	III	IV	V	VI
			N	
	Al	Si	P	S
Zn	Ga	Ge	As	Se
Cd	In		Sb	Te
Hg				

Si: Die "Mutter
aller Halbleiter"

(Es fing ursprünglich
mit Ge an)

III-V Verbindungen

II-VI Verbindungen

Halbleiter-Heterostrukturen

Material-Systeme

Ein Blick auf die Mitte des Periodischen Systems:

II	III	IV	V	VI
			N	
	Al	Si	P	S
Zn	Ga	Ge	As	Se
Cd	In		Sb	Te
Hg				

Si: Die "Mutter
aller Halbleiter"

(Es fing ursprünglich
mit Ge an)

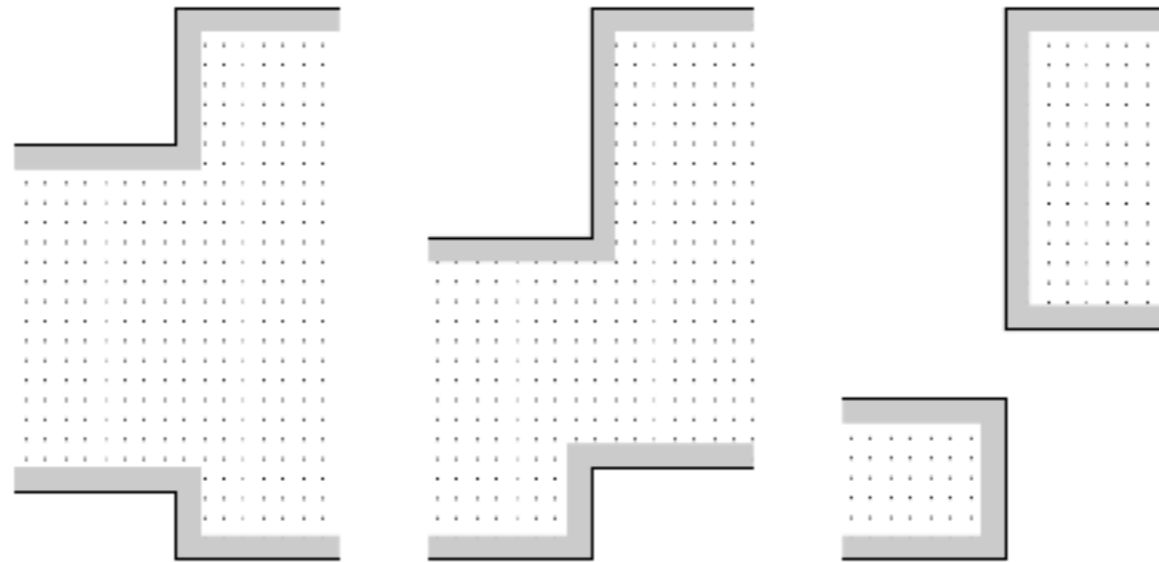
III-V Verbindungen

II-VI Verbindungen

Auch kontinuierliche Legierungen: $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}$, $\text{Hg}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Te}$, etc.

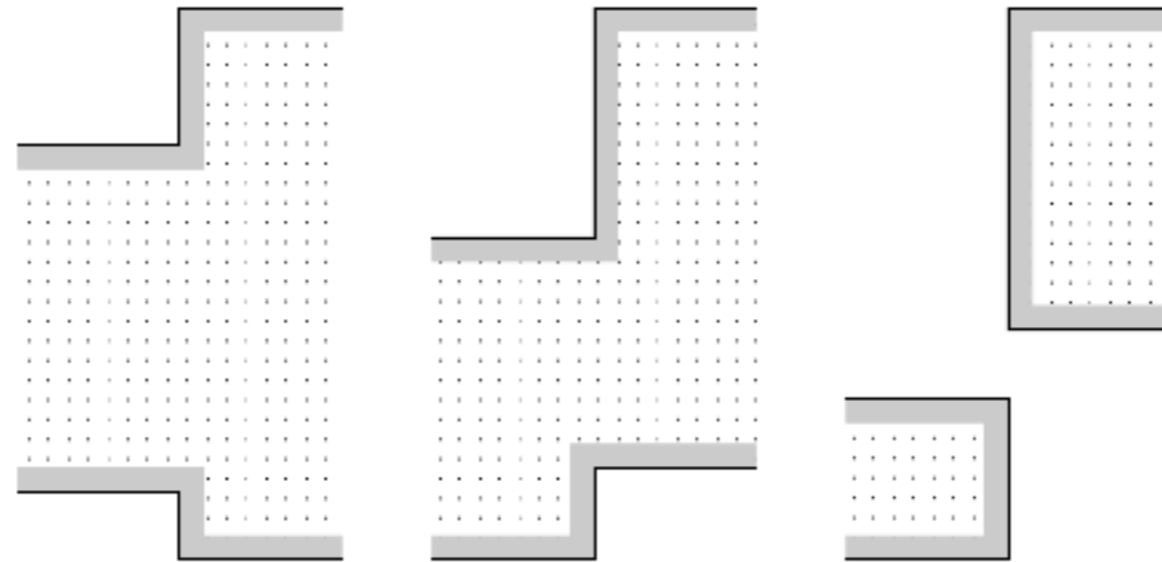
Warum Heterostrukturen?

Warum Heterostrukturen?



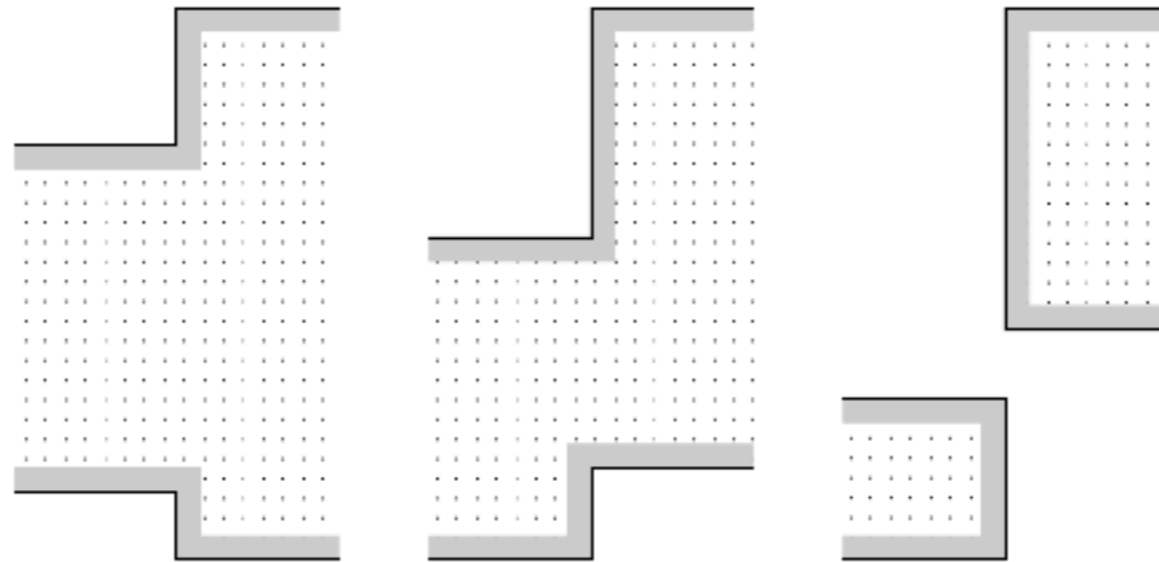
 Abrupte Hetero-Übergänge als Potentialstufen

Warum Heterostrukturen?



- Abrupte Hetero-Übergänge als Potentialstufen
- Quantisierung bei Nanodimensionen

Warum Heterostrukturen?

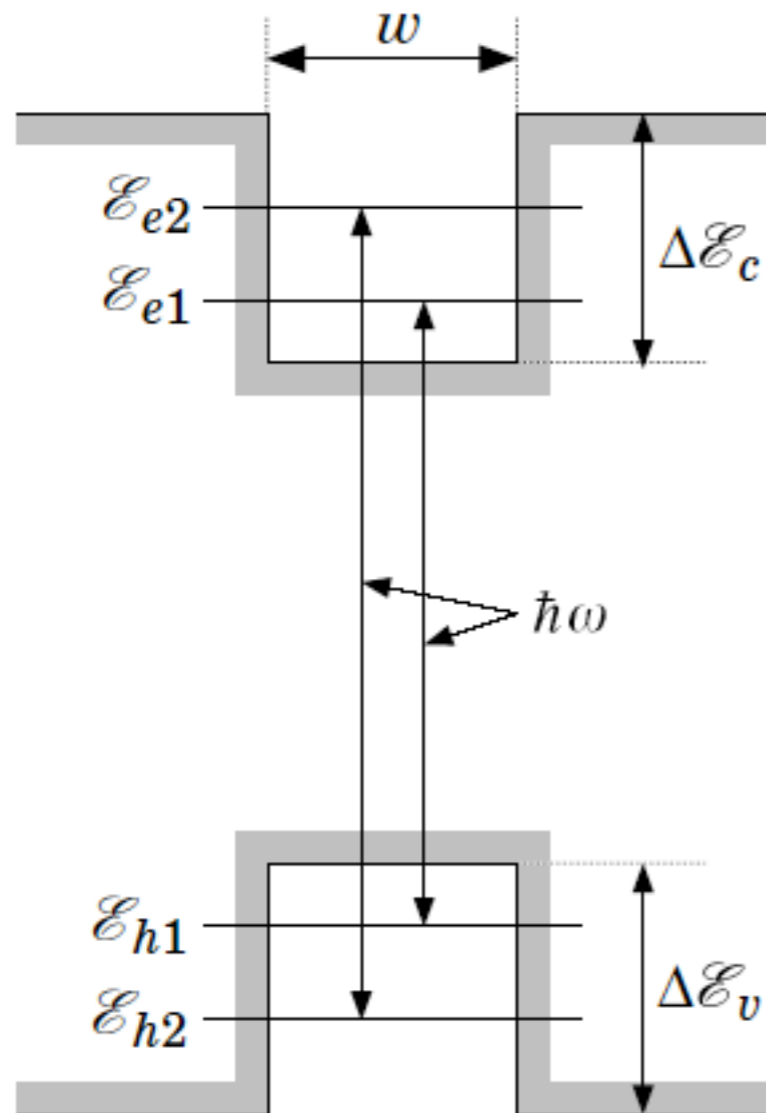


- Abrupte Hetero-Übergänge als Potentialstufen
- Quantisierung bei Nanodimensionen
- Quantentöpfe and Übergitter
- Esaki & Tsu 1970: Eine Idee
- Chang et al. 1974: Resonanz-Tunnel Dioden
- Dingle et al. 1974: Quantisierung in periodischen “Übergittern”

Quantisierung

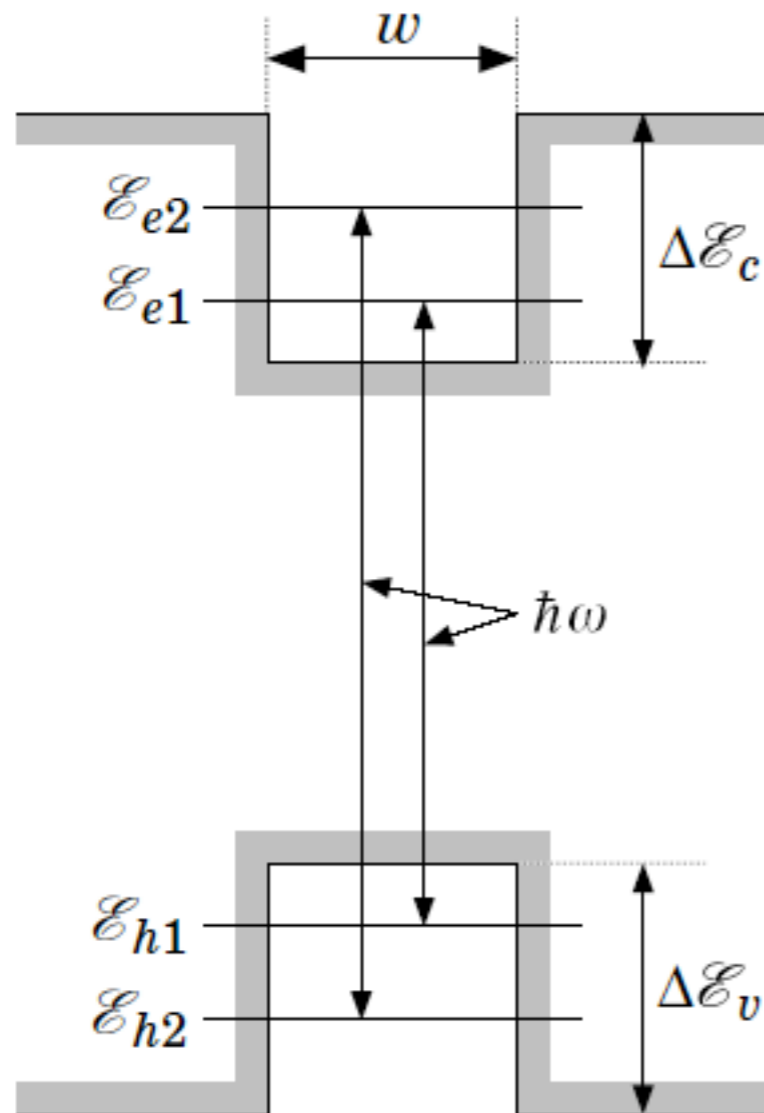
Quantisierung

Quantentopf mit optischen Übergängen

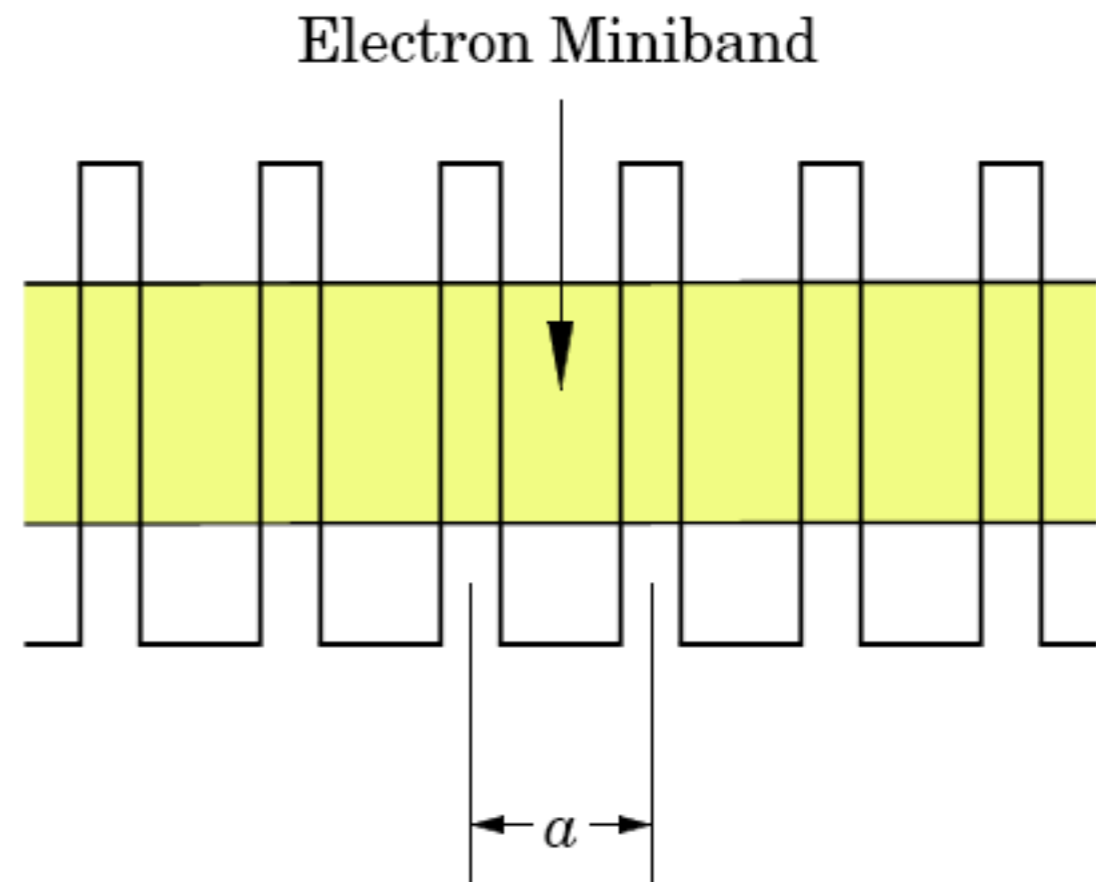


Quantisierung

Quantentopf
mit optischen Übergängen

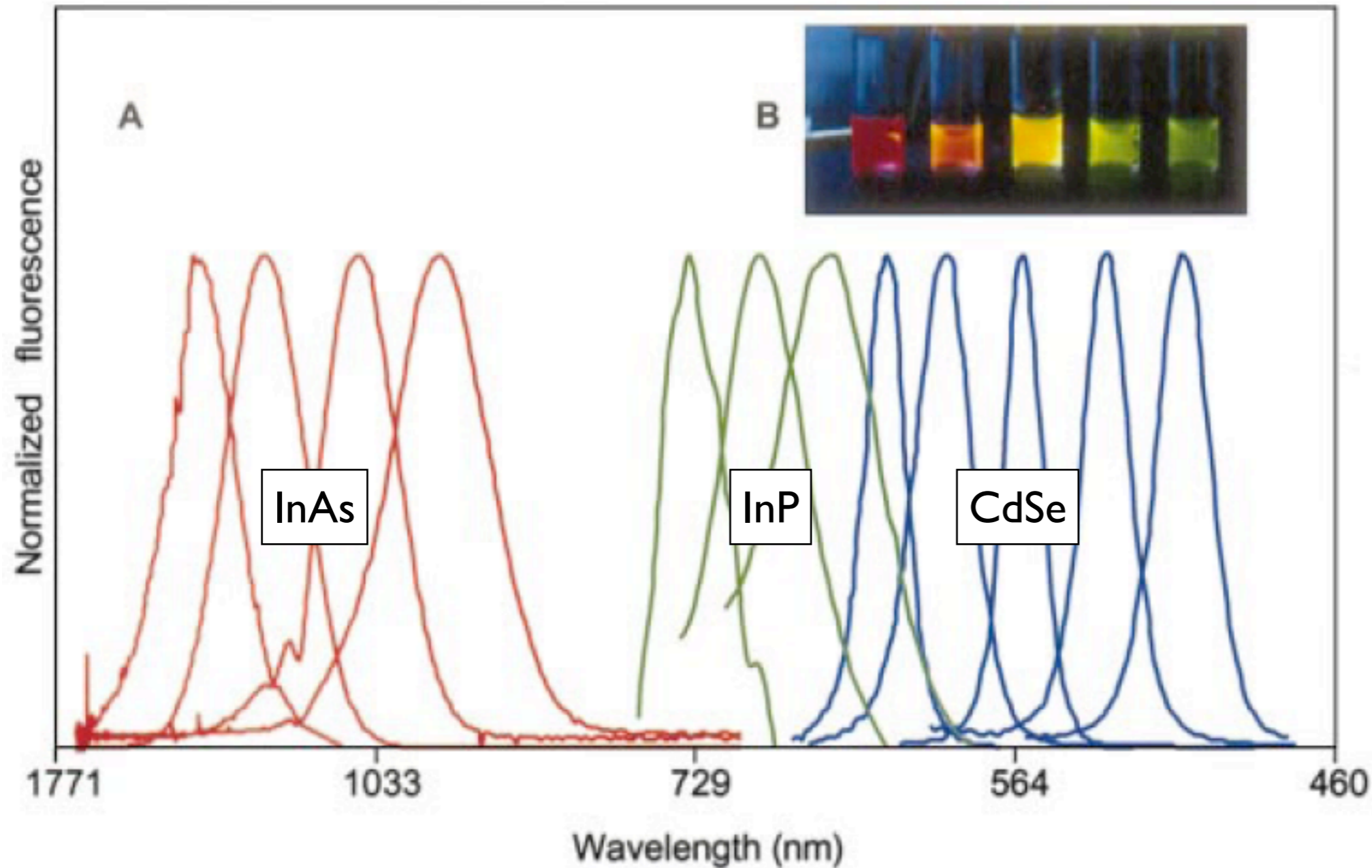


Periodisches Übergitter
mit Elektron-Miniband



Kolloide:

Fluoreszenz kolloidaler Halbleiter Nano-Partikel*



CdSe Partikel-Größen:
4,6; 3,6; 3,1; 2,4; 2.1 nm
(von links nach rechts)

*) Marcel Bruchez Jr., Mario Moronne, Peter Gin, Shimon Weiss, A. Paul Alivisatos,
"Semiconductor Nanocrystals as Fluorescent Biological Labels,"
Nature **281**, 2013-2016 (1998)








Heterostruktur-Technologie: Synthese und Instrumentation

Heterostruktur-Technologie: Synthese und Instrumentation

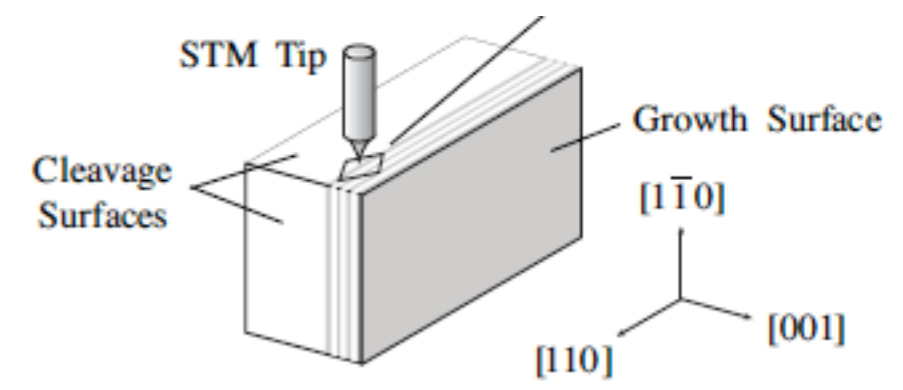
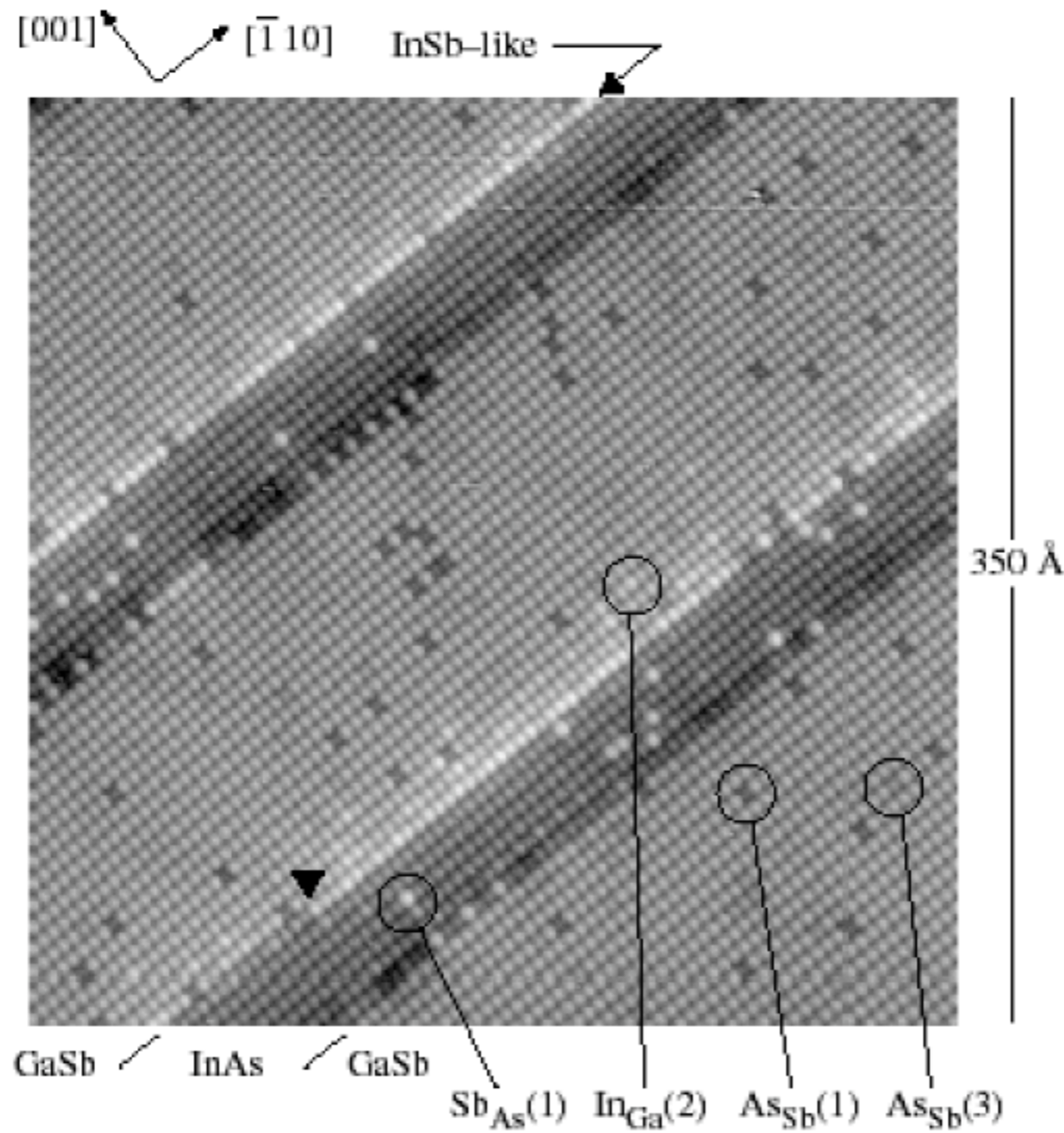


Kristall-Schichtsynthese mit atomarer Kontrolle:
Molekularstrahl-Epitaxie (MBE), ca. 1970

Heterostruktur-Technologie: Synthese und Instrumentation

-  Kristall-Schichtsynthese mit atomarer Kontrolle:
Molekularstrahl-Epitaxie (MBE), ca. 1970
-  Die zentrale Rolle neuer Instrumentation
 -  Elektronenbeugung während des Wachstums (RHEED)
 -  Oberflächen-Morphologie
 -  RHEED-Oszillationen: Abzählen der Atomlagen
 -  Raster-Tunnel-Mikroskopie mit atomarer Auflösung (STM)
 - 

STM Querschnitt durch ein InAs/GaSb Übergitter*



* Steinshnider et al., Phys. Rev. Lett. **85**. 2953 (2000)



Einige Vorhersagen sind “Risiko-frei”

Einige Vorhersagen sind “Risiko-frei”







Alle einzelnen Technologien werden sich massiv weiter- entwickeln






Einige Vorhersagen sind “Risiko-frei”

-  Alle einzelnen Technologien werden sich massiv weiter- entwickeln
-  Die Rolle biologischer Technologien wird zunehmen

Einige Vorhersagen sind “Risiko-frei”

-  Alle einzelnen Technologien werden sich massiv weiter- entwickeln
-  Die Rolle biologischer Technologien wird zunehmen
-  Viele der entscheidendsten neuen Anwendungen werden auf der Kombination mehrere Einzeltechnologien beruhen
-  Besonders Kombinationen von physikalischen Technologien mit biologischen

Einige Vorhersagen sind “Risiko-frei”

-  Alle einzelnen Technologien werden sich massiv weiter- entwickeln
-  Die Rolle biologischer Technologien wird zunehmen
-  Viele der entscheidendsten neuen Anwendungen werden auf der Kombination mehrere Einzeltechnologien beruhen
-  Besonders Kombinationen von physikalischen Technologien mit biologischen
-  Entwicklung neuer Instrumentations-Technologien wird ein wesentlicher “Schrittmacher” des Fortschritts sein



Meine “Persönliche Nano-Auswahl”

Meine “Persönliche Nano-Auswahl”






Quantisierung in 2 und 3 Dimensionen





Meine “Persönliche Nano-Auswahl”

-  Quantisierung in 2 und 3 Dimensionen
-  2-D Lithographie und das 3-D “Montage”-Problem

Meine “Persönliche Nano-Auswahl”





-  Quantisierung in 2 und 3 Dimensionen
-  2-D Lithographie und das 3-D “Montage”-Problem
-  Meta-Materialien

Meine “Persönliche Nano-Auswahl”

-  Quantisierung in 2 und 3 Dimensionen
-  2-D Lithographie und das 3-D “Montage”-Problem
-  Meta-Materialien
-  “Andere” Quantisierungs Effekte



Quantisierung in 2 und 3 Dimensionen

Quantisierung in 2 und 3 Dimensionen




-  Quanten-Drähte
-  Nanoröhren
-  Quanten-”Dots”
-  Nano-Kolloidteilchen

Quanten-Drähte





Quanten-Drähte

-  Sakaki's Traum 1980: Unterdrückung von Elektronenstreuung in "quer-quantisierten" Nano-Drähten?
-  Unsere erste Konfrontation mit *dem* Zentralproblem aller Nanostrukturen: Struktur-Schwankungen

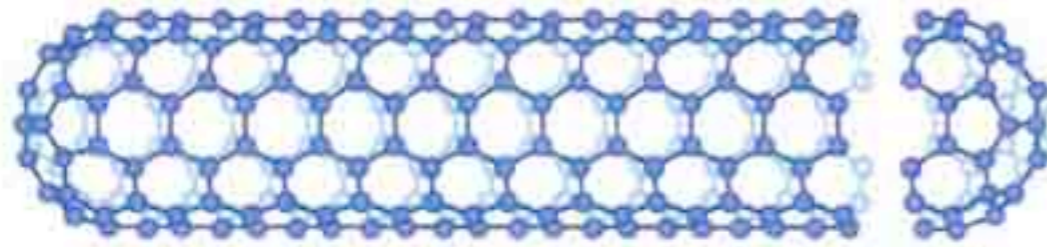
Quanten-Drähte

-  Sakaki's Traum 1980: Unterdrückung von Elektronenstreuung in "quer-quantisierten" Nano-Drähten?
-  Unsere erste Konfrontation mit *dem* Zentralproblem aller Nanostrukturen: Struktur-Schwankungen
-  Natur als Helfer statt Gegner: Nanoröhren?

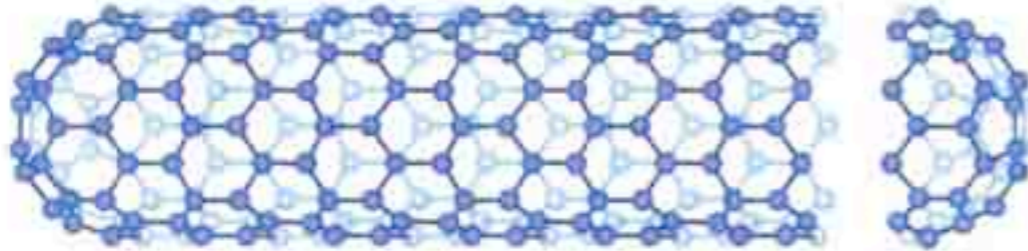
Quanten-Drähte

-  Sakaki's Traum 1980: Unterdrückung von Elektronenstreuung in “quer-quantisierten” Nano-Drähten?
-  Unsere erste Konfrontation mit *dem* Zentralproblem aller Nanostrukturen: Struktur-Schwankungen
-  Natur als Helfer statt Gegner: Nanoröhren?
-  3-D Quantisierung in längs-modulierten Drähten?

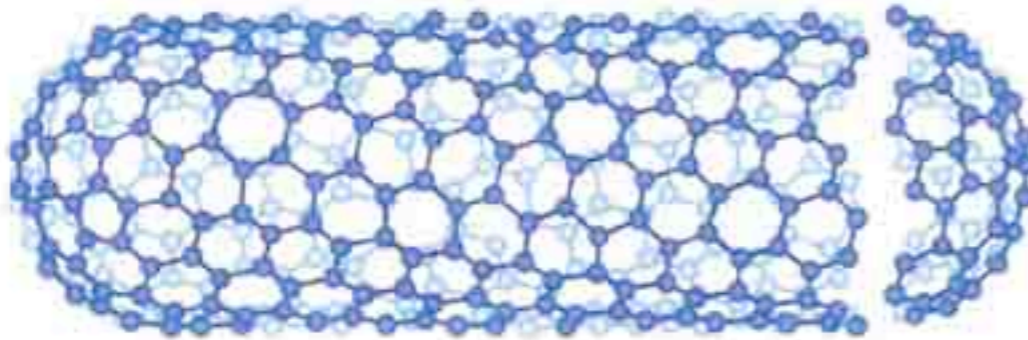
Kohlenstoff-Nanoröhren



$(n,m) = (5,5)$

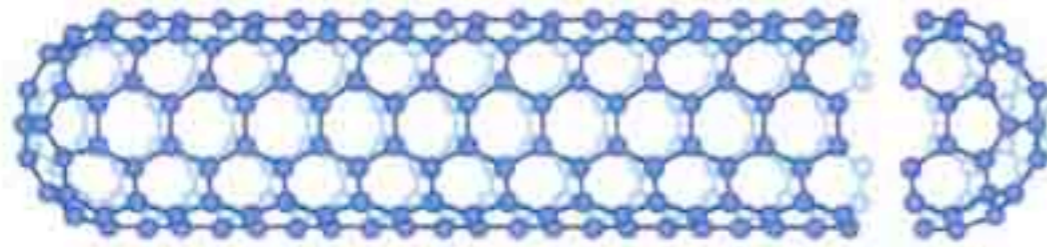


$(n,m) = (9,0)$

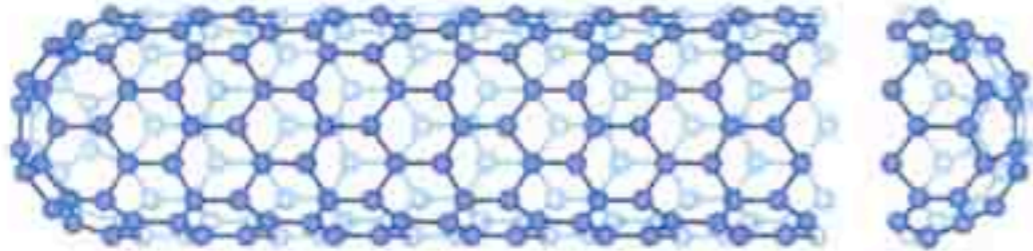


$(n,m) = (10,5)$

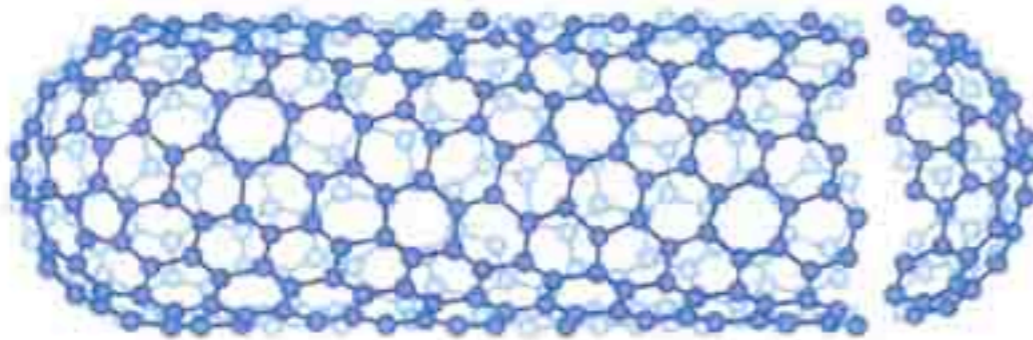
Kohlenstoff-Nanoröhren



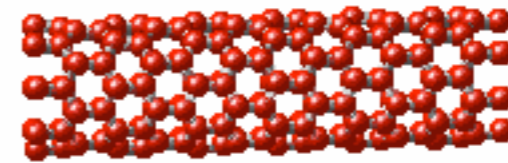
$(n,m) = (5,5)$



$(n,m) = (9,0)$



$(n,m) = (10,5)$



Quanten-Dots

Quanten-Dots



Das Zentral-Problem: Struktur-Schwankungen




Quanten-Dots







Das Zentral-Problem: Struktur-Schwankungen

● Größe, Gestalt, Platzierung

Quanten-Dots

-  Das Zentral-Problem: Struktur-Schwankungen
 -  Größe, Gestalt, Platzierung
-  Lithographie bleibt notwendig – auf Nanometer Skala!

Quanten-Dots

-  Das Zentral-Problem: Struktur-Schwankungen
 -  Größe, Gestalt, Platzierung
-  Lithographie bleibt notwendig – auf Nanometer Skala!
-  Poisson Schwankungen:

Quanten-Dots

- 🔊 Das Zentral-Problem: Struktur-Schwankungen
 - Größe, Gestalt, Platzierung
- 🔊 Lithographie bleibt notwendig – auf Nanometer Skala!
- 🔊 Poisson Schwankungen:

$$\Delta N = \sqrt{N}$$






“Lose” Kolloid-Nanopartikel

“Lose” Kolloid-Nanopartikel









Wiederum Größen-Schwankungen – aber ...

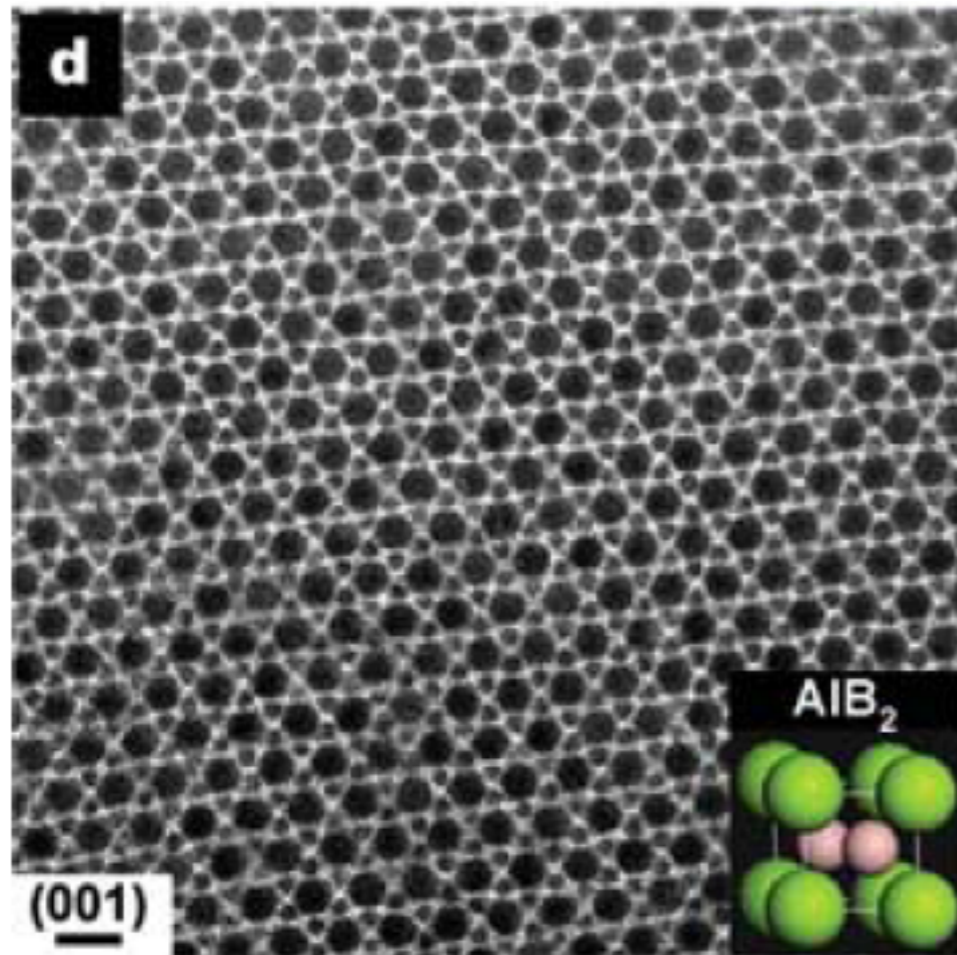
“Lose” Kolloid-Nanopartikel

-  Wiederum Größen-Schwankungen – aber ...
-  Sortierbarkeit nach physikalischen Eigenschaften
 -  Masse
 -  Optische Eigenschaften
 - 

“Lose” Kolloid-Nanopartikel

-  Wiederum Größen-Schwankungen – aber ...
-  Sortierbarkeit nach physikalischen Eigenschaften
 -  Masse
 -  Optische Eigenschaften
 - 
-  Zusammenbau zu Kolloid-Kristallen!

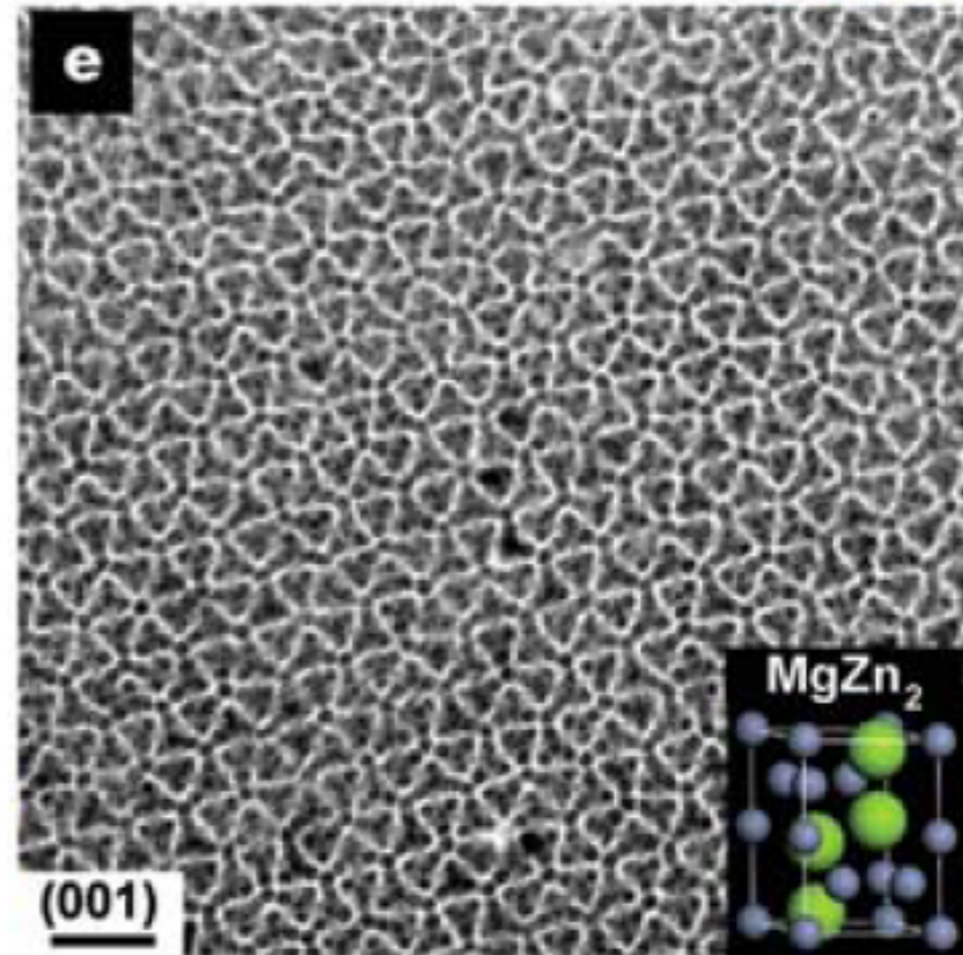
Kolloid-Kristalle: 2 Beispiele*



(001)

20 nm

6.2nm PbSe + 3.0nm Pd



(001)

5.8nm PbSe + 3.0nm Pd;

*Shevchenko et al., "Structural diversity in binary nanoparticle superlattices,"
Nature 439, 55-59 (2006)

2-D Lithographie und das 3-D Problem

2-D Lithographie und das 3-D Problem






Lithographie-Alternativen für Nanodimensionen





2-D Lithographie und das 3-D Problem

-  Lithographie-Alternativen für Nanodimensionen
 -  Zurück zu Gutenberg: Nano-”Drucken”?

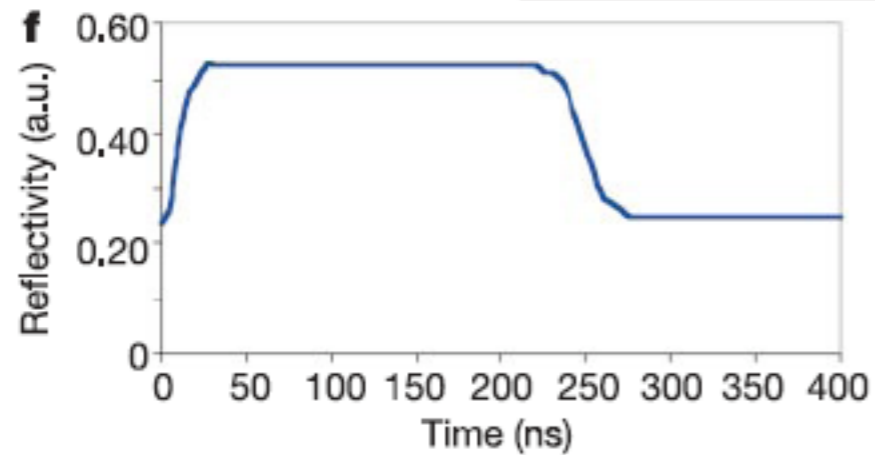
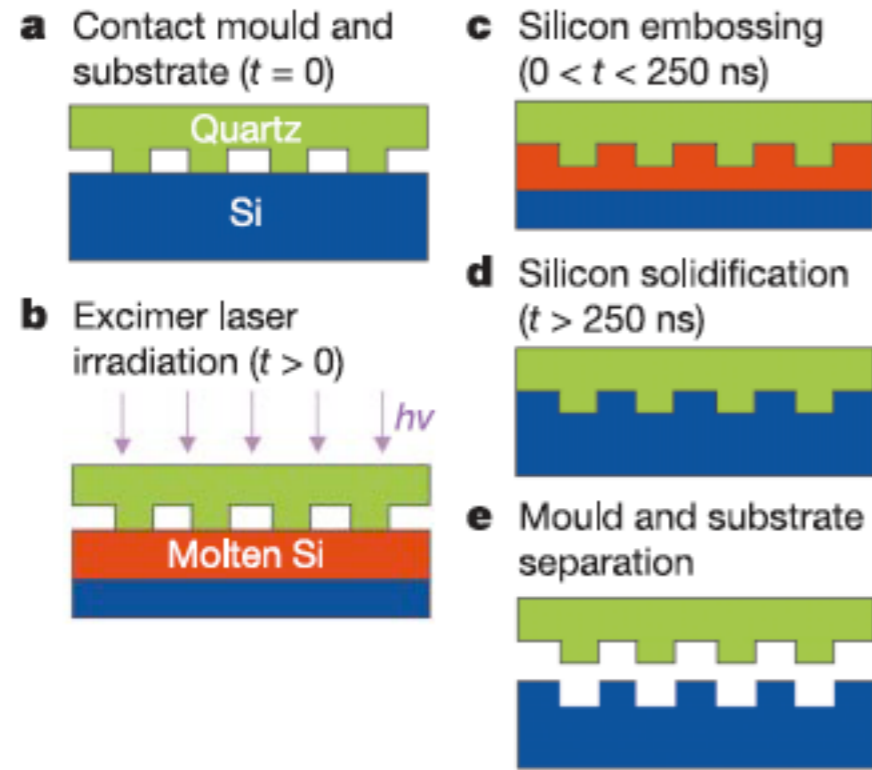
2-D Lithographie und das 3-D Problem

-  Lithographie-Alternativen für Nanodimensionen
 -  Zurück zu Gutenberg: Nano-”Drucken”?
-  Das 3-D Problem

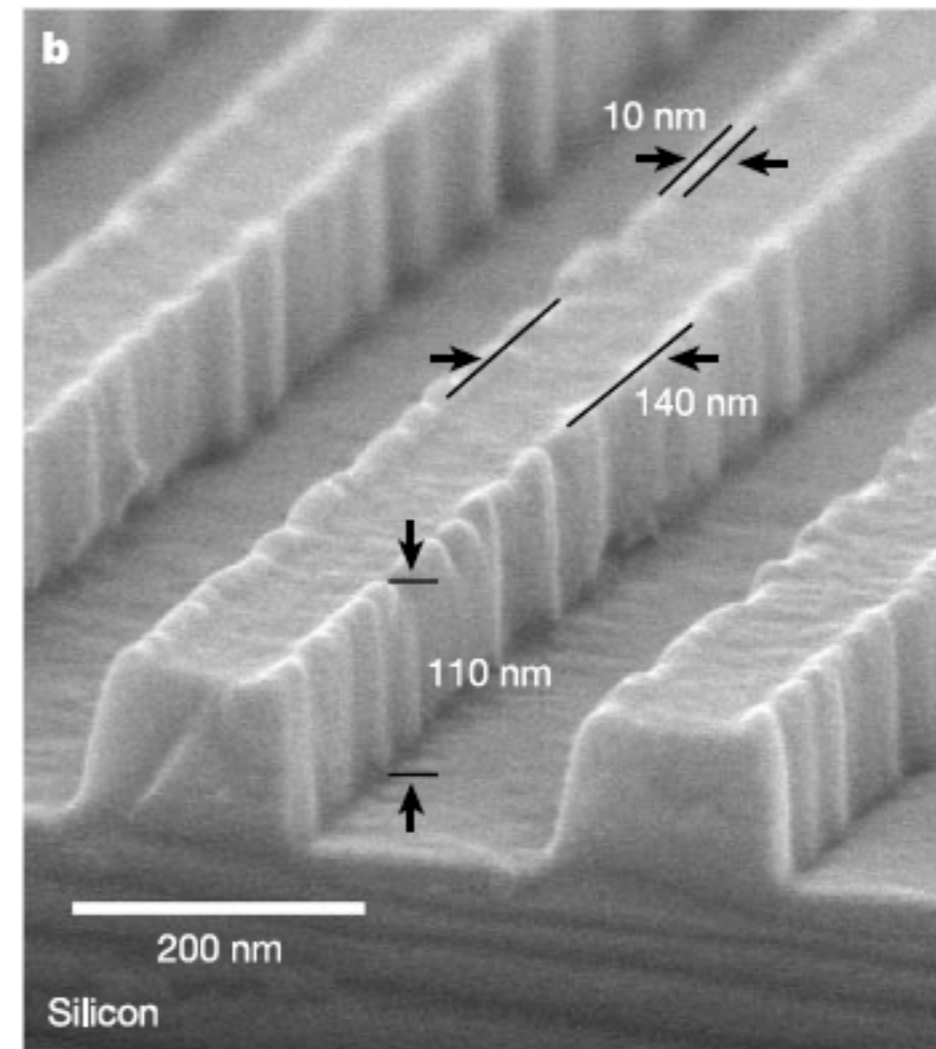
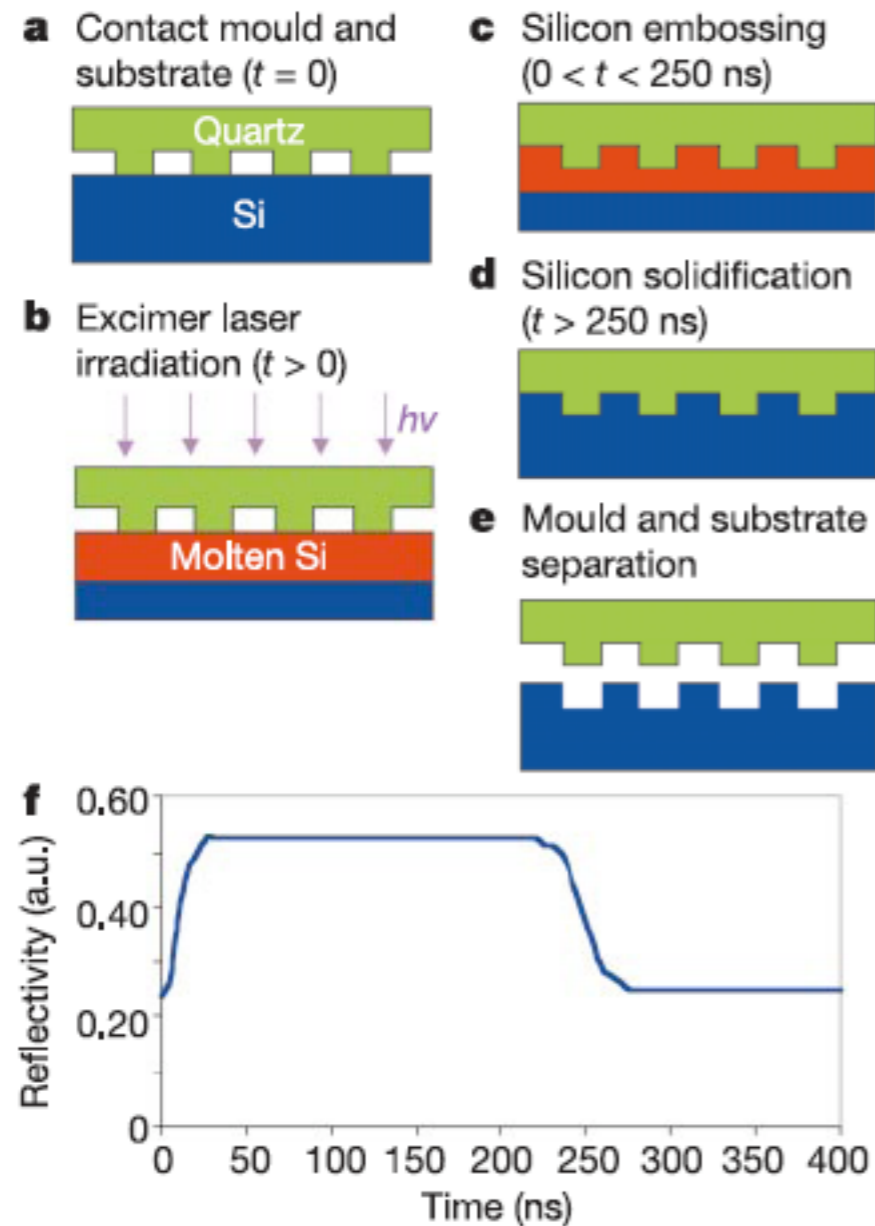
2-D Lithographie und das 3-D Problem

-  Lithographie-Alternativen für Nanodimensionen
 -  Zurück zu Gutenberg: Nano-”Drucken”?
-  Das 3-D Problem
 -  In-situ Synthese, oder “Montage” von Nano-Bausteinen?

Nano-''Imprint'': Ein Beispiel*



Nano-''Imprint'': Ein Beispiel*



Cross-section of a silicon pattern generated by laser-assisted direct imprint







*) From: S.Y. Chou, C. Keimel, and J. Gu, "Ultrafast and direct imprint of nanostructures in silicon," Nature **417**, 635-837 (2002).

Meta-Materialien:
Nano-Strukturierte **pseudo**-homogene
Materialien mit neuen Eigenschaften

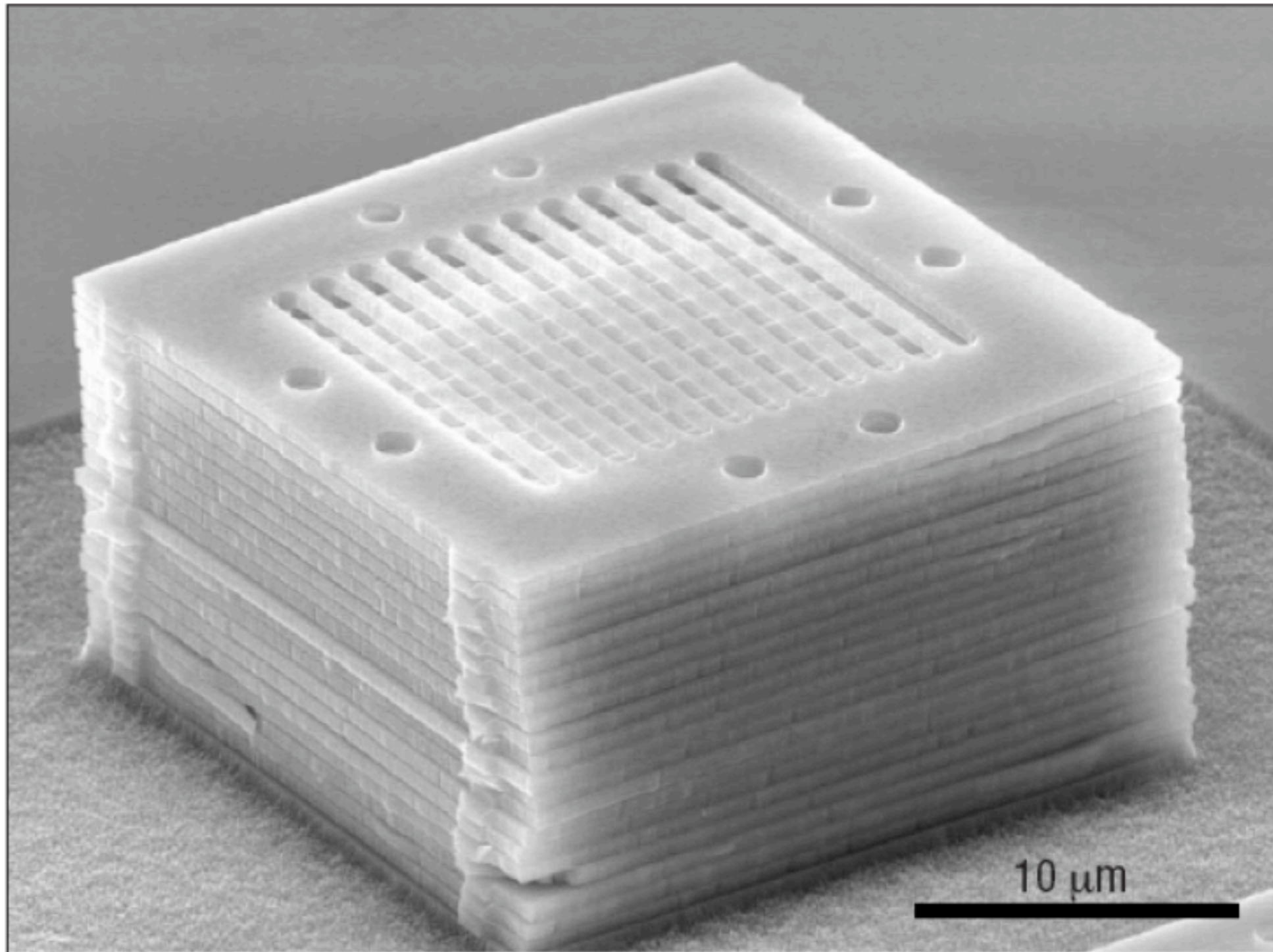
Meta-Materialien:
Nano-Strukturierte **pseudo**-homogene
Materialien mit neuen Eigenschaften

 Nano-Zellen als Pseudo-Atome

Meta-Materialien: Nano-Strukturierte **pseudo**-homogene Materialien mit neuen Eigenschaften

-  Nano-Zellen als Pseudo-Atome
-  Ein Beispiel: 3-D Photonische Kristalle im optischen Bereich
 -  Skalierung mit der Wellenlänge macht das ein Problem in Nanotechnologie
 -  Photonische Frequenz-Bänder und “Gaps”
 -  Bizarre Brechungs-Eigenschaften in erlaubten Bändern
 -  Negative Brechung

Ein erster 3-D photonischer Kristall, für 3-4 μ m Infrarot*



*) Von K.Aoki et al., "Microassembly of semiconductor three-dimensional photonic crystals,"
Nature Materials **2**, 118-121 (2003)

“Andere” Quantisierungs-Effekte

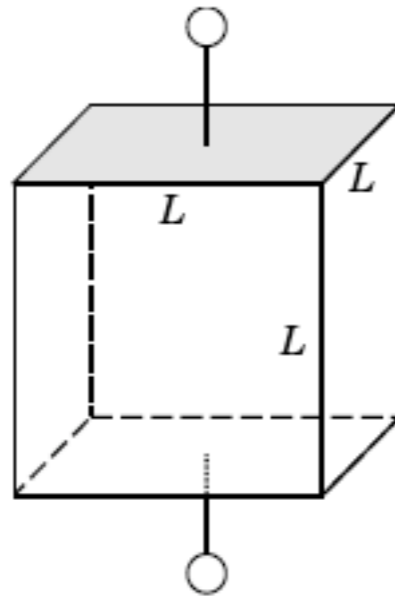
“Andere” Quantisierungs-Effekte

 Quantisierung der Ladung

 Magnet-Fluß Quantisierung

Ladungs-Quantisierung und Coulomb-Blockade

Ein Nano-Kondensator



$$C = \epsilon \cdot L = 8.85 \cdot 10^{-19} \text{ F} \cdot \left(\frac{\epsilon_r}{10} \cdot \frac{L}{10 \text{ nm}} \right)$$

Spannung pro Elektron:

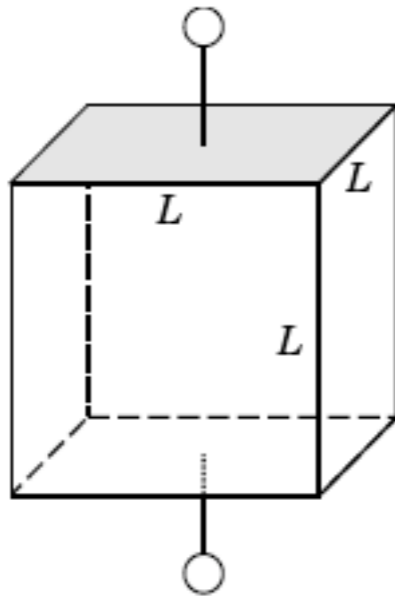
$$\Delta V = \frac{e}{C} = 0.18 \text{ V} \cdot \left(\frac{10}{\epsilon_r} \cdot \frac{10 \text{ nm}}{L} \right)$$

Zum Vergleich:

$$k \cdot 300 \text{ K} = 25.8 \text{ meV}$$

Ladungs-Quantisierung und Coulomb-Blockade

Ein Nano-Kondensator



$$C = \epsilon \cdot L = 8.85 \cdot 10^{-19} \text{ F} \cdot \left(\frac{\epsilon_r}{10} \cdot \frac{L}{10 \text{ nm}} \right)$$

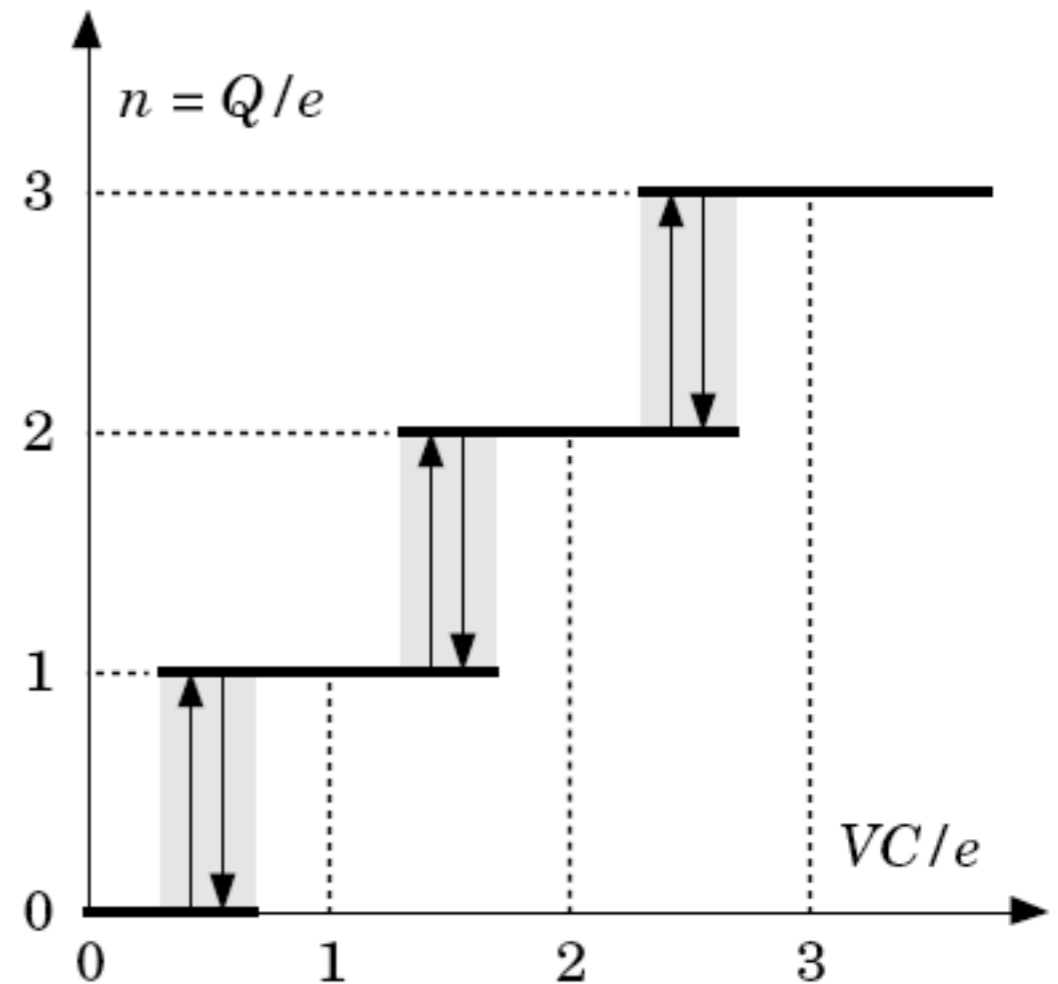
Spannung pro Elektron:

$$\Delta V = \frac{e}{C} = 0.18 \text{ V} \cdot \left(\frac{10}{\epsilon_r} \cdot \frac{10 \text{ nm}}{L} \right)$$

Zum Vergleich:

$$k \cdot 300 \text{ K} = 25.8 \text{ meV}$$

Ladungs-Stufen
als Funktion der Spannung



Verhaltensregeln gegenüber “futuristischen” Spekulationen:

Verhaltensregeln gegenüber “futuristischen” Spekulationen:

Die Frage ist nicht, ob “es geht” oder “nicht geht,”
sondern besser:
Welche Probleme müssten gelöst werden, *damit* es geht?

Verhaltensregeln gegenüber “futuristischen” Spekulationen:



Die Frage ist nicht, ob “es geht” oder “nicht geht,”
sondern besser:
Welche Probleme müssten gelöst werden, *damit* es geht?



Die internationale “Semiconductor Road
Map”

Verhaltensregeln gegenüber “futuristischen” Spekulationen:

Die Frage ist nicht, ob “es geht” oder “nicht geht,”
sondern besser:
Welche Probleme müssten gelöst werden, *damit* es geht?

-  Die internationale “Semiconductor Road Map”
-  “Moore’s Law” über CMOS hinaus?

Epilog

**Nano-”Was-auch-immer”:
Wissen wir wirklich
was uns hinter dem Horizont erwartet?**

Epilog

**Nano-”Was-auch-immer”:
Wissen wir wirklich
was uns hinter dem Horizont erwartet?**



Nur vage

Epilog

**Nano-”Was-auch-immer”:
Wissen wir wirklich
was uns hinter dem Horizont erwartet?**



Nur vage



Macht das etwas aus?

Epilog

**Nano-”Was-auch-immer”:
Wissen wir wirklich
was uns hinter dem Horizont erwartet?**

 Nur vage

 Macht das etwas aus?

 Kaum:

 Laßt uns opportunistisch handeln: Da is genug dort!