

Einführung in die Nanotechnologie

Grundlagen des Elektronischen Transports

Dozent: Bedeermann

Q. Was ist Nanotechnologie?

Nanotechnologie ist ein Umschlagbegriff, unter dem eine Vielzahl naturwissenschaftlicher und ingenieurtechnischer Fragestellungen und Aktivitäten zusammen. Das gemeinsame Konzept sind Strukturen (kondensierte Materie) im Bereich von ≈ 1 nm (Atom) bis einige μ m.

Ziele: (nicht erschöpfend)

- Miniaturisierung (Einzelkomponententechnik, Elektronik)
- Materials Design: Volumenmaterialien, Oberflächen mit Struktur auf der Nanoskala, neue Eigenschaften.

Herausforderungen:

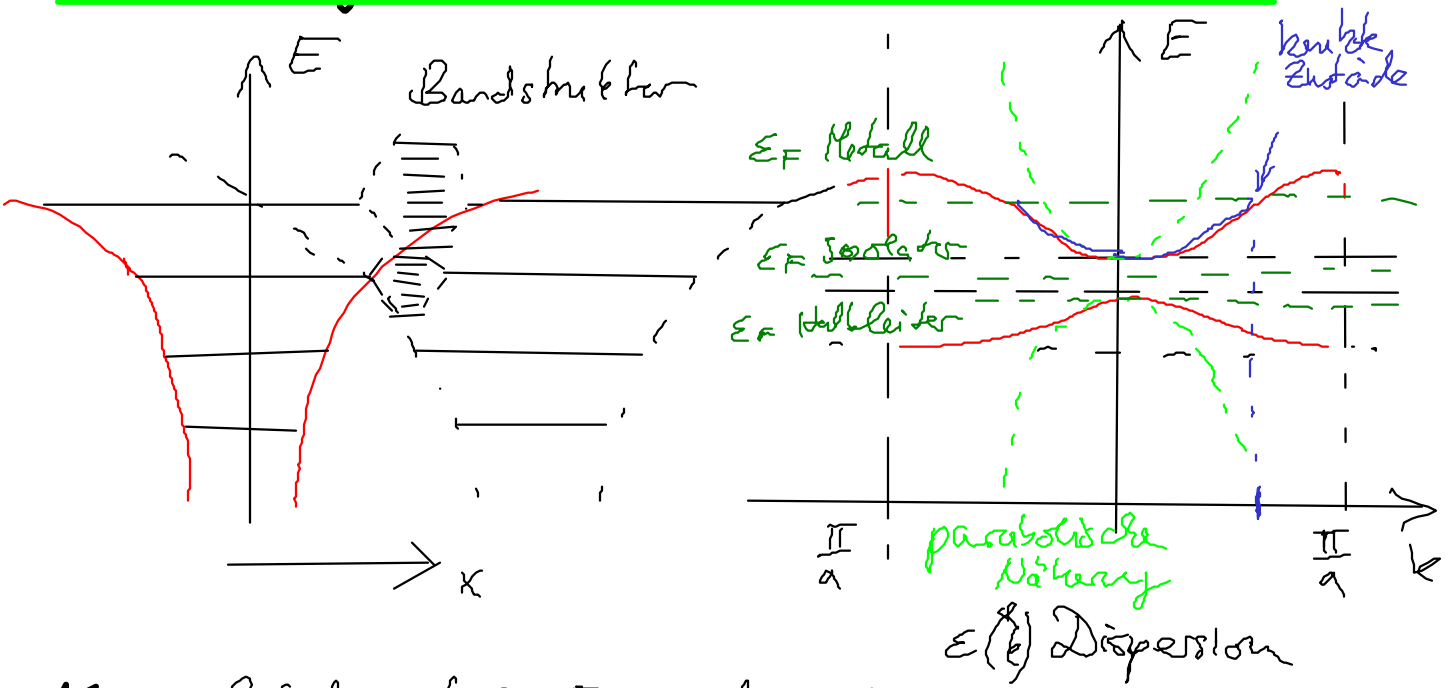
- Herstellungsverfahren: Top-down (Lithographie-Verfahren) v.s. Bottom Up (wie Natur Selbstorganisation der Bausteine)
- Verständnis der Eigenschaften / Funktionalität

Fragestellungen / Lösungen sind in der Regel interdisziplinär

Visionen

- Quantum Computing
- Supramolekulare Computer (mit Selbstorganisation ...)
- Photonik

1. Einführung: Festkörper in reduzierter Dimension



Atom: lokalisierte Zustände, diskontinuierliches Spektrum

Festkörper: Überlappung \rightarrow delokalisierte Zustände (ebene Wellen, Blochzustände) Bänder, Wellenzahl $k = \frac{2\pi}{\lambda}$

- Metall mit 1cm^3 enthält ca. 10^{23} Atome $\Rightarrow k$ quasi kontinuierlich
- Elektronenenergie (innerhalb des Bandes) $E(k) = \frac{(\hbar k)^2}{2m^*}$

m^* : Krümmung der Kurve $\hat{=}$ effektive Masse

$\hbar k$: Kristallimpuls

meistens nicht eine parabolische Näherung.

- Bandstruktur geht über \rightarrow effektive Masse m^*

- in Metallen ist $m^* \approx m_e$ (freie Elektronenmasse)

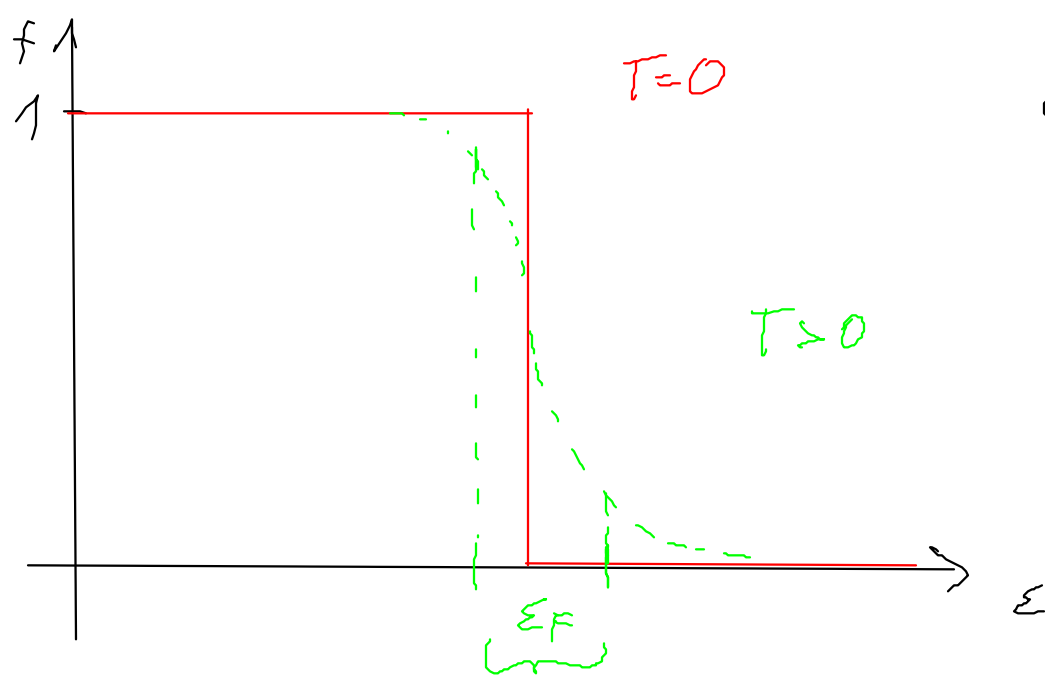
- in Halbleitern (oft) $m^* \ll m_e$

Fermi-Energie E_F besetzt bei $T=0$ alle Zustände unterhalb

- bei endlichen Temperaturen: Fermi-Verteilung

$$f(\epsilon) = \frac{1}{e^{\frac{\epsilon - \mu}{kT}} + 1}$$

chemisches Potential $\mu \approx E_F$ für $kT \ll E_F$



e^- bewegen sich
relativ frei
Fermi-Verteilung:
keine leeren Zustände
bis zu bestimmten
Energie, Rest ist frei

Im parabolischen Bandmodell

$$|\vec{k}| \leq k_F = (3\pi^2 n)^{1/3}$$

n : Ladungsträgerkonzentration

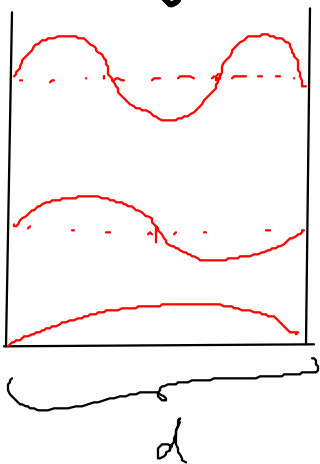
typische Wellenlänge $\lambda_F = \frac{2\pi}{|k_F|}$ von Elektronen

• Umkehrung durch E-Feld: relativ kleine Wirkung

typische Werte:

- Metall $k_F \sim 2 \text{ \AA}^{-1} \rightarrow n_F \sim 3 \text{ \AA}^3$
- Halbleiter (dotiert): $k_F \sim 0,01 \text{ \AA}^{-1} \rightarrow n_F \sim 50 \text{ nm}^3$
- Fermienergie in Metallen \rightarrow einige eV

1.2 Niedrigdimensionale Festkörper

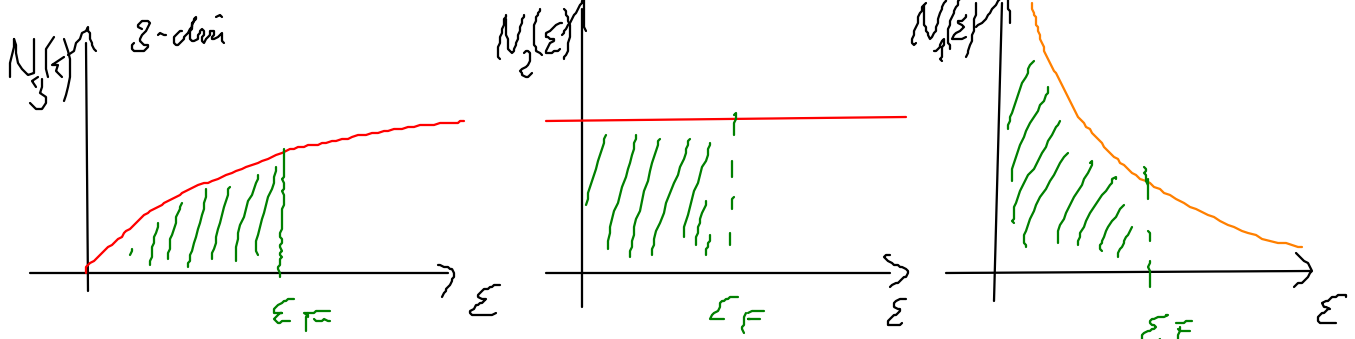


Teilchen im Kasten
diese Einschränkung wird wichtig, wenn
 $n \approx d$

	Metall	2-dim Halbleiter	0-dim Quantenpunkt	Atom
Ausdehnung	1 cm^3	$\square \times d \approx 10 \text{ nm}$	$\square \approx 10 \text{ nm}^3$	$\sim 0,5 \text{ nm}$
Wellenlänge λ_F	$0,5 \text{ nm}$	$\sim 50 \text{ nm}$	$\alpha^* \sim 10 \text{ nm}$ (Bohr radius)	$\alpha_B \sim 0,5 \text{ nm}$
Energieskala ϵ_F	5 eV	$\sim 5 \text{ meV}$	$\sim 5 \text{ meV}$	10 eV
Anregungsenergie (Abstand zw. 2 Zuständen)	$\sim 10^{-10} \text{ eV}$	$\sim 2 \text{ meV}$ (in z-Richtung)	$\sim 2 \text{ meV}$ (in alle Richtungen)	10 eV
			(= künstliches Atom)	

Zustandsdichte N : Anzahl der Elektronen pro Energie und Volumen

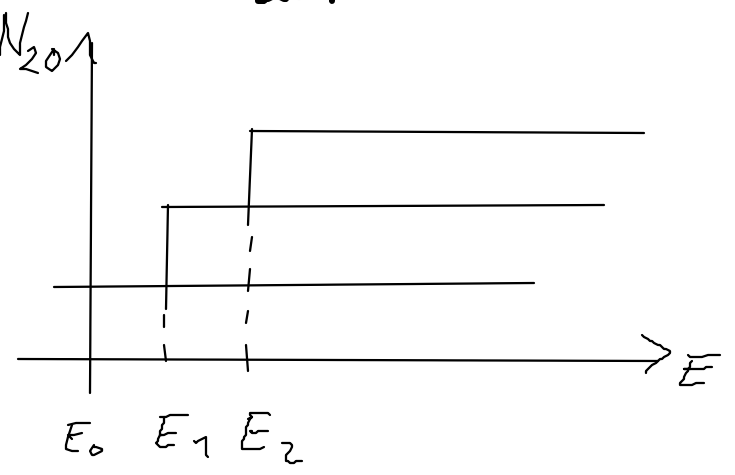
$N_d(\epsilon) \sim \epsilon^{\frac{d}{2}-1}$ (parabolisches Band)



- Im 3-d Dimensionen: mikroskopische Beschreibung \Rightarrow diskretes Spektrum
- Gesamtspektrum: Überlagerung des kontinuierlichen und diskreten Spektrums.

in 3-dim $\epsilon(\vec{k}) = \frac{\hbar^2(k_x^2 + k_y^2 + k_z^2)}{2m^*}$ 2-dim $\epsilon(\vec{k}) = \frac{\hbar^2(k_x^2 + k_y^2)}{2m^*} + E_n$ 1-dim $\epsilon(\vec{k}) = \frac{\hbar^2 k_x^2}{2m^*} + E_{n,m}$ 0-dim $\epsilon(\vec{k}) = E_{n,m,l}$

\uparrow
z-Quantisierung



Dimensionalität hängt ab, welche Größe man betrachtet: hier Energiespektrum, relevante Längenskala λ_F . Je nach Problem kann die Dim. anders definiert sein.