

# Kohlenstoffnanoröhrchen

**Begriffsklärung**

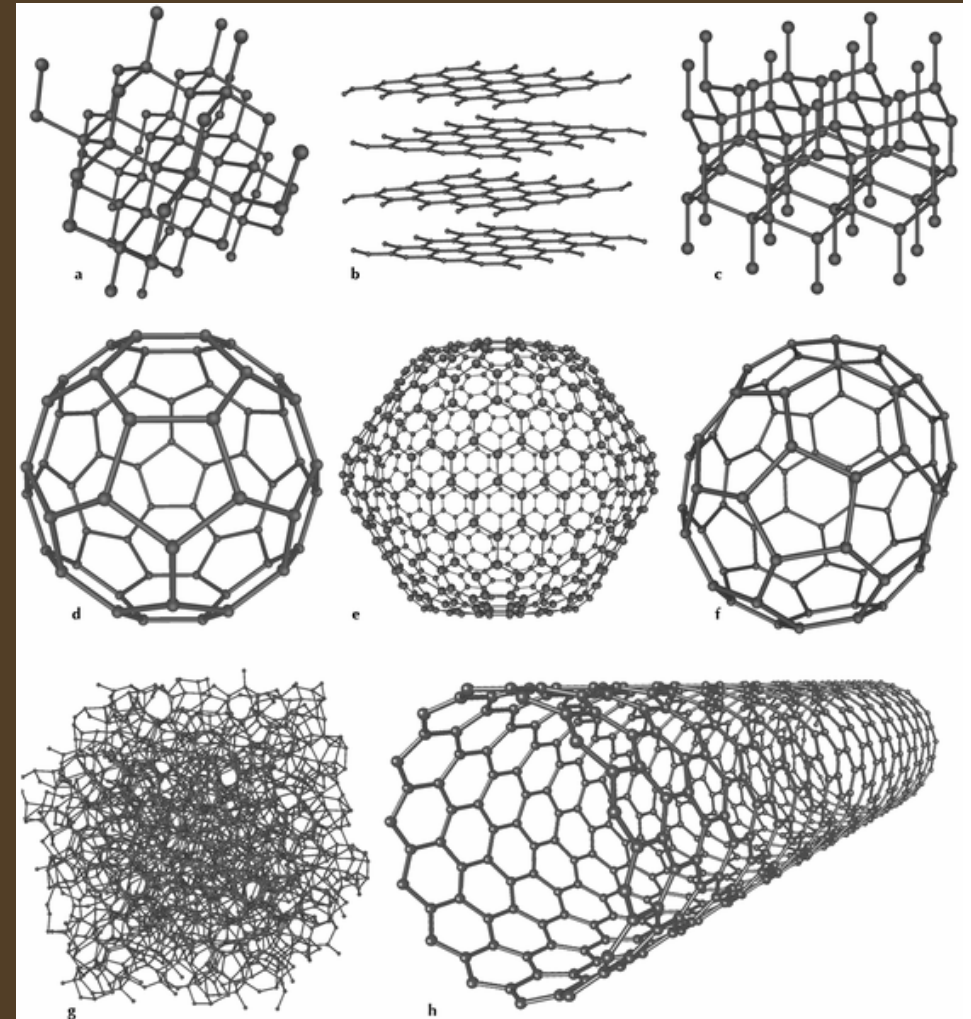
**Synthese**

**Physikalische Eigenschaften + Anwendungen**

**Fazit**

# BEGRIFF

- C-Modifikation, neben Graphen, Diamant und Fulleren
- **hexagonale Struktur**
- Aufgerolltes Graphen
- Durchmesser zwischen 0,4 und 100 nm
- Längen bis zu 1 mm (Rekord, 20cm)
- **Multitalent** mit vielen **superlativen** Eigenschaften

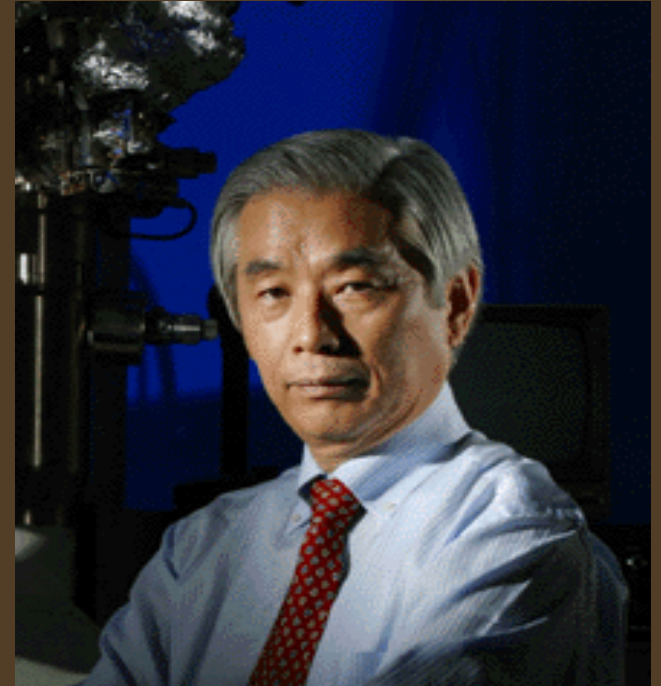


# BEGRIFF

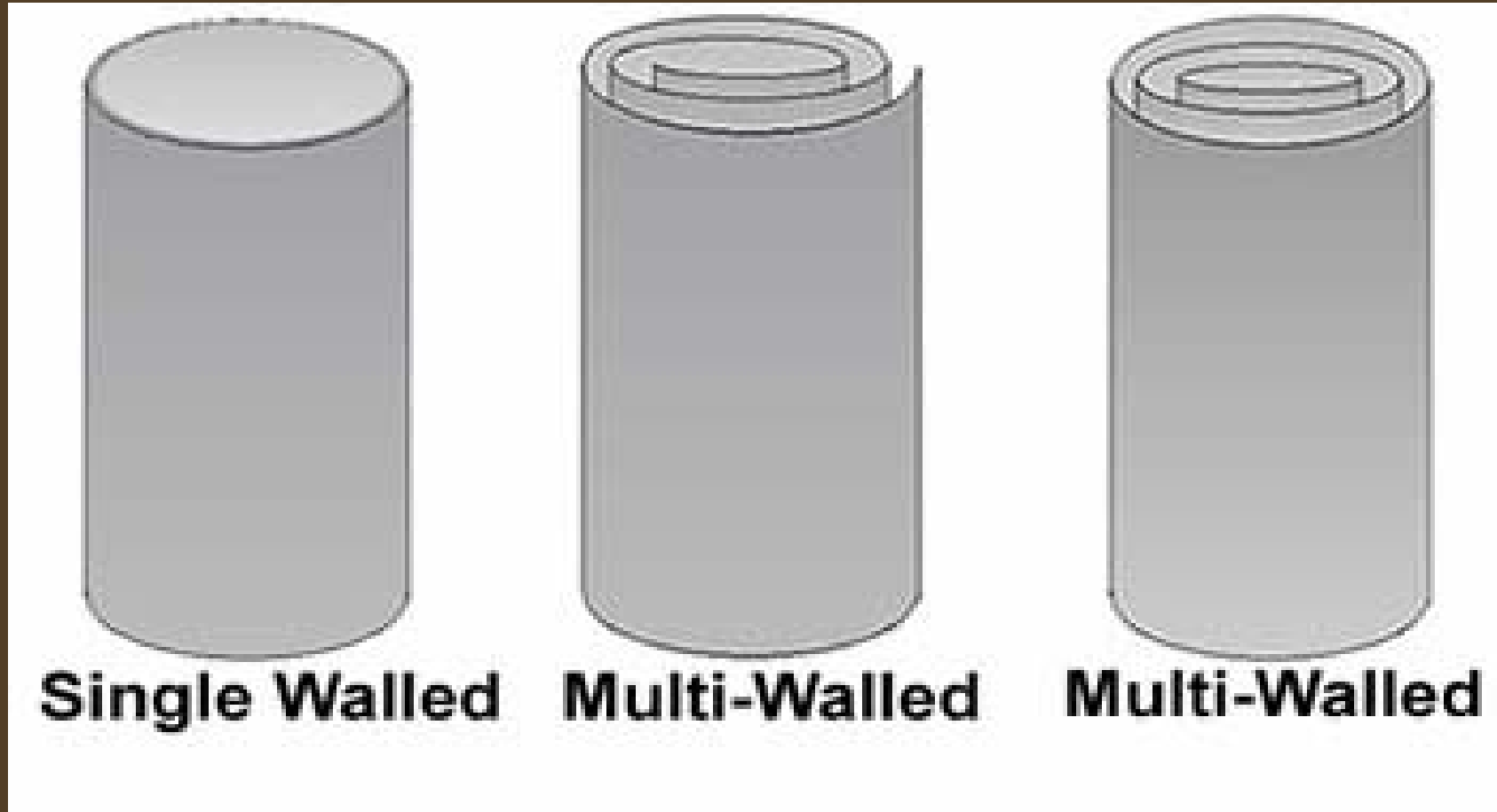
Entdeckung 1991 durch **Sumio Iijim**  
bei Lichtbogenentladung

Benjamin-Franklin-Medaille für  
Physik 2002

Mit einer Million Schweizer Franken  
dotierte Balzan-Preis 2007



# BEGRIFF



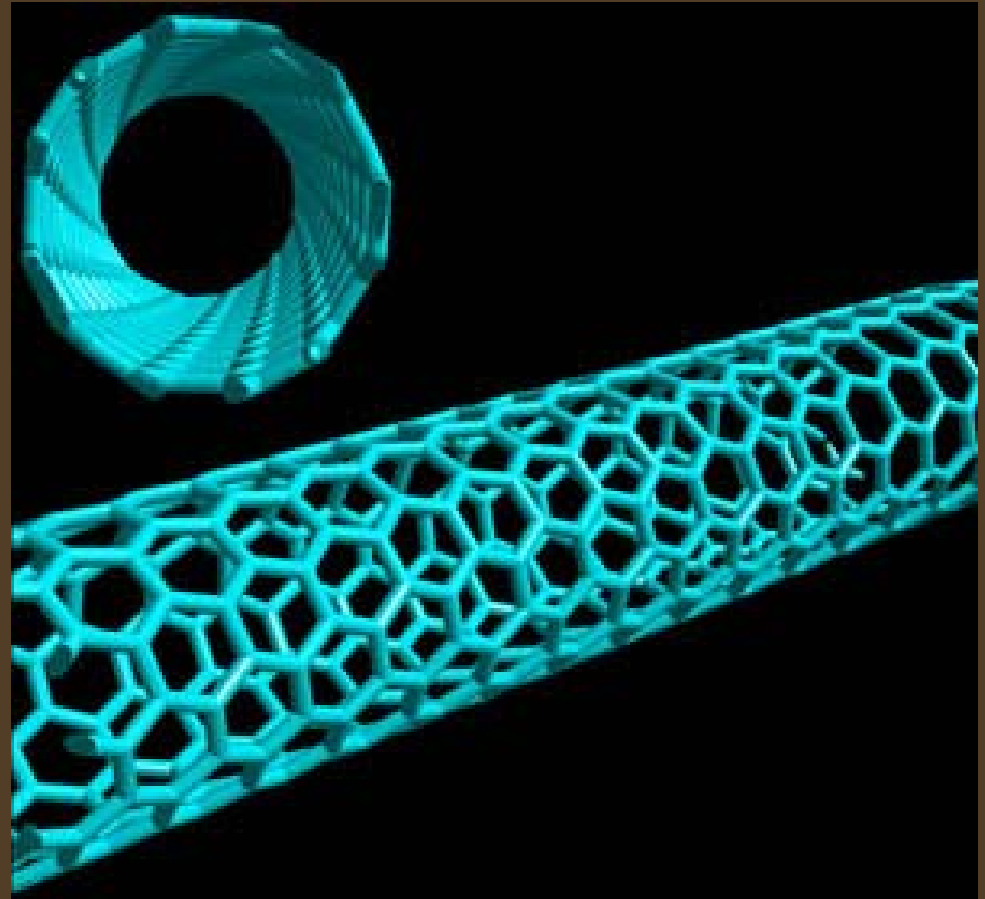
# BEGRIFF

Single Walled (0,4-5nm)

- Leiter
- Halbleiter

in der Mikroelektronik,

weil ihre elektrischen  
Eigenschaften gut zu  
kontrollieren sind...

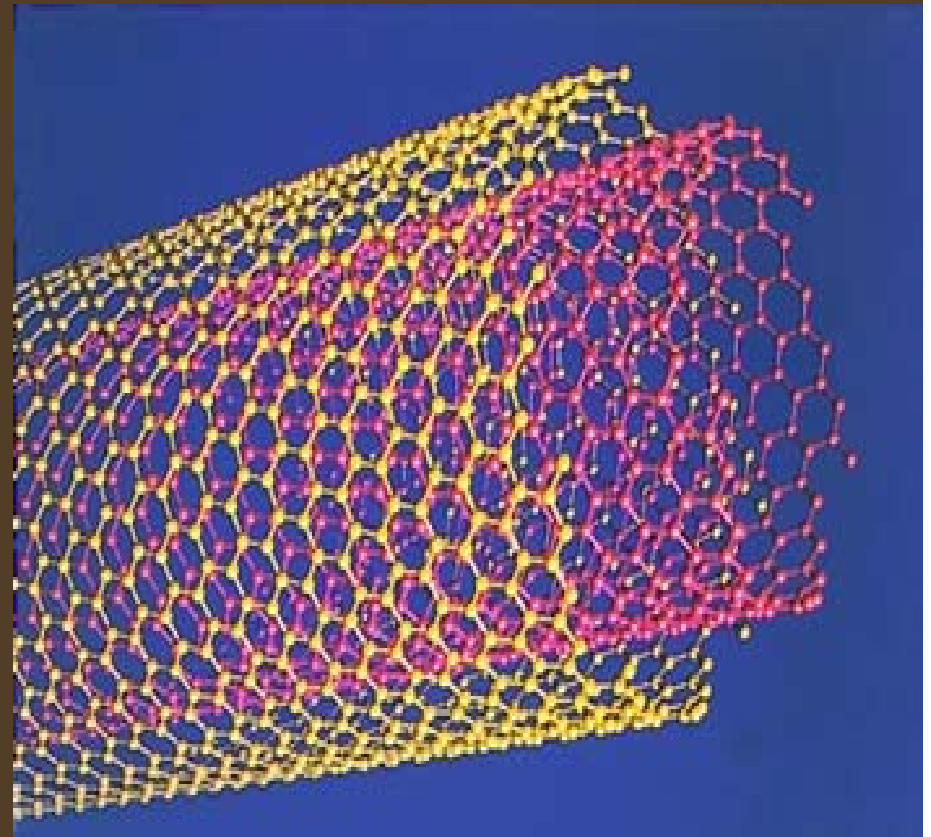


# BEGRIFF

## Multi Walled

- Massivmaterialien
- chemische Schutzschicht der SWNT,

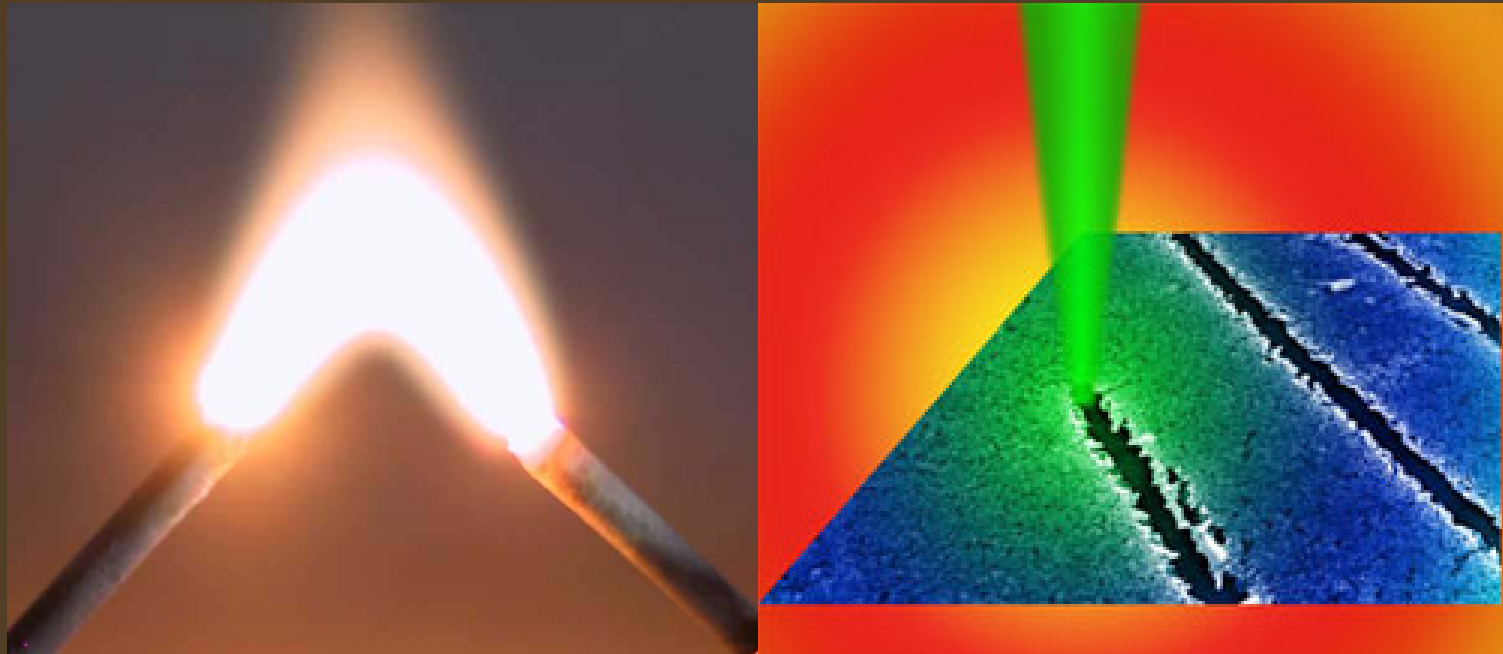
weil durch die Vielschichtigkeit eher die mechanische Vorteile hervortreten...



# SYNTHESE

Lichtbogenentladung und Laserablation

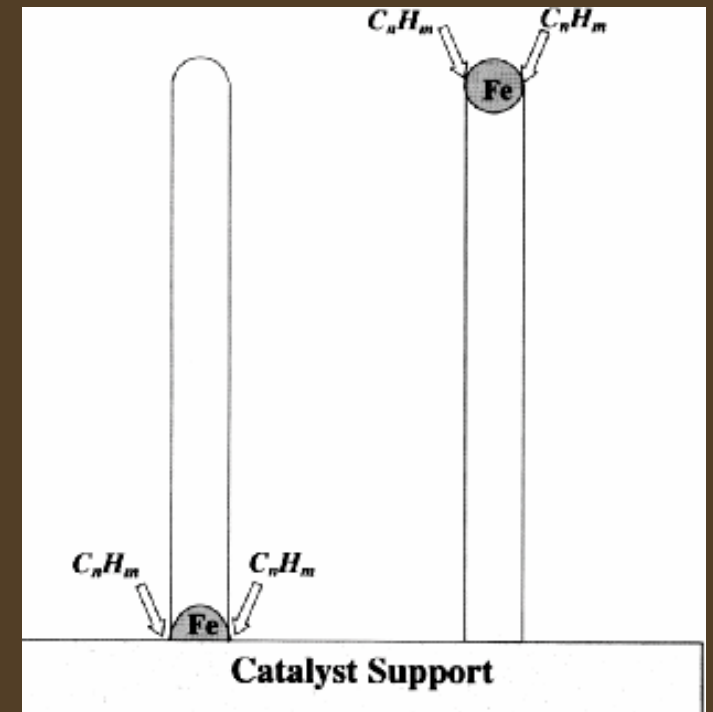
→ Kondensation von verdampftem Graphit



# SYNTHESE

## CVD

- Kohlenwasserstoffgas wird an Katalysator vorbeigeleitet
- Wachstum auf Trägersubstrat durch **Selbstorganisation**
- 2002 durch Infineon
- Schwierig zu kontrollieren ob Halbleiter oder Leiter und SWNT oder MWNT
- gezieltes Wachstum zwischen 2 Punkten schwer zu verwirklichen



# PHYSIKALISCHE EIGENSCHAFTEN

Der **Bottom-Up**-Herstellungsprozess der Kohlenstoffnanoröhrchen der uns die Manipulation nanoskaliger Strukturen ermöglicht und die besonderen Eigenschaften des **Graphens**, verleihen den Kohlenstoffnanoröhrchen einzigartige...

# PHYSIKALISCHE EIGENSCHAFTEN

...Mechanische Eigenschaften...

...Oberflächenverhalten...

...Thermische Leitfähigkeit...

...Elektronische Eigenschaften

# Mechanische Eigenschaften

steife, stabile **Hybridbindungen**

→ 20-mal höhere **Zugfestigkeit**

→ doppelt so hohes **E-Modul** wie Stahl

→ dabei so **leicht** wie Al

→ steife, stabile und leichte Verbundwerkstoffe, wie...

...Schußweste (MIT), Windräder, Fahrradhelme oder Tennisschläger...

# Oberflächenverhalten

keine ungesättigte Bindungen

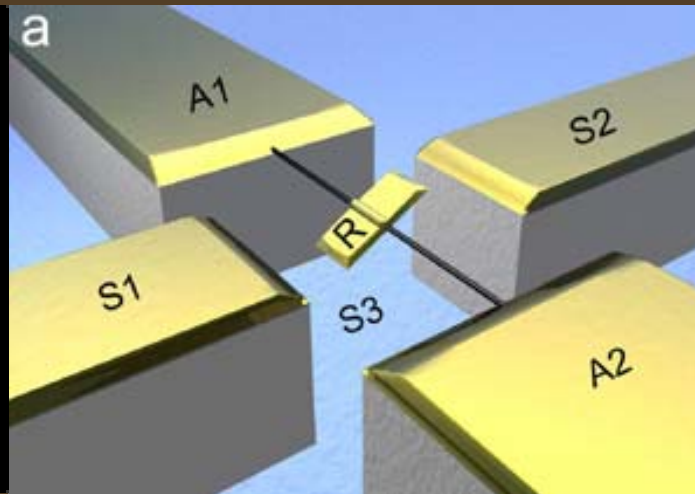
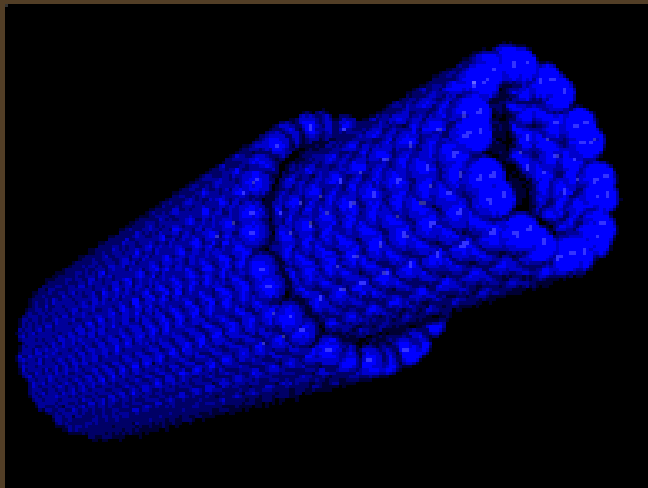
+ 2D-Organisation der sp<sup>2</sup>-Bindung

→ **keine Reibung**

→ Membranen und Filter mit perfektem Leitungsverhalten

→ mechanische Oszillatoren (> 50 GHz)

→ Nanomotoren in der Feinmotorik



# Thermische Leitfähigkeit

steife Bindung

- höhere **Wärmeleitfähigkeit** als die des Diamant
- Schaltkreiskühlung (Fujitsu)

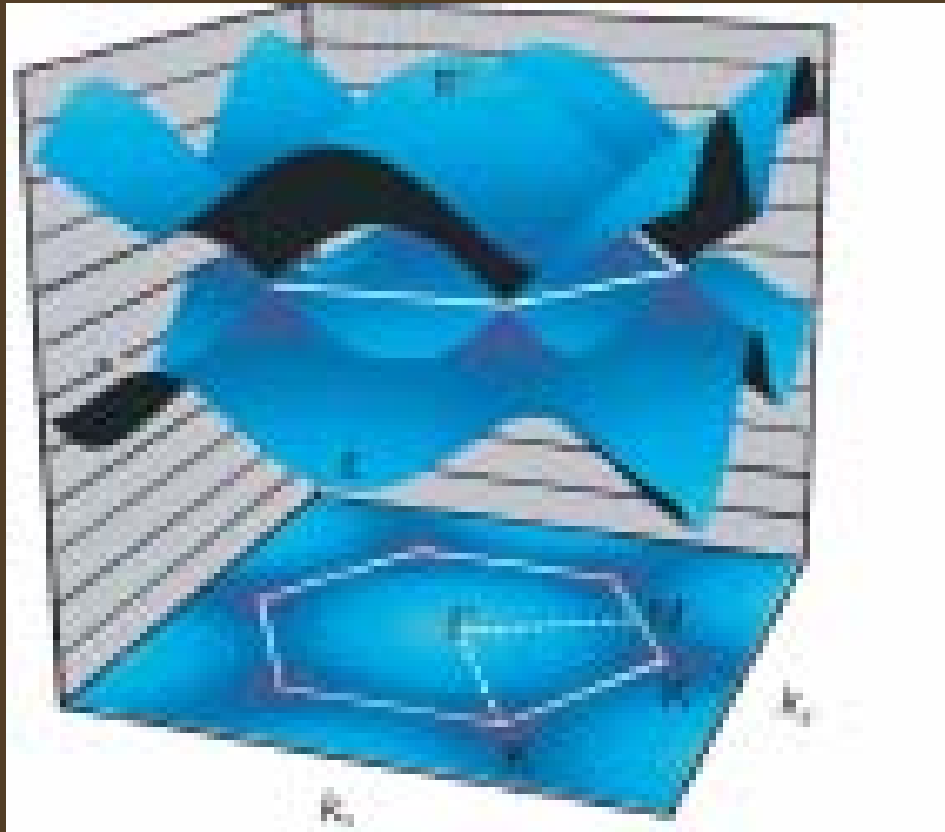
# Elektronische Eigenschaften

Die **elektronische Struktur** eines Materials ist entscheidend für die Art seiner Leitfähigkeit. Im Fall der Kohlenstoffnanoröhrchen leitet sich diese von der des Graphens ab...

# Elektronische Eigenschaften

Fermie-Punkte

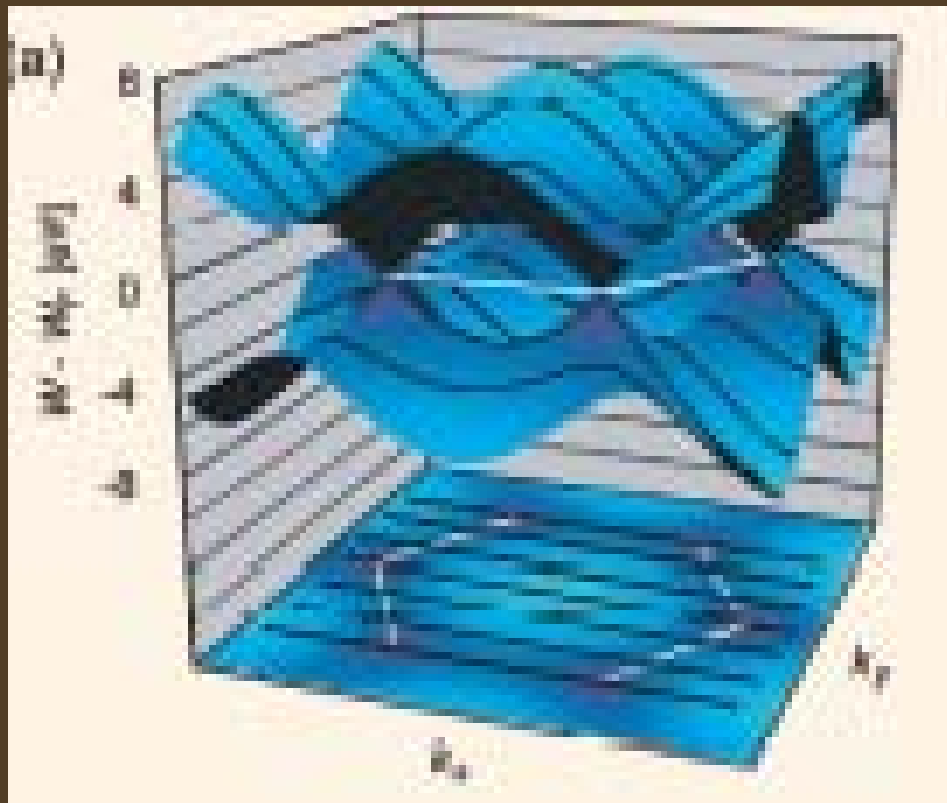
→ Graphen ist ein Halbmetall



# Elektronische Eigenschaften

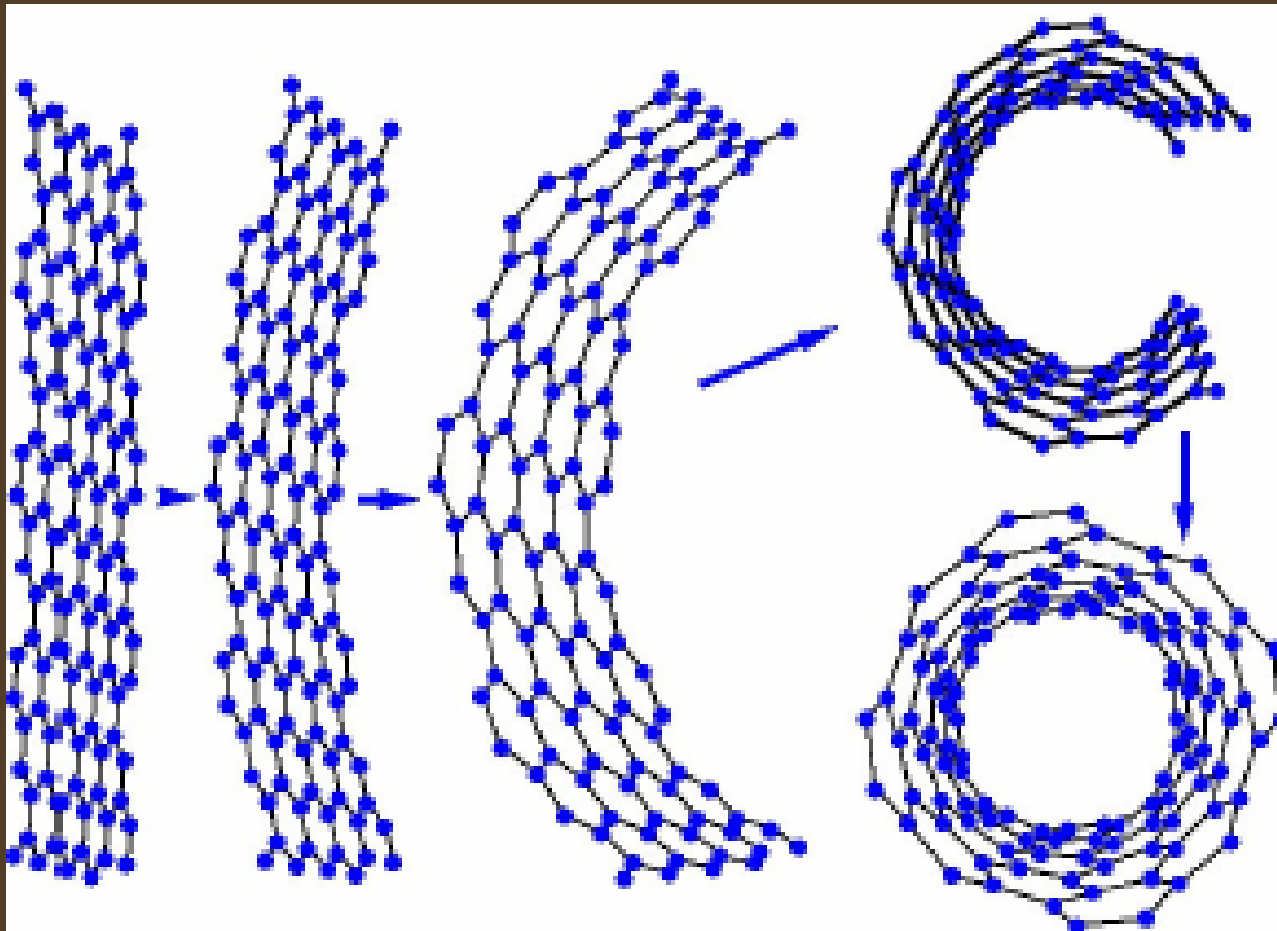
Schmales Stück Graphen

→ **Diskretisierung** der erlaubten Wellenvektoren



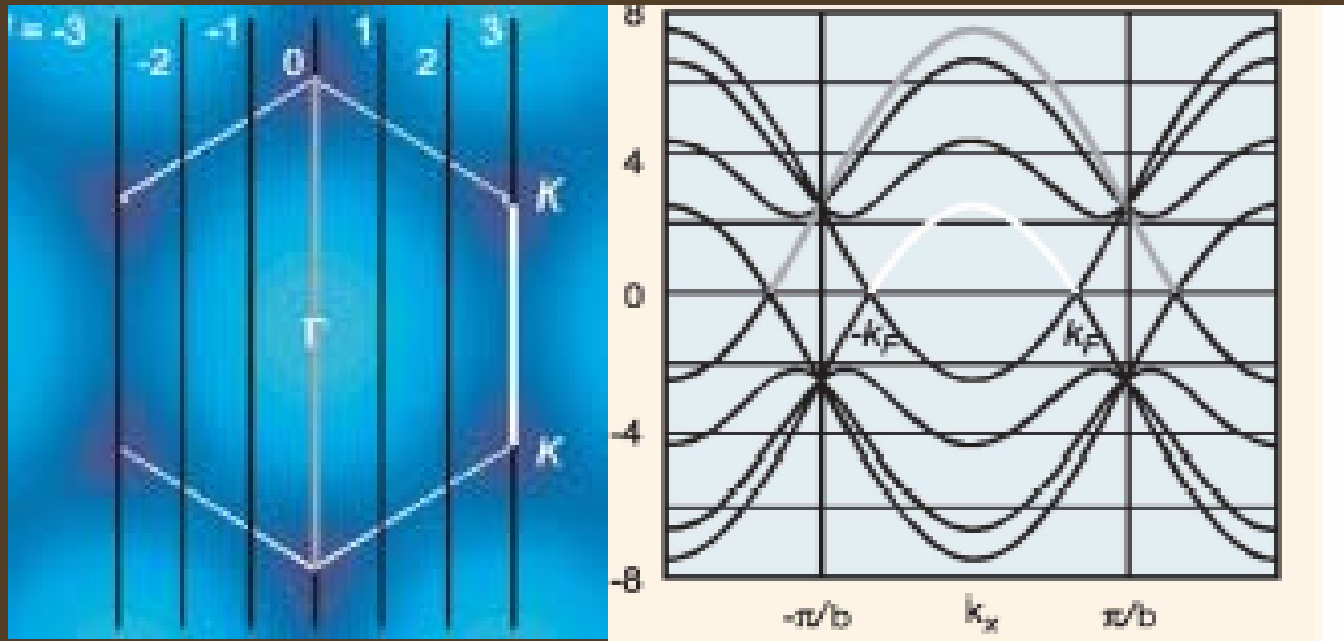
# Elektronische Eigenschaften

## Automatische Faltung



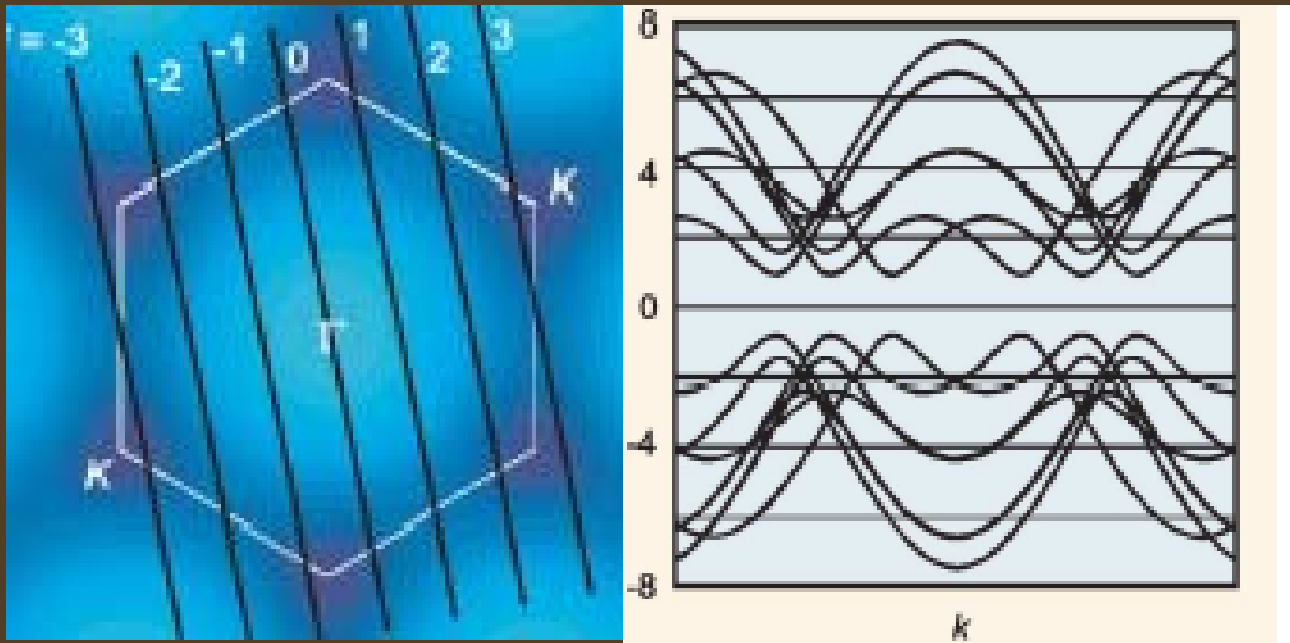
# Elektronische Eigenschaften

Halbmetalleigenschaften, wenn diskrete Energieniveaus Fermie-Punkte kreuzen



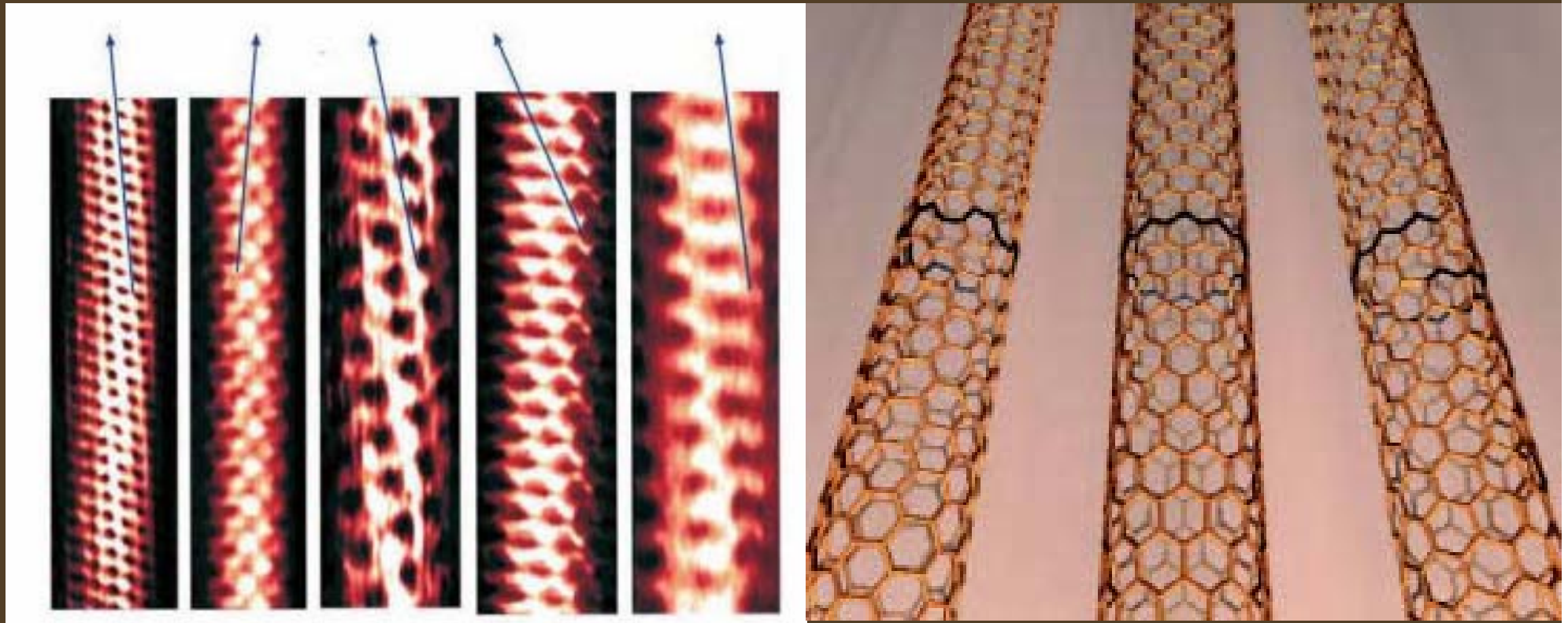
# Elektronische Eigenschaften

Halbleitereigenschaften, wenn diskrete Energieniveaus Fermie-Punkte nicht kreuzen



# Elektronische Eigenschaften

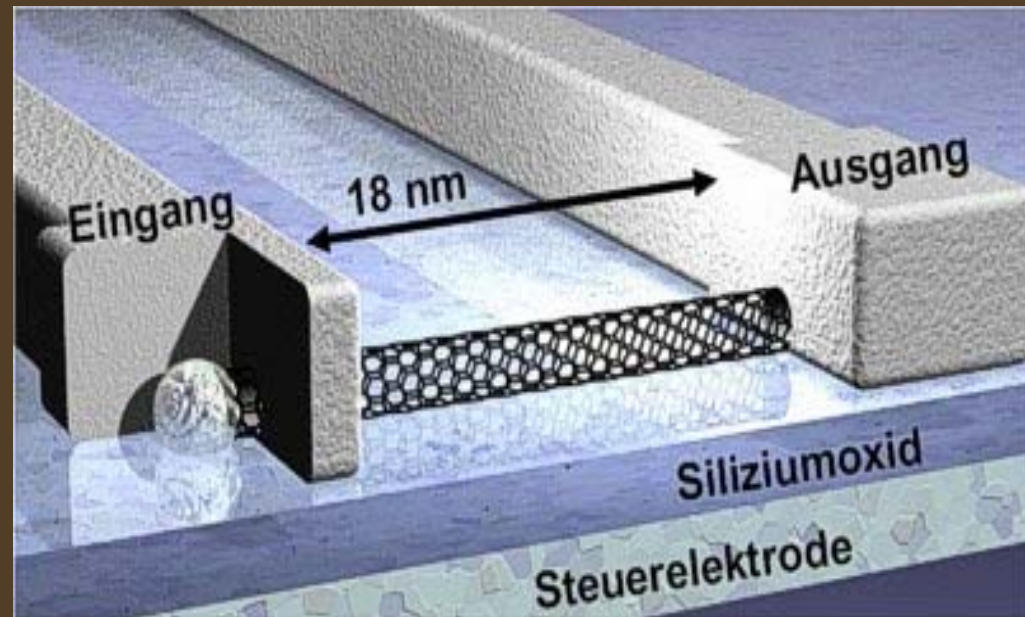
Halbmetall  $\leftarrow$  geometrische Struktur  $\rightarrow$  Halbleiter



# Elektronische Eigenschaften

→ weitere **Miniaturisierung** von Leiter- + Halbleiterstrukturen

Infineon 2004



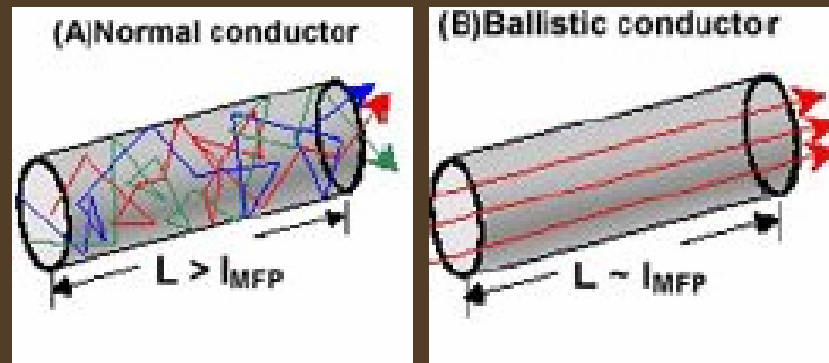
# Elektronische Eigenschaften

## Quantisierte Energiezustände

→ geringe Streuwahrscheinlichkeit

→ große mittlere freie Weglänge (500nm bis 10 $\mu$ m, in Metalle ca. 40nm)

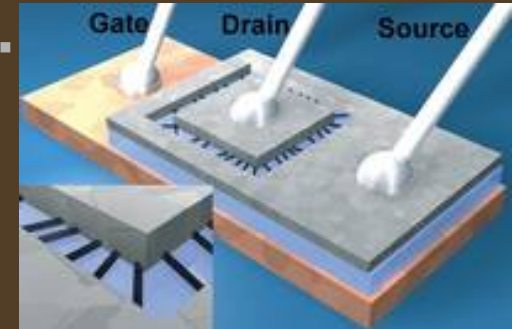
→ **ballistischer Transport** der Elektronen



# Elektronische Eigenschaften

→ **Strombelastbarkeit** 1000 mal höher als Cu.  
...Leistungstransistor (Prototyp, Infineon)

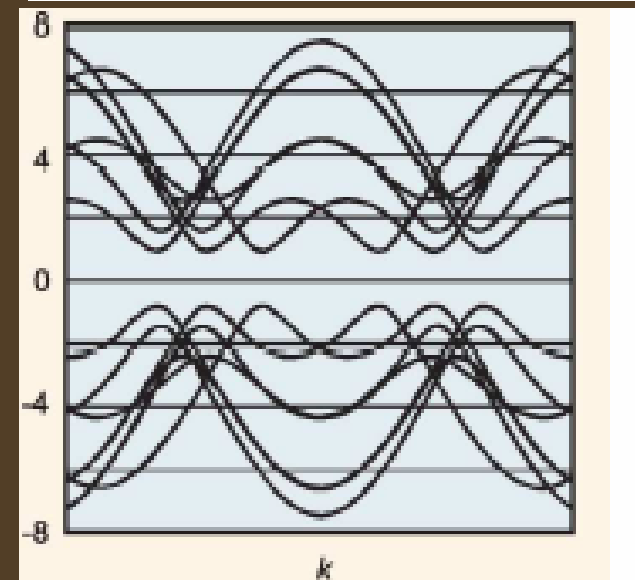
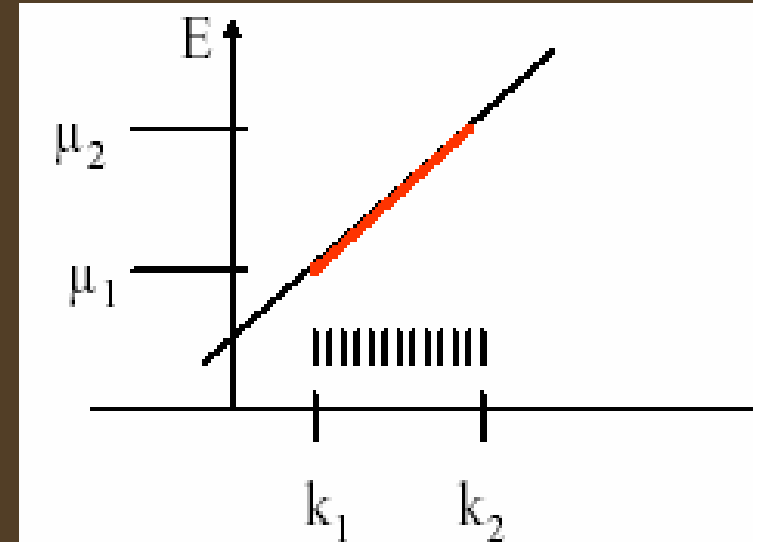
→ **hohe Beweglichkeit, Leitfähigkeit**  
...verlustarme, schnelle ICs  
...hochleistungsfähige Prozessoren



# Elektronische Eigenschaften

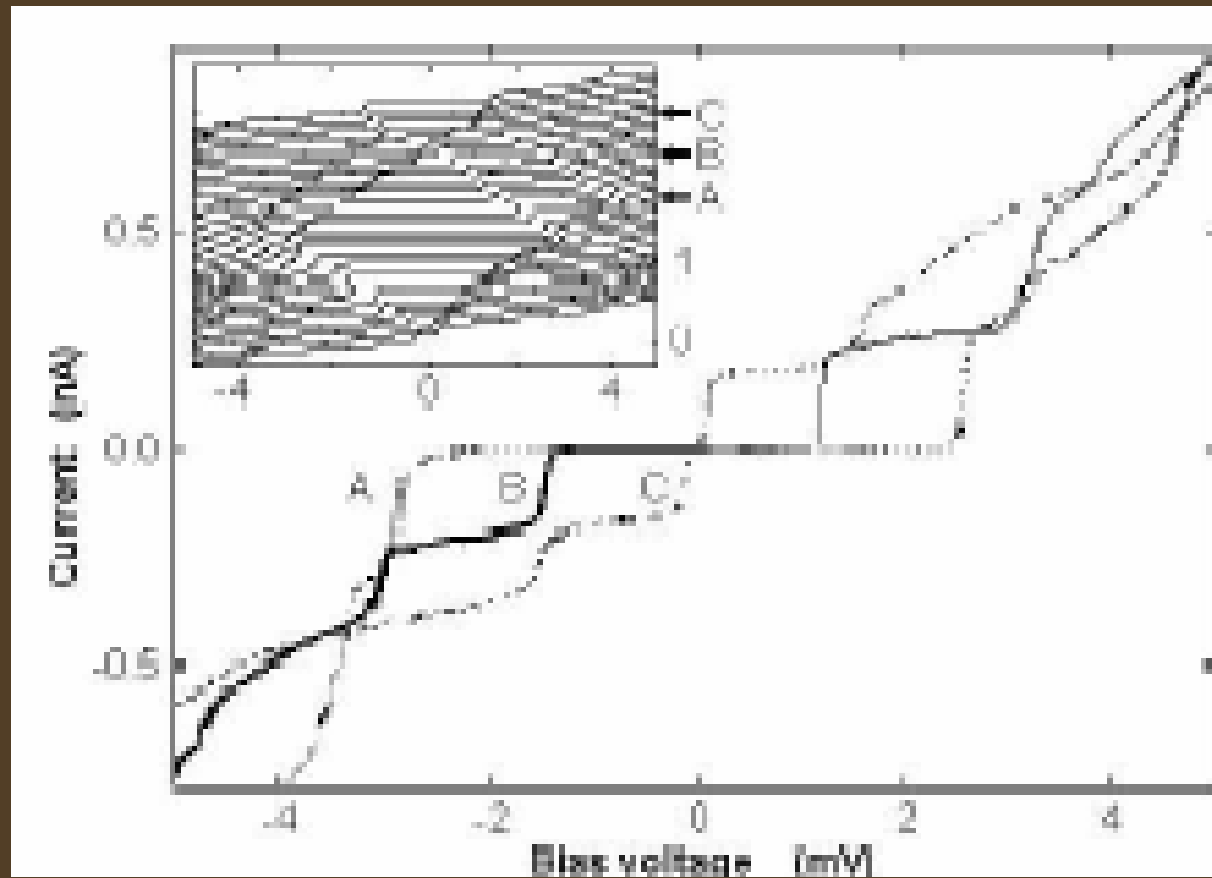
Geringe Abmessungen →  
geringe Kapazitäten →  
**Coulomb-Blockade** kommt  
zum Tragen

→ **Einzelelektronentransport**



# Elektronische Eigenschaften

→ Verwirklichung von Einzelelektronentransistoren



# Weitere Anwendung

- Biologische Transportvehikel
- Datenspeicher (schneller ansprechbar, wiederbeschreibbar und keine Abschirmung nötig)
- Spitze für AFM und STM  
→ um Faktor 10 bessere Auflösung



# Weitere Anwendung

- Robuste Beschichtung für Festplatte
- Extrem dünne Lichtleiter (SNOM)
- Flachbildschirme (Motorola)
- Akkus



Dominik Michler



Nanotube

# Weitere Anwendung oder Visionen

- Weltraumlift
- Trockener, reversibler Klebstoff für Vakuumtechnik oder Elektronik



# FAZIT

**Nanoskalige Bauelemente**, wie z.B. der Transistor sind stets schwerer seriell zu fertigen als **Massivmaterialien**.

# FAZIT

Entstehung durch **Selbstorganisation**sprozess,  
ermöglicht erst das Vordringen in  
Nanodimensionen!

- Erreichen **neuer Funktionalitäten**
- **qualitativ** und **quantitativ** neue Eigenschaften
- weiterer Schritt in der **Miniaturisierungsevolution**

# Referenzen

- **Kohlenstoff-Nanoröhren**

*Metall oder Halbleiter:*

*atomare und elektronische Struktur*

10. Mai 2004

Malte Avenhaus

Institut für Technische Physik II

- Quantisierter akustoelektrischer Strom durch Kohlenstoffnanoröhren

Diplomarbeit

von

Christoph Würstle

Juni 2006

Lehrstuhl für Experimentalphysik I

Universität Augsburg

Erstgutachter: Prof. Dr. A. Wixforth

Zweitgutachter: Prof. Dr. S. Horn

- [arXiv:cond-mat/0609043](https://arxiv.org/abs/cond-mat/0609043) v1 2 Sep 2006

Slippage of water past superhydrophobic carbon nanotube forests in microchannels

P. Joseph<sup>1</sup>, C. Cottin-Bizonne<sup>1</sup>, J.-M. Benoit<sup>1</sup>, C. Ybert<sup>1</sup>, C. Journet<sup>1</sup>, P. Tabeling<sup>2</sup>, L. Bocquet<sup>1</sup>.

(1) Laboratoire PMCN, Université Lyon 1, CNRS,

UMR 5586 69622 Villeurbanne, France

(2) Physico-Chimie Théorique, ESPCI,

CNRS, UMR 7083 75231 Paris, France

# Referenzen

**Natur und Wissenschaft Frankfurter Allgemeine Zeitung, 18.06.2003, Nr. 139, S. N2  
Fast reibungsfreier Graphit Superschmierfähigkeit bei verdrehten Schichten**

Edward I. Wolf: Nanophysics and Nanotechnology

Wikipedia (englisch und deutsch): Carbon Nanotubes,  
Kohlenstoffnanoröhrchen, Graphit, Potential Applications of CNTs

Zeitungsartikel