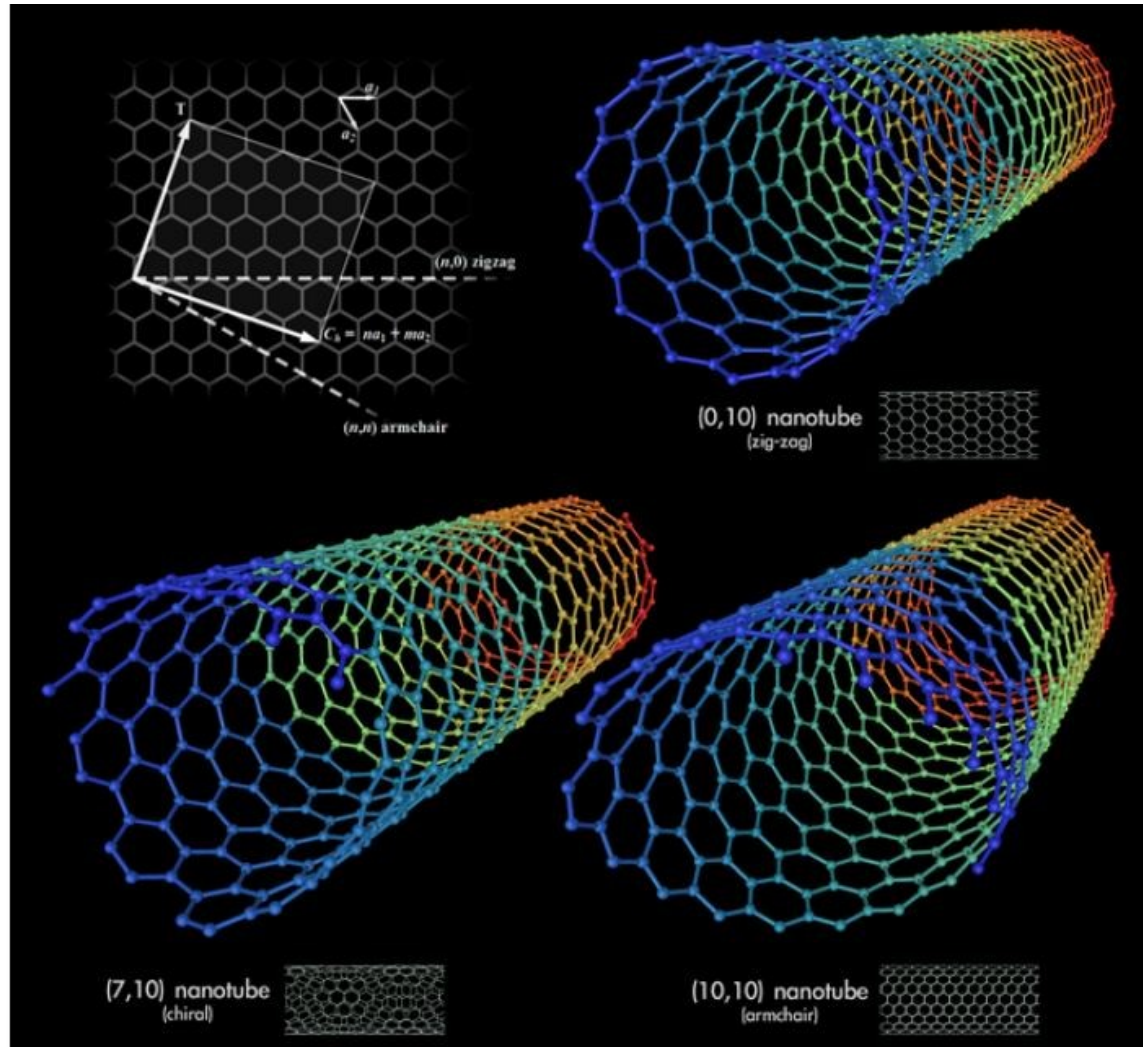


# Graphen

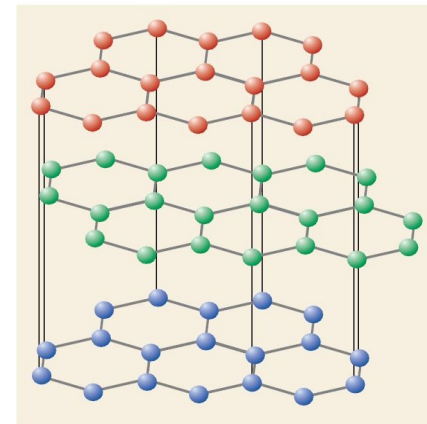
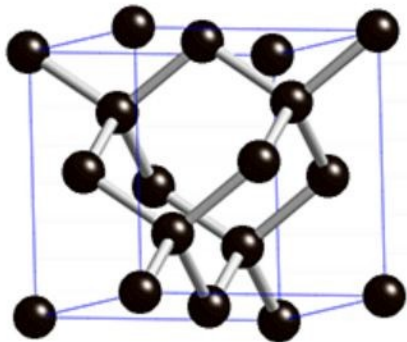
Kristin Kliemt, Carsten Neumann



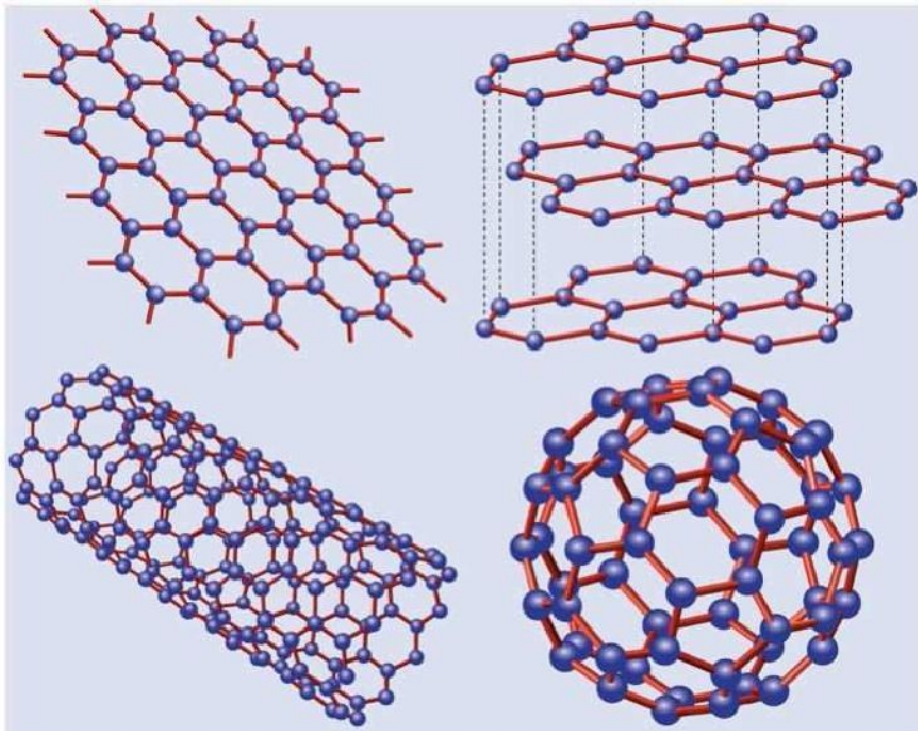
# Gliederung

- Kohlenstoffmodifikationen (Diamant, Graphit, Graphen)
- Stabilität und Struktur
- Dispersionsrelation
- Eigenschaften und Herstellung von Graphen
- Kohlenstoffnanotubes (CNTs)
- Herstellung
- Charakterisierung
- Mechanische Eigenschaften
- Elektrische Eigenschaften
- Anwendungen

# Diamant und Graphit



# Graphen



- **Graphen** (oben links),  
monoatomare Schicht,  
2d „Bienenwabengitter“
- **Graphit** (oben rechts)  
3d, hexagonal
- **Nanotubes** (unten links)
- **Fullerene** (unten rechts)  
C60

# Nobelpreis für Physik 2010

„... for groundbreaking experiments regarding the two-dimensional material graphene.“

- Theoretische Untersuchungen seit mehr als 60 Jahren
- Isolierung einer 1-atomaren Schicht Graphen erstmals 2004  
(University of Manchester)
- Technik: Scotch-Tape-Methode

# Nobelpreis für Physik 2010



Andre Geim

\* 21.10.1958

Sotschi, UdSSR



Konstantin Novoselov

\* 23.08.1974

Nischni Tagil, UdSSR



# Stabilität



## Mermin-Wagner-Theorem:

Aufgrund von Fluktuationen gibt es keine langreichweitige Ordnung in 2 Dimensionen.

- 2d- Festkörper theoretisch nicht stabil und verklumpen im Allgemeinen  $\rightarrow$  3d-Struktur
- Ausweg: Graphen „knittert“, Fluktuationen unterdrückt durch anharmonische Dehn- und Stauchmoden, leicht unterschiedliche Bindungslängen

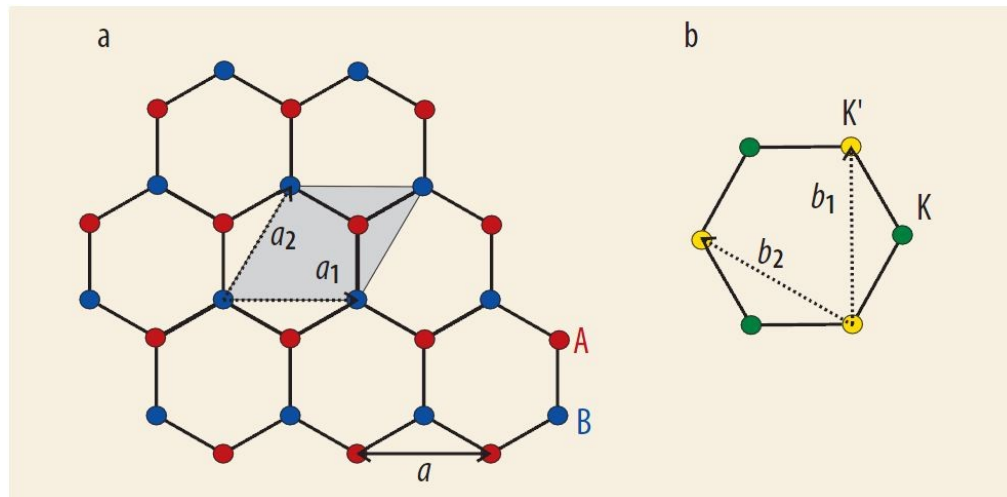
# Struktur von Graphen

a)

- Hexagonale Struktur
- 2 Atome pro Elementarzelle
- 2 Untergitter (rot, blau)

b)

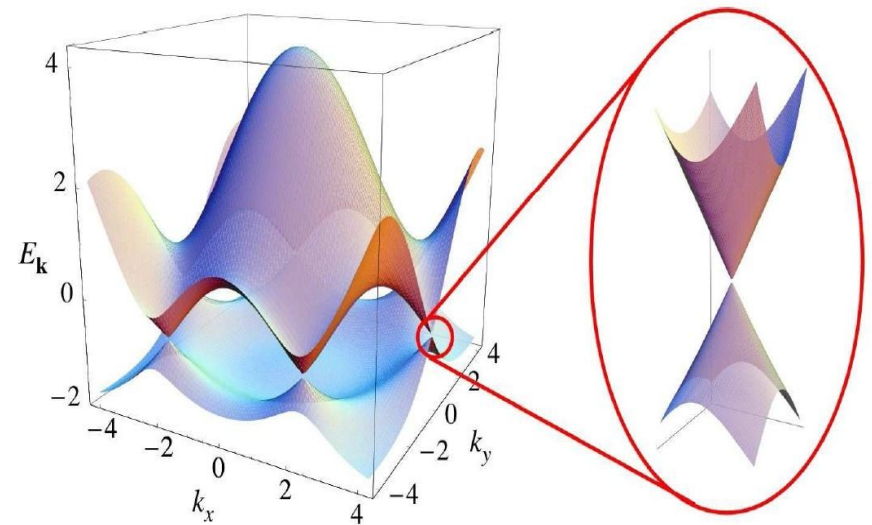
- Brillouinzone:  
Dirac-Punkte  $K$ ,  $K'$  gehören zu verschiedenen Untergittern





# Dispersionsrelation

- An den Dirac-Punkten  $K, K'$  ist die Energie  $E$  linear von  $k$  abhängig.
- Elektronen verhalten sich wie Dirac-Fermionen (relativistische, masselose Ladungsträger!).
- Bei  $K, K'$  berühren sich Valenz- und Leitungsband. Graphen verhält sich wie Halbleiter mit verschwindender Bandlücke.



# Eigenschaften

- Sehr gute Leitfähigkeit, grosse mittlere freie Weglänge, Elektronen bewegen sich über tausende Bindungslängen ohne zu streuen
- Gehört zu stabilsten bekannten Materialien (hohe Reissfestigkeit)
- Geringe Dichte → sehr leichtes Material (1 Quadratkilometer Graphen wiegt ca. 750 g)

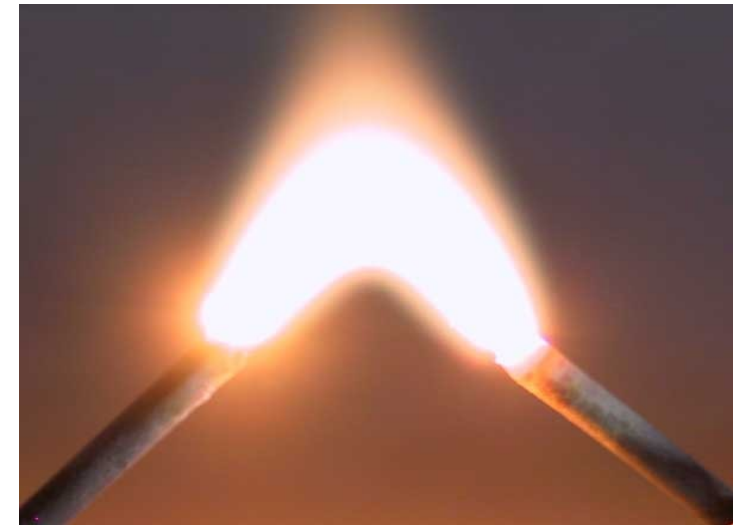
# Graphen Herstellung

- Graphitflocken auf Tesafilm, mehrmals falten, anhängenden Film auf Siliciumwafer ablegen
- Epitaktisches Wachstum auf SiC (Erhitzen, Silizium verlässt Oberfläche, zurückbleibender Kohlenstoff rekonstruiert zu Graphen)
- Mikromechanisches Spalten (Zerreiben von Graphitkristallen, Heraussuchen von Graphen aus Flocken)
- Identifikation von Graphen (eiatomare Schicht) durch Untersuchung mit Elektronenmikroskop bzw. optischem Mikroskop (Interferenz)

# Carbon Nanotubes (CNTs)

# Herstellung

- Lichtbogenentladung zwischen Graphitelektroden
- Laserinduziertes Verdampfen von Graphit
- CVD-Verfahren (chemical vapour deposition)



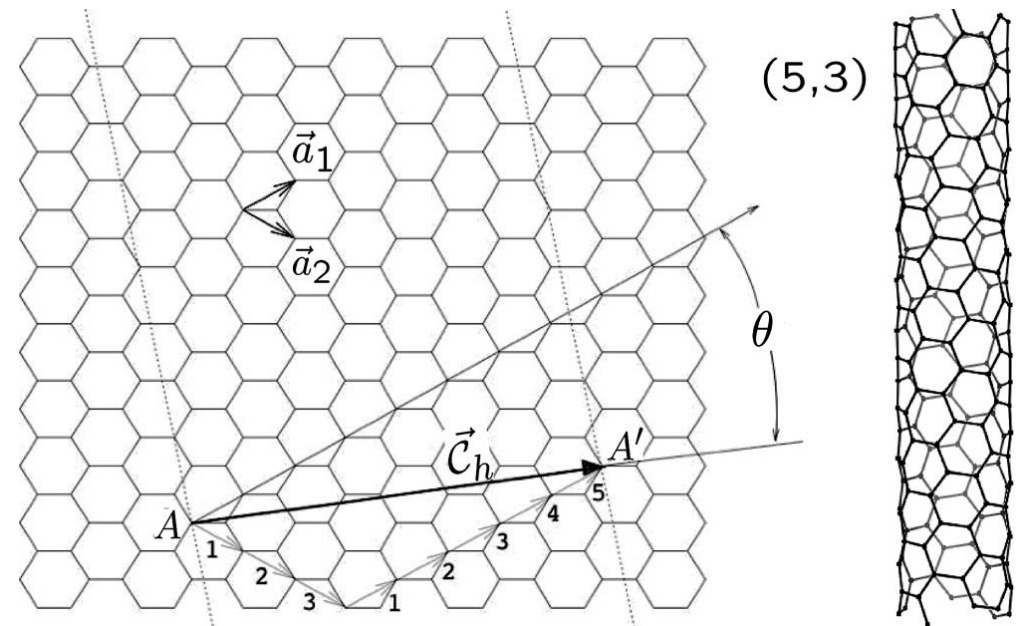
Lichtbogen

# Charakterisierung

- Wickelvektor verbindet zwei Punkte, die im CNT aufeinanderfallen

$$\vec{C}_h = n\vec{a}_1 + m\vec{a}_2$$

- (n,0) zigzag tube
- (n,n) armchair tube
- Sonst chiral tube

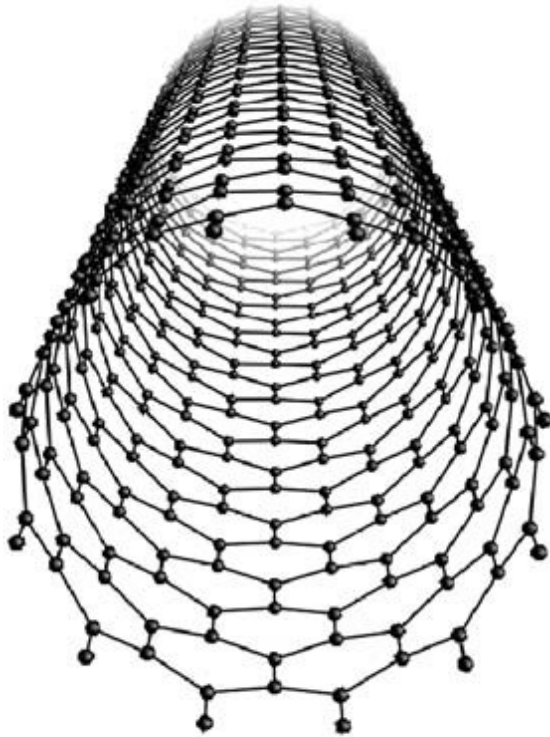


Veranschaulichung des Wickelvektors



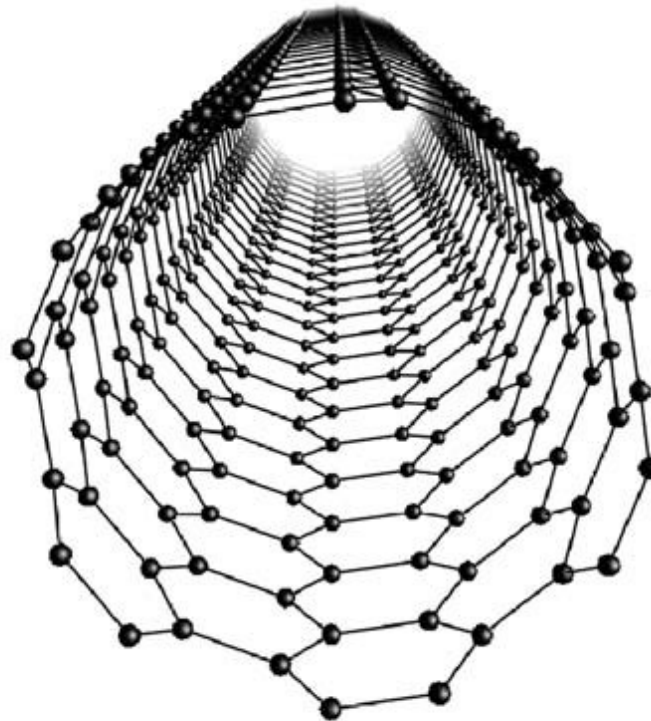
# Charakterisierung

zigzag



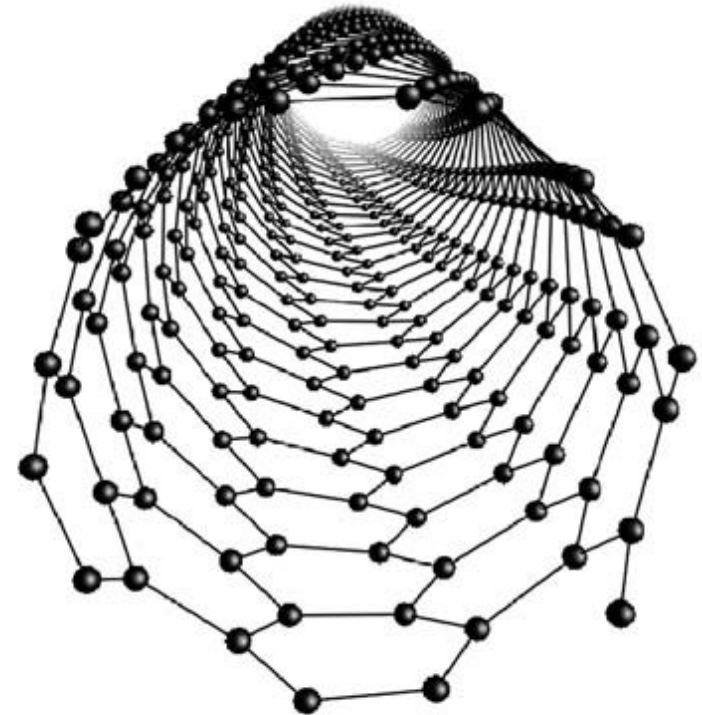
(12,0)

armchair



(6,6)

chiral



(6,4)

Metallisch, wenn  $n - m = 3i$ ,  $i \in \mathbb{N}$

# Mechanische Eigenschaften

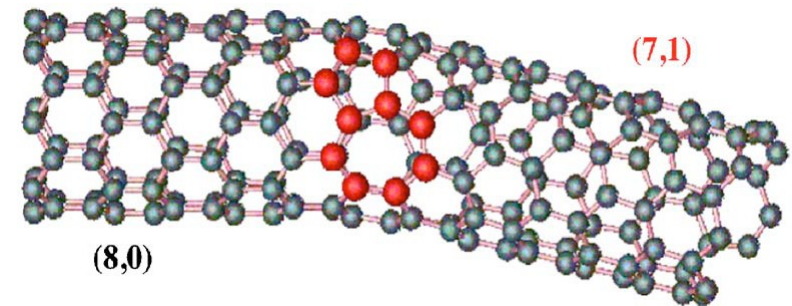
- Elastischer Bereich bis  $\varepsilon = 0,15$ 
  - Anwendung: z.B. Dehnungsmessstreifen
- Sehr hohe Wärmeleitfähigkeit
- Sehr hohe Strombelastbarkeit

# Elektrische Eigenschaften

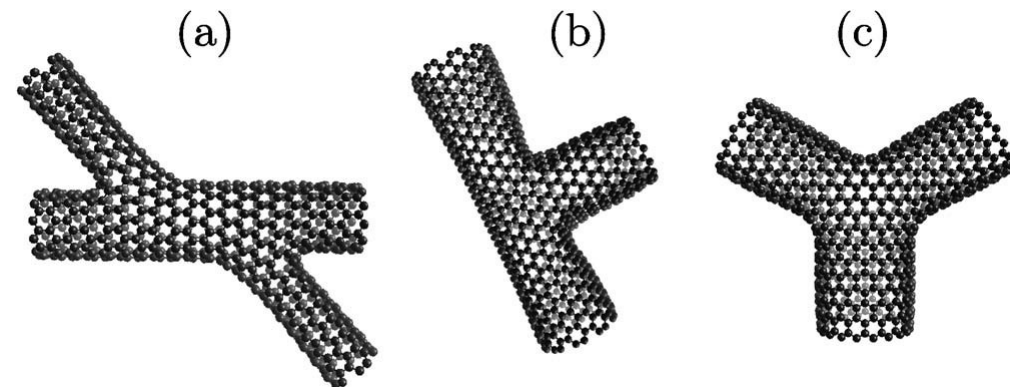
- SWNT: Bündel von 10 – 100 CNTs
- Wechselwirkung zwischen den Röhren
  - Bandlücke von ca. 0,1 eV an der Fermienergie,  
Größe invers abhängig vom CNT-Radius
- MWNT: Wechselwirkung abhängig von den beteiligten CNTs

# Elektrische Eigenschaften

- Einschränkung der elektronischen Wellenfunktion aufgrund der endlichen Länge
- Verbinden zweier verschiedener CNTs
  - Diode
  - quantum dot



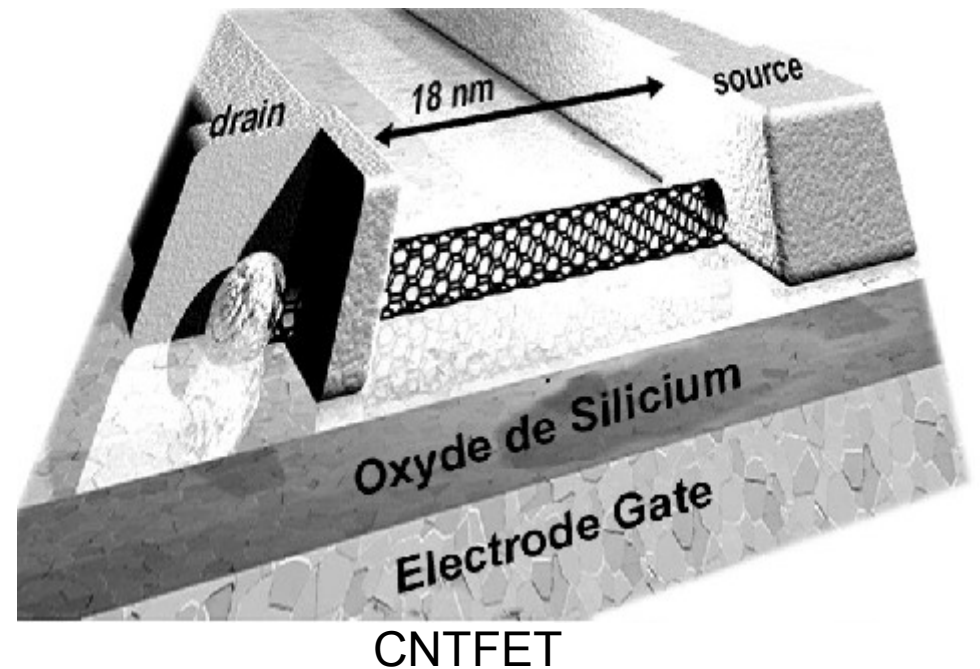
Verbindung zweier CNTs



X-, T- und Y-Verbindung

# Anwendungen

- CNTFET
- Als Spitze in Raster-tunnelmikroskopen
- Beimischung in Kunststoffen
- Schwarzer Farbstoff (Reflexionsgrad 0,045%)



# Quellen

- Charlier, X. Blase, and S. Roche, Reviews of Modern Physics 79, 677 (2007)
- Vorlesungsmaterial Nanoelektronik (Prof. Huth)
- [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org)
- Björn Trauzettel „Von Graphit zu Graphen“, Physik Journal 6 (2007), Nr.7, Wiley-VCH, Weinheim
- „The electronic properties of graphene“, C.Neto, F.Guinea, N.M.Peres, K.S.Novoselov, A.K.Geim (2008)