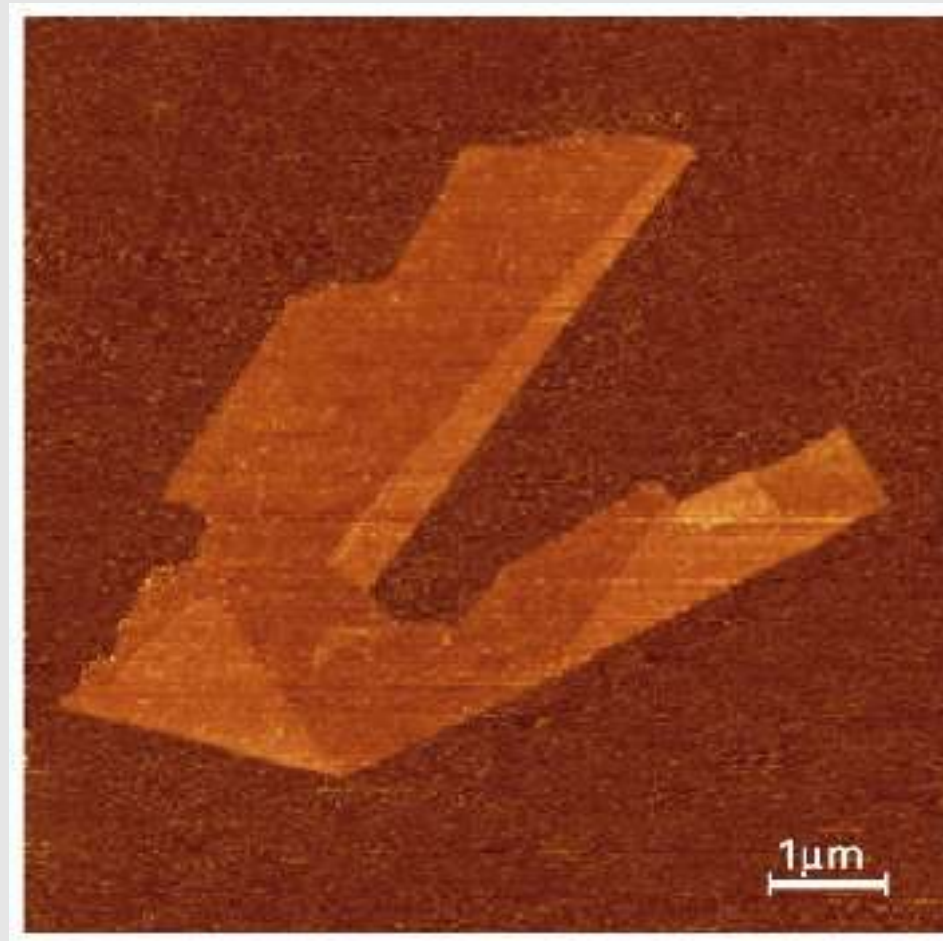


# Vortrag Graphen

Von Werner Schweigert am 29.1.2009



# Gliederung

## 1) Aufbau und Struktur von Graphen

- Kohlenstoff in verschiedenen Dimensionen
- Stabilität in zwei Dimensionen
- Elektronenstruktur von Graphen

## 2) Effekte aus der QED

- Kleinparadoxon

## 3) Effekte aus Theorie der kondensierten Materie

- anormaler Quanten-Hall-Effekt

## 4) Anwendungsmöglichkeiten

# Fragen ans Publikum

- Ist Graphen flach?
- Worin bestehen die Ähnlichkeiten zum Dirac Spektrum ?
- Wie tunneln Ladungsträger in Graphen?
- Was ist besonders am Quanten-Hall-Effekt in Graphen?

# Einleitung

- Manchester 2004, Entdeckung Graphen
- Technik : micromechanical cleavage

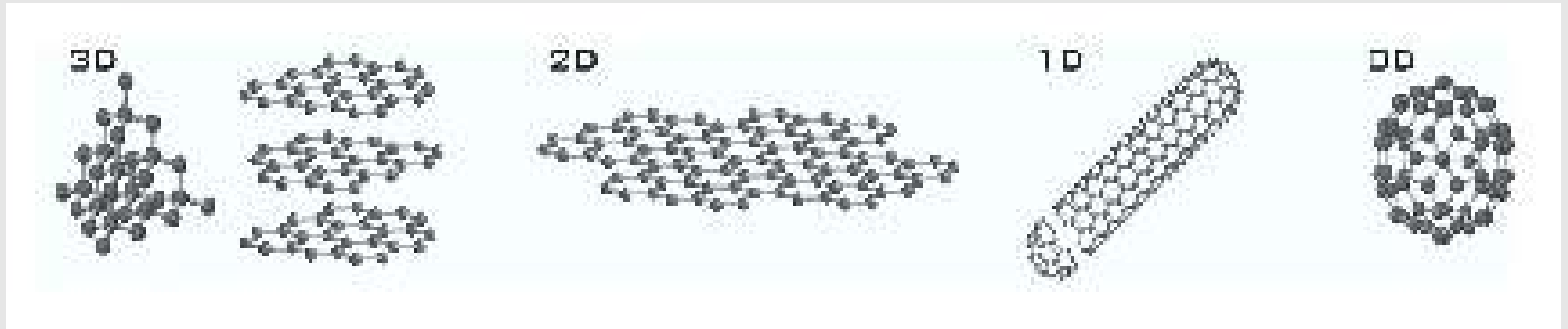
Andre Geim



Kostya Novoselov



# Formen von Kohlenstoff



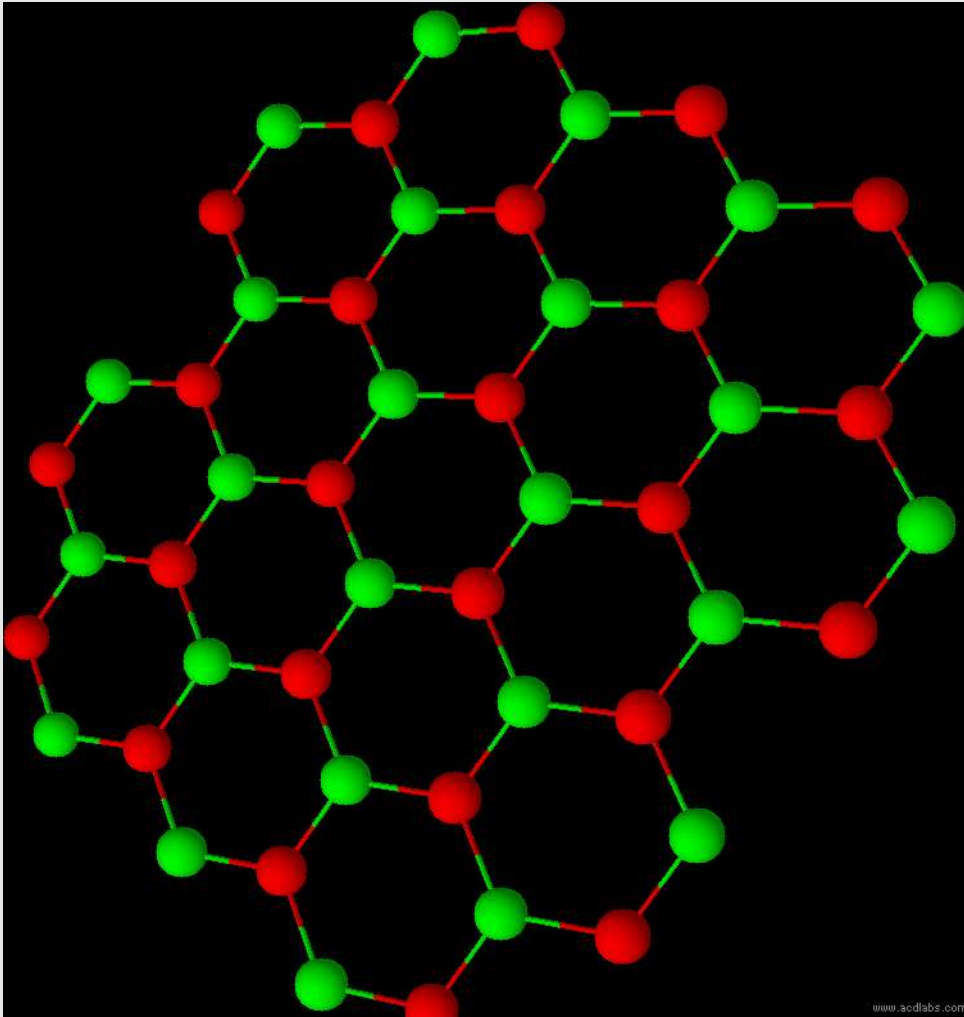
- Diamant und Graphit

- Graphen

- carbon nanotube

- Fulleren

# Graphen Struktur

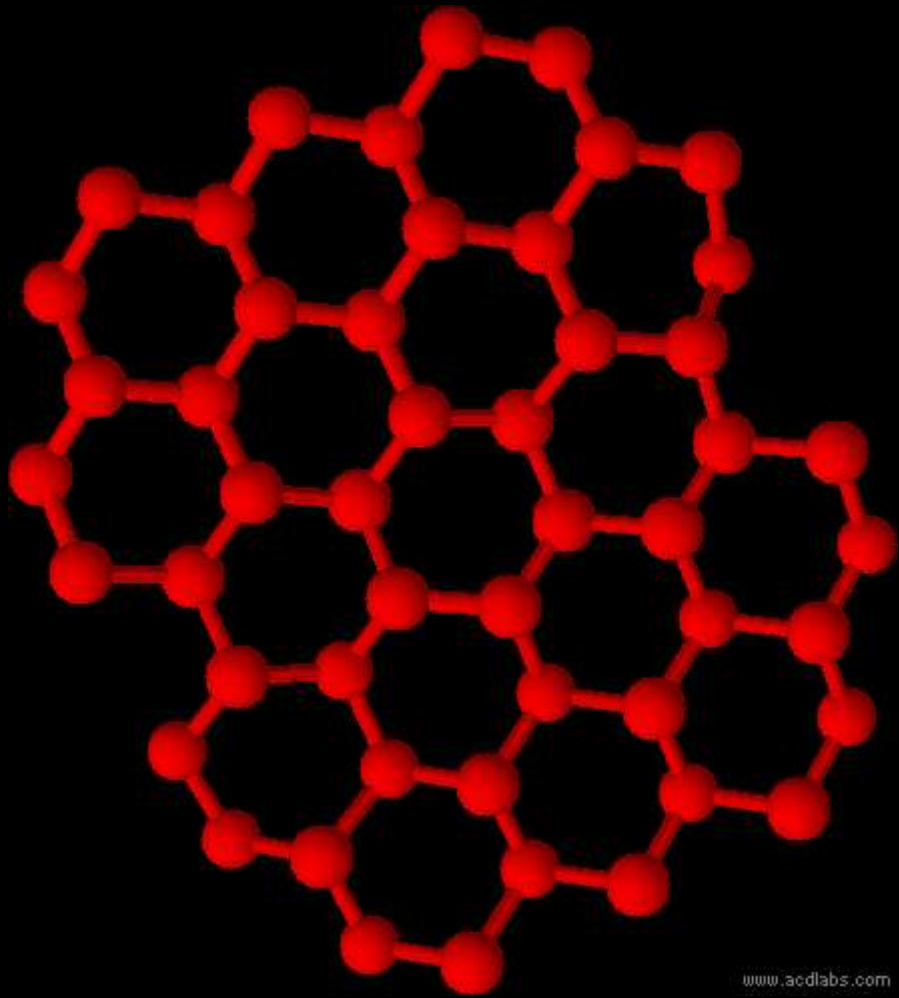


- Hexagonale Struktur
- Zwei Atome pro Brillouin Zone
- Darher kommen zwei Untergitter

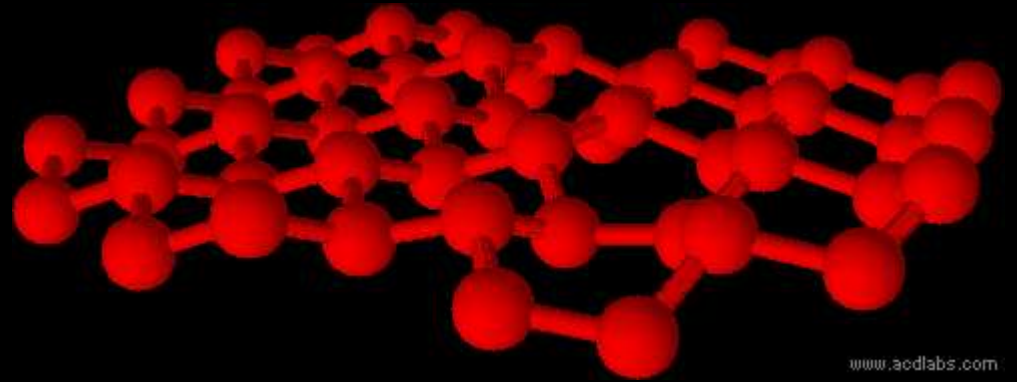
# Stabilität in 2 Dimensionen

- Mermin–Wagner Theorem:  
Fluktuationen zerstören langreichweitige Ordnung  
in 2 Dimensionen
- Fluktuationen in harmonischer Näherung:
  - 3D : sehr klein
  - 2D : divergent
- Membranen zerknittern in 3D

Folge: Graphen rippled



[www.acdlabs.com](http://www.acdlabs.com)



[www.acdlabs.com](http://www.acdlabs.com)

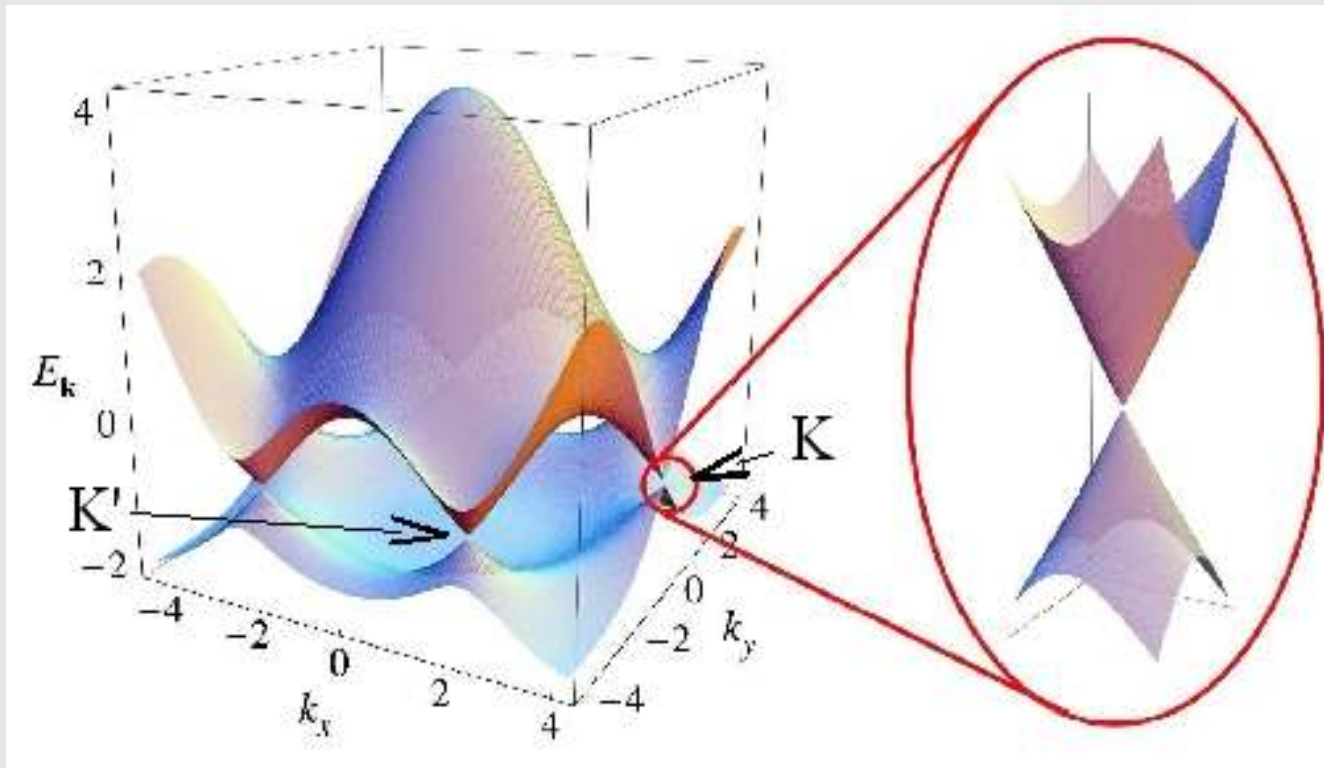


# Gitterfehler

- Stufen- und Schraubenveretzung zerstören Translationssymmetrie

Forderung: Kohäsionsenergie  $\gg$  thermischer Energie

# Energiespektrum von Graphen



- Bei Dirac Punkte  $K$  und  $K'$  ist  $E$  linear abhängig von  $k$
- Ähnlich Dirac Spektrum für masselose Fermionen

# Analogien zum Dirac Spektrum

## Dirac Spektrum

- Elektronen ↔
- Positronen ↔
- Lichtgeschwindigkeit  $c$  ↔
- Spin ↔
- Spinor Wellen Funktion ↔

## Graphen Spektrum

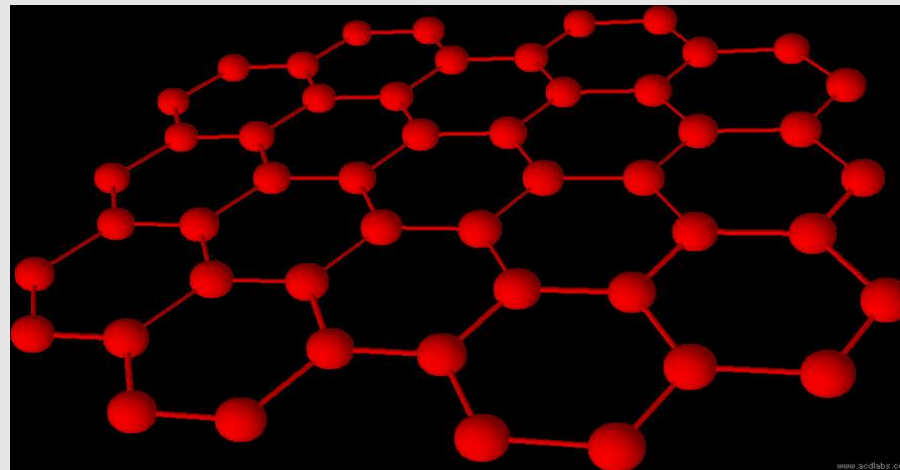
- Ladungsträger
- Quasiteilchen(Löcher)
- Fermigeschwindigkeit  $v_F \approx \frac{c}{300}$
- Untergitter
- zweikomponentige Wellenfunktion

# Quantenelektrodynamik

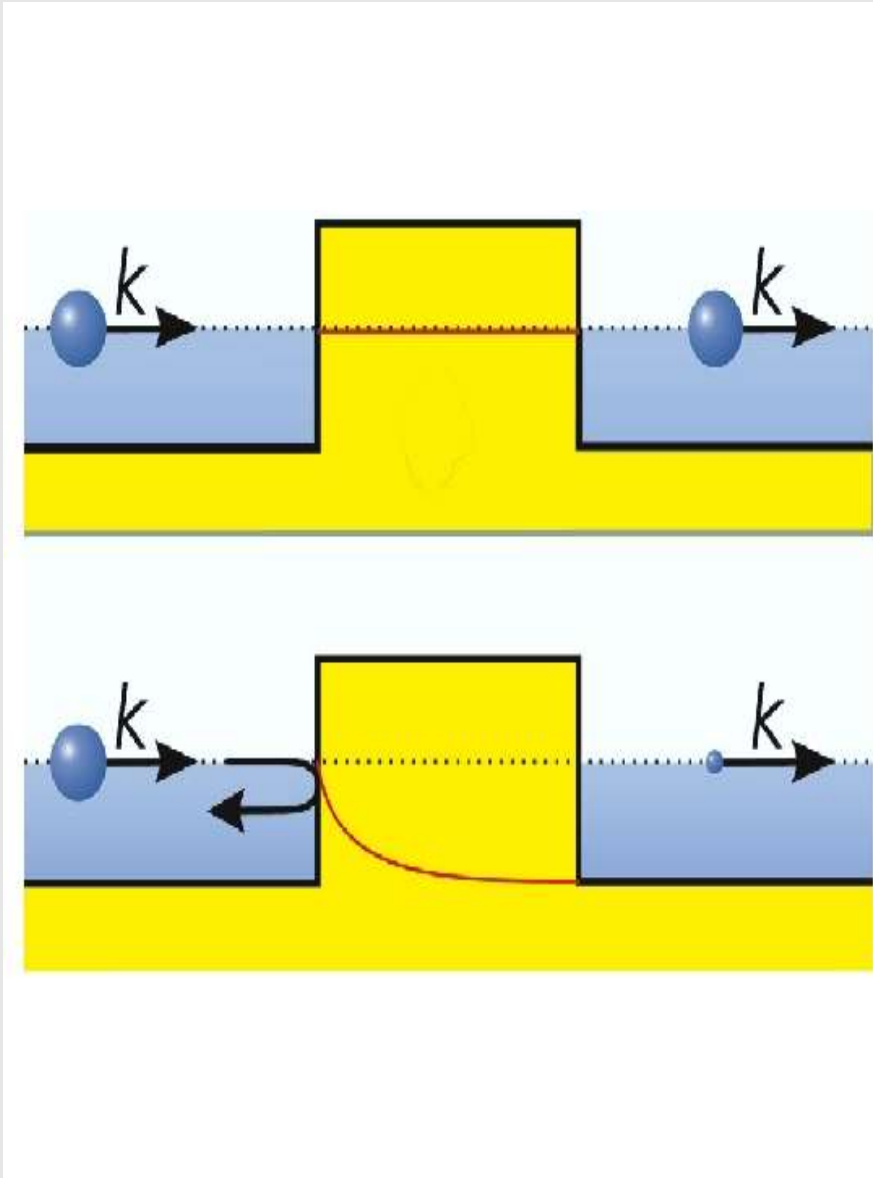
- Heisenbergsche Unschärfe
- Dirac Gleichung
- Tunneleffekte

# Theorie der kondensierten Materie

- Landau Niveaus
- Quanten-Hall-Effekt



# Kleinparadoxon



## Kleinparadoxon

- Tunnelwahrscheinlichkeit = 1
- Höhe der Barriere mindestens zweifache Ruheenergie

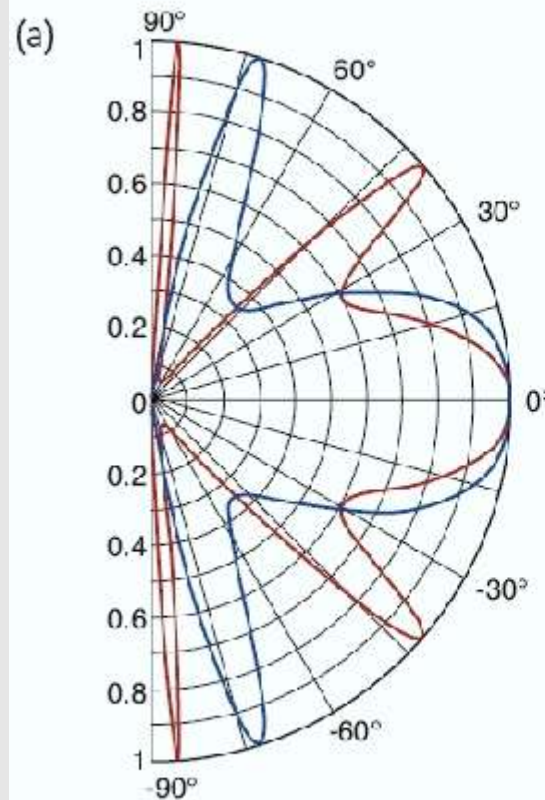
## Tunneln

- Tunnelwahrscheinlichkeit nimmt exponentiell ab
- Abhängig von Höhe und Breite der Barriere

# Tunnelwahrscheinlichkeit

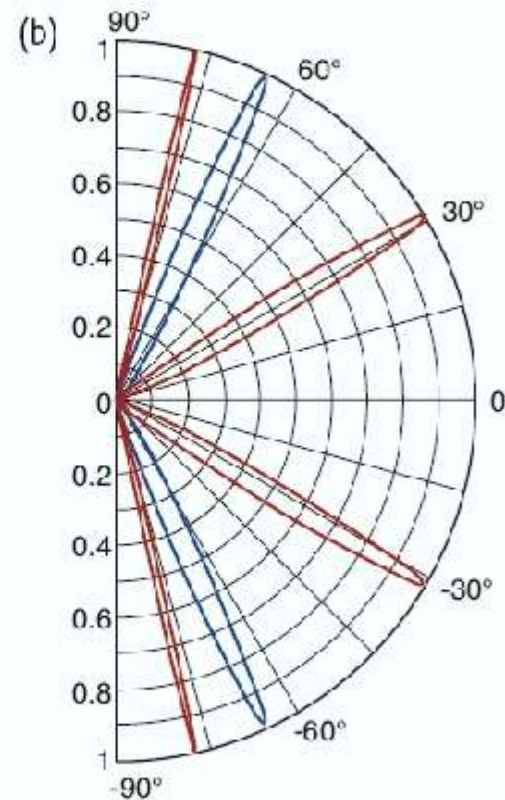
a)  
Einzelschicht

- 200 meV
- 285 meV

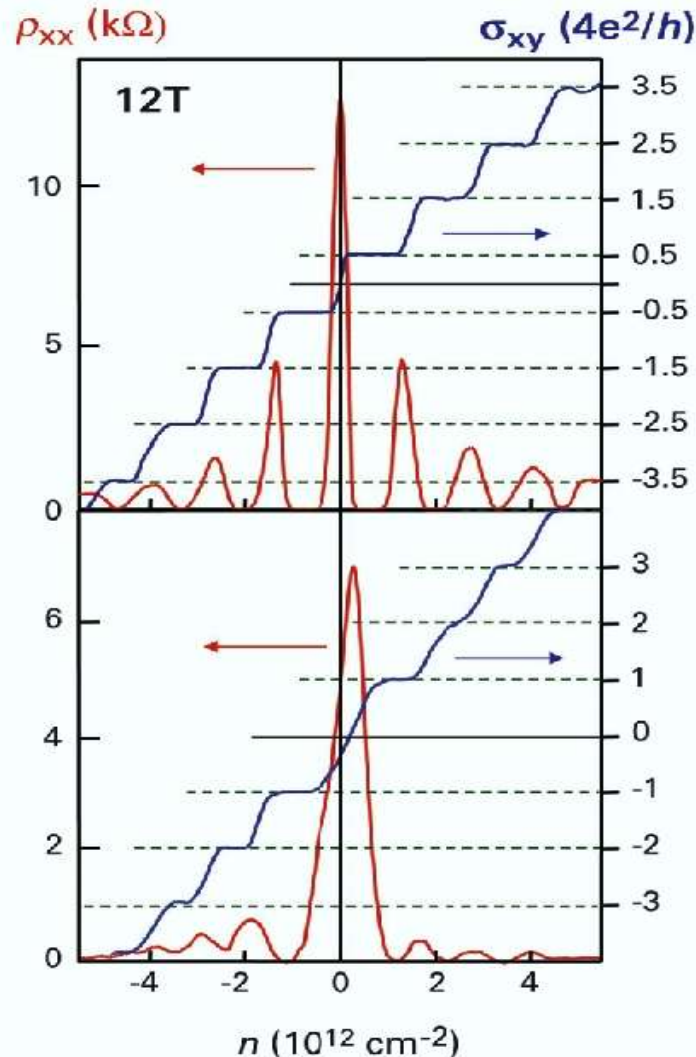


b)  
Doppelschicht

- 50 meV
- 100 meV



# Anormaler Quantenhalleffekt



## Einzelsschicht

- Halbzahlige Quantisierung der Leitfähigkeit nicht ganzzahlig!

## Doppelschicht

- Großer Sprung bei Null sonst ganzzahlige Quantisierung

# Landau Levels

## Links Halbleiter

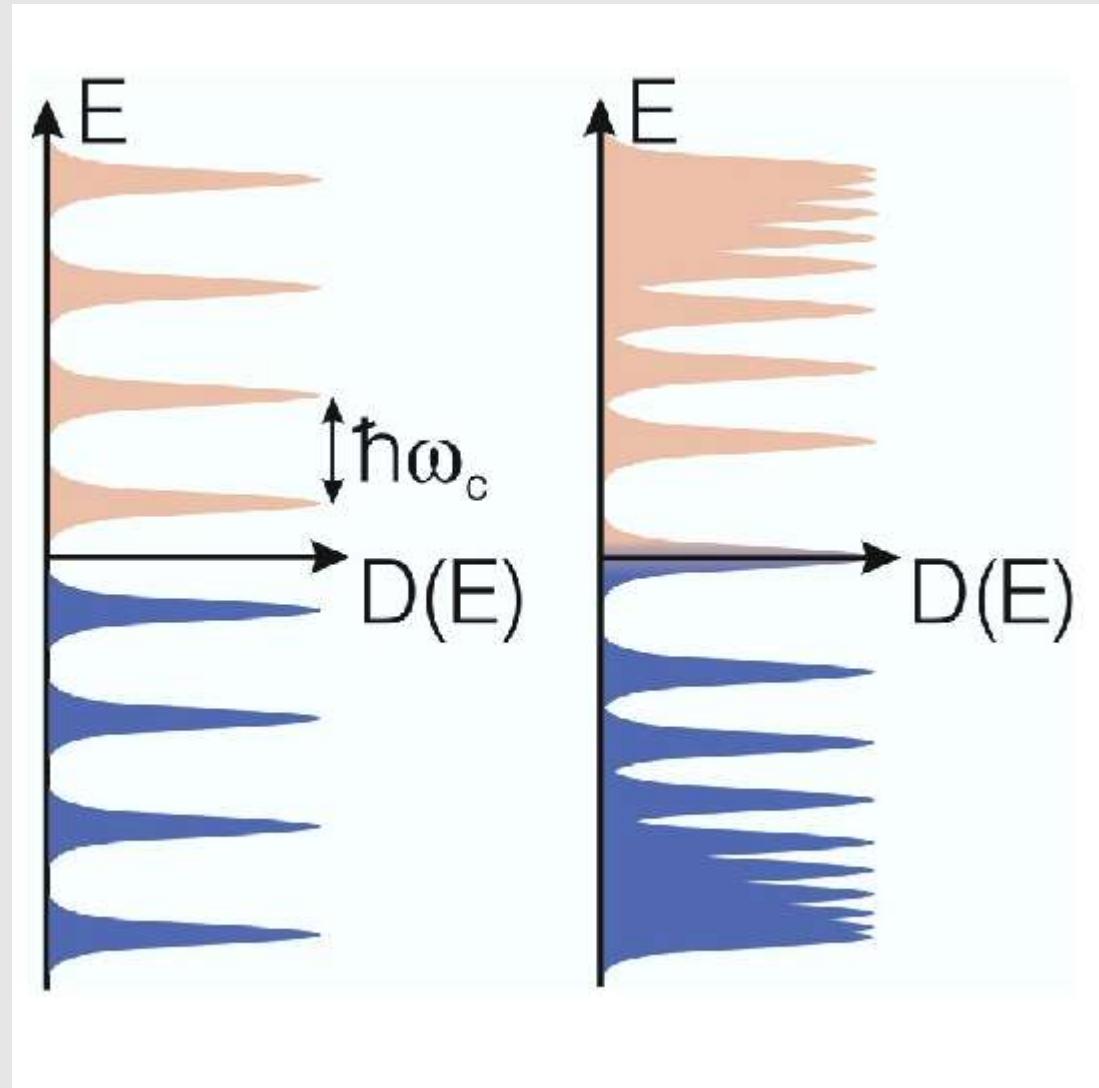
$$E = \hbar \omega_c \left( \nu + \frac{1}{2} \right)$$

parabolische  
Dispersionsrelation

## Rechts Graphen

$$E = \pm \sqrt{2 |e| B \hbar v_F^2 \left( \nu + \frac{1}{2} \pm \frac{1}{2} \right)}$$

lineare  
Dispersionsrelation

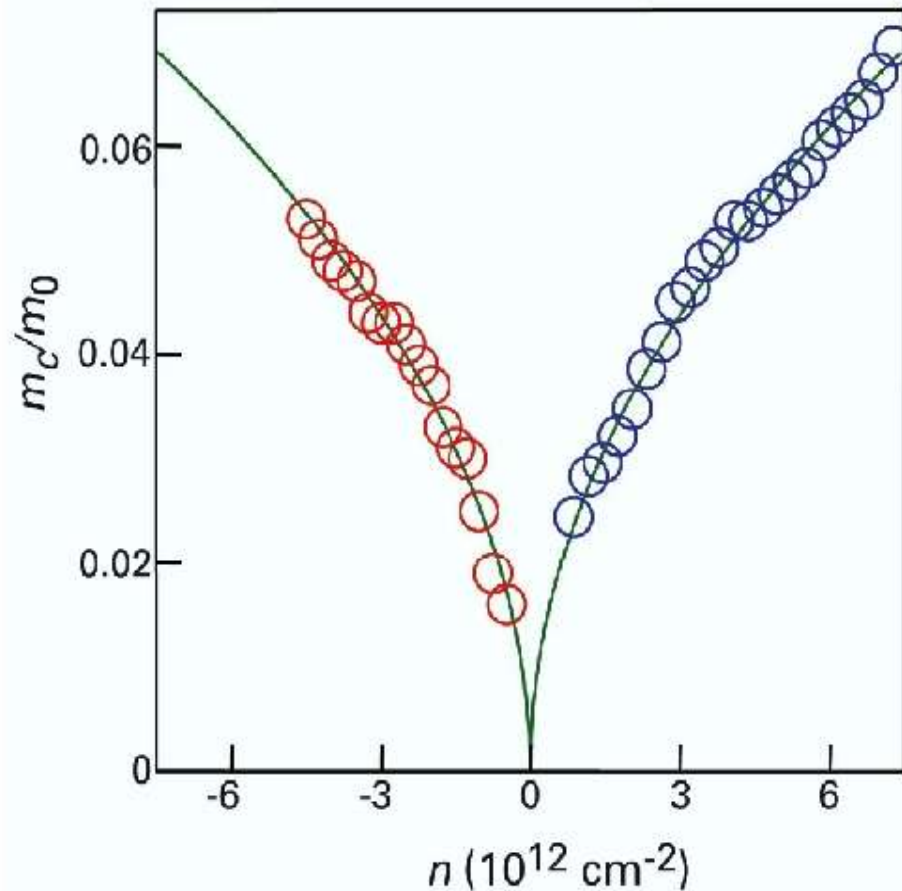




# Zyklotronmasse

- Einstellen Fermienergie auf Landau Niveau
- Physikalische Größen oszillieren mit  $1/B$
- Amplitude liefert Zyklotronmasse
- Periodendauer liefert Lagungsträgerkonzentration  $n$
- Theorie bei linearer Dispersion liefert

$$m \propto \sqrt{n}$$



# Anwendungen für Graphen

- Gassensor
- Feldeffekttransistor (FET)
- Supraleitenden FET
- TEM