

Festkörperphysik

David Rafaja

Material design

Materialeigenschaften

- Elektrische Eigenschaften
- Optische Eigenschaften
- Magnetische Eigenschaften
- Thermische Eigenschaften
- Mechanische Eigenschaften

Elektronenstruktur von Werkstoffen

- Energiebänder
- Brillouin-Zonen
- Fermi-Energie und -Fläche
- Reziprokes Gitter
- Direktes Gitter
(Kristallgitter)

Anwendungen

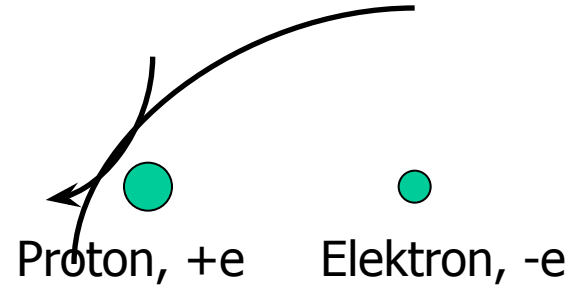
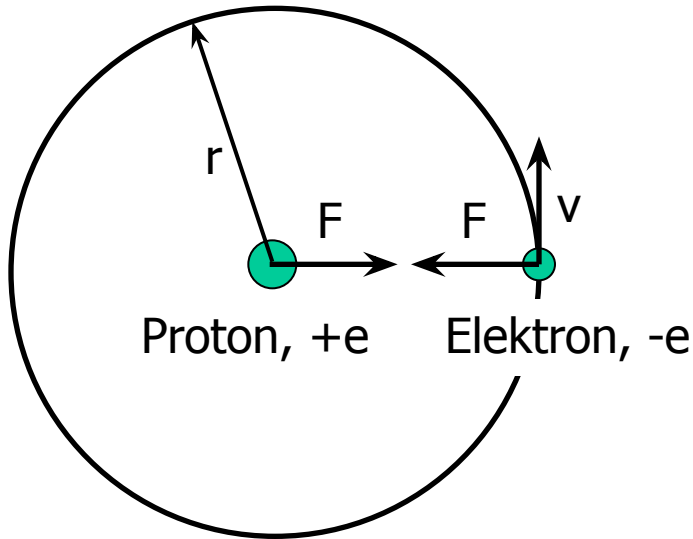
- Elektrischer Widerstand, Halbleiterelemente (Diode, Transistor)
- Spiegel, Linsen, Photoelemente (Dioden, Transistoren), Solarzellen
- Drehstromgeneratoren, Motoren, Transformatoren, Lautsprecher, magnetische Speicherung, Leseköpfe für magnetische Festplatten (GMR Effekt)
- Wärmeleitfähigkeit, Wärmekapazität, Heizkörper, Schutzschichten

Klassische Theorie

- Phänomenologische Beschreibung der physikalischen Erscheinungen
- Experimentelle Beobachtung
- Kontinuum-Theorie (makroskopische Eigenschaften, experimentelle Daten)

- Festkörperphysik: Mikroskopische Theorie für Beschreibung der Materialeigenschaften

Mißlingen der klassischen Physik



Das System strahlt Energie aus

Die Kräfte sind im Gleichgewicht

$$F \equiv F$$

$$\frac{mv^2}{r} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r^2}; v = \frac{e}{\sqrt{4\pi\epsilon_0 mr}}$$

$$E = \frac{1}{2} mv^2 - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r} = -\frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 r}$$

$$E(H) = 13.6 \text{ eV} \Rightarrow r = 0.53 \times 10^{-10} \text{ m}$$

$$1 \text{ eV} = 1.602 \times 10^{-19} \text{ J}; \quad 13.6 \text{ eV} = 1 \text{ Ry}$$

$$P = \frac{2}{3} \frac{e^2 a^2}{4\pi\epsilon_0 c^3}$$

$$a = \frac{v^2}{r} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 m r^2}$$

$$P = \frac{2}{3} \frac{e^6}{(4\pi\epsilon_0 c)^3 m^2 r^4}$$

$$P(H) = 2.9 \times 10^{10} \text{ eVs}^{-1}$$

Kollaps in 10^{-16} s

Gliederung der Vorlesung

I. Grundlagen der Elektronentheorie

1. Welleneigenschaften der Elektronen
2. Die Schrödinger-Gleichung und ihre Lösung
 - (a) Freie Elektronen
 - (b) Elektron im Potentialtopf
 - (c) Elektron in einer Potentialbarriere (der Tunneleffekt)
 - (d) Elektron im periodischen Potential (im Kristallgitter)
4. Die Bandstruktur (Energiebänder, Brillouin-Zonen)
5. Direktes und reziprokes Gitter
6. Fermi-Energie und Fermi-Fläche

II. Elektrische Eigenschaften

7. Elektrische Leitfähigkeit in Metallen und Legierungen (klassische und quantenmechanische Theorie)
8. Supraleitfähigkeit
9. Halbleiter
10. Grenzfläche Metal-Halbleiter (der Schottky Kontakt, der ohmsche Kontakt)
11. Sonstige Materialien (Polymere, Keramik, amorphe Materialien, Ionenleiter)

III. Optische Eigenschaften

12. Wechselwirkung zwischen Photonen und Elektronen
13. Optische Konstanten (Brechungsindex und Absorption)
14. Reflektivität, Eindringtiefe
15. Laser

IV. Magnetische Eigenschaften

16. Diamagnetismus (Langevin-Theorie)
17. Paramagnetismus (Curie-Gesetz)
18. Ferromagnetismus (Curie-Weiss-Gesetz)
19. Antiferromagnetismus und Ferrimagnetismus

V. Thermische Eigenschaften

20. Gitterschwingungen
21. Wärmekapazität und spezifische Wärme (klassische Theorie, Einstein-Modell, Debye-Modell)
22. Beitrag der Elektronen zur Wärmekapazität
23. Wärmeleitfähigkeit
24. Thermische Ausdehnung

Prof. Peter Grünberg

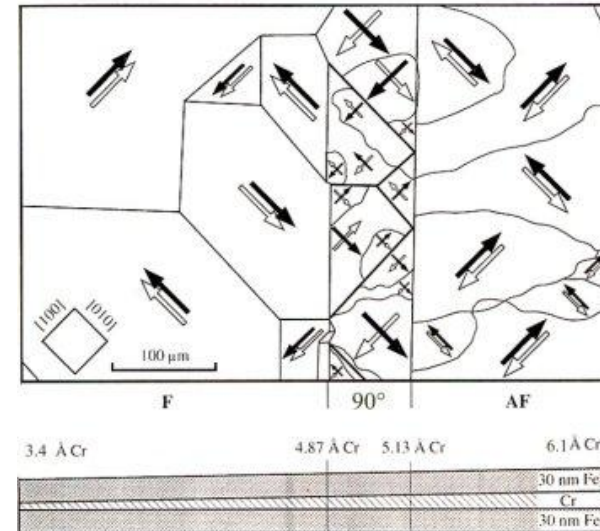
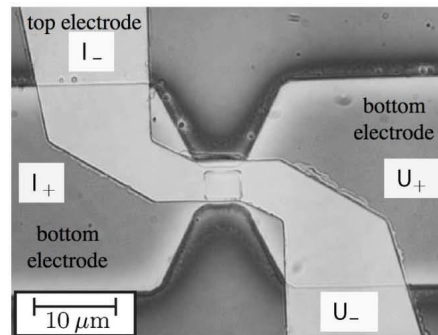
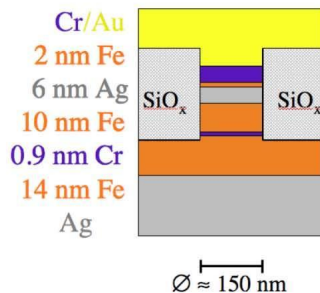
Institut für Festkörperforschung

Forschungszentrum Jülich

Nobelpreis für Physik (09.10.2007)

Entdeckung des GMR-Effektes

top electrode
 "free" layer
 decoupled by
 "fixed" layer
 AF coupled by
 "reference" layer
 bottom electrode
 + SiO_x insulation



Die Auswirkung der magnetischen Kopplung auf die Domänen in Dreilagensystemen wie im Querschnitt unten gezeigt. Oben: Falschfarbenbild, Mitte: Auswertung des Bildes in Bezug auf die Magnetisierungsrichtungen in den beiden Fe-Schichten. Die Kopplung ist links ferromagnetisch (F), rechts antiferromagnetisch (AF) und vom 90° Typ in der Mitte.

Epitaxial Fe/Ag/Fe/Cr/Fe(001) layer sequence grown on a Ag(001)-buffered GaAs(001) wafer and photograph of the final structure.

Grundgleichungen

□ Newton-Gesetz

$$F = ma = m \frac{dv}{dt}$$

□ Impuls

$$\int F dt = \int m dv \equiv p = mv$$

□ Kinetische Energie

$$\int F dl = \int m \frac{dv}{dt} dl \equiv E_{kin}$$

$$E_{kin} = \int m v dv = \frac{1}{2} m v^2$$

$$E_{kin} = \frac{p^2}{2m}$$

□ Lichtgeschwindigkeit

$$c = \frac{\lambda}{t} = v\lambda ; \omega = 2\pi\nu$$

□ Einstein-Formel

$$E = mc^2$$

Dualität der Elektronen

Wellen – Teilchen

- Thomson-Versuch (Elektron im elektrischen Feld): e und m
- Elektronenbeugung
- Charakteristische Spektrallinien
- Photoeffekt
- Wärmestrahlung

$$E = \nu h = \omega \hbar ; \quad \hbar = \frac{h}{2\pi}$$

$$h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ Js}$$

De Broglie-Wellen

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{2\pi\hbar}{p} ; \quad p = \frac{h}{\lambda}$$

$$\hbar = 1.054 \times 10^{-34} \text{ Js}$$

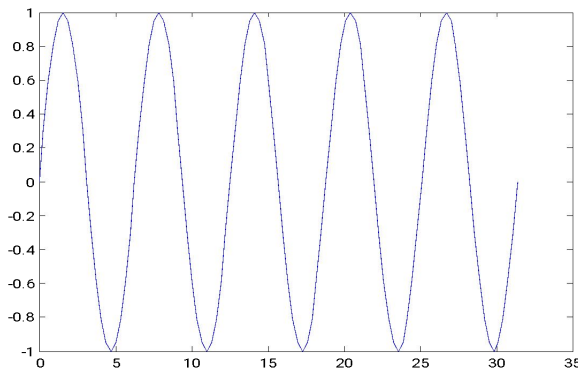
Wichtige Konstanten

Avogadro-Konstante	$N_A = 6.02217(4) \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
Boltzmann-Konstante	$k_B = 1.38062(6) \times 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$
Plancksche Konstante	$h = 6.62620(5) \times 10^{-34} \text{ Js}$
	$\hbar = h/2\pi = 1.0546 \times 10^{-34} \text{ Js}$
Lichtgeschwindigkeit im Vakuum	$c = 2.997925(1) \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$
Ruhmasse des Elektrons	$m_e = 9.10956(5) \times 10^{-31} \text{ kg}$
Ruheenergie des Elektrons	$m_e c^2 = 0.51100 \text{ MeV}$
Ruhmasse des Neutrons	$m_n = 1.67482 \times 10^{-27} \text{ kg}$
Ruhmasse des Protons	$m_p = 1.67261(1) \times 10^{-27} \text{ kg}$
Atomare Masseneinheit	$m(^{12}\text{C})/12 = 1.66055 \times 10^{-27} \text{ kg}$
Elementarladung	$e = 1.602192(7) \times 10^{-19} \text{ C}$
Influenzkonstante	$\epsilon_0 = 8.8542 \times 10^{-12} \text{ AsV}^{-1}\text{m}^{-1}$
Induktionskonstante	$\mu_0 = 1/\epsilon_0 c = 1.2566 \times 10^{-6} \text{ VsA}^{-1}\text{m}^{-1}$
Bohrscher Radius	$r_1 = 4\pi\epsilon_0 \hbar^2 / m_e e^2 = 0.529166 \times 10^{-10} \text{ m}$
Bohrsches Magneton	$\mu_B = \mu_0 \hbar e / 2m_e = 1.1654 \times 10^{-29} \text{ Vsm}$

Übergang Wellen – Teilchen

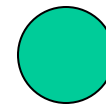
Klassische Physik - zwei Extreme

Welle



$$\psi = \sin(kx - \omega t)$$

Teilchen

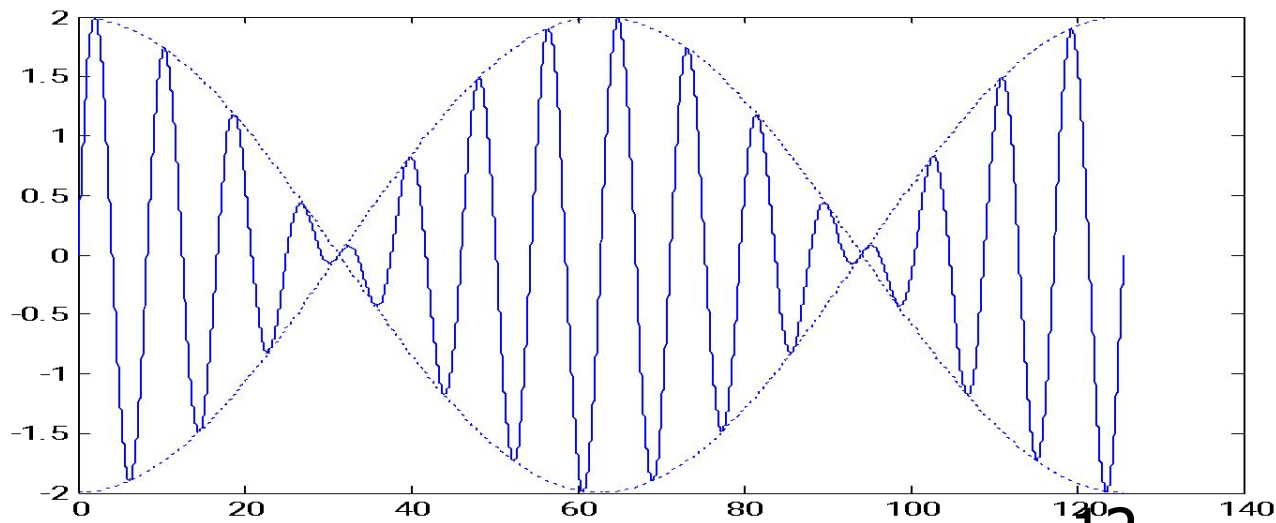


m, Q, v, x

Übergang Wellen – Teilchen

Zwei Wellen -- Wellenpakete

$$\begin{aligned}\psi_1 &= \sin(kx - \omega t); \psi_2 = \sin[kx - (\omega + \Delta\omega)t] \\ \sin \alpha + \sin \beta &= 2 \cos\left[\frac{1}{2}(\alpha - \beta)\right] \sin\left[\frac{1}{2}(\alpha + \beta)\right] \\ \psi_1 + \psi_2 &= 2 \cos\left(\frac{1}{2} \Delta\omega t\right) \sin\left[kx - \left(\omega + \frac{1}{2} \Delta\omega\right)t\right]\end{aligned}$$



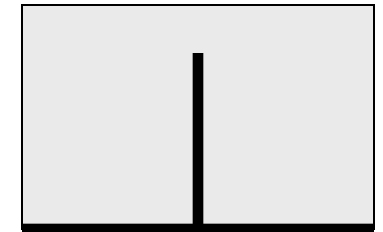
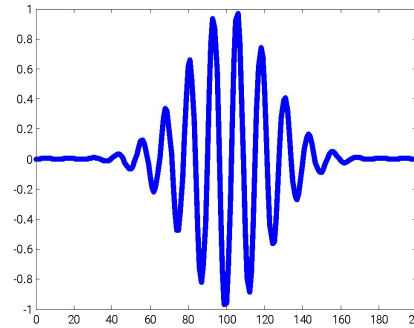
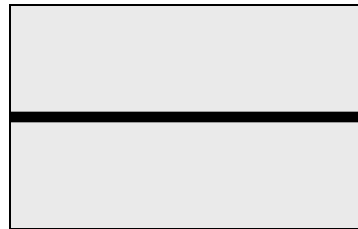
Übergang Wellen – Teilchen

klassische
Welle

QM
Materiewelle

klassisches
Teilchen

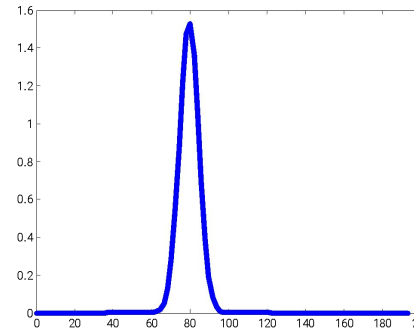
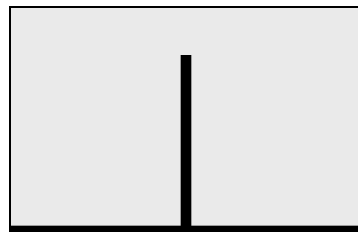
Position



$$\Delta x \rightarrow \infty$$

$$\Delta x = 0$$

Frequenz-
Spektrum



$$\Delta \omega = 0$$

$$\Delta \omega \rightarrow \infty$$

Fourier-Transformation des Signals = Frequenz-Spektrum

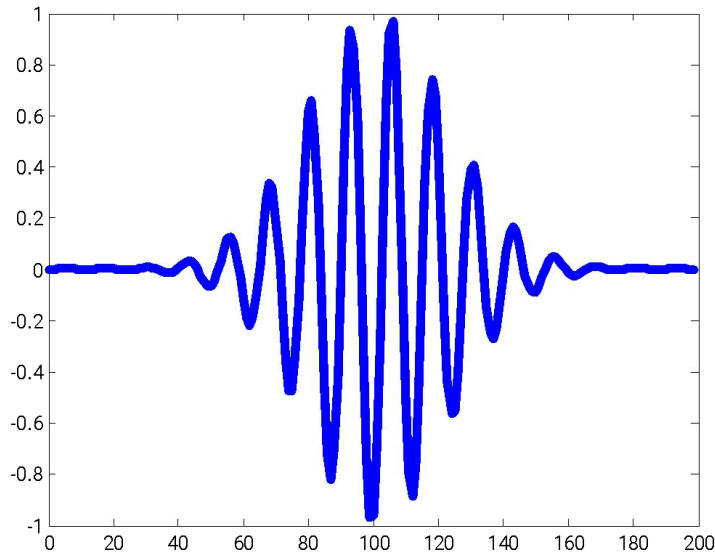
Die Unschärferelation Heisenberg-Prinzip

$$\Delta p \cdot \Delta x \geq h$$

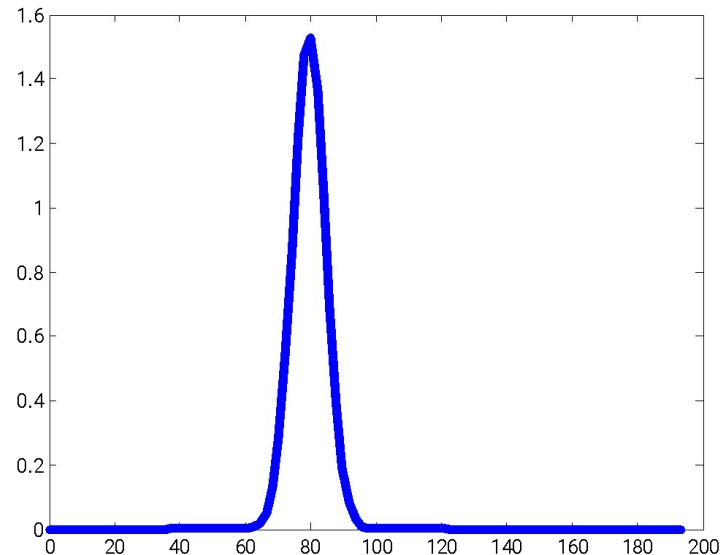
$$p = \frac{h}{\lambda} \Rightarrow \Delta p = -\frac{h}{\lambda^2} \Delta \lambda$$

$$-\frac{h}{\lambda^2} \Delta \lambda \cdot \Delta x \geq h \Rightarrow \Delta x \leq \frac{\lambda^2}{\Delta \lambda}$$

Wellenpaket



Frequenz-Spektrum



Phasengeschwindigkeit einer Welle

$$u = v\lambda = \frac{E}{h} \cdot \frac{h}{p} = \frac{mc^2}{mv_g} = \frac{c^2}{v_g} \Rightarrow uv_g = c^2$$

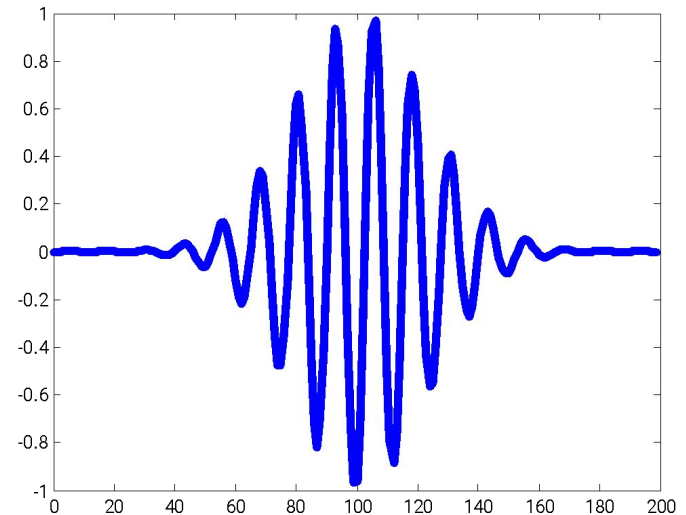
$$u > c$$

$$[E = h\nu; E = mc^2; h = p\lambda]$$

Gruppengeschwindigkeit eines Wellenpaketes

$$v_g = \frac{d\omega}{dk}; \quad u = \frac{\omega}{k}$$

k ... Wellenvektor



Phasengeschwindigkeit kann keine Information übertragen

Rechnerische Beispiele

- Energie eines Elektrons mit angegebener Wellenlänge
- Energie eines Photons mit angegebener Wellenlänge
- Unterschied zwischen der Gesamtenergie und der kinetischen Energie
- Unschärfe-Relation (Heisenberg) und die Länge des Wellenpaketes für Röntgenphoton
- Abstände zwischen den Röntgenphotonen
- Wann ist eine Interferenz zwei Röntgenphotonen möglich?