

# De-Haas-van-Alphen-Effekt

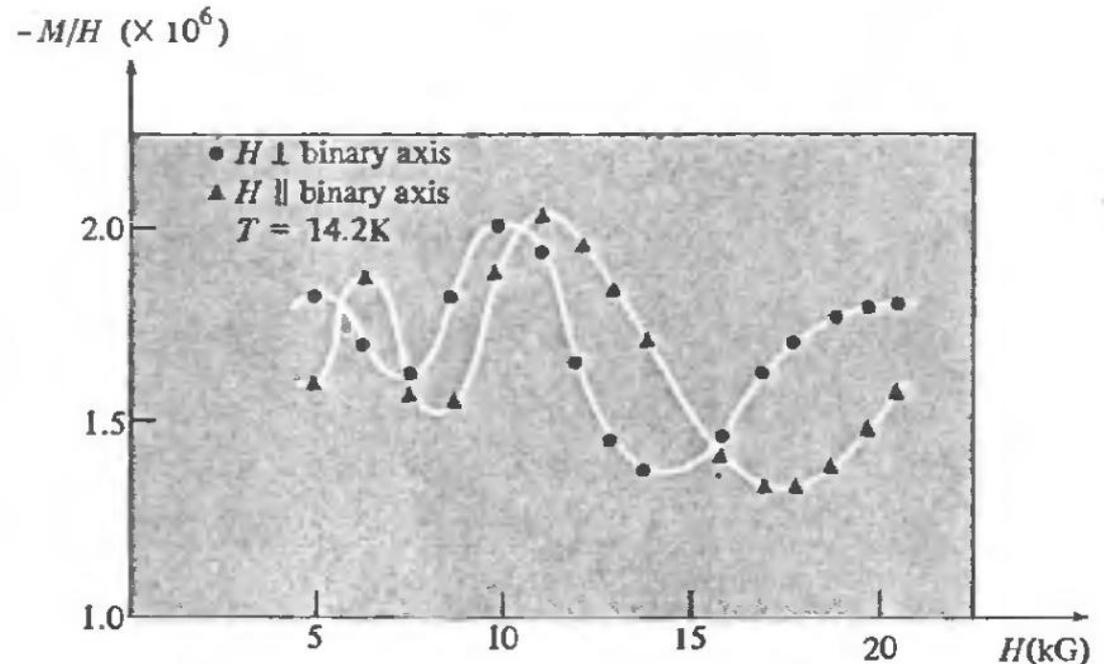
Jan Krieg, Steffi Hartmann  
Goethe-Universität  
18.01.2012

# Gliederung

- ▶ Historisches
- ▶ Bedeutung
- ▶ Verschiedene Messtechniken
- ▶ Theoretische Grundlagen
- ▶ Praktisches Beispiel
- ▶ Kritik

# Historisches

- ▶ 1930 von de Haas und van Alphen entdeckt
- ▶ Magnetisierung von Wismuth untersucht bei 14,5K
- ▶ Entdeckten periodische Oszillation der magnetischen Suszeptibilität abhängig vom inversen Magnetfeld
- ▶ Daraufhin bei vielen Metallen und Halbmetallen nachgewiesen



De Haas, van Alphen, Leiden Comm. 208d (1930)

# Bedeutung

- ▶ Erst 1952 von Onsager erkannt
- ▶ Ist Schlüssel zur elektronischen Struktur eines Metalls
- ▶ Ermöglicht Fermifläche auszumessen und effektive Masse der Elektronen zu bestimmen

$$\Delta \left( \frac{1}{B} \right) \propto \frac{1}{A_n}$$

$A_n$  Extremale Querschnittsfläche des Fermikörpers senkrecht zum Magnetfeld

$\Delta \left( \frac{1}{B} \right)$  Periode der Oszillation

# Verschiedene Messtechniken

## ▶ 1. Torque-Method:

- Probe wird an Faden aufgehängt
- magnetisches Moment  $\propto$  Drehmoment
- $\Rightarrow$  Winkelposition oszilliert

## ▶ 2. Field-Method:

- Probe von Spule umgeben
- misst induzierte Spannung, sobald Probe einem Magnetfeldimpuls ausgesetzt wird
- Signal abhängig von magnetischer Suszeptibilität der Probe

# Theoretische Grundlagen I

- ▶ Effekt beruht auf Landauquantisierung
- ▶ Hamiltonoperator spinloser Teilchen (keine  $e^-$ - $e^-$ -WW):

$$H = \sum_{i=1}^N \frac{(\vec{p}_i - \frac{e}{c} \vec{A}(\vec{r}_i))^2}{2m}$$

- ▶ Mit  $\vec{B} = (0, 0, B)$  bzw.  $\vec{A} = (0, B \cdot x, 0)$  folgt:

$$H = \frac{p_x^2}{2m} + \frac{m}{2} \omega_0^2 \left( x - \frac{p_y}{m\omega_0} \right)^2 + \frac{p_z^2}{2m} \quad ; \quad \omega_0 = \frac{eB}{mc}$$

- ▶ Entspricht Form des harmonischen Oszillators

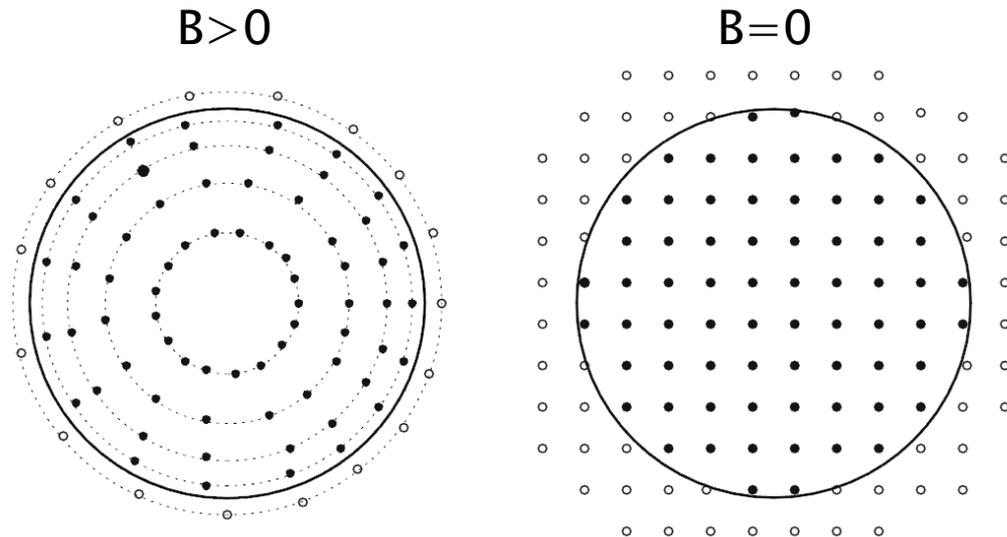
# Theoretische Grundlagen II

- ▶ Eigenenergien:

$$E_{n,k_z} = \hbar\omega_0 \left( n + \frac{1}{2} \right) + \frac{\hbar^2 k_z^2}{2m} \quad ; \quad n: \text{Landau-Quantenzahl}$$

- ▶ Entartungsgrad bzgl. n:

$$g = \frac{|e|B}{c} \frac{L_y L_x}{2\pi\hbar} \quad ; \quad L_x, L_y: \text{Ausdehnung des Systems}$$

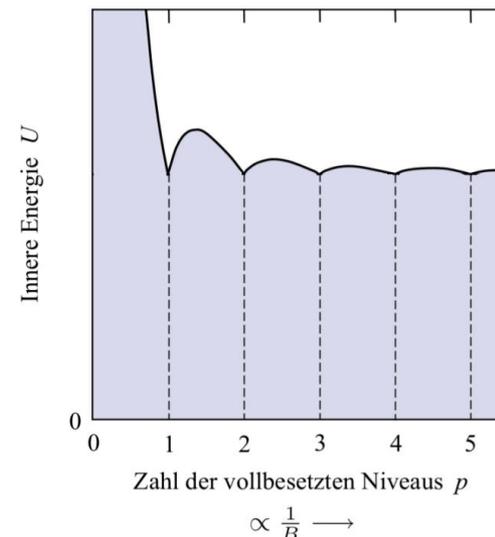
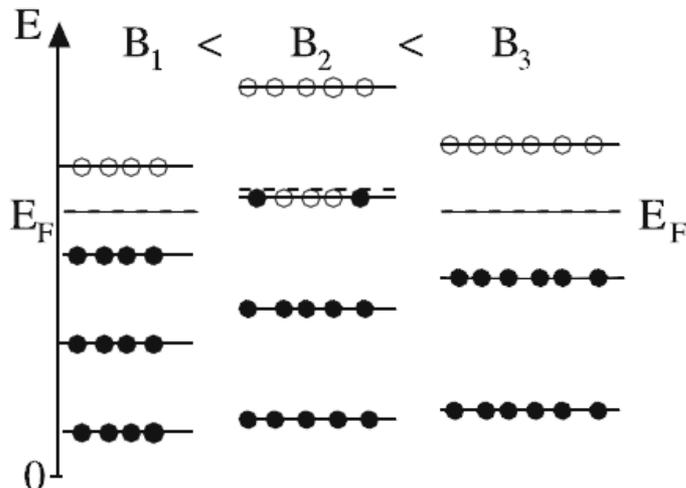


# Theoretische Grundlagen III

- ▶ Aus den Eigenenergien  $E_{n,k_z} = \hbar\omega_0 \left(n + \frac{1}{2}\right) + \frac{\hbar^2 k_z^2}{2m}$  kann man den Radius  $k_n$  im Impulsraum bestimmen:

$$k_n^2 = \left(n + \frac{1}{2}\right) \frac{2m\omega_0}{\hbar} \quad (\text{Erinnerung: } \omega_0 = \frac{eB}{mc})$$

- ▶ Radius der Landauzylinder und somit die Fermienergie nimmt mit B-Feld zu, zusätzlich steigt die Entartung



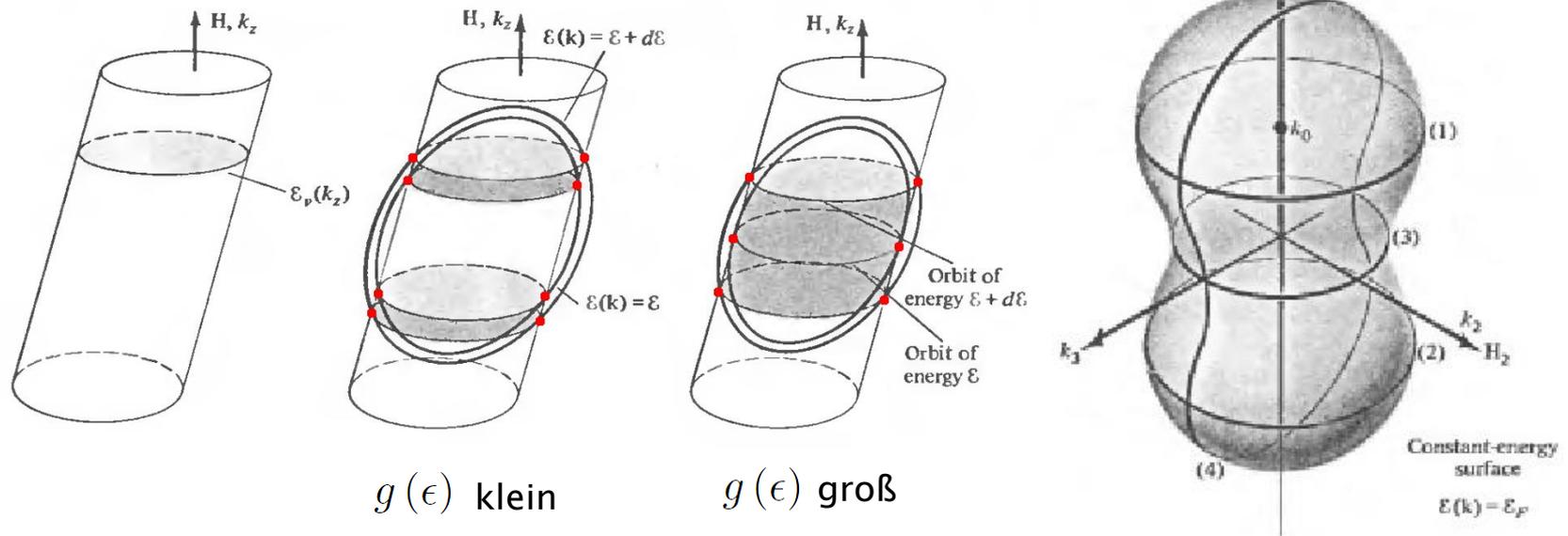
# Theoretische Grundlagen IV

- ▶ Falls  $E_F = \hbar\omega_0 \left(n + \frac{1}{2}\right) = \frac{\hbar|e|B}{mc} \left(n + \frac{1}{2}\right)$  gilt, macht die Magnetisierung einen Sprung, daraus ergeben sich Oszillationen in Abständen von:  $\Delta \left(\frac{1}{B}\right) = \frac{|e|\hbar}{mcE_F}$
- ▶ Damit lässt sich die effektive Elektronenmasse ermitteln
- ▶ In k-Raum umschlossene Fläche:  $A_n = \pi k_n^2 = \left(n + \frac{1}{2}\right) \frac{2\pi|e|B}{\hbar}$
- ▶ Differentiation liefert:  $\Delta \left(\frac{1}{B}\right) = \frac{2\pi e}{\hbar A_n}$
- ▶ Mit  $|dn| = 1$  folgt die Relation

$$\frac{dn}{dB} = -\frac{\hbar A_n}{2\pi|e|} \frac{1}{B^2}$$

# Theoretische Grundlagen V

- ▶ Nur extremale Flächen haben signifikanten Einfluss
- ▶  $g(\epsilon)$  : Zustandsdichte bei Energie  $\epsilon$



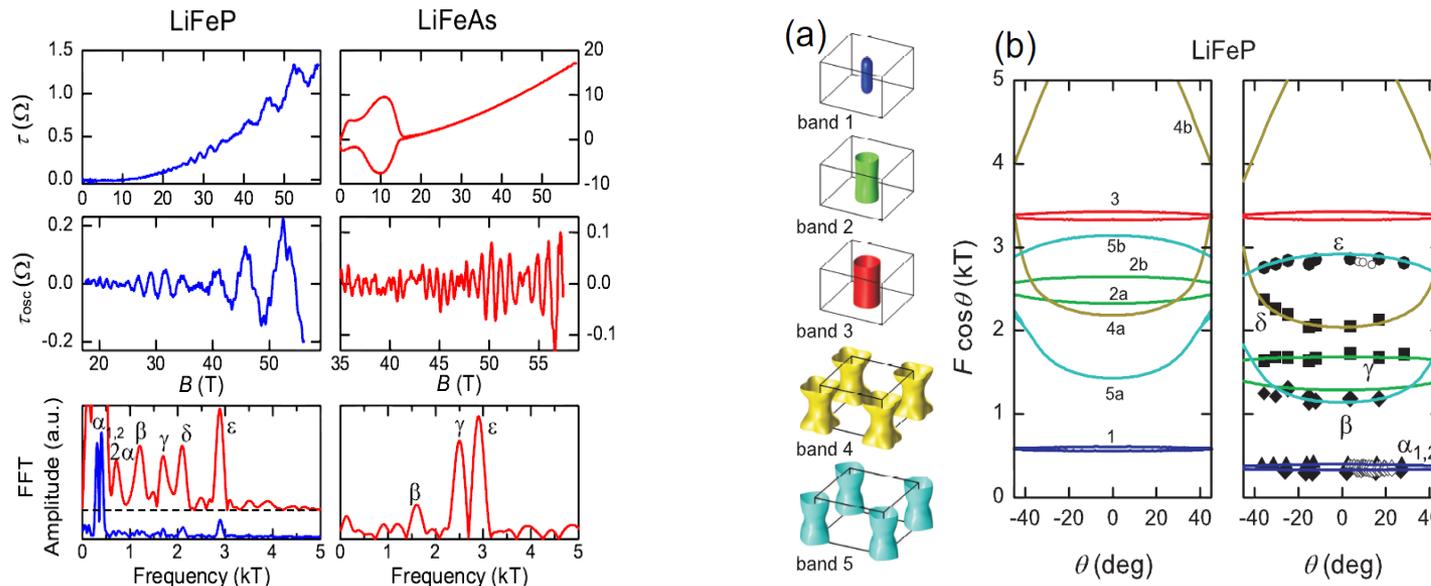
# Theoretische Grundlagen VI

- ▶  $T=0$ : Elektrische Eigenschaften nur durch  $g(\epsilon_F)$  bestimmt
- ▶  $T>0$ : Auch  $g(\epsilon)$  nahe bei  $\epsilon_F$  tragen bei
- ▶ verschiedene Oszillationen überlagern sich, der Effekt verschwimmt
- ▶  $\Rightarrow$  tiefe Temperaturen zur Beobachtung notwendig

# Praktisches Beispiel

- ▶ Messung des De-Haas-van-Alphen-Effektes an LiFeP und LiFeAs

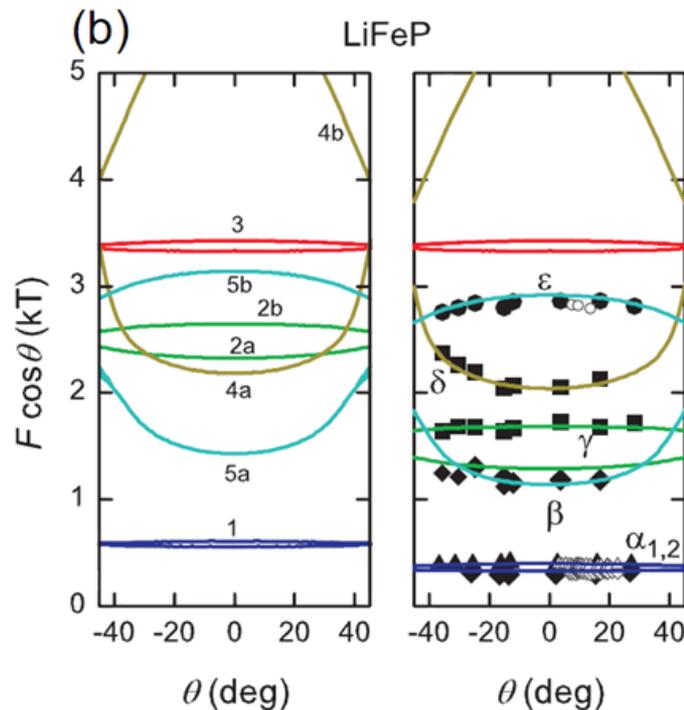
Mittels DFT-Rechnungen erhält man:



A de Haas-van Alphen study of the Fermi surfaces of superconducting LiFeP and LiFeAs  
 Putzke et al.  
 arXiv: 1107.4375v1

# Kritik

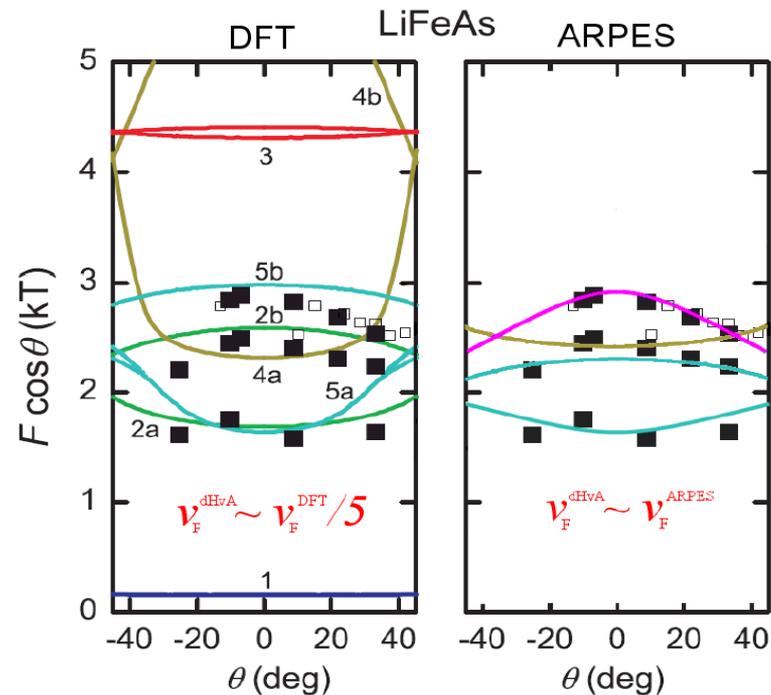
- ▶ Können Bänder unabhängig voneinander im Plot verschoben werden?



A de Haas-van Alphen study of the Fermi surfaces  
of superconducting LiFeP and LiFeAs  
Putzke et al.  
arXiv: 1107.4375v1

# Kritik

- ▶ Zuordnung von gemessenen Werten zu den berechneten nicht immer eindeutig



Comment on „A de Haas–van Alphen study of the Fermi surfaces of superconducting LiFeP and LiFeAs“  
Borisenko et al.  
arXiv:1108.1159

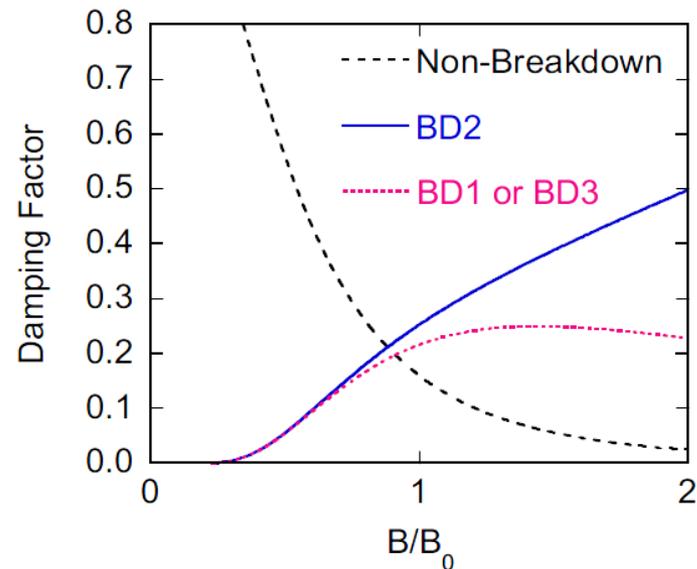
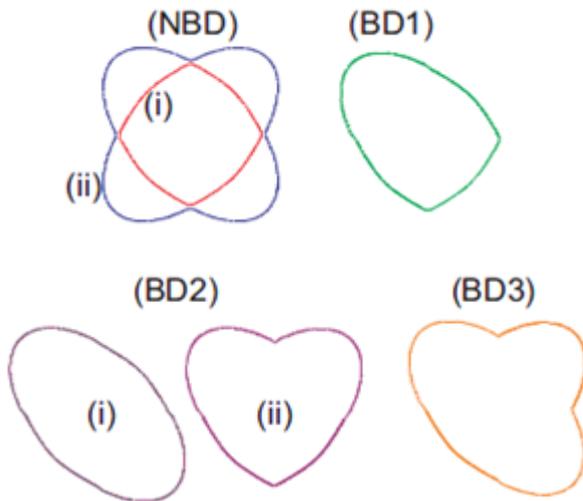
# Kritik

## ► Magnetic Breakdown:

- bei genügend hoher Energie tunneln die Elektronen zwischen den Bändern
- die Tunnelwahrscheinlichkeit hängt exponentiell vom Feld ab

$$p = e^{-B_0/B}$$

$B_0$  :Feld des Zusammenbruchs



Reply to Comment by Borisenko et al. on article „A de Haas–van Alphen study of the Fermi surfaces of superconducting LiFeP and LiFeAs“  
Putzke et al.  
arXiv:1108.3956v1

# Quellen

- ▶ Czycholl, Theoretische Festkörperphysik, 3. Auflage
- ▶ Ashcroft/Mermin, Solid State Physics, 1. Auflage
- ▶ Hunklinger, Festkörperphysik, 2. Auflage
- ▶ A de Haas–van Alphen study of the Fermi surfaces of superconducting LiFeP and LiFeAs, Putzke et al., arXiv: 1107.4375v1
- ▶ Comment on „A de Haas–van Alphen study of the Fermi surfaces of superconducting LiFeP and LiFeAs“, Borisenko et al., arXiv:1108.1159
- ▶ Reply to Comment by Borisenko et al. on article „A de Haas–van Alphen study of the Fermi surfaces of superconducting LiFeP and LiFeAs“, Putzke et al., arXiv:1108.3956v1