

# Materie im Magnetfeld

Die Atome in Materie haben magnetische Eigenschaften, die makroskopisch Magnetfelder beeinflussen, wenn man Materie in sie einbringt.

Man unterscheidet verschiedene Typen von magnetischen Eigenschaften:

Diamagnetismus

Paramagnetismus

Ferromagnetismus

Antiferromagnetismus

Ferrimagnetismus

Ein umfassendes mikroskopisches Verständnis ist erst in der Festkörperphysik möglich. Hier werden die makroskopischen Eigenschaften durch geeignete Parameter in die Gleichungen der Elektrodynamik eingebaut.

## Magnetische Dipole

Da keine magnetischen Monopole existieren, spielen bei Magnetfeldern Dipole eine ähnlich wichtige Rolle, wie die Ladungen in der Elektrostatik.

Eine stromdurchflossene Leiterschleife erzeugt ein magnetisches Dipolfeld:

Die magnetische Feldstärke ist proportional zum Strom.

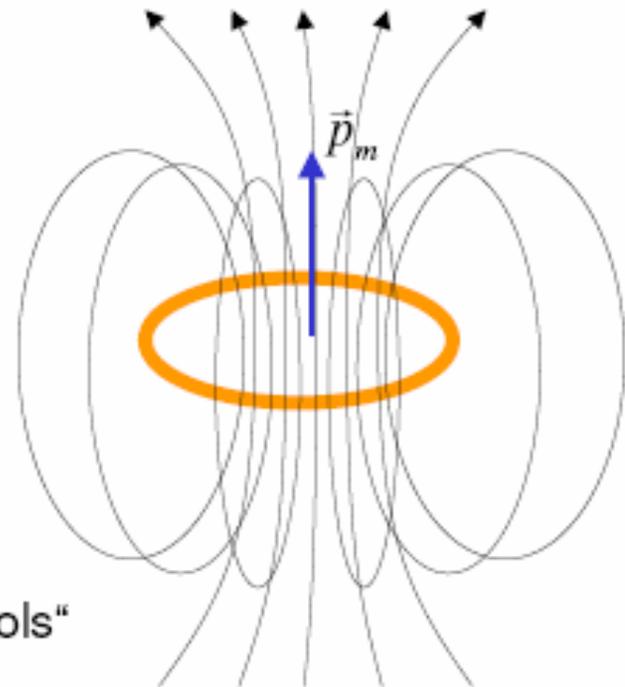
Der magnetische Fluss durch die Fläche der Leiterschleife ist proportional zur Fläche  $A$

$$\Phi = \int_{\text{Fläche}} \vec{B} \cdot d\vec{A}$$

Wir definieren daher für die „Stärke des Dipols“

$$\vec{p}_m = I \vec{A}$$

magnetisches Dipolmoment



## Magnetisches Moment eines Atoms

Atome besitzen magnetische Momente aufgrund der bewegten Elektronen. Ein Elektron, das im Atom mit der Frequenz  $f$  auf einer kreisförmigen Bahn umläuft, stellt einen Kreisstrom dar mit der Stromstärke:

$$I = q f$$

da es pro Sekunde  $f$  mal vorbeifliegt.

Das magnetische Dipolmoment ist also

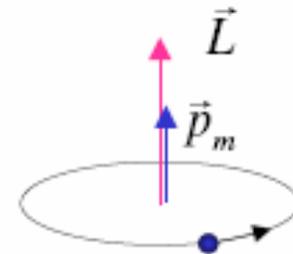
$$p_m = I A = I \pi R^2 = q f \pi R^2$$

$$\vec{p}_m = \frac{1}{2} q R^2 \vec{\omega}$$

Der Drehimpuls des Teilchens mit Masse  $m$  ist  $\vec{L} = m R^2 \vec{\omega}$

Also lässt sich das Dipolmoment durch den Drehimpuls ausdrücken

$$\vec{p}_m = \frac{q}{2m} \vec{L}$$



Im Atom ist der Drehimpuls gequantelt und kommt nur in ganzzahligen Vielfachen von  $\hbar$  vor.

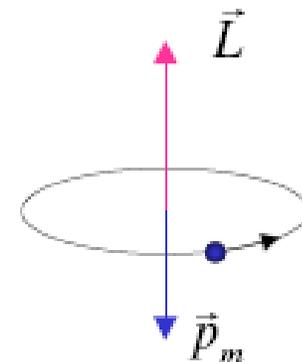
Mit der negativen Elektronenladung ( $q = -e$ ) ergibt sich

$$\vec{p}_m = -l \frac{e \hbar}{2m} \quad l = 0, 1, 2, 3, \dots$$

Das Dipolmoment für  $l=1$  nennt man

$$\mu_B = \frac{e \hbar}{2m}$$

Bohrsches Magneton



Durch seinen Spin (Drehimpuls  $\frac{1}{2}\hbar$ ) hat das Elektron selbst als Elementarteilchen auch ein magnetisches Dipolmoment

$$\vec{p}_m = -\mu_B$$

genauer ist es  
(vgl. Quantenelektrodynamik)

$$\vec{p}_m = -1.00114 \mu_B$$

## Magnetisierung

Bringt man Materie in ein Magnetfeld richten sich die atomaren Dipole im Magnetfeld aus und es entsteht eine Magnetisierung der Materie. Die magnetische Feldstärke eines äußeren Feldes wird dadurch verändert.

Die Magnetisierung ist die Vektorsumme über alle magnetischen Momente der Atome pro Volumen.

$$\vec{M} = \frac{1}{V} \sum_V \vec{p}_m$$

Die Magnetisierung  $M$  ist bei nicht zu großen Feldstärken proportional zu dem von außen angelegten Feld  $H$ :

$$\vec{M} = \chi \vec{H}$$

Die Konstante  $\chi$  heißt „magnetische Suszeptibilität“

## Magnetische Feldstärke in Materie

Die magnetische Feldstärke in Materie wird durch die Magnetisierung verändert:

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M}) = \mu_0(\vec{H} + \chi\vec{H}) = \mu_0(1 + \chi)\vec{H}$$

Man führt die dimensionslose Materialkonstante  $\mu$  ein:

$$\mu = 1 + \chi$$

$\mu$ : relative Permeabilität

Damit ergibt sich

$$B_{Materie} = \mu B_{Vakuum} = \mu\mu_0 H$$

## Paramagnetismus

Materie aus Atomen, die magnetische Dipolmomente besitzen und deren Ausrichtung durch die Wärmebewegung statistisch verteilt ist, nennt man paramagnetisch.

Im Magnetfeld werden die Dipolmomente in Feldrichtung ausgerichtet.

Die Magnetisierung zeigt also in Feldrichtung  $\vec{M} = \chi \vec{H}$

→ Die Suszeptibilität  $\chi$  ist positiv und  $\mu = (1 + \chi) > 1$ .

## Diamagnetismus

Materie aus Atomen, die keine magnetischen Dipolmomente besitzen nennt man diamagnetisch.

Durch das äußere Feld werden aber Dipolmomente induziert, die dem äußeren Feld entgegengesetzt sind.

Die Magnetisierung zeigt also entgegen der Feldrichtung  $\vec{M} = \chi \vec{H}$

→ Die Suszeptibilität  $\chi$  ist negativ und  $\mu = (1 + \chi) < 1$ .