

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.

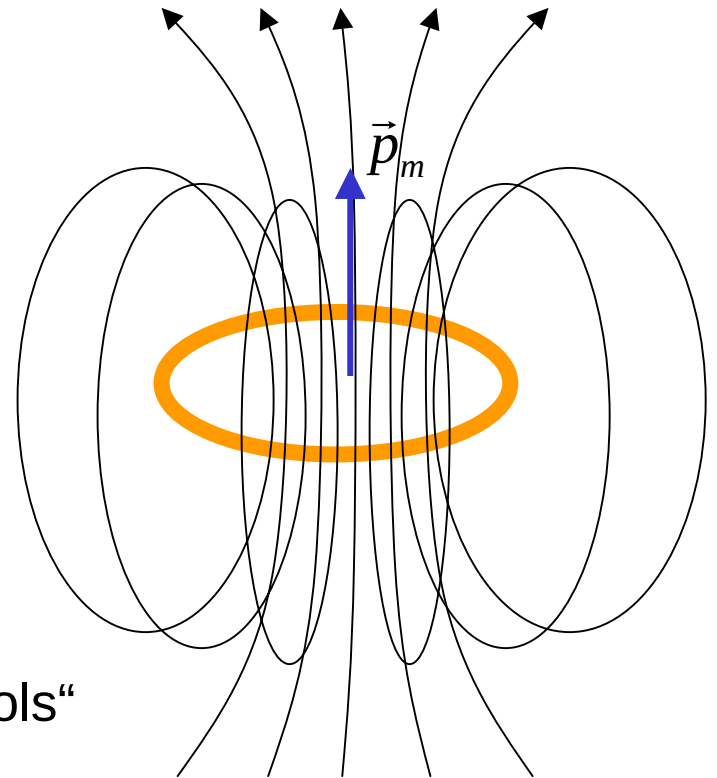
Der magnetische Fluss durch die Fläche der Leiterschleife ist proportional zur Fläche A

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

Wir definieren daher für die „Stärke des Dipols“

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

magnetisches Dipolmoment



Die Richtung des Dipolmoments zeigt in Richtung des Flächennormalenvektors, d.h. entlang der Achse der Leiterschleife.

Auf eine Leiterschleife im äußeren Magnetfeld wirkt ein Drehmoment aufgrund der Lorentzkraft. Dies lässt sich besonders leicht mit Hilfe des Dipolmomentes der Leiterschleife berechnen:

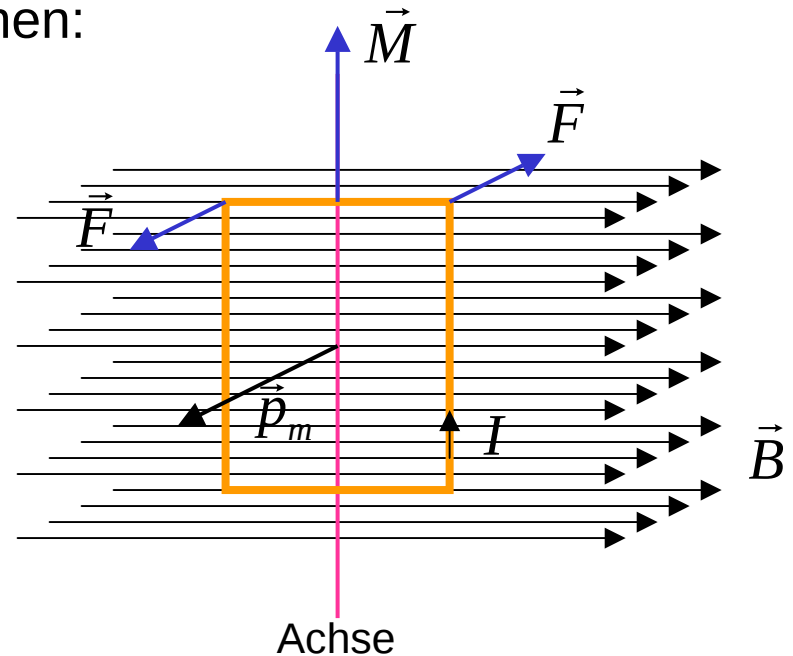
Auf die Leiterstücke der rechteckigen Leiterschleife wirkt die Lorentz-Kraft:

$$\vec{F} = I (\vec{l} \times \vec{B})$$

Für die senkrecht zur Achse laufenden Leiterstücke ergibt sich ggf. eine Kraft in Achsrichtung, die kein Drehmoment erzeugt.

Für die parallel zur Achse laufenden Leiterstücke ergibt sich:

$$F = I l B$$

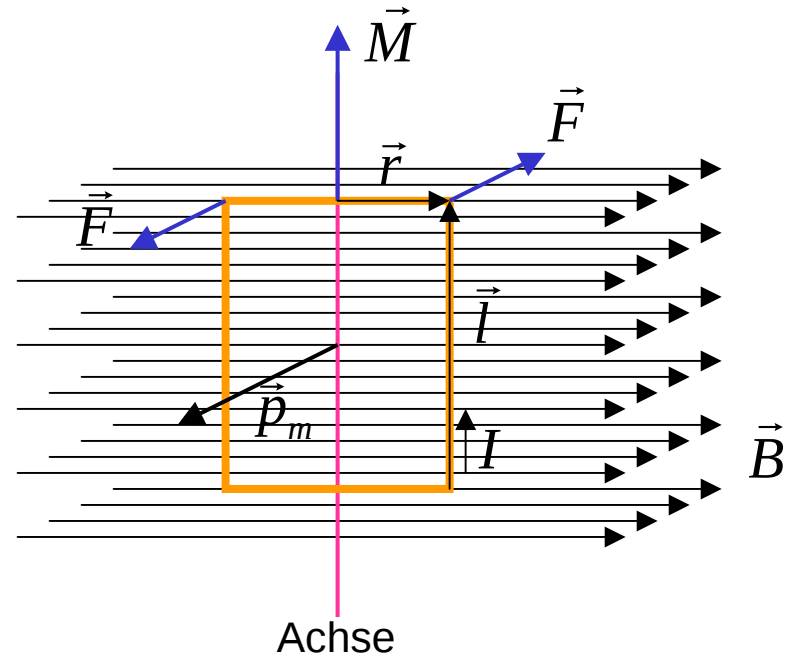


Für das Drehmoment ergibt sich mit $\vec{M} = (\vec{r} \times \vec{F})$ wenn alles senkrecht zueinander steht (R = halbe Breite, l = Höhe der Leiterschleife, A = Fläche)

$$M = 2r I l B = A I B = p_m B$$

Vektoriell geschrieben entsprechend:

$$\begin{aligned}\vec{M} &= (\vec{r} \times \vec{F}) \\ &= I(\vec{r} \times \vec{l} \times \vec{B}) \\ &= I(\vec{A} \times \vec{B}) \\ &= \vec{p}_m \times \vec{B}\end{aligned}$$



Das Ergebnis lässt sich auf einen beliebigen Dipol verallgemeinern

$$\vec{M} = \vec{p}_m \times \vec{B}$$

Drehmoment auf magnetischen Dipol

Energie eines Dipols im Magnetfeld

Auf den Dipol wirkt das Drehmoment

$$\vec{M} = \vec{p}_m \times \vec{B} \Rightarrow M = p_m B \sin \alpha$$

Dreht man um den Winkel α wird die Arbeit W verrichtet:

$$\begin{aligned} W &= \int F \, ds = \int \frac{M}{r} \, ds = \int \frac{M}{r} r \, d\alpha = p_m B \int \sin \alpha \, d\alpha \\ &= -p_m B \cos \alpha = -\vec{p}_m \cdot \vec{B} \end{aligned}$$

$$W = -\vec{p}_m \cdot \vec{B}$$

D.h der Dipol richtet sich von selbst im Magnetfeld so aus, dass sein Dipolmoment in Richtung des Magnetfeldes gerichtet ist.

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

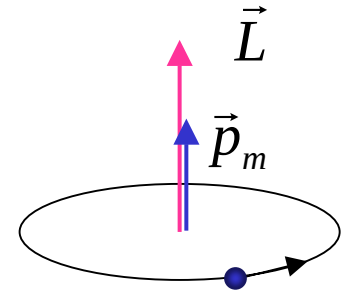
$$p_m = I A = I \pi R^2 = q f \pi R^2$$

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

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.

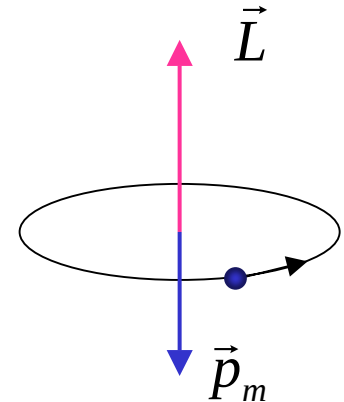
Mit der negativen Elektronenladung ($q = -e$) ergibt sich

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

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 χ 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 μ ein:

$$\mu = 1 + \chi$$

μ : relative Permeabilität

Damit ergibt sich

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

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 χ 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 χ ist negativ und $\mu = (1 + \chi) < 1$.

Kräfte auf Materie im inhomogenen Magnetfeld

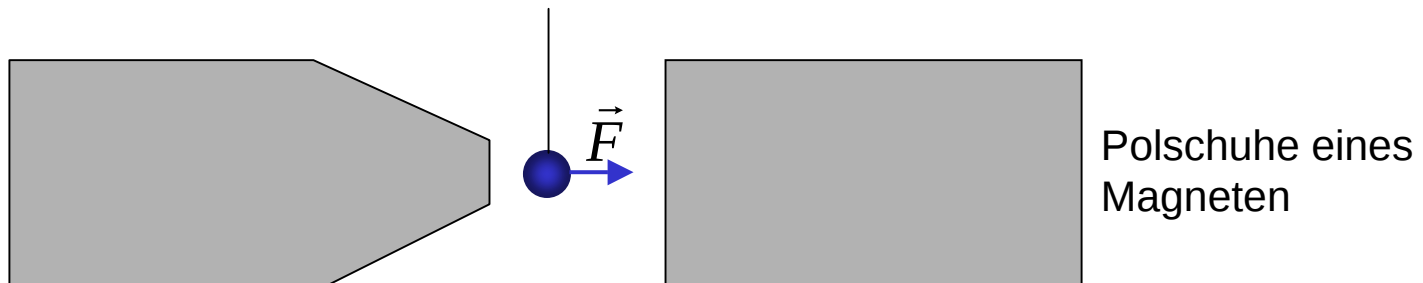
Im homogenen Magnetfeld wirkt nur ein Drehmoment an einem magnetischen Dipol.

Eine Kraft auf den Dipol ergibt sich nur im inhomogenen Feld, da die Kraft auf den einen Pol stärker ist als die Kraft auf den anderen Pol im schwächeren Feld.

Das Drehmoment richtet eine Kompassnadel im Magnetfeld aus.

Die Kraft im inhomogenen Feld führt zu einer Anziehung von Permanentmagneten untereinander.

Paramagneten werden in ein inhomogenes Magnetfeld hineingezogen, Diamagneten werden aus dem Feld hinausgedrängt, da ihre Dipole dem Feld entgegen gerichtet sind.



Beispiele für diamagnetische Stoffe χ

Kupfer	$- 10 \cdot 10^{-6}$	Gold	$- 36 \cdot 10^{-6}$
Wismut	$- 14 \cdot 10^{-6}$	Wasser	$- 0.72 \cdot 10^{-6}$
Silber	$- 26 \cdot 10^{-6}$	Stickstoff	$- 0.005 \cdot 10^{-6}$

Beispiele für paramagnetische Stoffe χ

Platin	$+ 19 \cdot 10^{-6}$	Wolfram	$+ 68 \cdot 10^{-6}$
Aluminium	$+ 23 \cdot 10^{-6}$	Fl. Sauerstoff	$+ 360 \cdot 10^{-6}$
Titan	$+ 70 \cdot 10^{-6}$	Sauerstoff	$+ 0.14 \cdot 10^{-6}$

Bei Paramagneten ist die Suszeptibilität temperaturabhängig, da die Wärmebewegung der Ausrichtung der Dipole entgegenwirkt.

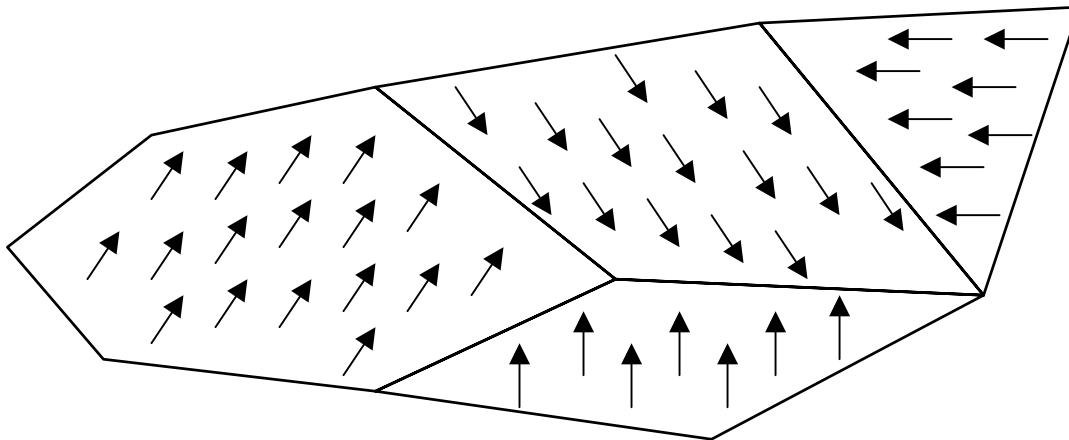
$$\chi \propto \frac{1}{T}$$

Ferromagnetismus

Bei ferromagnetischen Stoffen sind die atomaren magnetischen Momente ausgerichtet. Die Ausrichtung stabilisiert sich dadurch, dass jeder Dipol sich im Feld der anderen Dipole ausrichtet.

Diese Ausrichtung bleibt bis zu der s.g. Curie-Temperatur erhalten. Darüber ist die thermische Energie zu groß, um die Ausrichtung zu erhalten. Oberhalb der Curie-Temperatur werden die Stoffe paramagnetisch.

Erhitzt man den Ferromagneten über die Curie-Temperatur und kühlt ihn wieder ab, dann richten sich die Dipole spontan aus. Es bilden sich s.g. Weißsche Bezirke die sich in der Magnetisierungsrichtung unterscheiden:



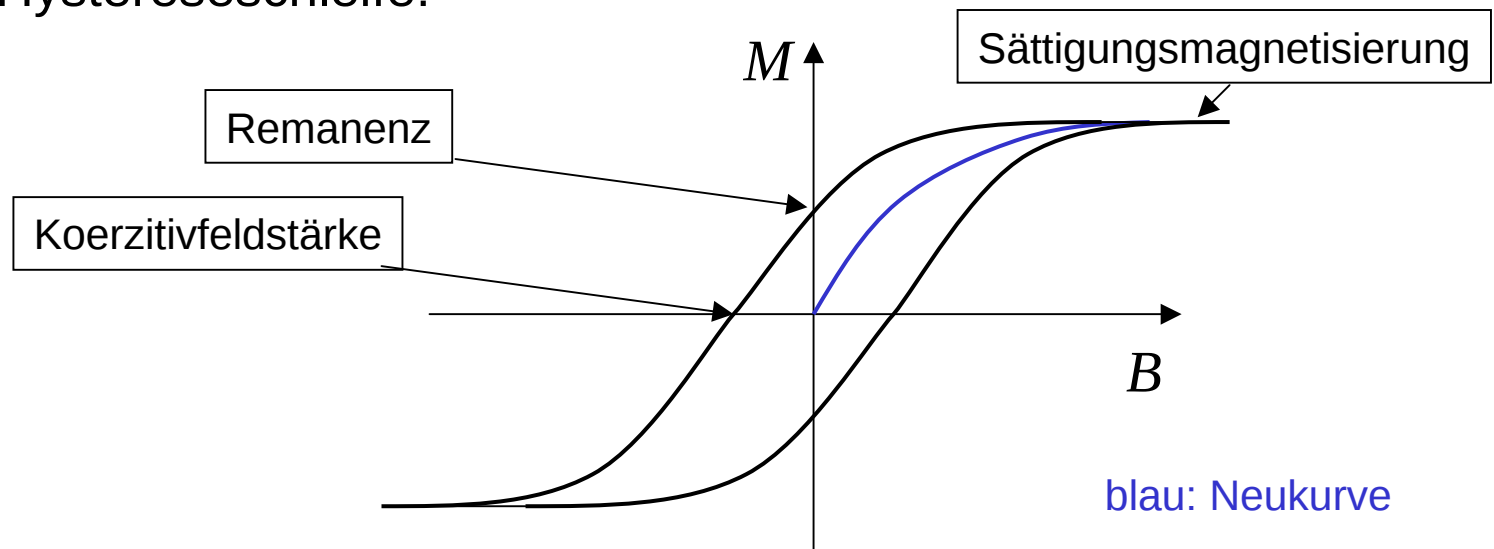
Bringt man den Ferromagneten in ein Magnetfeld, dann orientiert sich die Magnetisierung der Bezirke um in Richtung des Magnetfeldes.

Bei stärkeren Magnetfeldern geht die Magnetisierung in Sättigung.

Die Magnetisierung ist also nicht proportional zum äußeren Feld.

Schaltet man das Magnetfeld wieder ab, bleibt ein Teil der makroskopischen Magnetisierung erhalten (Remanenz). Man muss ein Gegenfeld anlegen, um die Magnetisierung aufzuheben (Koerzitivfeld).

Die Abhängigkeit der Magnetisierung von der magnetischen Feldstärke nennt man Hystereseschleife:



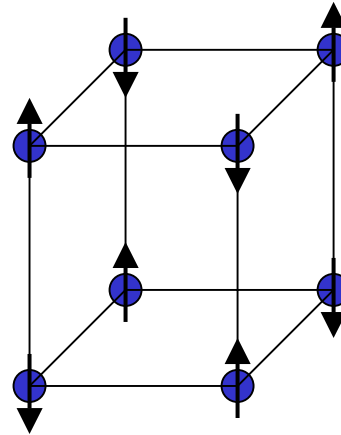
Beispiele für ferromagnetische Stoffe

	$\mu \cong \chi$	Curie-Temperatur
Eisen	500 – 10000	1043 K
Kobalt	80 - 200	1395 K
Permalloy (78% Ni, 3% Mo)	10 000 – 100 000	
Mumetall (76% ni, 5% Cu, 2% Co)	100 000	

Antiferromagnetismus

Beim Antiferromagnetismus besteht das Kristallgitter des Festkörpers aus zwei Untergittern, die entgegengesetzte Magnetisierung haben.

Oberhalb der s.g. Neel-Temperatur wird das Material paramagnetisch.



Ferrimagnetismus

Ebenso wie beim Antiferromagnetismus, aber die entgegengesetzten Magnetisierungen sind unterschiedlich groß und heben sich nicht gegenseitig auf. Es verbleibt eine makroskopische Magnetisierung