

3.6 Materie im Magnetfeld

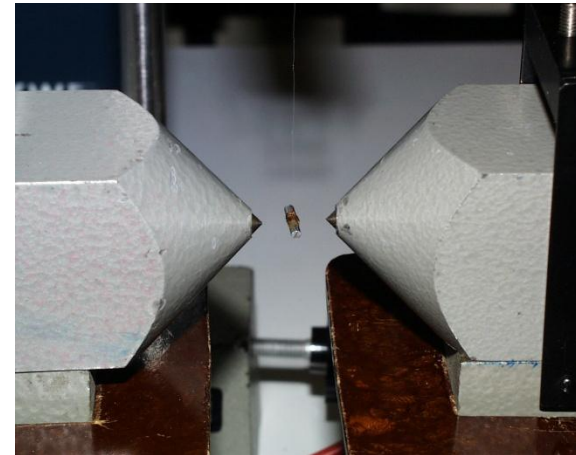
Vorversuche

Die magnetische Feldstärke, gemessen mit einer sog. Hall-Sonde, ist am Ende einer stromdurchflossenen Spule deutlich höher, wenn sich in der Spule ein Eisenkern statt Luft befindet. Das Eisen bewirkt eine Verstärkung des Felds.

In einem Magneten mit zugespitzten Polen richtet sich ein an einem Faden aufgehängtes Aluminiumstäbchen parallel zum magnetischen Feld aus (wie ein Kompass), während ein Stäbchen aus Wismut sich senkrecht dazu einstellt. Stoffe wie Aluminium verhalten sich wie ausgerichtete Dipole und heißen Paramagnete, Stoffe wie Wismut "widersetzen" sich dieser Ausrichtung. Sie heißen Diamagnete.

Ein Plättchen aus Graphit (Kohlenstoff), ebenfalls ein Diamagnet, schwebt über einer Anordnung von Permanentmagneten. Die Magnete sind als Quadrupol angeordnet (je zwei gegenüberstehende Nord- und Südpole), der eine Potenzialmulde bildet, in der sich das Graphitplättchen zentriert.

Eine paramagnetische Flüssigkeit wird in den Raum zwischen zwei magnetischen Polen hineingezogen.



Magnetisierung von Materie im Magnetfeld

Magnetische Felder bewirken in Materie eine Magnetisierung M , definiert als die Summe der magnetischen Dipolmomente p , geteilt durch das Volumen - ähnlich der Polarisation, die durch ein elektrisches Feld verursacht wird.

$$\vec{M} = \frac{1}{V} \cdot \sum_i p_{m,i} \quad [M] = 1 \frac{\text{A} \cdot \text{m}^2}{\text{m}^3} = 1 \frac{\text{A}}{\text{m}} = \left[\frac{B}{\mu_0} \right]$$

Auch hier werden

- existierende, aber ungeordnete atomare Dipole parallel zum B -Feld ausgerichtet (Paramagnetismus)
- Dipole "induziert", die (im Gegensatz zur Polarisation) antiparallel zum Feld sind (Diamagnetismus)

Diese magnetischen Eigenschaften sind allgegenwärtig, aber die Kräfte auf die meisten Materialien sind so schwach, dass sie kaum beobachtet werden. Nur Eisen, Kobalt und Nickel sowie einige Legierungen zeigen einen stärkeren magnetischen Effekt (Ferromagnetismus), so dass der falsche Eindruck entsteht, die meisten Materialien seien "nicht magnetisch".

Die atomaren Dipole kann man sich als kleine Stromschleifen vorstellen. In der Tat können Elektronen aufgrund ihrer Bahn um den Atomkern ein magnetisches Dipolmoment

$$p_m = I \cdot A = \frac{q \cdot L}{2m}$$

haben. Im Bohrschen Atommodell (Niels Bohr 1913) ist der Drehimpuls

ein ganzzahliges Vielfaches des sog. Planckschen Wirkungsquantums :

$$L = n \cdot \hbar$$

Mit $n = 1$, der Elementarladung $q = e$ und der Elektronenmasse m_e wird das sog.

Bohrsche Magneton als Einheit für atomare magnetische Dipolmomente definiert

$$p_B = \frac{e \cdot \hbar}{2m_e}$$

Darüber hinaus haben Elektronen ein magnetisches Moment aufgrund ihres "Spin". Der Effekt entspricht einer Eigenrotation, obwohl Elektronen (aus heutiger Sicht) punktförmig sind. Dies geht über die klassische Elektrodynamik hinaus. Die "atomaren Stromschleifen" können daher nur im Rahmen der Quantenmechanik beschrieben werden. Das magnetische Moment ist hier $p_m = g_e \cdot p_B$ mit dem Landé-Faktor $g_e \approx 2$ für Elektronen. Die kleine Abweichung $g - 2$, die von der Quantenelektrodynamik vorhergesagt wird, ist extrem präzise vermessen worden. Aktueller Wert: $g_e = 2,00231930436182(52)$

Das Gesamtmagnetfeld wird von "freien" Strömen (in Drähten) und von Polarisationsströmen bzw. der Magnetisierung hervorgerufen

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \mu_0 \cdot \vec{M} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M})$$

wobei ein "Hilfsfeld" H (analog zu D in der Elektrostatik) eingeführt wurde. Die Größe H hat die

Einheit $[H] = 1 \frac{\text{A}}{\text{m}}$

und wird als **magnetische Feldstärke** oder **magnetische Erregung** bezeichnet, während B die **magnetische Flussdichte** oder **magnetische Induktion** ist (aber auch oft Magnetfeld genannt wird).

Für die meisten Stoffe ist die Magnetisierung proportional zur magnetischen Erregung $\vec{M} = \chi_m \cdot \vec{H}$ mit der **magnetischen Suszeptibilität** χ_m . Damit ist

$$\vec{B} = \mu_0 \cdot (1 + \chi_m) \cdot \vec{H} = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \vec{H}$$

wobei μ_r als **relative Permeabilität** bezeichnet wird.

Paramagnete

Stoffe mit permanenten magnetischen Dipolen (z.B. Al, Na).

Die Suszeptibilität ist positiv und liegt im Bereich um 10^{-6} bis 10^{-9} .

Diamagnete

Bei Stoffen, die keine permanenten magnetischen Dipole besitzen (z.B. Edelgase, Cu, Ag, Au, Pb), ist die Suszeptibilität negativ im Bereich um 10^{-4} bis 10^{-6} .

Ferromagnete

Stoffe mit permanenten magnetischen Dipolen, die das Bestreben zeigen, sich wie ihre Nachbarn auszurichten (z.B. Fe, Co, Ni). Die Suszeptibilität positiv und sehr hoch: 10^2 bis 10^6 .

Versuche zum Ferromagnetismus

Magnetisierung und Entmagnetisierung

Stahldraht ist zunächst nicht oder nur schwach magnetisiert. Zieht man ihn mehrmals über den Pol eines Permanentmagneten, wird die Magnetisierung stärker. Zum Nachweis dient die Abstoßung eines Pols einer Kompassnadel (ohne Magnetisierung werden beide Pole angezogen). Eine Entmagnetisierung erreicht man über Erhitzen mit dem Bunsenbrenner oder heftige Hammerschläge.

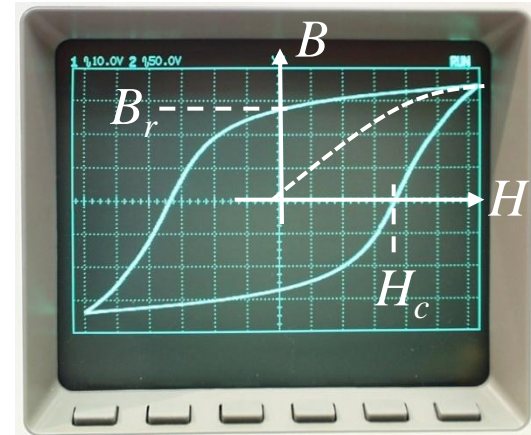
Abschirmung von Magnetfeldern

Ein Metallblech kann das Magnetfeld eines Permanentmagneten deutlich abschwächen, wie die Messung mit einer Hallsonde zeigt. Bei dem Blech handelt sich um sog. Mu-Metall oder Permalloy, eine Legierung aus Eisen, Nickel und anderen Metallen, die besonders "weichmagnetisch" ist. Die Permeabilität μ_r ist hoch (50000 und mehr), das Metall lässt sich leicht magnetisieren zeigt geringe Hysterese.



Hysterese

Eine stromdurchflossene Spule erzeugt ein Magnetfeld in einem Eisenkern, die "induzierte" Spannung (s. nächstes Kapitel) in einer zweiten Spule hängt vom Magnetfeld ab. Auf dem Oszillografenschirm:
Abszisse: Spannung proportional zum Spulenstrom und zur Erregung H
Ordinate: Spannung proportional zur magnetischen Flussdichte B .



Bei der erstmaligen Magnetisierung folgt Eisen der "Neukurve" (gestrichelte Linie im Bild), wird der Strom abgeschaltet, bleibt eine Magnetisierung und ein "remanentes Feld" B_r übrig. Bei $B = 0$ ist der Betrag der magnetischen Erregung gleich H_c , der "Koerzitivfeldstärke".

Barkhausen-Effekt

In ferromagnetischen Stoffen sind die magnetischen Dipolmomente innerhalb kleiner Bereiche ausgerichtet, die Weißsche Bezirke oder magnetische Domänen heißen. Die Orientierung der Domänen ist zunächst zufällig. In einem starken Magnetfeld verschieben sich die Domänengrenzen, sodass eine Magnetisierungsrichtung vorherrscht

Das Umklappen der magnetischen Domänen einer Probe in einer Spule wird mit einem Lautsprecher hörbar gemacht. Verschiedene Materialien unterscheiden sich im Geräusch:

Eisendraht: plötzliches Umklappen, kurzes Geräusch.

Nickel- und Federstahldraht: langsames Umklappen, prassendes Geräusch.

Versuch: Curie-Temperatur

Ein Körper aus "Silverin" (Legierung mit besonders niedriger Curie-Temperatur) löst sich von einem Elektromagneten, wenn er mit einer Heißluftpistole erwärmt wird.

