

3.5. Materie im Magnetfeld

3.5.1. Magnetisches Moment

Wie wir bei der Diskussion der stromdurchflossenen Leiterschleife gesehen hatten erzeugen elektrische Kreisströme magnetische Dipolmomente

Exp. 36: Dipol im Magnetfeld

$$\vec{m} = I A \vec{n}, \quad [m] = A \text{ m}^2$$

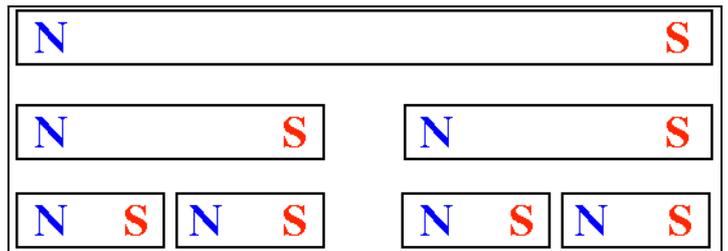
wobei I den Strom, A die Fläche und \vec{n} den Normalenvektor auf die Fläche darstellt. Solche Dipole existieren auch in mikroskopischer Form in unterschiedlichen Materialien.

Ein Stahldraht kann magnetisiert werden indem man ihn

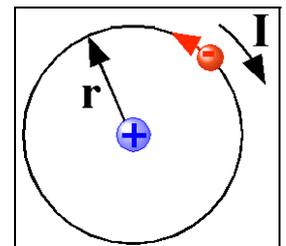
Exp. 25b Magnetisierung eines Stahldrahtes

in ein Magnetfeld bringt. Der Draht enthält anschließend einen Nord- und einen Südpol, wie man anhand der Wechselwirkung mit einer Kompassnadel nachweisen kann.

Dass es sich hier um mikroskopische Dipole handelt, und nicht um jeweils einen magnetischen Monopol am Ende des Drahtes, sieht man daran, dass man beim Teilen des Drahtes in zwei Teile die Teile nicht eine "Ladung" enthalten, sondern selber wieder als Dipole wirken.



Die Dipole sind erst auf atomarer Ebene zu finden. Als ein einfaches Modell berechnen wir das magnetische Moment eines Elektrons, welches um einen Atomkern kreist. In einem klassischen Modell beschreiben wir den Kreisstrom durch ein einzelnes Elektron als



$$|I| = e \omega / 2\pi.$$

Damit wird das magnetische Moment

$$m = I \pi r^2 = r^2 e \omega / 2.$$

In der Quantenmechanik wird gezeigt, dass der Drehimpuls von Elektronen in Atomen nur Werte annehmen kann, die einem Vielfachen der Planck'schen Konstanten $\hbar = h/2\pi = 1.05459 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$ besitzen; im klassischen Modell entspricht dies

$$\hbar = m_e r^2 \omega.$$

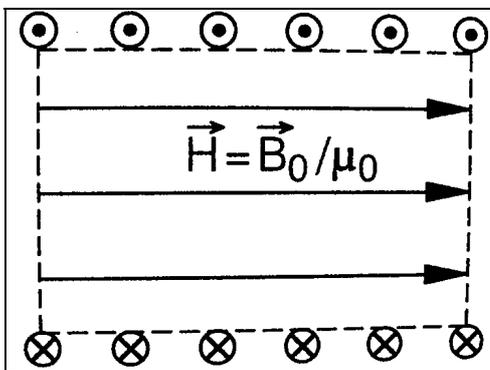
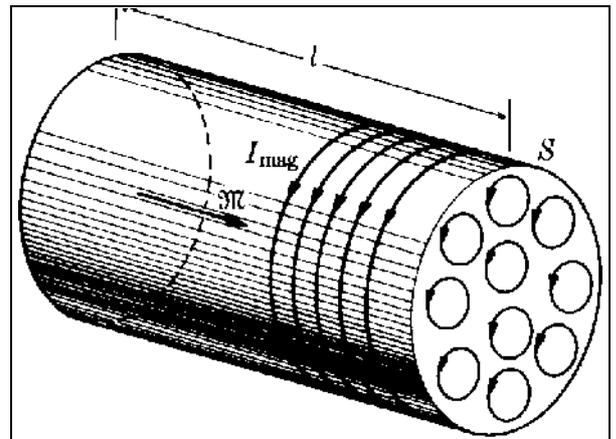
Damit wird das magnetische Moment dieses atomaren Kreisstroms

$$\mu_B = \frac{e \hbar}{2 m_e} = \frac{1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C } 1.05 \cdot 10^{-34} \text{ Js}}{2 \cdot 9.1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}} = 9.27 \cdot 10^{-24} \text{ A m}^2 .$$

Dieses elementare magnetische Moment wird als Bohr'sches Magneton bezeichnet. Es stellt die Einheit für mikroskopische magnetische Momente dar. In realen Systemen ergeben sich Korrekturen, die aber von der Größenordnung von eins sind.

3.5.2. Magnetische Eigenschaften

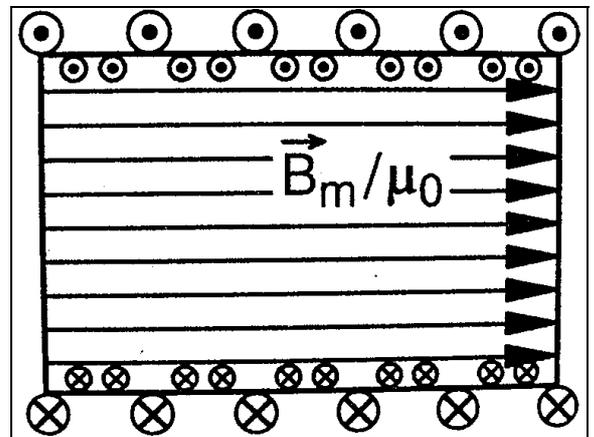
Analog zum elektrischen Feld wird auch bei magnetischen Feldern im Material eine magnetische Polarisation induziert.



Wir betrachten zunächst eine gewöhnliche Spule mit Magnetfeld H im Inneren.

Bringt man ein magnetisches Material in diese Spule so stellt man fest,

dass die magnetische Flussdichte B bei gleichem Strom zunimmt.

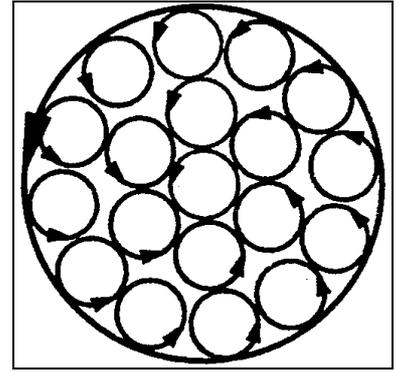


Exp. 34 Eisenkern in Spule

Die Zunahme der Flussdichte B

kann man mit einer Hallsonde messen wenn der Eisenkern hineingeschoben wird. Man kann sich dies so vorstellen, dass im magnetischen Stab Ringströme fließen, welche ein zusätzliches Feld erzeugen, das parallel zum externen Feld μH liegt.

Diese zusätzlichen Ringströme kann man sich entweder als an der Oberfläche liegend (wie die Oberflächenladungen bei Dielektrika) vorstellen, oder als kleine Ringströme im gesamten Volumen des Stabes.



Die gesamte magnetische Flussdichte im Material ist

$$B_m = \mu_r B_0 = \mu_r \mu_0 H_0 = B_0 + \mu_0 J ,$$

wobei sich H_0 und B_0 auf die Situation ohne Material, d.h. auf die leere Spule beziehen. μ_r ist die relative Permeabilität des Mediums.

In der letzten Gleichung stellt der Term $\mu_0 J$ den Beitrag des Materials zum gesamten Feld dar. J wird als magnetische Polarisation bezeichnet, und ist durch die Stärke, Dichte und Ausrichtung der mikroskopischen Dipole gegeben. Sie ist häufig proportional zum äußeren Feld,

$$\vec{J} = (\mu_r - 1) \vec{H}_0 = \chi_m \vec{H}_0 .$$

Die Proportionalitätskonstante χ_m wird als magnetische Suszeptibilität bezeichnet. Sie kann wahlweise anstelle der Permeabilität μ_r verwendet werden.

Permeabilität und magnetische Suszeptibilität können gemessen werden indem man die Änderung der Induktivität einer Spule beim Einführen des entsprechenden Materials misst – in enger Analogie zum Dielektrikum im Plattenkondensator.

Z: Spule mit Kern

3.5.3. Klassifikation magnetischen Verhaltens

Man unterscheidet drei Arten von magnetischen Materialien je nach Bereich von χ_m :

- in diamagnetischen Materialien ist die magnetische Polarisation klein und entgegen dem äußeren Feld ausgerichtet, $\chi_m < 0$.
- in paramagnetischen Materialien ist die magnetische Polarisation klein und parallel zum äußeren Feld ausgerichtet, $\chi_m > 0$.
- in ferromagnetischen Materialien ist die magnetische Polarisation groß und parallel zum äußeren Feld ausgerichtet, $\chi_m \gg 0$. Häufig ist sie aber nicht mehr proportional zum äußeren Feld.

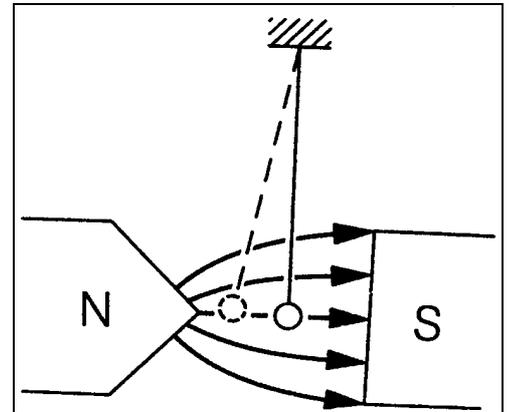
Ist die Suszeptibilität negativ so ist die induzierte Magnetisierung dem äußeren Magnetfeld entgegengerichtet. Die Energie des so induzierten magnetischen Dipols ist damit positiv und proportional zur Stärke des Magnetfeldes.

Z: $\vec{B} \uparrow \downarrow \vec{\mu}$

Auf ein diamagnetisches Material wirkt deshalb eine Kraft in Richtung des schwächeren Feldes.

Exp. 98 / 98a: Dia- / Paramagnetismus

Diesen Fall erhält man z.B. wenn man eine Glaskugel in ein inhomogenes magnetisches Feld bringt. Dabei spielt es keine Rolle welches der Nord- und welches der Südpol ist, die Glaskugel wird immer in Richtung des schwächeren Feldes bewegt. Im Gegensatz dazu ist die Magnetisierung in einem paramagnetischen Material parallel zum äußeren Feld orientiert. Es kann seine Energie somit erniedrigen indem es sich in Richtung des stärkeren Feldes bewegt. Diesen Fall kann man mit einer Aluminiumkugel nachvollziehen.



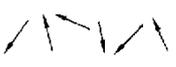
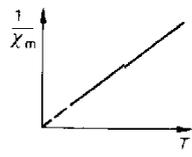
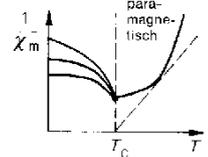
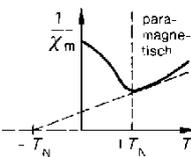
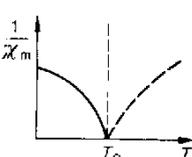
Magnetische Eigenschaften findet man nicht nur in Festkörpern; auch Flüssigkeiten sind paramagnetisch wenn sie entsprechende Ionen enthalten. In diesem Beispiel enthält die FeCl_3 Lösung paramagnetische Eisenionen. Auch in diesem Fall kann das Material Energie gewinnen indem es sich in das Gebiet mit höherer Energie bewegt, also im Rohr hochsteigt.

Exp. 99: paramagnetische Flüssigkeit

Das magnetische Verhalten unterschiedlicher Materialien kann auf mikroskopische Eigenschaften zurückgeführt werden. Die wichtigsten Beiträge stammen von den magnetischen Momenten der Elektronen, wobei unterschieden werden kann zwischen deren Bahnmoment \vec{m}_{Bahn} und Spinnmoment \vec{m}_{Spin} , welcher der Eigenrotation der Elektronen entspricht.

magnetische Materialeigenschaften

E. Hering, R. Martin, and M. Stohrer, 'Physik für Ingenieure', VDI-Verlag, Düsseldorf (1989).

| Stoffmagnetismus | Diamagnetismus | Paramagnetismus | Ferromagnetismus | Antiferromagnetismus | Ferrimagnetismus |
|-----------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Ursachen | abgeschlossene Elektronenschalen | unaufgefüllte Elektronenschalen | unaufgefüllte innere Elektronenschalen | unaufgefüllte innere Elektronenschalen; sehr kleine Atomabstände; NaCl-Struktur | unaufgefüllte innere Elektronenschalen; Spinellstruktur ((MgO · Al ₂ O ₃)) |
| Wirkungen (magnetische Momente) | jeder Stoff; Kompensation der Spinmomente; nur bei äußerem Feld vorhanden | regellose Verteilung  | parallele Spinausrichtung in Weiß'schen Bezirken  | zwei ferromagnetische Untergitter gleicher Spinmomente  | zwei ferromagnetische Untergitter mit ungleichen Spinmomenten  |
| Temperaturabhängigkeit des Kehrwerts der magnetischen Suszeptibilität | keine |  Curiesches Gesetz: $\chi_m = \frac{C}{T}$ |  Curie-Weißsches Gesetz: $\chi_m = \frac{C}{T - T_C}$ |  $\chi_m = \frac{C}{T + T_N}$ (richtungsabhängig) |  $\chi_m = \frac{C}{T - T_C}$ (im allgemeinen komplizierter Verlauf) |
| magnetische Suszeptibilität | $-1 < \chi_m < 0$ | $10^{-6} < \chi_m < 10^{-3}$ | $10^2 < \chi_m < 10^5$ | — | — |
| Werkstoffe | Ag, Au, Bi, Cu, H ₂ , N ₂ | Sn, Pt, W, Al, O ₂ | Co, Fe, Gd, Ni | FeO, NiO, CoO CrF ₃ , FeF ₃ , CoF ₃ | MeO · Fe ₂ O ₃ (Me: Fe, Ni, Co) Ferrite |

Der Diamagnetismus existiert in allen Körpern; er kann jedoch durch andere Effekte überdeckt werden. In diamagnetischen Materialien sind die Elektronen jeweils in Paaren vorhanden, deren magnetische Spinmomente entgegengesetzt ausgerichtet sind. Dadurch tragen diese nicht zum Magnetismus bei. Hingegen erzeugt das äußere Magnetfeld eine Präzession der Elektronenhülle. Der daraus resultierende Kreisstrom erzeugt eine magnetische Polarisation in entgegengesetzter Richtung. Typische Werte der magnetischen Suszeptibilität in diamagnetischen Materialien sind

Generell ist der Diamagnetismus umso stärker je größer die Elektronendichte ist und je weiter die Elektronen vom Atomkern entfernt sind.

Z: Spinmomente

In paramagnetischen Materialien existieren magnetische Spinmomente, welche ohne Magnetfeld zufällig orientiert sind und sich deshalb gegenseitig kompensieren. Liegt ein äußeres Magnetfeld an, so werden die magnetischen Momente teilweise ausgerichtet und erzeugen eine Polarisation parallel zum äußeren Feld. Die Stärke dieser Polarisation ist durch das Gleichgewicht zwischen dem Energiegewinn durch parallele Orientierung und der thermischen Bewegung gegeben. Es wird beschrieben durch

| | |
|--------------------|------------------------|
| Cu | $-9.6 \cdot 10^{-6}$ |
| Ag | $-25.2 \cdot 10^{-6}$ |
| Sb | $-70.9 \cdot 10^{-6}$ |
| Bi | $-156.0 \cdot 10^{-6}$ |
| NaCl | $-13.9 \cdot 10^{-6}$ |
| SiO ₂ | $-29.6 \cdot 10^{-6}$ |
| H ₂ O | $-7 \cdot 10^{-6}$ |
| N ₂ (g) | $-6.75 \cdot 10^{-9}$ |

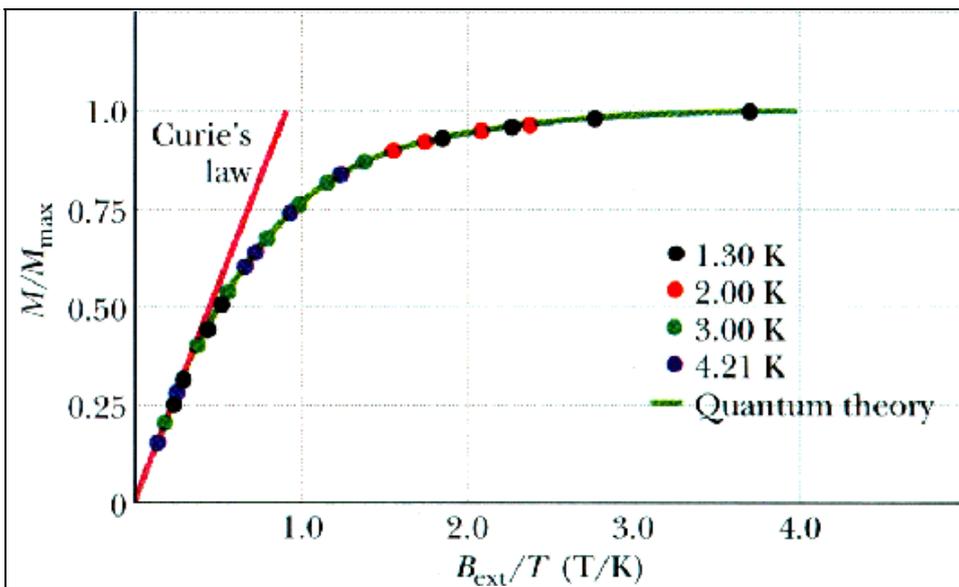
das Curie-Weiß Gesetz

$$\chi_m = C/T .$$

Die Curie-Konstante C ist eine materialabhängige Konstante.

Typische Werte der magnetischen Suszeptibilität in paramagnetischen Materialien sind in Metallen bei Raumtemperatur zwischen 10^{-5} und 10^{-3} .

| | |
|---------------------|------------------------|
| Al | $+20.85 \cdot 10^{-6}$ |
| Pt | $+257.4 \cdot 10^{-6}$ |
| Mn | $+883.0 \cdot 10^{-6}$ |
| V | $+340.0 \cdot 10^{-6}$ |
| O ₂ (g) | $+1.9 \cdot 10^{-6}$ |
| O ₂ (fl) | $+3.6 \cdot 10^{-3}$ |



Bei tiefen Temperaturen und hohen Feldern findet man Abweichungen von diesem linearen Verhalten. Sie können dadurch erklärt werden, dass dann alle Dipole vollständig ausgerichtet sind. Eine quantitative

Behandlung ist jedoch nur mit Hilfe der Quantenmechanik möglich.

3.5.4. Ferromagnetismus

In Materialien mit nur teilweise gefüllten Elektronenschalen kann die Wechselwirkung zwischen den Elektronen zu einer bevorzugten parallelen Ausrichtung ihrer magnetischen Momente führen.

Z: Orientierung / Energie

Gegen diese Ausrichtung wirkt die thermische Bewegung. Es gibt deshalb eine Temperatur T_C , oberhalb der sich solche Materialien wie ein Paramagnet verhalten, während sie sich unterhalb ferromagnetisch verhalten. Die genaue Temperaturabhängigkeit der Suszeptibilität ist jedoch etwas anders als bei reinen Paramagneten:

$$\chi_m(\text{ferromagnet}) = \frac{C}{T - T_C} \quad \text{für } T > T_C .$$

Sie nimmt somit mit abnehmender Temperatur zu und divergiert bei der kritischen Temperatur T_C , der Curie-Temperatur. Bei dieser Temperatur genügt

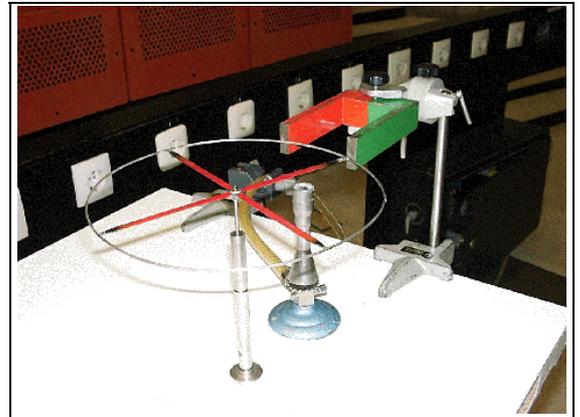
Z: $\chi_m(T)$

somit (idealisiert) schon ein beliebig kleines Feld, um eine makroskopische magnetische Polarisation zu erzeugen, es entsteht eine spontane Polarisation.

| Curie-Temperatur | |
|------------------|-----------|
| | T_c / K |
| Dy | 87 |
| Gd | 289 |
| Cu_2MnAl | 603 |
| Ni | 631 |
| Fe | 1042 |
| Co | 1400 |

Diese kritischen Temperaturen sind stark materialabhängig; sie können weniger als 1 K oder > 1000 K betragen.

Indem man ein ferromagnetisches Material über die Curie-Temperatur erwärmt macht man es zu einem Paramagneten; kühlt man es wieder ab so wird es wieder zu einem Ferromagneten. In diesem Experiment nützt man die Erwärmung des Nickelrades, um das Material paramagnetisch zu machen (also im Vergleich zum ferromagnetischen Material nichtmagnetisch. Es wird deshalb weniger stark vom Magneten angezogen als der ferromagnetische Teil des Rings, es entsteht netto ein Drehmoment, welches auf den Ring wirkt und er beginnt sich zu drehen. Dadurch wird ein anderer Teil erwärmt und das Drehmoment dadurch aufrecht erhalten.



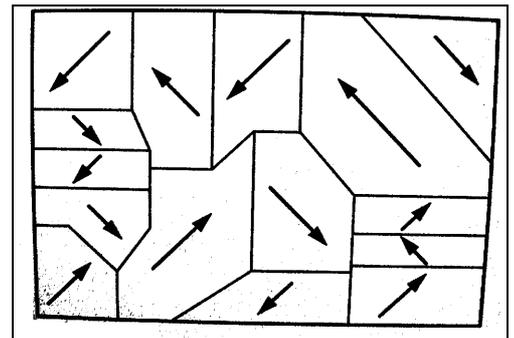
Exp. 102.1: Curie-Punkt

Die spontane Polarisierung des ferromagnetischen Materials entsteht zunächst nur lokal, d.h. die Momente orientieren sich auf einer Skala von μm parallel zueinander. Es entstehen Bereiche, in denen die Momente alle in die gleiche Richtung orientiert sind.:

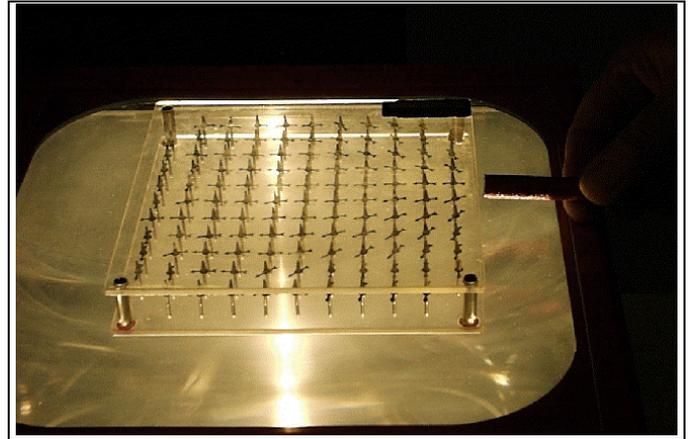
Exp. 25a Modell Ferromagnetismus

Diese kleinen magnetischen Domänen werden als Weiß'sche Bezirke (Pierre Weiß 1865-1940) bezeichnet und sind die größten magnetisch homogenen Bereiche. Auf einer größeren Skala treten alle Orientierungen gleichwertig auf.

Weiß'sche Bezirke kann man u.a. im Polarisationsmikroskop beobachten. Je nach Art des Kristallgitters gibt es verschiedene mögliche Vorzugsorientierungen für die Domänen. In diesem kubischen Modell z.B. gibt es vier äquivalente Orientierungen, im hexagonalen Modell sechs.



Wird ein äußeres Feld angelegt so wachsen die Bezirke, in denen die Magnetisierung parallel zum äußeren Feld liegt auf Kosten der anderen Bezirke. Sie wachsen auf Kosten der benachbarten Domänen und es können auch ganze Domänen umklappen.



Exp. 100.1: Barkhausen-Effekt

Diesen Effekt kann man auch akustisch hörbar machen. In diesem Experiment werden drei dünne Drähte aus Nickel, geglühtem Eisen und Stahldraht verglichen: Jedesmal wenn eine Domäne umklappt wird in der Spule ein Spannungspuls induziert, der als Knacken hörbar wird.

Wenn das Feld genügend groß wird stellen sich alle atomaren Dipole parallel zum äußeren Feld, das Material ist vollständig polarisiert. Diese Materialien können deshalb auch ohne äußeres Magnetfeld eine Magnetisierung zeigen. Die Beziehung zwischen B und H ist somit nicht mehr linear. Man kann eine Permeabilität nur noch differentiell definieren:

$$\mu = 1/\mu_0 \text{ dB/dH} .$$

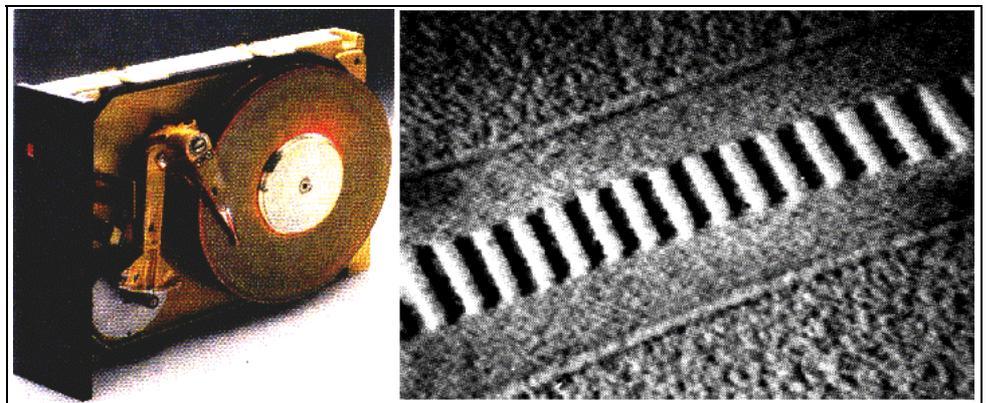
diese Permeabilitäten / Suszeptibilitäten können sehr groß sein, im Bereich von 1000 bis 100'000.

| Suszeptibilität | |
|------------------------|---------|
| | μ_r |
| Ferrite | 1000 |
| Fe (rein) | 10000 |
| Co | 1400 |
| Ni-Fe (μ -Metall) | < 90000 |

Exp. 101b: Abschirmung mit μ -Metall

Das Material mit der größten Suszeptibilität, μ -Metall, wird insbesondere verwendet, um magnetische Felder abzuschirmen.

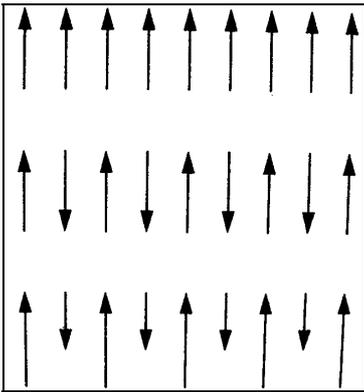
Es existiert eine ganze Reihe von weiteren Anwendungen für ferromagnetische Materialien. Eine davon ist die Verwendung für die Speicherung von Daten. In einer Festplatte sind, wie in der Abbildung gezeigt, einzelne Bezirke mit einer bestimmten Richtung polarisiert.



Neben ferromagnetischem Verhalten gibt es auch antiferromagnetisches Verhalten. In diesem Fall ist die Wechselwirkung zwischen nächsten Nachbarn so, dass antiparallele Orientierung energetisch günstiger ist. Die kritische Temperatur wird hier als Neel-Temperatur T_N bezeichnet. Oberhalb der Neel-Temperatur gilt ein abgewandeltes Curie-Weiß Gesetz

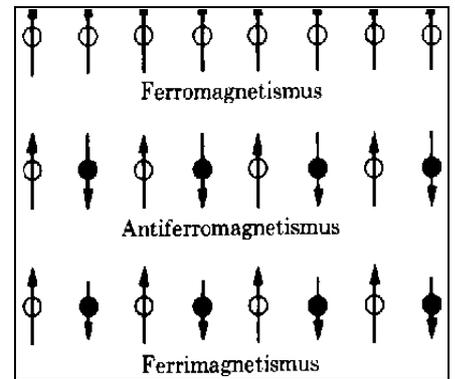
$$\chi_m = \frac{C}{T + T_N} .$$

Unterhalb T_N ist χ_m stark materialabhängig.



Eine weitere Klasse von magnetischen Materialien sind die Ferrimagnete oder Ferrite. Hier sind magnetische Momente unterschiedlicher Größe antiparallel ausgerichtet sind und kompensieren sich teilweise.

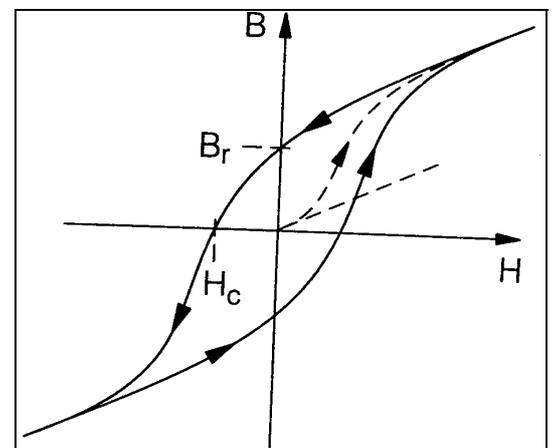
Die Ausrichtung der magnetischen Momente kann auch Auswirkungen auf die Form des Materials haben. Bei piezoelektrischen Materialien konnte die Form mit Hilfe eines angelegten elektrischen Feldes verändert werden.



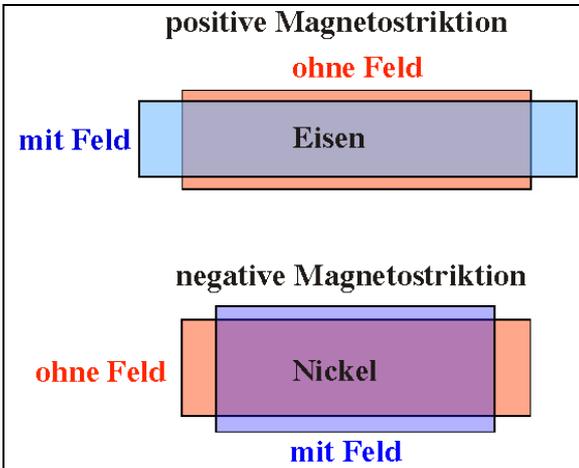
Ähnlich kann mit Hilfe von magnetischen Feldern die Form von magnetischen Materialien geändert werden. Dieser Effekt wird als Magnetostriktion bezeichnet. Bei positiver Magnetostriktion (z.B. Fe) verlängert sich das Material beim Anlegen eines Feldes; bei negativer Magnetostriktion (z.B. Nickel) verkürzt und verbreitert sich das Material.

3.5.5. Magnetische Hysterese

Trägt man für ein ferromagnetisches Material



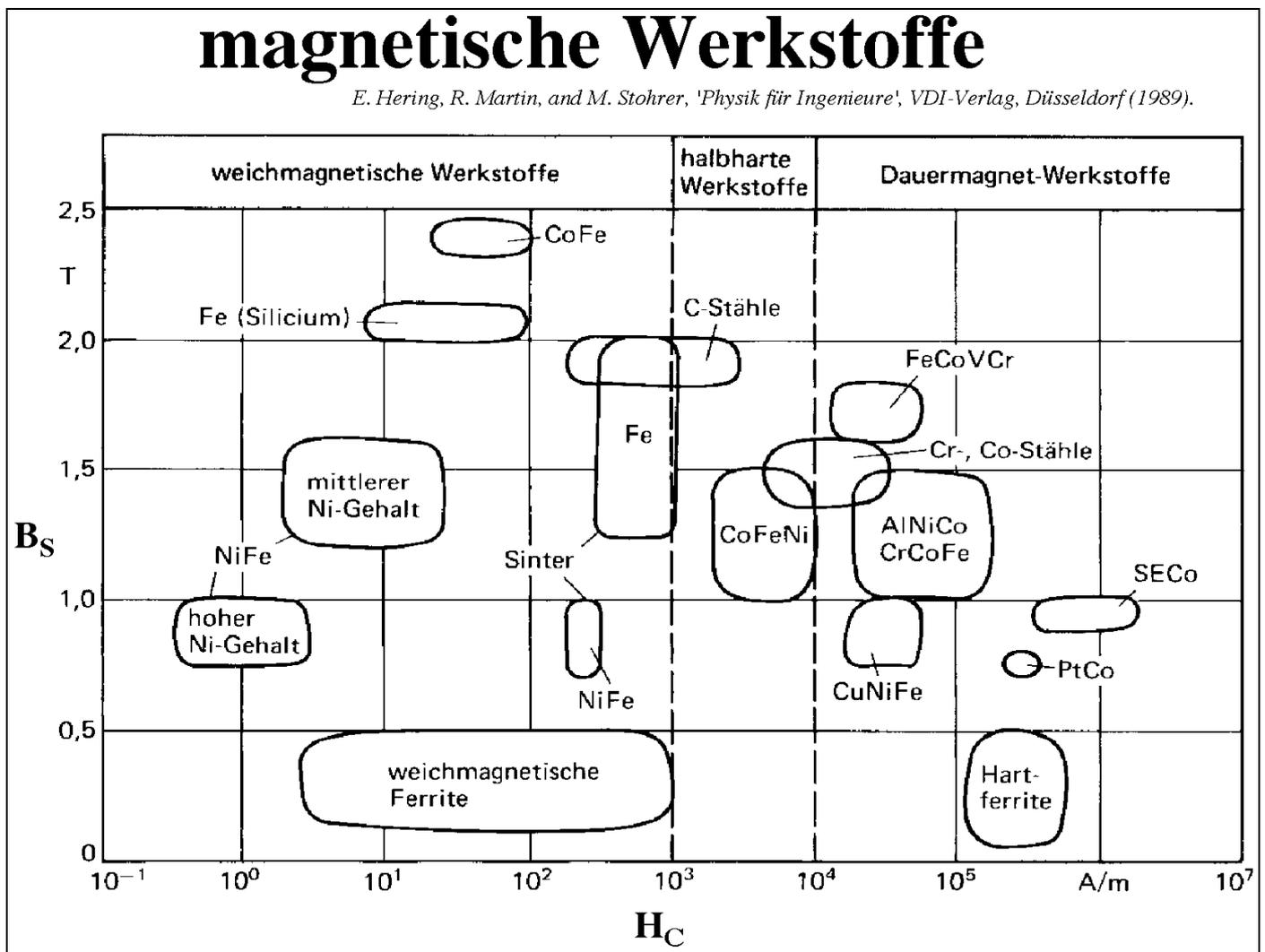
die magnetische Flussdichte gegen das äußere Magnetfeld auf, so erhält man eine Kurve, die von der zeitlichen Änderung der Felder abhängt. Beginnt man mit einem nicht magnetisierten Material so findet man ein näherungsweise lineares Verhalten. Bei größeren Feldern treten Sättigungseffekte auf. Diese können auf die vollständige Ausrichtung der Weiß'schen Bezirke zurückgeführt werden. Wird das Feld wieder verringert so bleibt die Orientierung zunächst erhalten. Auch ohne äußeres Feld findet man eine Magnetisierung,



die sogenannte Remanenz B_r . Dies ist die charakteristische Eigenschaft eines Permanentmagneten. Erst wenn ein Gegenfeld (das Koerzitivfeld H_c) angelegt wird kann diese Magnetisierung auf Null reduziert werden. Für stärker negatives Feld wird tritt eine negative Magnetisierung auf, welche schließlich ebenfalls sättigt.

Gute Permanentmagnete haben hohe Koerzitivfeldstärken und hohe Remanenzen. Die Remanenzfelder liegen in der Größenordnung von 1 T, während die Koerzitivfelder von einigen 1000 bis zu einigen 100000 A/m gehen können. Die höchsten Werte erzielt man mit seltenen Erden, da diese eine große Zahl ungepaarter Elektronen enthalten.

| Remanenz und Koerzitivfeld | | |
|----------------------------|-----------|-------------|
| | B_r / T | $H_c / A/m$ |
| C-Stahl | 1 | 3600 |
| Cr-Stahl | 0.95 | 5000 |
| AlNiCo Stahl | 1.25 | 44000 |
| Co-Stahl | 0.95 | 19000 |
| seltene Erden | 0.9 | 700000 |



Während die Sättigungsfeldstärken alle im Bereich von 1 T liegen können die Koerzitivfelder über viele Größenordnungen variieren. Man beachte die logarithmische Skala in der Figur!

Exp. 101: Hysterese

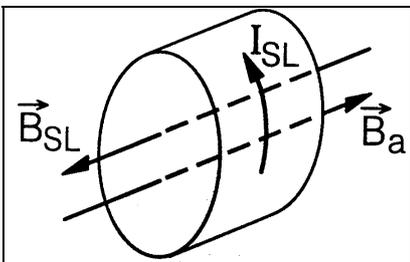
Im Experiment wird das äußere Magnetfeld H und die magnetische Flussdichte B gemessen, welches in einem Eisenkern einer Solenoidspule erzeugt wird. Das äußere Magnetfeld wird periodisch variiert, während die Flussdichte über eine zweite Spule gemessen wird.

Die Fläche der Hysterese im B - H Diagramm hat die Einheit einer Energiedichte; sie entspricht der Energie, welche in einem Zyklus des äußeren H -Feldes im Material deponiert wird. Bei Transformatoren (siehe Kapitel 3.6) finden viele solche Zyklen statt. Man versucht deshalb die Hysteresen für solche Anwendungen möglichst gering zu machen. Materialien, welche diese Bedingung erfüllen, werden als magnetisch weich bezeichnet; sie zeichnen sich dadurch aus, dass die Magnetisierung nach Entfernung des äußeren Feldes wieder verschwindet. Für solche Anwendungen sind z.B. Ferrite gut geeignet, da sie schon bei geringen Koerzitivfeldern umpolarisiert werden.

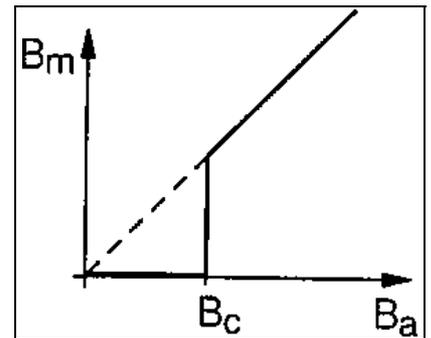
3.5.6. Magnetische Eigenschaften von Supraleitern

Neben der verlustlosen Leitung von Elektrizität haben Supraleiter auch außergewöhnliche magnetische Eigenschaften. Insbesondere sind sie perfekte Diamagneten.

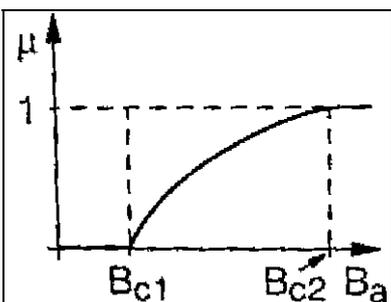
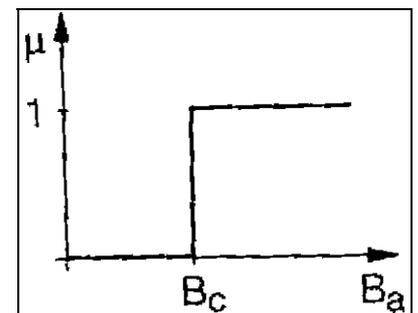
Dies bedeutet, dass magnetische Felder nicht ins innere eines Supraleiters eindringen können. Dies gilt allerdings nur bis ein kritisches Feld erreicht ist; oberhalb dieser Feldstärke dringt das Magnetfeld wieder ein.



Dies geschieht dadurch, dass an der Oberfläche des Supraleiters Kreisströme entstehen, die ein Magnetfeld erzeugen, welches das äußere Feld gerade kompensiert.

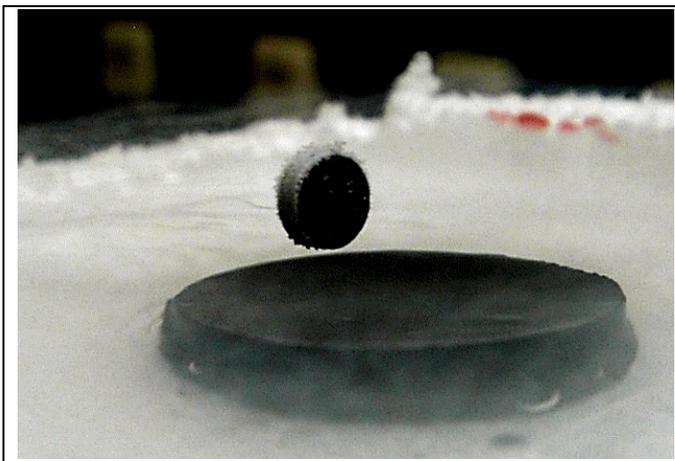
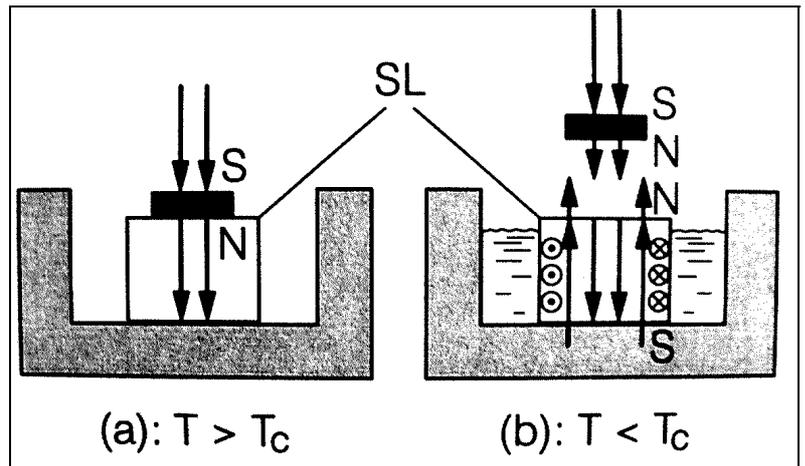


Man kann dies durch die Permeabilität μ ausdrücken: sie beträgt im Supraleitenden Bereich 0. Wenn ein kritisches Feld erreicht wird, dringt das Feld wieder in das Material ein, die Suszeptibilität wird 1. Diese Eigenschaft, das Magnetfeld auszustoßen, wird als Meißner-Ochsenfeld Effekt bezeichnet (Fritz Walther Meißner, 1882-1974; R. Ochsenfeld, 1901-).



In sogenannten Typ II Supraleitern wird dieses Verhalten etwas modifiziert: hier dringt das Feld nicht mehr schlagartig ein, sondern die Suszeptibilität steigt über einen Bereich von Feldstärken an bis sie den Wert 1 erreicht.

Dieses Verhalten wird gerne mit einem Experiment demonstriert, bei dem ein Magnet auf einen Supraleiter gelegt wird. Handelt es sich um einen Hoch- T_C Supraleiter so genügt flüssiger Stickstoff, um ihn unter die kritische Temperatur abzukühlen. Dabei wird das Feld aus dem Supraleiter ausgestoßen und der Magnet schwebt über dem Supraleiter.



Dieser Effekt wird z.B. bei einem japanischen Konkurrenzprodukt zum Transrapid verwendet, um ihn über der Schiene schweben zu lassen.



Exp. 103: Supraleitung

Eine Möglichkeit, den Meissner-Effekt nachzuweisen ist, ein Stück Supraleiter mit flüssigem Stickstoff unter die kritische Temperatur abzukühlen. Legt man dann einen kleinen Permanentmagneten auf den Supraleiter, so können die Magnetfeldlinien nicht in den Supraleiter eindringen und der Magnet schwebt über dem Supraleiter.