

7. Magnetische Eigenschaften

Magnetwerkstoffe z.B. kommen in Elektromotoren, Generatoren, Transformatoren, als Informationsspeicher, als Aktuatoren und Sensoren zum Einsatz. Das magnetische Verhalten der Stoffe ist in erster Linie durch ihre Elektronenstruktur bestimmt.

7.1 Magnetische Dipole und magnetische Momente

Magnetisierung entsteht, wenn sich in einem Stoff induzierte oder permanent vorhandene magnetische Dipole infolge der Wechselwirkung mit einem äußeren magnetischen Feld ausrichten.

Die Stärke des von einem magnetischen Dipol erzeugten Magnetfeldes ist sein **magnetisches Moment**. Zu jedem Elektron eines Atoms gehören zwei magnetische Momente. Das eine entsteht durch die Eigenrotation des Elektrons, dem Spin, das andere durch den Bahnumlauf des Elektrons um den Atomkern. Entsprechend nennt man die Momente **Spinmoment** und **Bahnmoment**.

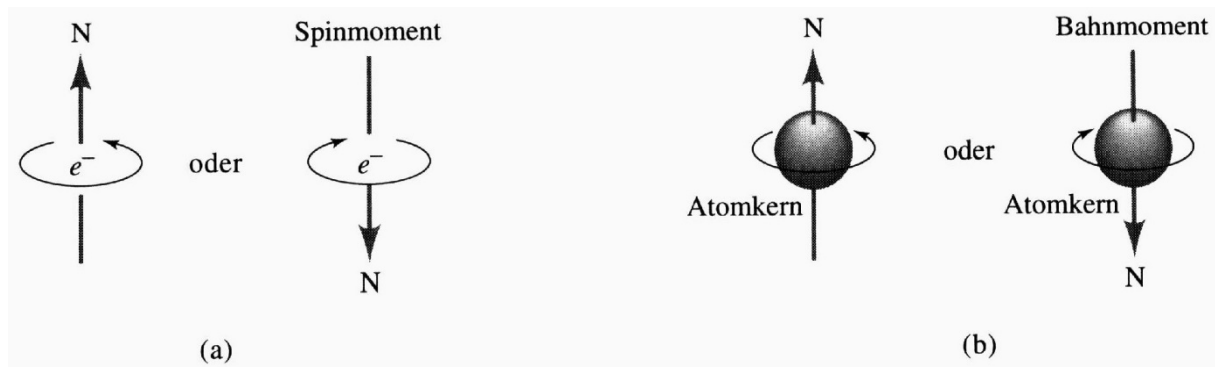


Abb. 7.1 Elementare magnetische Momente (a) Spinmoment (b) Bahnmoment

Jedes von ihnen hat die Größe eines **Bohrschen Magnetons**, der Maßeinheit für die Stärke magnetischer Momente:

$$\text{Bohrsches Magneton} = \frac{qh}{4\pi m_e} = 9,27 \cdot 10^{-24} \text{ Am}^2$$

q = Elementarladung, m_e = Masse des Elektrons, h = Plancksches Wirkungsquantum

Jedes Orbital eines Atoms kann durch höchstens zwei Elektronen mit entgegengesetztem Spin besetzt werden. Da sich die antiparallel gerichteten magnetischen Momente beider Elektronen in ihrer Wirkung aufheben, weist ein voll besetztes Niveau kein resultierendes magnetisches Spinmoment auf.

Tabelle 7.1 Spins der 3d- und 4s- Elektronen von Übergangsmetallen. Die Pfeile bezeichnen die Spinrichtungen.

Metall	3d					4s
Sc	↑					↑↓
Ti	↑	↑				↑↓
V	↑	↑	↑			↑↓
Cr	↑	↑	↑	↑	↑	↑
Mn	↑	↑	↑	↑	↑	↑↓
Fe	↑↓	↑	↑	↑	↑	↑↓
Co	↑↓	↑↓	↑	↑	↑	↑↓
Ni	↑↓	↑↓	↑↓	↑	↑	↑↓
Cu	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑

7.2 Magnetisierung und Permeabilität

Jeder fließende Strom erzeugt ein Magnetfeld.

Die **Magnetische Feldstärke** in einer langen, dünnen Spule beträgt.

$$H = \frac{nI}{l} \quad n = \text{Windungszahl}, \quad l = \text{Spulenlänge}, \quad I = \text{Stromstärke}$$

Damit ergibt sich als Einheit: $[H] = A/m$

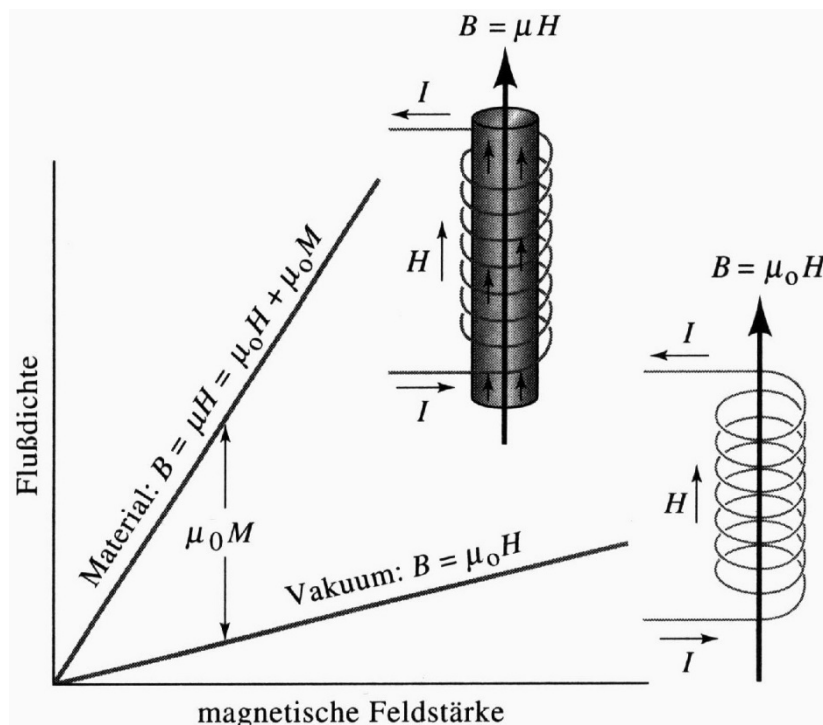


Abb. 7.2 Der Spulenstrom I erzeugt ein Magnetfeld H und die Flußdichte B . Die Flußdichte nimmt zu, wenn das Spuleninnere mit einem magnetischen Material ausgefüllt wird. [4]

Ein Magnetfeld erzeugt einen magnetischen Fluss Φ .

Die **Flussdichte** B , auch **Induktion** genannt, ist im Vakuum der Feldstärke proportional.

$$B = \mu_0 H$$

$$\text{Einheit: } [B] = \text{Tesla} = T = Vs / m^2 = Wb / m^2$$

Mit der magnetischen Feldkonstante $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} Vs / Am$

Für den **magnetischen Fluss** gilt: $\Phi = B \cdot A$ $A = \text{Fläche}$

Einheit: $[\Phi] = \text{Weber} = Wb = Vs$

Befindet sich im Inneren der Spule ein Material, so ändert sich die Flussdichte infolge der Ausrichtung der im Material vorhandenen Dipole auf

$$B = \mu H \quad \mu = \mu_r \mu_0$$

μ ist die **absolute Permeabilität**, μ_r die **relative Permeabilität** des Kernmaterials.

Die durch Material im Spuleninneren hervorgerufene Zunahme der Flussdichte ist gleich der **Magnetisierung** M .

$$B = \mu_0 H + \mu_0 M$$

Ein Maß für die durch das Material entstehende Feldverstärkung ist die **magnetische Suszeptibilität** χ .

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

Es gilt der Zusammenhang:

$$\mu_r = 1 + \chi$$

Von großer technischer Bedeutung sind Magnetwerkstoffe, bei denen $\mu_r \gg 1$ ist. Für diese gilt:

$$B \approx \mu_0 M$$

7.3 Wechselwirkungen zwischen magnetischen Dipolen und Magnetfeld

Festkörper zeigen in Abhängigkeit davon, wie sich ihre Atome im Magnetfeld verhalten, verschiedene Formen des Magnetismus.

Diamagnetismus

In manchen Stoffen sind nur die magnetischen Bahnmomente der Elektronen wirksam. Diese stellen sich gemäß der Lenz'schen Regel entgegen der Richtung eines äußeren Magnetfeldes und erzeugen eine negative Magnetisierung. Typisch $\mu_r = 0,99995$ bzw. $\chi = -0,0005$ z.B. Cu, Ag, Au, Bi und Aluminiumoxid sind bei Zimmertemperatur diamagnetisch. Supraleiter stellen bis zur kritischen Flussdichte ideale Diamagnete dar, d.h. $\mu_r = 0$ bzw. $\chi = -1$.

Paramagnetismus

Die Atome eines Festkörpers, die ungepaarte Elektronen enthalten, verhalten sich wie magnetische Dipole, die in einem ansteigenden Magnetfeld zunehmend Feldrichtung annehmen und dadurch eine positive Magnetisierung erzeugen. Da zwischen den Dipolen keine Wechselwirkungen besteht, lässt sich eine vollständige Ausrichtung nur durch extrem starke Felder erreichen. Ohne äußeres Feld geht die Orientierung wieder verloren. z.B. Al, Ti, Sauerstoff und Kupferlegierungen zeigen paramagnetisches Verhalten. Typisch $1,00 < \mu_r < 1,01$ bzw. $0,00 < \chi < 0,01$

Ferromagnetismus

Ferromagnetismus entsteht bei Fe, Ni und Co durch ungefüllte Niveaus in der 3d-Schale. In ferromagnetischen Stoffen kommt es durch Wechselwirkungen zwischen den magnetischen Dipolen ungepaarter Elektronen bereits in relativ kleinen Feldern zur einheitlichen Ausrichtung aller magnetischen Dipole. μ_r erreicht Werte bis 10^6 .

Antiferromagnetismus

In Stoffen wie Mn, Cr, MnO und NiO stellen sich benachbarte Dipole im Magnetfeld antiparallel zueinander ein. Trotz großer Stärke der individuellen Dipole entsteht keine resultierende Magnetisierung.

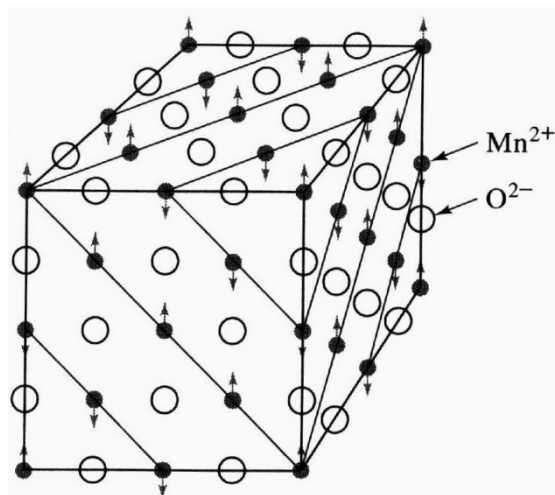


Abb. 7.3 Kristallstruktur von MnO. $\{111\}$ - Ebenen sind im Wechsel mit O- Ionen bzw. Mn- Ionen besetzt. Die magnetischen Momente der Mn- Ionen haben in jeder zweiten Ebene entgegengesetzte Richtung und bewirken dadurch das antiferromagnetische Verhalten von MnO. [4]

Ferrimagnetismus

In manchen keramischen Stoffen besitzen unterschiedliche Ionenarten verschieden starke magnetische Dipole. Im Magnetfeld stellen sich die einen Ionen in Feldrichtung, die anderen Ionen gegen die Feldrichtung. Wegen der unterschiedlichen Dipolstärke ergibt sich als Differenz eine Nettomagnetisierung, die das äußere Feld wesentlich verstärken kann.

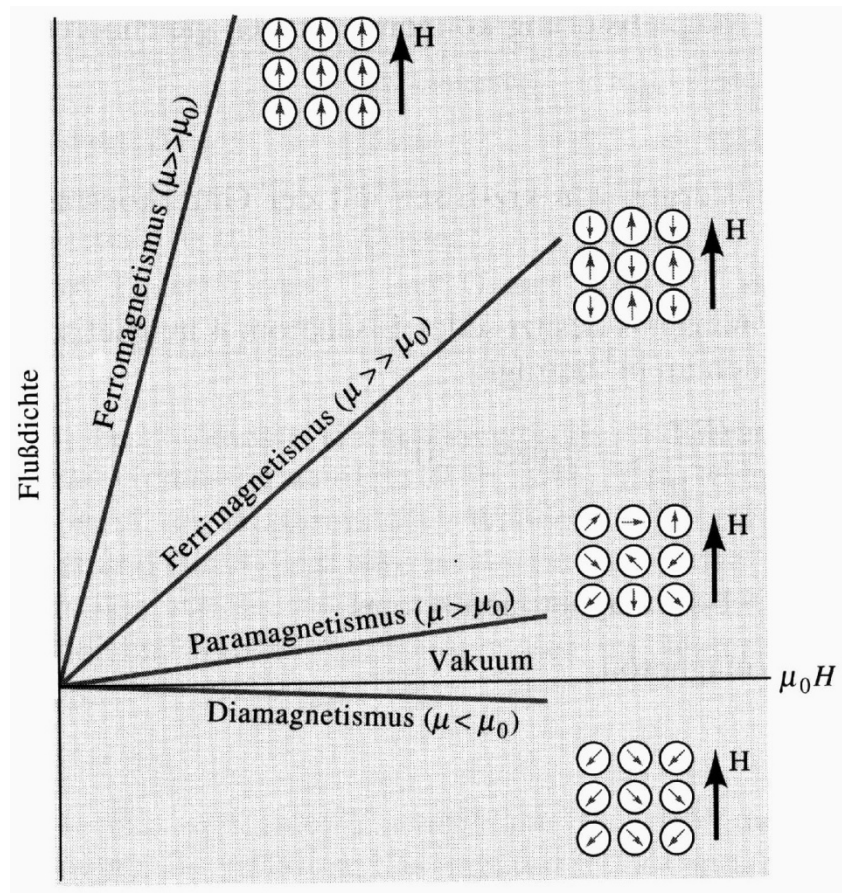


Abb. 7.4 Einfluss des Spulenkernmaterials auf die Flußdichte. Schwächung der Flußdichte in diamagnetischen Stoffen infolge Dipoleinstellung gegen die Feldrichtung. Zunehmende Verstärkung der Flußdichte durch para-, ferri- und ferromagnetische Stoffe. [4]

7.4 Domänenstruktur und Hystereseschleife

Die starke Magnetisierung ferromagnetischer Substanzen beruht auf der Wechselwirkung zwischen magnetischen Dipolen benachbarter Atome. Sie erzeugt im Korngefüge eine Substruktur magnetischer Domänen, die auch ohne äußeres Magnetfeld vorhanden ist.

Domänen, auch *Weißsche Bezirke* genannt, sind Bereiche mit einheitlicher Ausrichtung magnetischer Dipole. Typische Größe $50 \mu\text{m}$.

In einem Material, das sich noch nicht in einem magnetischen Feld befunden hat, ist die Anordnung der Domänen zufällig. Eine Magnetisierung besteht in diesem Zustand nicht.

Domänen sind durch sogenannte *Blochwände* voneinander getrennt. In Ihnen ändert sich die Richtung der Magnetisierung allmählich. Dicke etwa 100 nm .

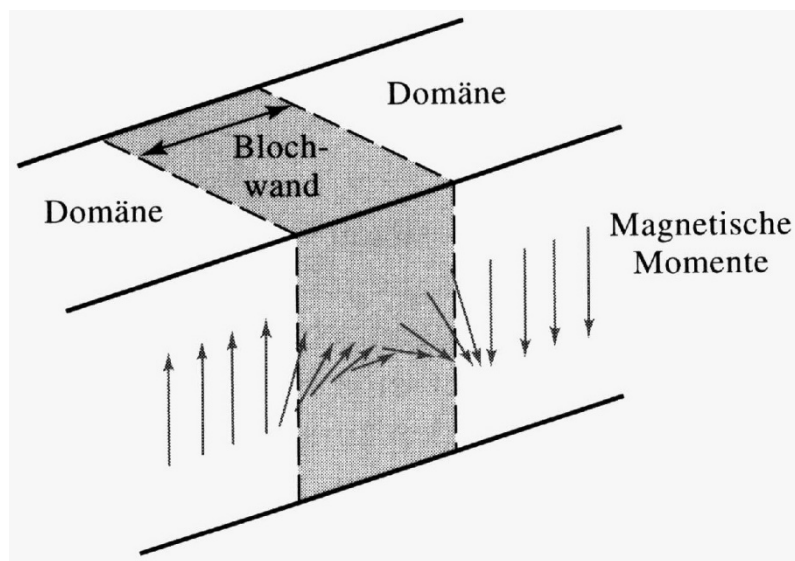


Abb. 7.5 Kontinuierliche Richtungsänderung magnetischer Momente in einer Blochwand

Unter der Wirkung eines ansteigenden äußeren Magnetfeldes beginnen Domänen, deren Orientierung ungefähr mit der Feldrichtung übereinstimmt, auf Kosten der weniger günstig orientierten Domänen durch Verschiebung der Blochwände zu wachsen. Mit zunehmender Magnetisierung können günstig orientierte immer leichter wachsen. Die Permeabilität wird größer und erreicht ein Maximum. Schließlich wird mit Ausrichtung aller Domänen die *Sättigungsmagnetisierung* erreicht.

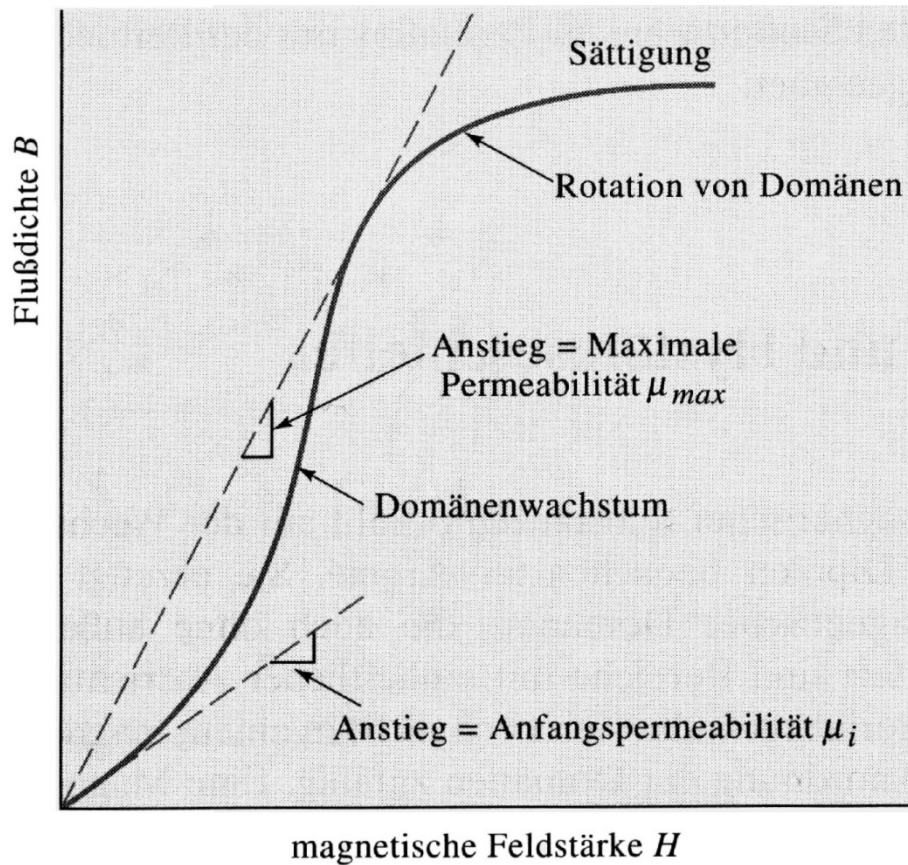


Abb. 7.6 Magnetisierung eines ferromagnetischen Werkstoffes mit steigender Feldstärke.

8.5 Anwendungen der Magnetisierungskurve

Größe und Form der Hystereseschleife geben Auskunft über das Verhalten von Stoffen im Magnetfeld.

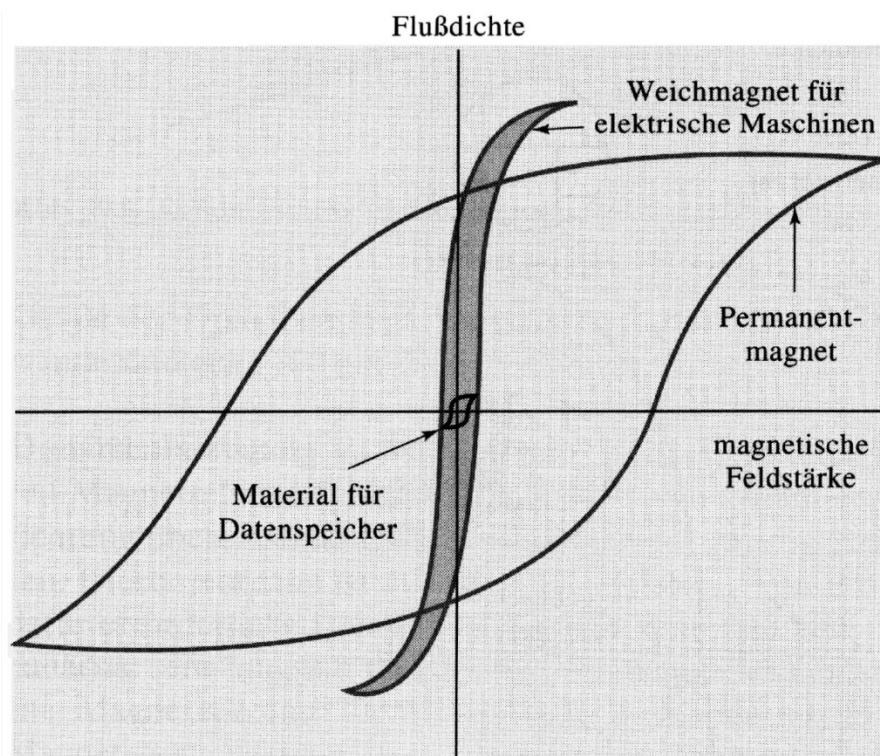


Abb. 7.8 Hystereseschleifen ferromagnetischer Werkstoffe verschiedener Einsatzgebiete.

Magnetwerkstoffe für die Elektrotechnik

Ferromagnetische Materialien werden zur Verstärkung des Magnetfeldes stromdurchflossener Leiter genutzt, um Arbeit zu leisten oder Energie zu übertragen. Da hier Wechselstrom zur Anwendung kommt, durchläuft das Kernmaterial ständig die Hystereseschleife. Für diese Bedingungen sind am besten *weichmagnetische* Stoffe geeignet. Diese weisen folgende Eigenschaften auf:

- Hohe Sättigungsmagnetisierung für hohe Verstärkung der magnetischen Wirkung.
- Große Permeabilität um mit relativ niedrigen Feldstärken in die Sättigung zu gelangen.
- Kleines Koerzitivfeld zeigt an, dass für das Umpolieren geringe Feldstärken ausreichen.
- Kleine Remanenz damit ohne äußeres Feld nur eine geringe Restmagnetisierung bestehen bleibt.

Den oben genannten Eigenschaften entsprechen schmale Hystereseschleifen und geringe Energieverluste im Wechselfeld. Das Durchlaufen der Hystereseschleife führt infolge der Dipolreibung zu Wärmeentwicklung und damit zu Energieverlusten, die mit der Frequenz des Wechselfeldes ansteigen.

- Schnelle Reaktion auf hochfrequente Magnetfelder für Hochfrequenzanwendungen.
- Hoher elektrischer Widerstand zur Verringerung von Wirbelströmen.

Magnetische Speicherwerkstoffe

Dabei wird von der Eigenschaft Gebrauch gemacht, eine aufgeprägte Magnetisierung auch ohne Magnetfeld aufrechterhalten zu können.

Für diesen Einsatz eignen sich Ferrite, die Mangan, Magnesium oder Kobalt enthalten. Sie besitzen eine rechteckige Hystereseschleife sowie kleine Sättigungsmagnetisierung, Remanenz und Koerzitivfeldstärke.

Werkstoffe für Hartmagnete

Materialien zur Herstellung von Permanentmagneten müssen eine hohe Remanenz, Permeabilität und Koerzitivfeldstärke sowie eine große Hystereseschleife und Energiedichte aufweisen.

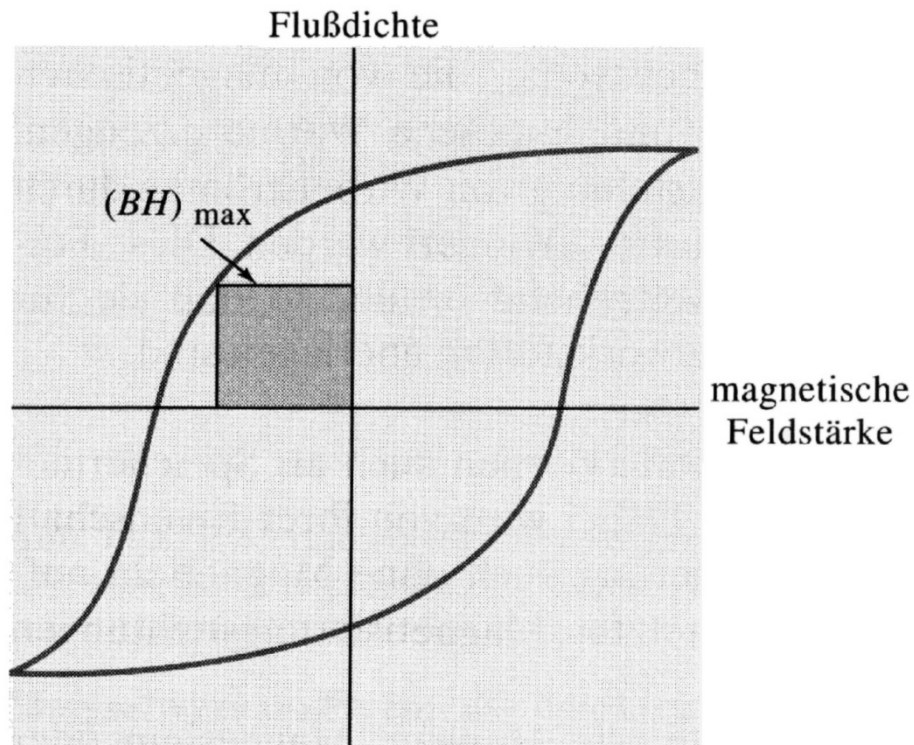


Abb. 7.9 Die größtmögliche Rechteckfläche im zweiten oder vierten Quadranten geben den Kennwert BH_{Max} .

7.6 Curietemperatur

Die Beweglichkeit der magnetischen Dipole eines ferromagnetischen Materials nimmt mit steigender Temperatur zu. Dadurch wird die spontane Magnetisierung innerhalb der Domänen schwächer. Domänen können leichter wachsen, sind aber bei sinkender Feldstärke weniger stabil. Sättigungsmagnetisierung und Koerzitivfeldstärke nehmen ab. Beim Überschreiten der *Curietemperatur* verschwindet der Ferromagnetismus völlig, das Material verhält sich paramagnetisch.

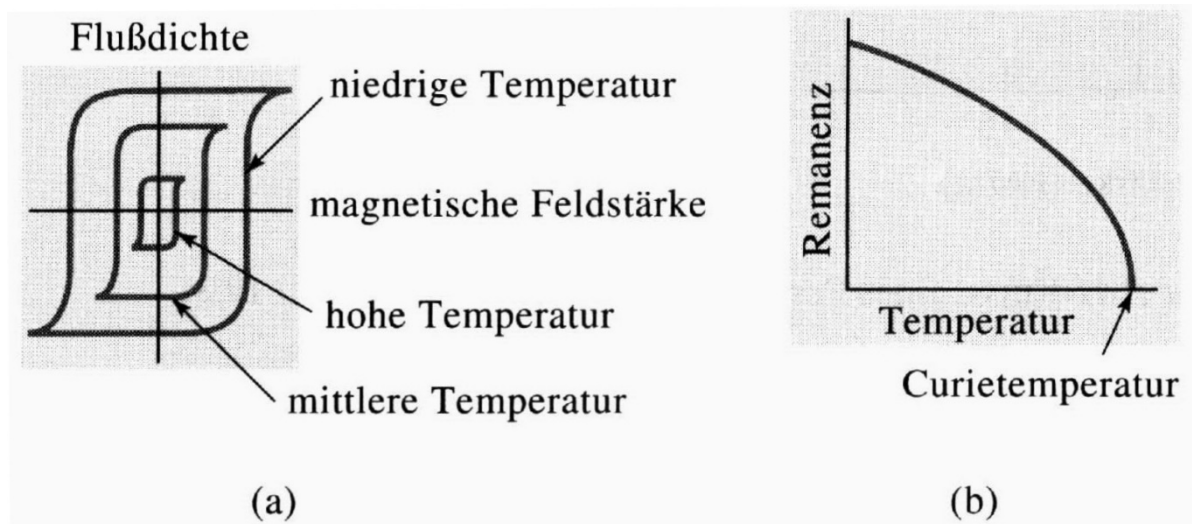


Abb. 7.10 Temperatureinfluss auf (a) Hystereseschleife und (b) Remanenz.

Tabelle 7.2 Curietemperaturen ausgewählter Stoffe

Material	Curietemperatur (°C)
Gadolinium	16
Nd ₂ Fe ₁₂ B	310
Nickel	358
BaO · 6Fe ₂ O ₃	450
Co ₅ Sm	725
Eisen	770
AlNiCo 1	780
CuNiCo	855
Alnico 5	900
Cobalt	1 131

7.7 Magnetwerkstoffe

Magnetische Metalle

In reiner Form werden Eisen, Nickel und Kobalt gewöhnlich nicht als Magnetwerkstoffe verwendet, da ihre gute elektrische Leitfähigkeit und starke Hysterese in Wechselfeldern große Energieverluste verursachen.

Eisen-Nickel Legierungen

Einige Eisen-Nickel Legierungen wie Permalloy eignen sich aufgrund ihrer hohen Permeabilität gut zur Herstellung von Weichmagneten.

Eisen-Silizium

Eisenlegierungen mit 3% - 5% Silizium kommen in Elektromotoren und Generatoren zur Anwendung. Hierbei wird von der magnetischen Anisotropie dieser Werkstoffe Gebrauch gemacht, die sich durch entsprechende Vorbehandlung erzielen lässt. So erzeugt Walzen und anschließende Wärmebehandlung eine Schichttextur mit $\langle 100 \rangle$ Orientierung der Kristallite. Da FeSi in $\langle 100 \rangle$ Richtungen am leichtesten magnetisierbar ist, tritt bereits bei geringen Feldstärken magnetische Sättigung ein.

Verbundmagnete

Im Hochfrequenzbereich kommen Verbundmagnete zur Anwendung, die in eine Polymermatrix eingebettete magnetische Teilchen enthalten. Die Partikel oder Domänen sind leicht auszurichten. Wirbelströme können wegen des hohen elektrischen Widerstandes des Polymers nicht fließen.

Metallische Gläser

Durch extrem schnelles Abkühlen von Metallen aus dem flüssigen Zustand lassen sich amorphe Modifikationen, sogenannte metallische Gläser, herstellen. Dünne Bänder metallischer Gläser ergeben aufeinander gestapelt massive weichmagnetische Blöcke mit sehr großer Permeabilität. Die im magnetischen Material enthaltenen Domänen sind wegen fehlender Korngrenzen gut beweglich, und infolge des hohen elektrischen Widerstandes treten nur geringe Wirbelstromverluste auf.

Komplexe Legierungen für Permanentmagnete

Das Gefüge hochentwickelter Permanentmagnete ist so feinkörnig, dass jeder Kristallit nur eine Domäne enthält. Die Domänen sind deshalb nicht mehr durch Blochwände, sondern durch Korngrenzen voneinander getrennt. Sie können daher ihre Orientierung nur noch durch Rotation ändern. Dies erfordert mehr Energie als Domänenwachstum.

Beispiele hierfür sind gesinterte Co_5Sm Magnete mit großem BH-Produkt.

Ferrimagnetische Keramikwerkstoffe

Ferrite sind gebräuchliche keramische Magnetwerkstoffe mit Spinellstruktur, in der jedes Metallion einen Dipol darstellt. Obwohl die Dipole verschiedener Ionenarten entgegengesetzte Richtungen haben können, ergibt sich wegen ihrer unterschiedlichen Stärke eine resultierende Magnetisierung und das Material verhält sich ferrimagnetisch.