

Der Permanentmagnetismus –

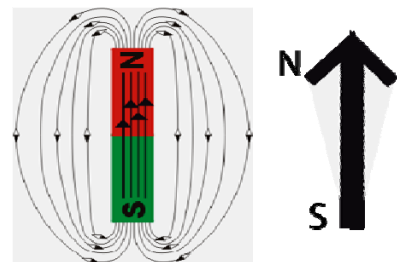
Funktionsweise, Herstellung, Anwendungen und Grenzen

C. Egli, Fach „Grundlagen der Elektrotechnik“, 11.11.2009

Vorbemerkungen: in diesem Script ist mit dem Ausdruck „Magnetismus“ ausschliesslich Ferromagnetismus gemeint. Andere Magnetismusarten wie Dia- und Paramagnetismus werden des Überblicks halber nicht berücksichtigt. Auch die speziellen Gitteranordnungen in Permanentmagneten, Anisotropie und Isotropie, werden bewusst nicht erklärt. Die fett markierten Begriffe sind in beiliegendem Glossar näher erläutert.

Grundprinzipien des Magnetismus

- Ein **Magnetfeld** entsteht immer in der Umgebung bewegter Ladungen. Bei einem Elektromagneten geschieht das durch Strom, der durch einen Stoff geleitet wird. Sobald der Strom abgeschaltet wird, verschwindet das Magnetfeld. Bei einem Permanentmagneten allerdings bleibt die Magnetisierung bestehen. Die Gründe dafür stecken im Aufbau des ferromagnetischen Metalls: Es ist aus atomgrossen Elementarmagneten aufgebaut, die immer einen Nord- und einen Südpol haben. Diese Struktur nennt sich **Dipol**.
- Ein Magnet, so klein er auch sein mag, hat immer gleich viele Nord- und Südpole. Es ist nicht möglich, Magnete mit nur einem Pol herzustellen. Man kann aber Magnete ganz ohne Pole herstellen, indem man sie gleichmässig im Kreis herum magnetisiert (6).
- Durch Konvention wurde festgelegt: Die Feldlinien treten jeweils beim Nordpol aus und beim Südpol wieder in den Magneten ein. Die Feldlinien bilden immer geschlossene Schleifen, haben also weder Anfang noch Ende.
- Entgegengesetzte Pole ziehen sich an, gleiche Pole stossen sich ab. So wird der Nordpol einer Kompassnadel vom magnetischen Südpol der Erde (der sich in der Nähe des geografischen Nordpols befindet) angezogen.
- Ohne äussere Einflüsse vermindert sich die Magnetisierung eines Permanentmagneten praktisch nicht. Er kann aber entmagnetisiert werden durch hohe Temperaturen, starke Schläge oder umgekehrt ausgerichtete starke Magnetfelder (6).



Geschichte der Permanentmagnete

Bis in die 30er-Jahre war das einzige vom Menschen erzeugte Material mit ferromagnetischen Eigenschaften gehärteter Stahl. Daher kommt auch der Begriff „**hartmagnetisch**“. Dieser wies aber eine sehr niedrige **Koerzivität** (siehe Hysteresekurve) auf und musste daher häufig „remagnetisiert“ werden. In den folgenden Jahrzehnten wurden effektivere Magnete entwickelt (siehe Tabelle). Der grösste Sprung gelang 1960-80 mit der Entwicklung von Magneten aus den *Seltenerdmetallen* Samarium (Sm) und Neodym (Nd). Seltenerdmetalle sind die Elemente mit den Ordnungsnummern 57-71 im Periodensystem. Die Gewinnung von reinem Samarium und Neodym ist aufwändig, weshalb die Herstellung von Seltenerd-magneten lange relativ teuer war. Da aber grosse Neodym-Vorkommen erschlossen wurden, sind Neodymmagnete deutlich günstiger als Samariummagnete. Seltenerdmetalle hatten einen sehr grossen Einfluss auf die zunehmende Miniaturisierung in der Elektrotechnik (z.B. bei Sensoren) und in der Motorenindustrie: es wird weniger Material benötigt und das Gewicht der Bauteile nimmt ab (7).

Anforderungen des Marktes an Permanentmagnete

- hohes bleibendes Magnetfeld (Remanenz B_r)
- hohe magnetische Härte (Widerstand gegen Umpolung= Koerzivität H_c)
- Korrosionsbeständigkeit
- mechanische Stabilität
- viele verschiedene Formen
- Temperaturstabilität, hohe Curie-Temperatur T_c
- günstig in der Herstellung (6)

Diese Anforderungen lassen sich in der Realität nicht alle berücksichtigen. So sind temperaturbeständige Magnete aus dem teureren Samarium, Neodymmagnete haben zwar ein hohes Energieprodukt, sind aber korrosionsanfällig... Hier gilt es also, einen guten Kompromiss zu finden, je nach gewünschter Anwendung des Magneten. Hier ein Überblick über einige wichtige Eckdaten von Permanentmagneten (7):

Name	hergestellt seit	Energieprodukt $(BH)_{max}$	Kosten	Vorteile	Nachteile	Verwendungsart
AlNiCo	1930	60 kJ/m ³	eher teuer (Kobalt)	hohe Curie-Temp. (ca. 850Grad), hohe Remanenz, hohe Festigkeit	Brüchigkeit, kleine Koerzivität, fast nur in Stabform	traditionelle Schulungsmagnete, Reed-Schalter
Ferrit	1950	50 kJ/m ³	sehr günstig	nicht korrosionsanfällig, in Umgebungen bis 200 Grad verwendbar, günstig, leicht magnetisierbar	Sprödeheit, vergleichsweise niedriges Energieprodukt	meistverbreitete Magnetart im Alltag
Samarium-Cobalt	1960/70	280kJ/m ³	sehr teuer (Sm selten)	hohe Curie-Temp., korrosionsbeständig	Hohe Kosten	Anwendungen mit grosser Hitze
Neodym gesintert	1980	360-460kJ/m ³	günstig	hohes Energieprodukt, Platz- und Gewichtseinsparungen möglich, vielfältige Formen	Brüchigkeit, tiefe Curie-Temp., korrosionsanfällig, belastungsempfindlich	überall in Industrie, siehe Seite 5

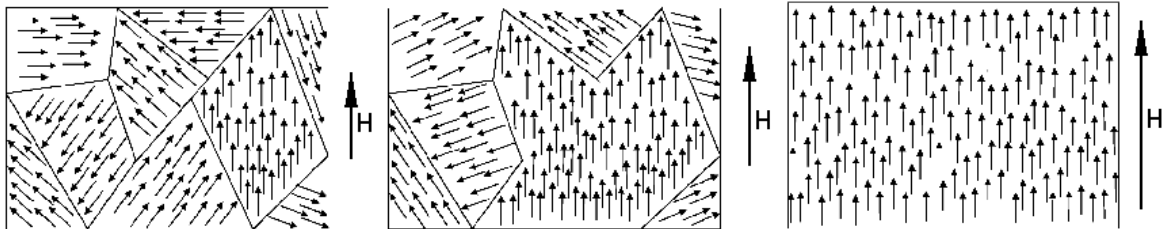
Erstmagnetisierung eines Permanentmagneten

Ein ferromagnetischer Stoff besteht naturgemäss aus unzähligen kleinen **Elementarmagneten**. Mehrere benachbarte Elementarmagnete haben die gleiche magnetische Ausrichtung¹. Zusammen bilden sie einen **Weiss'schen Bezirk** (Domäne) im Stoff. Weil jeder Weiss'sche

¹ der Grund für diese spontane Ausrichtung (ohne äusseres Magnetfeld) ist die so genannte Austauschwechselwirkung zwischen ungepaarten Elektronen in Kristalliten. Die Austauschwechselwirkung wird im Rahmen der Quantenmechanik erklärt.

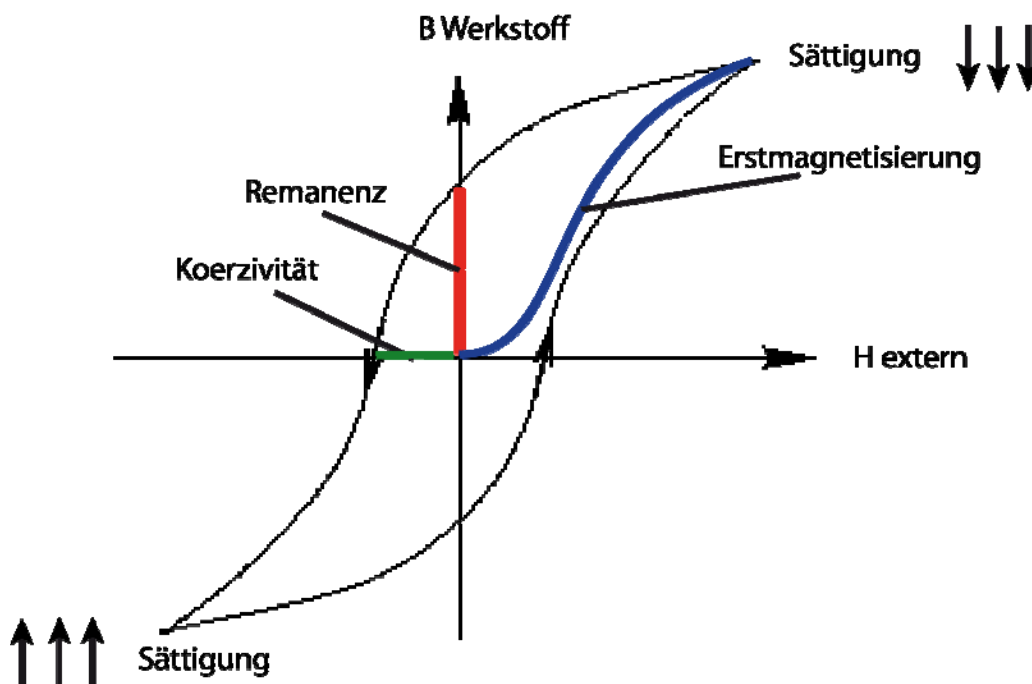
Bezirk in einer anderen Richtung magnetisiert ist, heben sich die verschiedenen kleinen Magnetisierungen gegenseitig auf und der Stoff ist als Ganzes nicht magnetisch. Um aus dem Stoff einen starken Permanentmagneten zu machen, müssen die Domänen gleich ausgerichtet werden. Das geschieht durch das Anlegen eines externen Magnetfeldes. Dabei passiert folgendes:

Die Domänen, die zufälligerweise bereits gleich ausgerichtet waren wie das äussere Magnetfeld, vergrössern sich auf Kosten der anders ausgerichteten Domänen. Gleichzeitig beginnen sich auch die Elementarmagnete in den anderen Domänen dem äusseren Magnetfeld entsprechend auszurichten. Die Magnetisierung des Stoffes nimmt dadurch insgesamt zu (heisst: ein internes B-Feld entsteht). Dieser Vorgang ist sehr energieaufwändig, weshalb dazu ein starkes äusseres Magnetfeld nötig ist. Nachdem das äussere Magnetfeld abgeschaltet ist, können die Domänenwände nicht mehr aus eigener Kraft vollständig zurückwandern. Dies, weil die Domänen von Fremdkörpern im Magnet festgehalten werden (**Domain wall pinning**). Die Überwindung dieses Effektes benötigt viel Energie. Die Magnetisierung bleibt also bestehen. Überschreitet das von aussen angelegte Magnetfeld eine gewisse Stärke, verschwinden die "falsch magnetisierten" Domänen schliesslich ganz. Die Elementarmagnete sind somit alle gleich ausgerichtet. Diesen Zustand nennt man **magnetische Sättigung**. Der soeben beschriebene Vorgang lässt sich als Kurve in einem H-B-Diagramm darstellen. Man nennt diese Kurve die **Hysteresekurve** (3,4,5,6).



Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/Weiss-Bezirk>

Erklärungen zur Hysteresekurve (S.4)



Für die Magnetisierung ist für uns nur der erste Quadrant des Koordinatensystems wichtig. Die X-Achse zeigt das extern angelegte H-Feld (H_{extern}), die Y-Achse das resultierende B-Feld im ferromagnetischen Stoff ($B_{\text{Werkstoff}}$). Die Magnetisierung und damit das B-Feld im Stoff steigt mit zunehmendem H_{extern} an, allerdings nicht proportional. Die Form der Erstmagnetisierungskurve entspricht der **Permeabilität** μ , also die Durchlässigkeit des Stoffes für die Flussdichte B. Die Permeabilität ändert sich im Laufe des Magnetisierungsprozesses: zuerst ist die Kurve sehr steil, in Richtung der Sättigung wird sie flacher. Wenn alle Elementarmagnete im Stoff gleich ausgerichtet sind, kann die Magnetisierung trotz weiterer Vergrößerung des H-Feldes nicht weiter wachsen.

De facto kann aber kein Werkstoff die Magnetisierung vollkommen behalten; die Magnetisierung nimmt nach dem Abschalten des externen Magnetfeldes wieder ab. Bei einem weichmagnetischen Stoff sinkt die Magnetisierung sogar wieder annähernd auf null. Bei einem hartmagnetischen Stoff aber wird ein grosser Teil der Magnetisierung beibehalten. Diesen Effekt nennt man **Remanenz** oder Restmagnetisierung. Der Stoff ist aber nicht nur mehr oder weniger magnetisiert, sondern auch unterschiedlich widerstandsfähig gegenüber Entmagnetisierungsversuchen: Die Elementarmagnete eines Hartmagneten richten sich zwar nach einem anderen Magneten aus, schnellen dann aber wieder an ihre ursprüngliche Position zurück, sobald der Magnet wieder entfernt wird. Das nennt man **Koerzivität**. **Permanentmagnete** sind Hartmagnete, haben also eine hohe Koerzivität (3,4,5,6).

Formeln, Berechnungen

Magnetische Energie $W_m = \frac{1}{2} B H V$, maximales Energieprodukt $(BH)_{\text{max}} = \frac{1}{2} B H$

1) Gesucht: W_m eines Würfelmagneten aus Neodym,

Kantenlänge = 10mm, $(BH)_{\text{max}} = 325 \text{kJ/m}^3$

$W_m = 325'000 \text{J/m}^3 \times (0.01 \text{m})^3 = 0.325 \text{ J}$ Dies entspricht einer Haftkraft von ungefähr 3.5 kg.

2) Gesucht: W_m eines Riesenquaders („TODESMAGNET) aus Neodym,

Kantenlängen = 50x50x25 mm, $(BH)_{\text{max}} = 310 \text{kJ/m}^3$

$W_m = 310'000 \text{ J/m}^3 \times (0.05 \times 0.05 \times 0.025 \text{m})^3 = 19.375 \text{ J}$

Dies entspricht einer Haftkraft von ungefähr 100 kg!

Herstellungsprozess am Beispiel von gesinterten Neodym-Magneten

- 1) chemische Grundsubstanz (Legierung, hier aus Eisen, Neodym und Bor) herstellen
- 2) mahlen → kleine Körner/Kristalliten
- 3) ausrichten an einem Magnetfeld, in Form pressen
- 4) sintern: starkes Erhitzen, bis die bis anhin losen Körner aneinander haften (nicht aber schmelzen!) → Grund für Sprödigkeit von Neodymmagneten
- 5) bearbeiten, beschichten
- 6) **magnetisieren** durch externes Magnetfeld (siehe Hysteresekurve) (6)

Möglichkeiten und Grenzen zukünftiger Entwicklungen

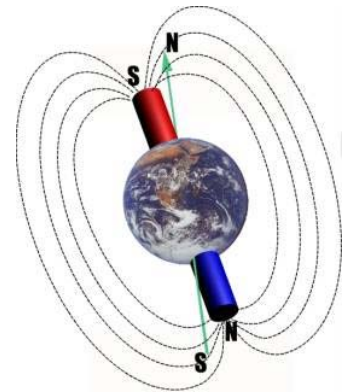
Heutige Seltenerd-magnete haben bereits ein sehr hohes maximales **Energieprodukt**. Die Industrie wird aber zweifellos in Zukunft noch stärkere Magnete verlangen. Die Stärke eines Magneten ist abhängig von Fremdkörpern (Kohlenstoff etc.) im Metall und Form, Grösse und Ausrichtung der Kristalliten, aus denen der Magnet besteht, sowie weiteren Faktoren, deren Erläuterung den Rahmen dieser Arbeit aber sprengen würde (6).

Bei der Herstellung stösst man nun an physikalische Grenzen: ein Magnet kann nur aus einer begrenzten Anzahl Elementarmagneten bestehen. Da die Sättigung als der Punkt definiert ist, an dem alle Elementarmagnete gleich ausgerichtet sind, kann auch ein stärkeres externes Magnetfeld keinen zusätzlichen Effekt auf den Stoff haben. Eine Möglichkeit zur weiteren Optimierung wäre also eine weitere Verdichtung des ferromagnetischen Materials: es wären dann mehr Elementarmagnete pro Volumen vorhanden, die man ausrichten könn-

te. Eine andere Möglichkeit wäre, die Remanenz eines Magneten durch spezielle Legierungen noch weiter zu erhöhen.

Magnetanwendungen in Wissenschaft und Praxis

Ein natürlich auftretender Magnet ist das **Erdmagnetfeld**. Dieses Magnetfeld hat am Äquator eine Stärke von lediglich 30 Mikrottesla, an den Polen selbst beträgt es etwa 60 Mikrottesla. (4) Der magnetische Nord- und der Südpol der Erde sind aber nicht gleichbedeutend mit dem geografischen Nord- und Südpol: Ein magnetischer Pol der Erde befindet sich zwar in der Nähe des geographischen Nordpols, dies ist jedoch der magnetische Südpol der Erdkugel. So zeigt der Nordpol der Kompassnadel nach Norden, weil sich dort der magnetische Südpol der Erde befindet, welcher in der Nähe des geographischen Nordpols liegt. Die Magnetpole der Erde wandern und haben im Laufe der Erdgeschichte schon mehrfach die Plätze gewechselt.



Quelle: www.fosar-bludorf.com/polwechsel/

Bei einer **Magnetresonanztomografie** (MRI) nimmt sich die Medizin den Elektromagnetismus zu Hilfe. Der Körper besteht zu einem grossen Teil aus Wasserstoffatomen, die auf ein angelegtes externes Magnetfeld reagieren. In der Röhre werden elektromagnetische Wechselfelder mit unterschiedlicher Frequenz erzeugt. Dabei werden die Wasserstoffatome abwechselnd ausgelenkt und in die ursprüngliche Ausrichtung zurückgelassen. Dies generiert kleinste Mengen von Energie, die von Detektionsspulen aufgezeichnet werden. Mit einem Computer können dann z.B. Gewebe von unterschiedlicher Dichte unterschieden werden. Bei einem MRI können heute Magnetfelder in der Stärke von 3 bis maximal 10 Tesla erzeugt werden (4).

Das stärkste bisher bekannte Magnetfeld eines Permanentmagneten wurde 2002 im **CERN** gemessen. Es betrug 5 Tesla. (1) Der Large Hadron Collider des CERN kann für die Untersuchungen der Materie ein Magnetfeld von insgesamt 4 Tesla erzeugen. Beim LHC wurden dazu 9300 Permanentmagnete in verschiedensten Grössen eingebaut. (2)

Die häufigsten Anwendungen von Permanentmagneten in der Industrie sind Computerbestandteile (wie Festplatten und CD-ROM-Laufwerke), (Auto-)Motoren und Generatoren (6,7). Gerade im Bereich der Alternativenenergien sind starke Permanentmagnete sehr interessant: Ihr Einsatz ermöglicht Miniaturisierung und Werkstoffeinsparungen und erhöht damit den Wirkungsgrad der Stromerzeugung (weniger mechanische Energie wird benötigt, um gleich viel elektrische Energie zu erzeugen).

Quellen:

- (1) <http://cerncourier.com/cws/article/cern/28598>
- (2) <http://public.web.cern.ch/public/en/LHC/Facts-en.html>
- (3) <http://www.mechatronikernetz.de>
- (4) <http://www.de.wikipedia.org> (diverse Artikel)
- (5) http://www.supermagnete.ch/magnetism_terms.php
- (6) Foliensatz und Auskünfte R. B., Physiklehrer
- (7) Bundesamt für Energie (2006): Wirtschaftlichkeit, Anwendungen und Grenzen von effizienten Permanent-Magnet-Motoren