
Grundlagen des Magnetismus (2)

Im diesem zweiten und letzten Beitragteil geht es um weitere Grundlagen des Dauermagnetismus.

Die im ersten Teil des Beitrags angesprochenen Elementarmagnete, bei denen es sich um ganze Kristallbereiche handelt, sind in allen ferromagnetischen Stoffen vorhanden. Zu den ferromagnetischen Stoffen gehören Eisen, Nickel, Kobalt, Legierungen dieser Stoffe sowie Legierungen dieser Elemente mit anderen Stoffen. In einem nichtmagnetisierten ferromagnetischen Werkstoff sind diese Elementarmagnete völlig ungeordnet, so dass sich ihre Magnetfelder gegenseitig aufheben (**Bild 8**).

In einem Magnetfeld, d.h. durch Magnetisierung, richten sich die

Prof. Dr.-Ing. H. Biechl
Werner-von-Siemens-Labor
für Elektrische Antriebe
und Mechatronik
Hochschule Kempten

Elementarmagnete wie Magnetnadeln mehr oder weniger vollständig aus, so dass sie gemeinsam eine verstärkte magnetische Wirkung ausüben. Dabei darf man sich nicht vorstellen, dass es zu mechanischen Bewegungen der Elementarmagnete kommt. Damit würde ja die Festigkeit des Werkstoffes verloren gehen, was erfahrungsgemäß nicht der Fall ist. Man muss sich das Ausrichten der Elementar-

magnete durch eine Veränderung der magnetischen Verhältnisse innerhalb der Elementarmagnete vorstellen.

Elementarmagnete können nur bei bestimmten Kristallstrukturen auftreten. Aus diesem Grund gibt es bei flüssigen oder gasförmigen Stoffen keinen Ferromagnetismus. Weshalb nun Elementarmagnete überhaupt vorhanden sind, lässt sich nur atomphysikalisch erklären. Wissenschaftler sind heute der Meinung, dass der Aufbau der Atome und die Eigenrotation der Elektronen, der so genannte Elektronenspin, für die magnetische Wirkung verantwortlich sind, da letztlich Magnetfelder nur durch bewegte Ladungen verursacht werden können. Bei Ferromagnetismus sind die Spins der Elektronen im Bereich dieser Elementarmagnete alle gleichgerichtet. Diese Elementarmagnete bezeichnet man auch als Weissche Bezirke, benannt nach dem französischen Physiker Pierre Weiss. Weiss wurde am 25.3.1865 in Mühlhausen geboren und starb am 24.10.1940 in Lyon. Auf ihn geht die Theorie des Ferromagnetismus zurück.

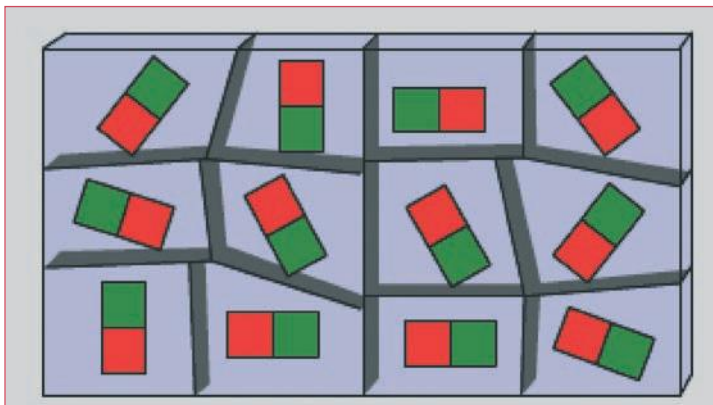


Bild 8: Unregelmäßige Lage der Elementarmagnete in einem Eisenstab (unterteilt in Weissche Bezirke)

Durch den äußeren Einfluss eines Magnetfeldes richten sich die Elementarmagnete aus und verbleiben mehr oder weniger in dieser Stellung. Somit entsteht eine das Magnetfeld verstärkende Wirkung. Je mehr die ausgerichteten Elementarmagnete in ihrer Stellung verharren, desto stärker ist der Dauermagnet. Wenn alle Elementarmagnete vollständig ausgerichtet sind, spricht man von magnetischer Sättigung. Eine weitere Steigerung der magnetischen Eigenschaft ist dann nicht mehr möglich (**Bild 9**).

Formen des Magnetismus

In Festkörpern unterscheidet man meist fünf Typen von Magnetismus:

Ferromagnetismus

Beim Ferromagnetismus sind die magnetischen Momente einzelner Teilchen nicht unabhängig voneinander, sondern richten sich spontan parallel aus. Die Kopplung der magnetischen Momente erstreckt sich aber nicht über das ganze Material sondern ist auf kleine Bereiche, die Weissche Bezirke beschränkt. Typische Längenskalen sind 10 Nanometer bis wenige Mikrometer.

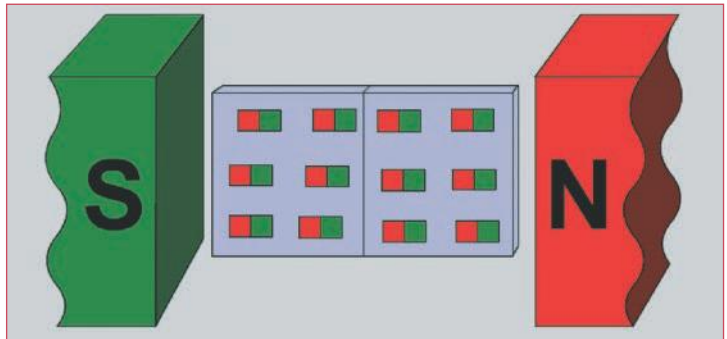


Bild 9: Ausrichtung der Elementarmagnete durch den Einfluss eines äußeren Magnetfeldes

Die Ausrichtung der Weisschen Bezirke ist statistisch verteilt, so dass der Gesamtkörper unmagnetisch erscheint. Durch ein äußeres Magnetfeld kann man die Bezirke gleichmäßig ausrichten. Geht das äußere Magnetfeld zurück, so nimmt die Flussdichte B wieder ab. Diese Ausrichtung bleibt auch nach Entfernen des äußeren Feldes erhalten, so dass man eine permanente Magnetisierung (Remanenz) erhält. Die notwendige Feldstärke zum Abbau der Remanenz ist die so genannte Koerzitivfeldstärke. Ein Umkehren der Feldstärke von H , z. B. durch Stromrichtungsänderung während der negativen Halbwelle des Wechselstromes, führt dazu, dass der das Material zunächst ent- und dann unmagnetisiert wird.

Die Hysteresekurve (**Bild 10**) beschreibt das Auf-, Ent- und Ummagnetisieren in grafischer Art und Weise. Der Flächeninhalt der Kurve ist ein Maß für die Ummagnetisierungsarbeit pro Volumen.

Paramagnetismus

Besitzen die Atome, Ionen oder Moleküle eines Materials ein magnetisches Moment, so richten sich diese parallel zum äußeren Magnetfeld aus. Dies bewirkt eine Verstärkung des Magnetfeldes im Material. Bei einem idealen Paramagneten sind die einzelnen magnetischen Momente voneinander isoliert. Darum bricht das innere Magnetfeld nach Entfernen des äußeren Magnetfeldes wegen der Wärmebewegung der Teilchen

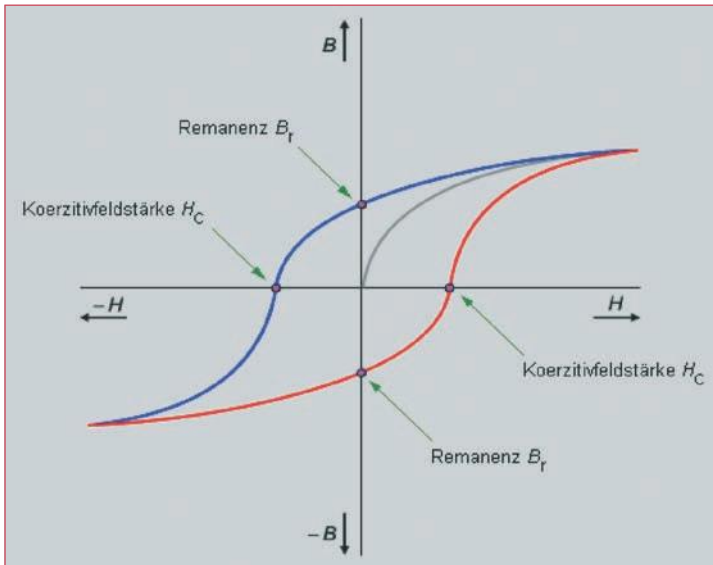


Bild 10: Hysteresekurve eines ferromagnetischen Materials. Remanenz = Restmagnetismus, Koerzitivfeldstärke = Feldstärke zum Abbau der Remanenz

zusammen. Demzufolge nimmt der Paramagnetismus mit steigender Temperatur ab.

Diamagnetismus

Bringt man eine Substanz in ein magnetisches Feld, so induziert dieses in den Elektronenhüllen der Atome einen Strom, dessen Magnetfeld nach der Lenzschen Regel dem äußeren entgegengerichtet ist. Diamagnetismus

führt so zu einer Abschwächung des Magnetfeldes in der Substanz. In Materialien deren Atome, Ionen oder Moleküle keine ungepaarten Elektronen besitzen, ist Diamagnetismus die einzige Form von Magnetismus.

Ferrimagnetismus

Auch beim Ferrimagnetismus sind die magnetischen Momente einzelner Teilchen nicht unab-

hängig voneinander. Es liegen aber zwei Arten von magnetischen Zentren vor. Die Spinmomente gleichartiger Zentren richten sich dabei parallel und die verschiedener antiparallel aus. Dieses führt zu einer partiellen Auslöschung der magnetischen Momente. Im übrigen Verhalten ähneln sie den Ferromagneten.

Antiferromagnetismus

Auch beim Antiferromagnetismus sind die magnetischen Momente einzelner Teilchen nicht unabhängig voneinander sondern richten sich spontan antiparallel aus. Daher zeigt der ideale Antiferromagnet nach außen kein magnetisches Verhalten. Mit steigender Temperatur stört die Wärmebewegung die Anordnung, so dass sich der Antiferromagnet zunehmend wie ein Ferrimagnet verhält

Weichmagnetisch und hartmagnetisch

Ein relativ simples Experiment zeigt den Unterschied zwischen weich- und hartmagnetisch.

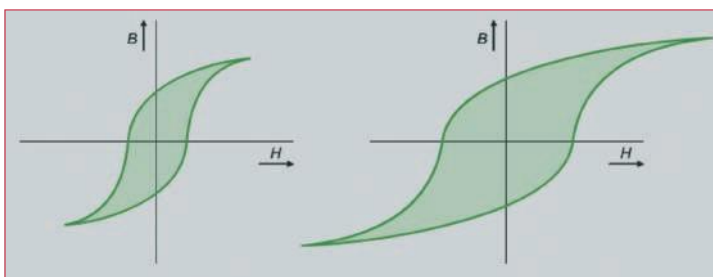


Bild 11: Weichmag. Material für Ständerbleche von elektrischen Maschinen (links). Hartmag. Material z. B. für Synchronmaschinen, Sensoren od. Hysteresekupplungen (rechts)

1. Bringt man ein Werkstück aus einem weichmagnetischen Stahl (Werkstück 1) in die Nähe eines Dauermagneten, wird dieses Werkstück magnetisiert und somit angezogen. Es ist dann seinerseits imstande, einen leichten Gegenstand aus Stahl anzuziehen. Entfernt man den Stabmagneten, so fällt der leichte Gegenstand ab (weichmagnetisch).

2. Verwendet man hingegen ein hartmagnetisches Material (Werkstück 2), aus Stahl einer anderen Legierung, kann es passieren, dass der leichte Gegenstand auch nach dem Entfernen des Stabmagneten haften bleibt, d. h. nicht abfällt (hartmagnetisch).

Erkenntnis aus dem Experiment

1. Beide Werkstücke sind offensichtlich durch den Dauermagneten magnetisiert worden.
2. Das Werkstück 1 war aber nur vorübergehend magnetisch. Diese nicht beständige Form des Magnetismus heißt flüchtiger Magnetismus.
3. Meist bleibt ein geringer Rest zurück, den man als Restmagnetismus oder remanenten Magnetismus bezeichnet.
4. Das Werkstück 2 behält seinen Magnetismus. Diese beständige Form des Magnetismus nennt man Dauermagnetismus oder permanenten Magnetismus.
5. Stahl mit geringem Restmagnetismus heißt »magnetisch weich« oder »weichmagnetisch«. Stahl mit permanentem Magnetismus wird als »magnetisch hart« oder »hartmagnetisch« bezeichnet (**Bild 11**).

Magnetwerkstoffe

Zur Herstellung von Dauermagneten verwendet man heute Metalllegierungen und Metalloxidmischungen. AlNi- und

AlNiCo-Legierungen sind Legierungen von Aluminium und Nickel bzw. Aluminium, Nickel und Kobalt. Sie werden meist mit ihrem Handelsnamen bezeichnet, z. B. Oerstit, Permanit, Koerzit. Weiterhin gibt es Ferrit-Magnetwerkstoffe, welche die Handelsnamen Oxit, Koerox, Ferroxdure usw. tragen. Sie bestehen aus Eisenoxid (Fe_2O_3) verbunden mit Barium- oder Strontiumoxid. Die pulverförmigen Oxide werden gepresst und wie keramische Massen unter Wärmeeinwirkung gesintert. Eine magnetische Vorzugsrichtung bekommt der Werkstoff, wenn er während des Sinterns einem Magnetfeld ausgesetzt ist.

Diese Richtungsabhängigkeit der magnetischen Eigenschaft bezeichnet man als Anisotropie. Danach lassen sich diese Magnete durch Scheiden, Erodieren oder Schleifen endbearbeiten.

Je nach Anwendung benötigt man hart- oder weichmagnetische Werkstoffe. Für viele Zwecke sind Dauermagnete erforderlich. Für andere Aufga-

ben (Hubmagnete, magnetische Spannvorrichtungen, Relais, bestimmte elektrische Maschinen) soll der Magnetismus jedoch nur so lange auftreten, wie elektrischer Strom fließt. Diese sowie andere Eigenschaften werden durch bestimmte Größen und Kennlinien beschrieben, wie remanente Flussdichte, Koerzitivfeldstärke, Sättigungsflussdichte, Ummagnetisierungsverluste bzw. Hysteresekurve.

Als weichmagnetische Werkstoffe kommen z. B. unlegierte Stähle in Frage. Weiterhin verwendet man Eisen-Nickel-Legierungen. Sie sind unter den Handelsnamen Hyperm, Permalloy, Mu-Metall usw. bekannt. Sie enthalten neben Eisen bis zu 80 % Nickel, zusätzlich Chrom, Mangan, Kupfer, Molybdän und Silizium. Für elektrische Maschinen, Transformatoren, Drosseln und Wandler verwendet man siliziumlegierte Bleche, sog. Elektrobleche. Neben Eisen und Kohlenstoff enthalten sie bis zu 4,2 % Silizium, was die spezifische Leitfähigkeit vermindert und dadurch die Wir-

belstromverluste reduziert. Kaltgewalzte, kornorientierte Bleche (Texturbleche) lassen sich in Walzrichtung besonders leicht magnetisieren und ummagnetisieren, da eine magnetische Vorzugsrichtung existiert. Diese Bleche werden im Großtransformatorbau verwendet.

Zuletzt sei noch auf weichmagnetische Ferrite hingewiesen. Es handelt sich dabei um keramische Werkstoffe, die sich aus Eisenoxid und Oxiden von Mangan, Zink, Nickel und anderen Stoffen zusammensetzen. Die Handelsnamen lauten Siffe-

rit, Ferroxcube usw. Sie werden durch Sintern zu Formteilen verarbeitet. Diese Ferrite haben einen sehr hohen spezifischen Widerstand, so dass Wirbelstromverluste sehr gering ausfallen. Man verwendet sie hauptsächlich für Bauteile der Hochfrequenz- und Nachrichtentechnik (z.B. Übertrager).

Die Curie-Temperatur

Ein in der Lehre über den Magnetismus bedeutsamer Effekt ist der Sachverhalt, dass die parallele Ausrichtung der Elementarmagnete mit zunehmender Tem-

peratur verloren geht, bis sie oberhalb der sog. ferromagnetischen Curie-Temperatur völlig verschwindet. Oberhalb dieser Curie-Temperatur, die für verschiedene Stoffe unterschiedlich ist, existiert kein Ferromagnetismus mehr. Die Curie-Temperatur einiger typischer Magnetwerkstoffe ist:

Eisen 769°C

Nickel 330°C

Cobalt 1127°C

Ferrite 100 ... 460°C (je nach Werkstoffzusammensetzung)

Ferritkerne zeigen beispielsweise etwas unterhalb der recht niedrigen Curie-Temperaturen eine starke Änderung der Permeabilitätszahl μ . Sie steigt zunächst an und fällt bei weiter steigender Temperatur steil ab. Diese kritischen Temperaturen dürfen im Betrieb nicht erreicht werden. Oft besitzen jedoch die Kernverluste im Bereich um 100°C ein Minimum, sodass eine weitere Erwärmung im Betrieb begrenzt werden sollte.

Die Magnetostriktion

Ein anderer Effekt, der hier erwähnt werden soll, ist die sog. Magnetostriktion. Dabei handelt es sich um eine elastische Längenänderung bei ferromagnetischen Stoffen im magnetischen Feld. Die Maximalwerte der Längenänderung Δ/l liegen im Allgemeinen zwischen $-3 \cdot 10^{-5}$ und $+5 \cdot 10^{-5}$. Magnetostriktive Materialien dienen zur Erzeugung von Ultraschall.

Pierre Curie (* 15. Mai 1859 in Paris; † 19. April 1906 in Paris) war ein französischer Physiker und Nobelpreisträger. Pierre Curie wurde in Paris geboren, durch Privatlehrer unterrichtet und legte bereits mit 16 Jahren das Abitur ab. Mit 19 Jahren erwarb er einen Universitätsabschluss in Physik. Er schloss 1895 seine Promotion ab und wurde zum Professor ernannt. Am 26. Juli 1895 heiratete er die polnische Physikerin Maria Skłodowska. In seinen frühen Studien über die Kristallographie, die er mit seinem älteren Bruder Jacques durchführte, entdeckte er 1880 die Piezoelektrizität. Weitere Arbeiten zur Symmetrie richteten seine Aufmerksamkeit auf das Gebiet des Magnetismus und der Entdeckungen der nach ihm benannten Curie-Temperatur, Curie-Gesetz und Curie-Kon-



stante. Zusammen mit seiner Frau Marie entdeckte er 1898 das Radium und das Polonium als Spaltprodukte der Pechblende. Im Jahre 1903 erhielt er gemeinsam mit seiner Frau Marie Curie und Henri Becquerel den Nobelpreis für Physik. Pierre Curie starb bei einem Verkehrsunfall, als er unter eine Droschke geriet und dabei einen Schädelbruch erlitt.