A. Grundbegriffe des Permanentmagnetismus

Magnetische Materialien kann man sich aus einzelnen magnetischen Momenten aufgebaut denken, die die Quelle der magnetischen Felder darstellen. Das magnetische Moment ist eine Vektor-Größe. Summiert man alle magnetischen Momente auf und teilt durch das Materialvolumen, so erhält man die sog. Magnetisierung. Das magnetische Moment kann in Analogie zur elektrischen Ladung der Elektrizitätslehre gesehen werden; die Magnetisierung entspricht in diesem Fall der elektrischen Ladungsdichte. Somit haben wir als elementare Träger des Magnetismus:

$\vec{m}$ magnetisches Moment [Am^2]

$$\vec{M} = \frac{d\vec{m}}{dV} \quad \text{Magnetisierung [A/m]} \tag{A.1}$$

Statt des Magnetisierungs-Vektors wird in der technischen Literatur oft die sog. magnetische Polarisation **J** verwendet, welche sich von **M** durch die Permabilitäts-Konstante μ_0 unterscheidet:

$$\vec{J} = \mu_0 \cdot \vec{M} \quad [T] \quad \text{mit} \quad \mu_0 = 1.257 \cdot 10^{-6}\,\text{Vs/Am} \tag{A.2}$$

Die aus der Magnetisierung resultierenden Felder können unterteilt werden in:

$\vec{B}$ magnetische Flußdichte [T]

und

$\vec{H}$ magnetische Feldstärke [A/m]

Die Beschreibung der Felder und der resultierenden Phänomene wie Kräfte, Drehmomente, Energien etc. erfolgt durch die **Maxwell-Gleichungen:**

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad \text{(magnetische Flußerhaltung)} \tag{A.3}$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad \text{(Amperesches Gesetz)} \tag{A.4}$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad \text{(Faradays Gesetz)} \tag{A.5}$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho \quad \text{(Coulombsches Gesetz)} \tag{A.6}$$

j ist die Stromdichte [A/m^2] und **E** beschreibt die elektrische Feldstärke [V/m]. Die elektrische Flußdichte **D** hat die Einheit [As/m^2]. ρ beschreibt die elektrische Ladungsdichte [As/m^3].Wie sind magnetischen Momente oder die Magnetisierung in den Maxwell-Gleichungen enthalten ? Dies erfolgt durch die sog. **Konstitutionsrelation**, welche den Zusammenhang zwischen den in den Maxwellgleichungen beinhalteten Feldern **B** und **H** und der Magnetisierung **M** liefert:

$$\vec{B} = \mu_0 \cdot \vec{H} + \mu_0 \cdot \vec{M} \tag{A.7}$$

Verwendet man J anstatt M so erhält man stattdessen:

$$\vec{B} = \mu_0 \cdot \vec{H} + \vec{J} \tag{A.8}$$

Das Verhalten von **M**, insbesondere dessen Abhängigkeit von **H**, ergibt die Einteilung des Magnetismus in dessen Basis-Klassen: Diese **H**-Abhängigkeit wird durch die sogenannte Suszeptibilität χ beschrieben, die eine einheitenlose Größe darstellt:

$$\vec{M} = \chi(H) \cdot \vec{H} \tag{A.9}$$

Definieren wir die relative Permeabilität durch:

$$\mu = \chi + 1 \tag{A.10}$$

so erhalten wir aus den Gleichungen. (A.2), (A.8) und (A.9):

$$\vec{B} = \mu_0 \cdot \mu \cdot \vec{H} \tag{A.11}$$

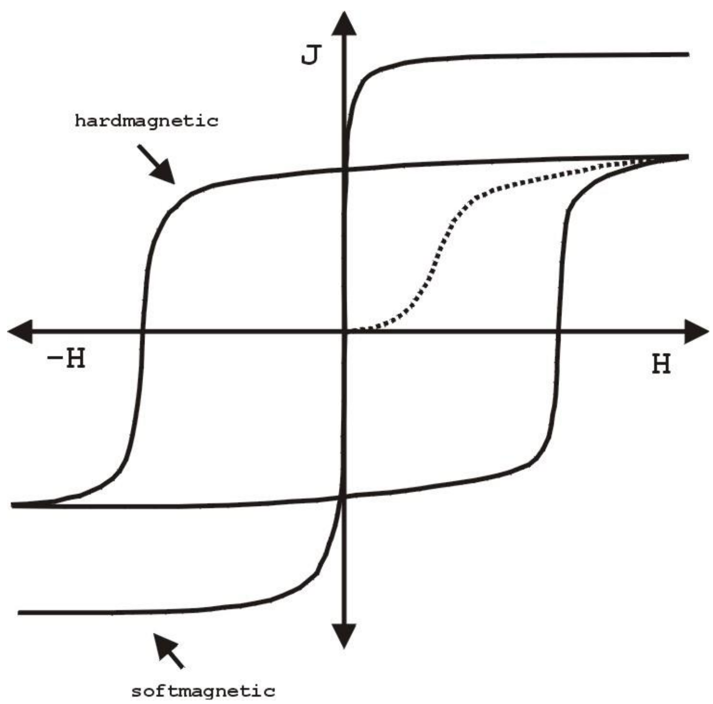

Abb.A1: Hart- und weichmagnetische Materialien und deren J(H)-Abhängigkeit. Gepunktet ist die sog. Neukurve dargestellt.

Wir nehmen eine grobe Unterteilung des Magnetismus in folgende Basis-Klassen vor:

Diamagnetismus: $\quad \chi < 0, \ |\chi| << 1$ (A.12a)

Paramagnetismus $\chi > 0, \ |\chi| << 1$ (A.12b)

Ferromagnetismus: $\chi > 0, \ |\chi| >= 1$ (A.12c)

Für technische Anwendungen sind der Dia- und Paramagnetismus in den meisten Fällen vernachlässigbar. Ihr Zustandekommen wird später im Abschnitt über die atomaren Ursachen des Magnetismus behandelt.

Die Materialien, die die Klasse der Ferromagnete bilden, lassen sich in sog. hart- und weichmagnetische Materialien einteilen. Insbesondere in hartmagnetischen Materialien existiert kein eindeutiger Zusammenhang zwischen **M** (oder **J**) und **H**, sondern der Effekt der **Hysterese** ist hier bestimmend. Abb. 1 zeigt schematisch den J(H)-Zusammenhang (äquivalent M(H), siehe obige Definition von J) für weich- und hartmagnetische Materialien. Die gepunktete Kurve wird durchlaufen, wenn das Material aus dem entmagnetisierten Zustand kommt, während das Material die äußere Kurve durchläuft, nachdem es in irgend eine Richtung voll aufmagnetisiert wurde.

Weichmagnetische Materialien zeigen i.a. ebenfalls eine Hysterese, deren Breite jedoch wesentlich geringer ist (bis um den Faktor 1000 oder mehr), wenn man diese mit der Kurve von Hartmagneten vergleicht. Insofern stellt sich die entsprechende J(H)-Kurve in Abb. 1 hier als ein eindeutiger funktionaler Zusammenhang dar.