

## 7.4.2 Was man wissen muss

Wir kennen den Ursprung magnetischer Felder und verstehen die Asymmetrie zwischen magnetischen und (die)elektrischen Eigenschaften.

Die Rolle des **Bohrschen Magnetons** als elementarer magnetischer Dipol, auch die Herkunft aus Spin und Bahnmoment der Elektronen einzelner Atome, ist uns geläufig.

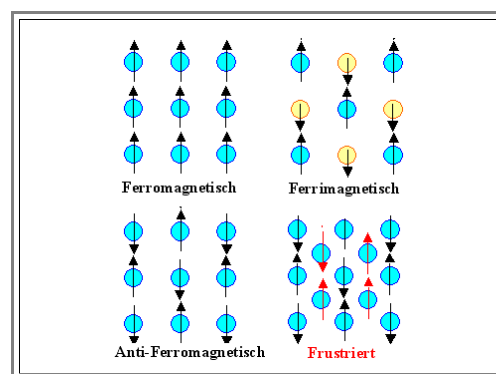
Bei Festkörpern wissen wir:

Entweder haben die den Festkörper konstituierenden Atome **keine** magnet. Momente, dann haben wir für die **ET&IT** uninteressante **diamagnetische** Materialien vor uns.

Oder es gibt magnet. Momente. Dann unterscheiden wir:

- **Paramagnete** = keine Ordnung (bei **RT**) und für die **ET&IT** uninteressant, da auch "Orientierungspolarisation" nur geringe Effekte erzeugt.
- **Ferro-, Ferri- und Antiferromagnete** mit magnetischer Ordnung unterhalb einer kritischen Temperatur (**Curie-T** für "Ferro"; **Neél-T** für "Antiferro").

Obwohl Anti-Ferromagnetismus für **ET&IT**-Anwendungen **noch** bedeutungslos ist, wird sich das in der Zukunft ändern ("Spintronic"), deshalb kennen wir den Begriff.



Die formale Beschreibung magnetischer Phänomene ist uns halbwegs geläufig, auch die Analogie zur Beschreibung von Dielektrika. Die Tabelle im [Link](#) verstehen wir im Prinzip. Insbesondere sind die folgenden Gleichungen klar:

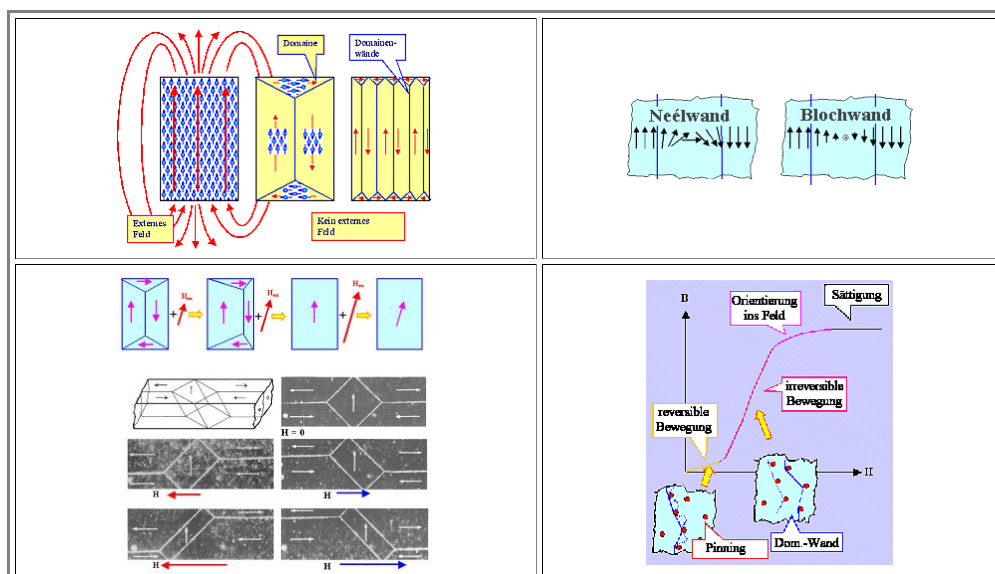
$$\mathbf{B} = \mu_0 \cdot \mathbf{H} + \mathbf{J} = \mu_0 \cdot (\mathbf{H} + \mathbf{M})$$

$$\mathbf{M} = \mathbf{J} / \mu_0 = (\mu_r - 1) \cdot \mathbf{H} = \chi_{\text{mag}} \cdot \mathbf{H}$$

Wir kennen auch die Benennungen: Primäre Parameter sind die **magnetische Feldstärke  $H$** , **magnetische Induktion  $B$** , **magnetische Polarisation  $J$**  oder die **Magnetisierung  $M$**  sowie die **magnetische Suszeptibilität  $\chi_{\text{mag}}$**  oder die (relative) **Permeabilität  $\mu_r$** .

Wir wissen, warum der simple Zusammenhang  $\mathbf{M} = \chi_{\text{mag}} \cdot \mathbf{H}$  für Ferromagnete nur sehr bedingt gilt (kleine  $H$  bei Ausgangsmagnetisierung  $\mathbf{M} = \mathbf{0}$ ) und daß wir ansonsten sehr komplexes Verhalten mit **Hysteresekurven** bekommen.

Wir verstehen auch warum. Die Stichworte sind: **Domänen, Domänenwände, Verschiebung von Domänenwänden!** Wir können die nachfolgenden Bilder sowohl interpretieren als auch – der Spur nach – selbst zeichnen



- Die energetischen Gründe für die Entstehung von Domänen sind klar, auch die Balance zwischen Domänenwandenergie und reduzierter Feldenergie und elastischer Energie; der Begriff "*Magnetostriktion*" sagt uns was.
  - Die Bezeichnung "*leichte Richtungen*" sagt uns in diesem Zusammenhang auch was.
- Wir verstehen, dass *magnetische Verluste* aus zwei Komponenten bestehen – *Wirbelstromverluste* und *Hystereseverluste* –, die beide mit der Frequenz ansteigen (quadratisch für Wirbelstrom, linear für Hysterese).
  - Wirbelstromverluste lassen sich bekämpfen (wir kennen zwei Methoden: isolierte Bleche und ferromagn. Isolatoren), Hystereseverluste nicht, sofern man einen *hartmagnetischen* Werkstoff braucht, denn sie sind, wie wir wissen, gegeben durch die *Fläche der Hysteresekurve*.
- Es ist klar, dass *nur* das Frequenzverhalten der Ferro-(und Ferri-)Materialien wichtig ist, und dass wir dabei die *Zeitabhängigkeit der Verschiebung von Domänenwänden* betrachten.
  - Damit ist auch klar, dass bei hohen Frequenzen nicht mehr viel passiert. Insbesondere können wir in der eigentlich korrekten Gleichung für den optischen Brechungsindex  $n = (\epsilon_r \cdot \mu_r)^{1/2}$  derzeit *noch*  $\mu_r = 1$  setzen.
- Wir können zumindest die paradigmatischen Anwendungen für Magnetwerkstoffe angeben, nach hart- und weichmagnetisch sortieren und ein paar Möglichkeiten zur Optimierung einer Hysteresekurve angeben und begründen.

## Zahlen und Formeln

Unbedingt erforderlich:

- Anmerkung:* In der Regel reichen "Zehner"-Zahlen. Genauere Werte sind in Klammern gegeben.

Zahlen neu			
Größe			
Permeabilität $\mu_r$		Diamagnete: $< \approx 1$ Paramagnete: $> \approx 1$ Ferromagnete: $\gg 1$ ; bis $>1000$	
Frequenzabhängigkeit		relevant nur $< \approx$ GHz; darüber $\mu_r \approx 1$	

Zahlen alt			
Größe		Zehnerwert	Besserer Wert
Durchschlagsfestigkeiten $E_{\max}$	$\approx$	(0,1 . . . 10) MV/cm	$\approx$ 15 MeV/cm (Limit)
Maximale Stromdichten $j_{\max}$	$\approx$	( $10^3$ . . . $10^5$ ) A/cm <sup>2</sup>	
Einige Dielektrizitätskonstanten $\epsilon_r$		$\epsilon_r(\text{H}_2\text{O}) \approx 80$ $\epsilon_r(\text{SiO}_2) \approx 3,7$ $\epsilon_r(\text{Halbleiter}) \approx 10 \dots 20$	
"Interessante" Frequenzen		$\approx 10$ GHz: Relaxation H <sub>2</sub> O $\approx 10^{13}$ Hz: Resonanz Ionenpolarisation $\approx 10^{15}$ Hz = "Optik": Resonanz Elektronenpolarisation	

<b>Daten Licht:</b> Wellenlänge Frequenz Energie	≈ ≈ ≈	1 μm 10 <sup>14</sup> Hz 1 eV	500 nm 5 · 10 <sup>14</sup> Hz 2,5 eV
Avogadrokonstante		10 <sup>24</sup> mol <sup>-1</sup>	6 · 10 <sup>23</sup> mol <sup>-1</sup>
Bildungs- und Wanderungsenergie Leerstelle	≈	1 eV	ca. (0,5 ... 5) eV
(k <sub>B</sub> T) <sub>RT</sub>	≈	1/40 eV = 0,025 eV	
Typische Gitterkonstante a	≈	1 Å = 0.1 nm	2 Å ... 5 Å
Größe eines Atoms (Durchmesser)	≈	1 Å = 0.1 nm	1 Å ... 3 Å
Photonenenergie (sichtbares) Licht	≈	1 eV	(1,6 ... 3,3) eV
Vibrationsfrequenz Atome im Kristall	≈	10 <sup>13</sup> Hz	

Formeln neu	
Größe	Formel
Magnetische Größen	$B = \mu_0 \cdot H + J = \mu_0 \cdot (H + M)$ $M = J / \mu_0 = (\mu_r - 1) \cdot H = \chi_{\text{mag}} \cdot H$ $\mu_r = \chi_{\text{mag}} + 1$

Formeln alt	
Größe	Formel
Dielektrische Größen	$\underline{\mu} = q \cdot \underline{\xi}$ $\underline{P} = \frac{\sum \underline{\mu}}{V} = \frac{\underline{P}}{V} = \langle \underline{\mu} \rangle \cdot N_V$ $\epsilon_r = \chi + 1$

Schwingungsgleichung und Resonanzfrequenz	$\frac{m d^2x}{dt^2} + m k_R \cdot \frac{dx}{dt} + k_F x = q E_0 \cos(\omega t)$ $\omega_0' = \left( \frac{k_F}{m} \right)^{1/2}$
Komplexer Brechungsindex $n^* = n + i\kappa$	$(n + i\kappa)^2 = \epsilon' - i \cdot \epsilon''$
Blindleistung $L_B$ Wirkleistung $L_W$	$L_B = \omega \cdot \epsilon' \cdot E^2$ $L_W = \omega \cdot \epsilon'' \cdot E^2$
Entropie S	$S_j = k_B \cdot \ln p_j$
Freie Energie G	$G = U - TS$
Stirling-Formel	$\ln x! \approx x \cdot \ln x$
Dichte Teilchen bei E	$n(E) = D(E) \cdot w(E) \cdot dE$
Boltzmann-Näherung an Fermiverteilung $f(E)$ für $E - E_F \gg k_B T$	$f(E) \approx \exp\left(-\frac{E - E_F}{k_B T}\right)$
Boltzmannfaktor (Wahrscheinlichkeit für E)	$w(E) = \exp[-E/(k_B T)]$
Boltzmannverteilung	$\frac{n(E)}{n(E_0)} = \exp\left(-\frac{E - E_0}{k_B T}\right)$
Leerstellenkonzentration ( $E^F$ : Bildungsenergie)	$c_V = \exp[-E^F/(k_B T)]$
Sprungrate r atomarer Defekte ( $E^M$ : Wanderungsenergie)	$r = v_0 \cdot \exp[-E^M/(k_B T)]$
Diffusionsstromdichte $j_{Diff}$ (Vektor!)	$j_{Diff} = -D \nabla n$

Diffusionslänge $L$	$L = (D\tau)^{1/2}$
Coulombpotential	$U_{\text{Cou}} = \frac{e^2}{4\pi \cdot \epsilon_0 \cdot r}$
Beziehung Kraft $F(r)$ — Potential $U(r)$	$F(r) = -\nabla U(r)$
Mech. Spannung $\sigma$ , Dehnung $\epsilon$ , E-Modul $E$	$\sigma = \frac{F}{A}$ $\epsilon = \frac{l(\sigma) - l_0}{l_0}$ $E = \frac{d\sigma}{d\epsilon}$
Innere Energie pro Freiheitsgrad (Gleichverteilungssatz; einzelnes Teilchen)	$U_{\text{Freiheitsgrad}} = \frac{1}{2}k_B T$
Mittlere thermische Energie eines klassischen Teilchens (innere Energie; Def. der Temperatur)	$U_{\text{Teilchen}} = \frac{1}{2}fk_B T$ <p>(<math>f</math>: Anzahl der Freiheitsgrade)</p>
Thermische Energie (Größenordnung von $U_{\text{Teilchen}}$ )	$E_{\text{therm}} = k_B T$ <p>(<math>U_{\text{Teilchen}} \approx k_B T</math>)</p>