

7.4 Zusammenfassungen zu Kapitel 7

7.4.1 Merkpunkte zu Kapitel 7: Magnetische Materialien

Es gibt **keine** elementaren magnetische **Monopole** – wohl aber elementare **magnetische Dipole**:

1. Ein **magnetisches Bahnmoment** $\underline{m}_{\text{Bahn}}$, das aus dem "Strom" der Elektronen resultiert, die "im Kreis" um einen Atomkern "fließen".
 2. Ein magnetisches Spinnmoment, d. h. ein mit dem Spin der Elektronen gekoppeltes magnetisches Moment, das die Elektronen schlicht "haben".
- Beide sind ± 1 **Bohrsches Magneton** groß.

Das magnetische Moment eines Atoms kommt von der Überlagerung der Bahn- und Spinnmomente und tendiert dazu, so **klein als möglich** zu sein.

- Damit hat aber die Hälfte der Atome (alle mit ungeradzahligem z) mindestens ein $\underline{m}_{\text{Bohr}}$.

Wichtig: magnetische Momente der Atome können in **jede** Richtung zeigen und diese Richtung auch ändern, ohne daß das im Kristall fest gebundene Atom sich **drehen** muss!

- Bei elektrischen Dipolmomenten geht das nicht!

Im **magnetischen Feld** gibt es zwei grundlegende Materialeffekte:

- In Atomen / Kristallen **ohne** magnetisches Moment der Atome werden durch ein magnetisches **H-Feld** welche induziert (Analogon bei Dielektrika: Elektronenpolarisation).
- In Atomen / Kristallen **mit** magnetischem Moment der Atome werden diese Moment im **H-Feld** etwas ausgerichtet

Interessant sind nur **ferromagnetische Materialien**, bei denen zwischen den magnetischen Momenten der Atome eine so starke Wechselwirkung besteht, dass eine Ordnung in den sonst statistisch verteilten Richtungen der magnetischen Momente auftritt.

- In den technisch sehr wichtigen ferromagnetischen Materialien (**Fe, Co, Ni**) zeigen die magnetischen Momente alle in dieselbe Richtung. Der Nettoeffekt ist **starke Magnetisierung**.
- In den technisch unwichtigen anti-ferromagnetischen Materialien (**Cr**) zeigen magnetischen Momente abwechselnd in entgegengesetzte Richtung. Der Nettoeffekt ist **keine Magnetisierung**.
- In den technisch sehr wichtigen **ferrimagnetischen** Materialien bleibt trotz antiferromagnetischer Grundstruktur eine Nettomagnetisierung, da die antiparallelen Momente ungleich groß sind.⇒

Die formale Beschreibung folgt der Systematik bei den Dielektrika.

- Primäre Materialparameter sind die **magnetische Polarisation** $\underline{J}$ oder die **Magnetisierung** $\underline{M}$ sowie die **magnetische Suszeptibilität** χ_{mag} .
- Für Ferromagnetika ist allerdings $\underline{M}$ nur für kleine Magnetfelder proportional zu $\underline{H}$; die Angabe einer **konstanten** magnetischen Suszeptibilität ist also nur bedingt sinnvoll.

$$m^e = \pm m_{\text{Bohr}}$$

$$m^{\text{Atom}} = \sum m_{\text{Bohr}} = \text{kleinst-möglich}$$

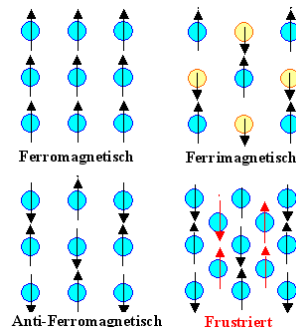
$$\begin{aligned} \text{Geradzahliges } z &\Rightarrow m^{\text{Atom}} = 0 \\ \text{Ungeradzahliges } z &\Rightarrow m^{\text{Atom}} = (1, 2, 3, \dots) \cdot m_{\text{Bohr}} \end{aligned}$$



Diamagnetische Materialien

Paramagnetische Materialien

**Minimaler Effekt.
Vollständig uninteressant für ET&IT
Wird nicht weiter behandelt**

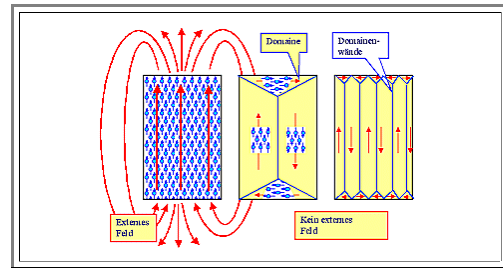


$$\underline{B} = \mu_0 \cdot \underline{H} + \underline{J} = \mu_0 \cdot (\underline{H} + \underline{M})$$

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

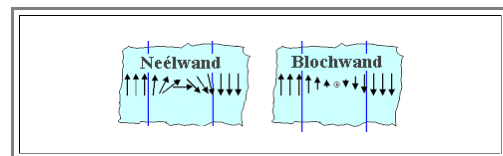
Viele ferromagnetische Materialien haben trotz paralleler Ausrichtung der atomaren magnetischen Momente eine verschwindende Magnetisierung, d. h. sie sind keine starken Permanentmagnete.

- Der Grund dafür liegt in der Ausbildung von **magnetischen Domänen** = Bereichen mit perfekter magnetischer Ordnung, aber mit verschiedener, sich insgesamt weitgehend aufhebender Ausrichtungen der Magnetisierung.
- Die **Domänenwände** sind flächige Defekte im Ordnungsmuster der atomaren Magnetisierungen und haben somit eine Energie pro cm^2
- Die Magnetisierung über eine Domänenwand ändert sich stetig; damit haben Domänenwände eine "Dicke", die viele Gitterkonstanten betragen kann.



Es gibt zwei Hauptarten von Domänenwänden: die **Blochwand** und die **Neélwand**.

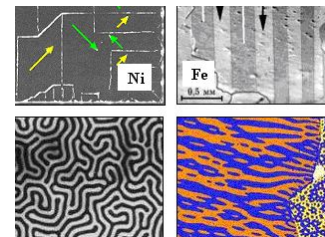
- Meist liegen Blochwände vor; Neélwände sind eher in dünnen Schichten prominent.



Domänen entstehen, weil durch Domänenbildung trotz des Energieinvestments für die Domänenwände, die (freie) Energie des Materials insgesamt gesenkt werden kann. Dabei sind drei Energiebeiträge besonders wichtig:

- Im sich bis ins "Unendliche" erstreckenden Magnetfeld eines starken Magneten steckt eine Menge **Feldenergie**. Mit geeignet angeordneten Domänen kann diese Energie praktisch auf Null reduziert werden.
- Kristalle mit geordneten magnetischen Momenten zeigen ausnahmslos den Effekt der **Magnetostriktion** – d. h. sie "ziehen" sich senkrecht zur Magnetisierungsrichtung etwas zusammen. Damit kommt elastische Energie ins Spiel (Es werden Bindungsfedern gedehnt oder gedrückt).
- Die gemeinsame Richtung der geordneten magnetischen Momente ist nicht beliebig sondern energetisch am günstigsten für "**leichte Richtungen**" = niederindizierte kristallographische Richtung, (z. B. $\langle 100 \rangle$ in Fe, $\langle 111 \rangle$ in Ni).
- Die resultierenden Strukturen können sehr komplex sein, minimieren aber schlicht die Energie.

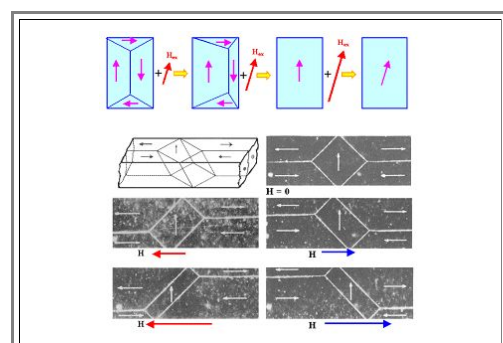
- Energie des externen Magnetfelds.**
- Verformungsenergie wg. Magnetostriktion**
- Anisotropie über "leichte Richtungen"**



Mit einem äußeren Magnetfeld vergrößern sich günstig orientierte Domänen auf Kosten der anderen. →

Dazu müssen sich **Domänenwände bewegen**. Domänenwände werden aber in ihrer Beweglichkeit stark von lokalen inneren mechanischen Spannungen / Dehnungen = **Defekten** beeinflusst. Das hat eine Reihe von Konsequenzen:

- Die Magnetisierungskurve wird nichtlinear und zeigt oft **Hysterese**.
- Domänenwände zu verschieben geht nicht so schnell. → Die **Frequenzabhängigkeit** der Magnetisierung von ferromagnetischen Materialien folgt aus der "Mechanik" der Domänenbewegung, die schon bei relativ niedrigen Frequenzen (**kHz . . . MHz**)



schlappmacht – außer bei speziellen "Nano"-Werkstoffen.

- Domänenwände hin und her zu schieben kostet Energie. Ein Teil der magnetischen Verluste P (die **Hysterseverluste** P_{Hyst}) erklärt sich durch diesen Effekt.
- Kristalldefekte beeinflussen (typischerweise erschweren) die Bewegung von Domänenwänden. Damit lassen sich Eigenschaften der Hysteresekurve durch "defect engineering" einstellen.

Weitere **Verluste** P_{Wirb} resultieren von induzierten Wirbelströmen in leitenden magnetische Materialien (spez. Widerstand ρ).

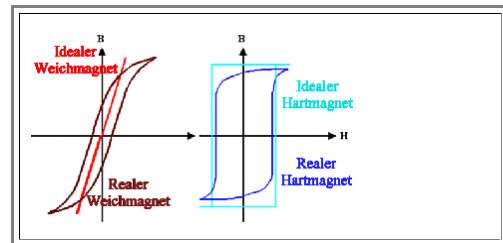
- Beide Verlustarten sind proportional zur Frequenz f . d ist die Dicke des Materials senkrecht zur Feldrichtung.
- Zur Minimierung von P_{Wirb} ist es angebracht, statt Volumenmaterials eine Schichtung isolierter Bleche zu nehmen (z. B. Trafokerne)

$$P_{\text{Fe}} = P_{\text{Wirb}} + P_{\text{Hyst}}$$

$$= \frac{\pi \cdot d^2}{6\rho} \cdot (f \cdot B_{\text{max}})^2 + 2f \cdot H_C \cdot B_{\text{max}}$$

Anwendungen brauchen entweder hart- oder weichmagnetische Materialien.

- Die paradigmatischen Beispiele für **Weichmagnete** sind **Transformatorkerne**
- Die paradigmatischen Beispiele für **Hartmagnete** sind **magnetische Speicher**. Wir brauchen hier **Remanenz** – in der Richtung der Magnetisierung steckt das **Bit**.
- Für "richtige" Permanentmagnete (z. B. für Lautsprecher, Mikrowellenröhren, Generatoren, ...) braucht man selbstverständlich auch ein möglichst hartmagnetisches Material.



Das Maßschneiden von Hysteresekurven (und anderen Eigenschaften) erfolgt durch:

- Optimale Materialwahl**
 - Ferromagnetische Elemente und Legierungen: **Fe**, **Ni**, **Co**.
 - Kombinationen mit antiferromagnetischen Elementen (**Cr**, ...) und "fast" ferromagn. Atomen (**Mn**, **Ga**, **O**, ..
 - Moderne "Exoten" mit **seltenen Erden**: **Co Sm**, **FeNdB**, **FeTb**, ...
- "**Defect Engineering**" Beeinflussung der Domänenwandbewegung durch mech. Spannungen verursacht durch Defekte (Ausscheidungen Korngrenzen, Versetzungen, ...).
- Faustregel: Defekte machen magn. "härter".

