

7.2.2 Magnetische Verluste

Wir betrachten ein ferromagnetisches Material mit einer gegebenen Hysteresekurve. Wir stecken es in ein oszillierendes Magnetfeld bei einer Frequenz, der das Material noch problemlos folgen kann. Dann gibt es **zwei** vollständig unabhängige Mechanismen, die zu **magnetischen Verlusten** führen, d. h. das Material aufheizen.

- 1. Das magnetische Wechselfeld induziert Ströme, die im Material herumwirbeln, eben **Wirbelströme**. Wie stark diese Wirbelströme sind, und damit die Wirbelstromverluste P_{Wirb} , hängt natürlich davon ab, wie leitfähig das Material ist; in Isolatoren treten sie nicht auf. Die wirklich guten (oder billigen) Ferromagnete sind aber i. d. R. Metalle ("Trafoeisen"), und damit sind Wirbelstromverluste sehr real.
- 2. Die holprige Bewegung der Domänenwände braucht Energie, die letztlich in Wärme umgewandelt wird; auch in nichtleitenden Ferrimagneten. Das sind dann intrinsische magnetischen Verluste oder **Hystereseverluste** P_{Hyst} .

Beide Effekte addieren sich. Ohne Details zu betrachten ist doch folgendes sofort klar. Die magnetischen Verluste **nehmen zu** mit:

- 1. Der Frequenz f in beiden Fällen, denn in jedem Zyklus um die Hysteresekurve herum wird ein bestimmter fixer Verlust anfallen.
- 2. Dem maximalen magnetischen Fluss B_{max} (oder der Magnetisierung) in beiden Fällen.
- 3. Der Leitfähigkeit $\sigma = 1/\rho$ für die Wirbelstromverluste.
- 4. Der magnetischen Feldstärke H für die intrinsischen magnetischen Verluste.

Eine genauere theoretischen Betrachtung ergibt das folgende Ergebnis für die gesamten magnetischen oder, wie man auch sagt, "Eisen" Verluste P_{Fe} pro cm^{-3} :

$$P_{\text{Fe}} \approx P_{\text{Wirb}} + P_{\text{Hyst}} \approx \frac{\pi \cdot d^2}{6\rho} \cdot (f \cdot B_{\text{max}})^2 + 2f \cdot H_C \cdot B_{\text{max}}$$

- Mit d = Dicke des Materials senkrecht zur Feldrichtung, H_C = Koerzitivfeldstärke.

Es ist klar, was man tun muss um die Wirbelstromverluste zu minimieren:

- Verwende ein Material mit hohem Widerstand – einen **Ferrimagneten** oder Ferrit. Was man an Sättigungsmagnetisierung verliert, kann vielleicht durch die reduzierten Verluste, vor allem bei hohen Frequenzen, wieder reinkommen.
- Falls das nicht geht: Mache d klein durch Stapeln dünner isolierter ferromagnetischen Scheiben. Das ist die Lösung, die man in jedem Standardtransformator findet.

Schauen wir uns jetzt mal die **Hystereeverluste** P_{Hyst} an.

- Der Term $H_C \cdot B_{\text{max}}$ entspricht im wesentlichen der **Fläche** unter der Hysteresekurve. Multipliziert mit zweimal der Frequenz hat man eine gute Näherung für diese Verluste.
- In anderen Worten: That's it! Für ein gegebenes magnetisches Material sind das die magnetischen Verluste die man hat; man kann nichts dagegen tun.

Die einzige Wahl, die man hat, ist ein Material zu nehmen, dessen Hysteresekurve für den geplanten Zweck optimal ist. Das gibt Anlass zu Fragen:

- 1. Was für eine optimale Hysteresekurve brauche ich überhaupt für die geplante Anwendung?
- 2. Was gibt es denn so im Wunschbereich?
- 3. Kann ich die Hysteresekurve eines Materials im Zweifel so ändern, dass sie passt?

Das schauen wir uns in den nächsten Moduln an.

Fragebogen

Schnelle Fragen zu 7.2.2