



## Lezione 11

# Schermi in Campo Vicino

Giuseppe Pelosi - Stefano Selleri  
Dipartimento di Elettronica e Telecomunicazioni  
Università di Firenze



## Sommario della Lezione

- ❖ Introduzione
- ❖ Sorgenti ad alta e bassa impedenza
- ❖ Schermi per il campo magnetico



## Introduzione

Si è valutata l'efficacia schermate per un'onda piana incidente.

Ogni sorgente, a grande distanza, genera un campo che può essere modellato come un'onda localmente piana. Questo è legato al fatto che nei campi radiati i moduli del campo elettrico e del campo magnetico sono in un rapporto ben definito, l'impedenza del mezzo.

Una sorgente a distanza ravvicinata, d'altro canto genera anche campi reattivi, per cui vi è uno sbilanciamento fra campi elettrici e magnetici.

Diventa quindi importante poter valutare separatamente, per una sorgente vicina, il potere schermante relativamente al campo elettrico ed al campo magnetico, separatamente.



## Sorgenti ad Alta e bassa Impedenza

Ricordando il campo di un dipolo elettrico corto

$$\mathbf{E} = \begin{cases} E_r = 2 \frac{Idl}{4\pi} \zeta_0 k_0^2 \cos \theta \left( \frac{1}{k_0^2 r^2} - j \frac{1}{k_0^3 r^3} \right) e^{-jk_0 r} \\ E_\theta = \frac{Idl}{4\pi} \zeta_0 k_0^2 \sin \theta \left( j \frac{1}{k_0 r} + \frac{1}{k_0^2 r^2} - j \frac{1}{k_0^3 r^3} \right) e^{-jk_0 r} \\ E_\phi = 0 \end{cases} \quad \mathbf{H} = \begin{cases} H_r = 0 \\ H_\theta = 0 \\ H_\phi = \frac{Idl}{4\pi} k_0^2 \sin \theta \left( j \frac{1}{k_0 r} + \frac{1}{k_0^2 r^2} \right) e^{-jk_0 r} \end{cases}$$

Riconosciamo immediatamente come il rapporto tra i moduli di E e di H non sia costante.

Definiamo di conseguenza un' **impedenza d'onda** una grandezza che, in campo lontano, coincida con l'impedenza caratteristica del mezzo e, in campo vicino, renda conto dello sbilanciamento fra campo elettrico e campo magnetico:

$$Z_w = \frac{E_\theta}{H_\phi}$$



## Sorgenti ad Alta e bassa Impedenza

Per il dipolo elettrico corto

$$\begin{aligned} Z_w = \frac{E_\theta}{H_\phi} &= \frac{\frac{Idl}{4\pi} \zeta_0 k_0^2 \sin \theta \left( j \frac{1}{k_0 r} + \frac{1}{k_0^2 r^2} - j \frac{1}{k_0^3 r^3} \right) e^{-jk_0 r}}{\frac{Idl}{4\pi} k_0^2 \sin \theta \left( j \frac{1}{k_0 r} + \frac{1}{k_0^2 r^2} \right) e^{-jk_0 r}} = \\ &= \zeta_0 \frac{j \frac{1}{k_0 r} + \frac{1}{k_0^2 r^2} - j \frac{1}{k_0^3 r^3}}{j \frac{1}{k_0 r} + \frac{1}{k_0^2 r^2}} \end{aligned}$$

Per distanze molto piccole il termine in  $r^3$  domina e si ha

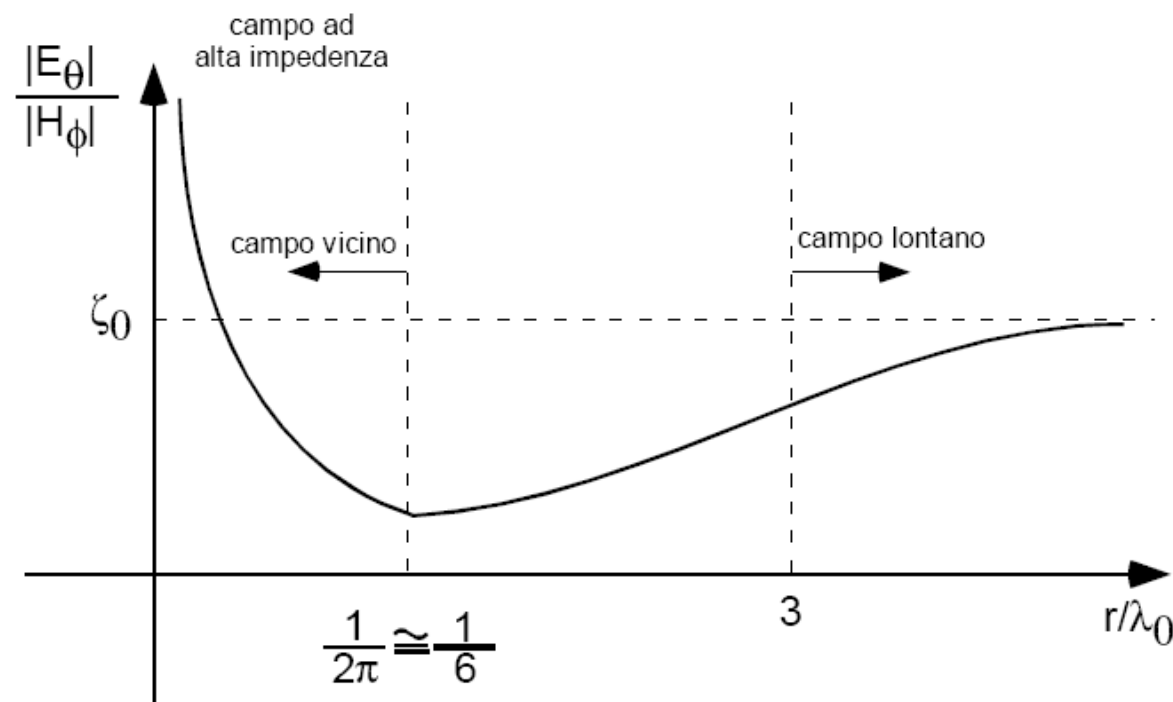
$$Z_w \cong -j \frac{\zeta_0}{k_0 r}$$

L'impedenza d'onda è capacitiva e il suo modulo è elevato, ovvero si ha predominanza di campo elettrico sul magnetico. Siamo in situazione di **alta impedenza**.



## Sorgenti ad Alta e bassa Impedenza

In funzione della distanza...





## Sorgenti ad Alta e bassa Impedenza

Per la Spira elementare

$$\mathbf{E} = \begin{cases} E_r = 0 \\ E_\theta = 0 \\ E_\phi = -j\omega\mu_0 \frac{I\pi b^2}{4\pi} k_0^2 \sin\theta \left( j\frac{1}{k_0 r} + \frac{1}{k_0^2 r^2} \right) e^{-jk_0 r} \end{cases} \quad \mathbf{H} = \begin{cases} H_r = j2\omega\mu_0 \frac{I\pi b^2}{4\pi\zeta_0} k_0^2 \cos\theta \left( \frac{1}{k_0^2 r^2} - j\frac{1}{k_0^3 r^3} \right) e^{-jk_0 r} \\ H_\theta = j\omega\mu_0 \frac{I\pi b^2}{4\pi\zeta_0} k_0^2 \sin\theta \left( j\frac{1}{k_0 r} + \frac{1}{k_0^2 r^2} - j\frac{1}{k_0^3 r^3} \right) e^{-jk_0 r} \\ H_\phi = 0 \end{cases}$$

Con una definizione duale

$$Z_w = \frac{E_\phi}{H_\theta} = \frac{-j\omega\mu_0 \frac{I\pi b^2}{4\pi} k_0^2 \sin\theta \left( j\frac{1}{k_0 r} + \frac{1}{k_0^2 r^2} \right) e^{-jk_0 r}}{j\omega\mu_0 \frac{I\pi b^2}{4\pi\zeta_0} k_0^2 \sin\theta \left( j\frac{1}{k_0 r} + \frac{1}{k_0^2 r^2} - j\frac{1}{k_0^3 r^3} \right) e^{-jk_0 r}} = \zeta_0 \frac{j\frac{1}{k_0 r} + \frac{1}{k_0^2 r^2}}{j\frac{1}{k_0 r} + \frac{1}{k_0^2 r^2} - j\frac{1}{k_0^3 r^3}}$$



## Sorgenti ad Alta e bassa Impedenza

Stavolta a dominare vicino alla sorgente è

$$Z_w \cong j\zeta_0 k_0 r$$

L'impedenza d'onda è induttiva e il suo modulo è basso, ovvero si ha predominanza di campo magnetico sull'elettrico. Siamo in situazione di **bassa impedenza**.

Per quanto riguarda le sorgenti reali le scintille e le scariche elettriche sono affini ai dipoli elettrici corti e sono quindi sorgenti ad alta impedenza

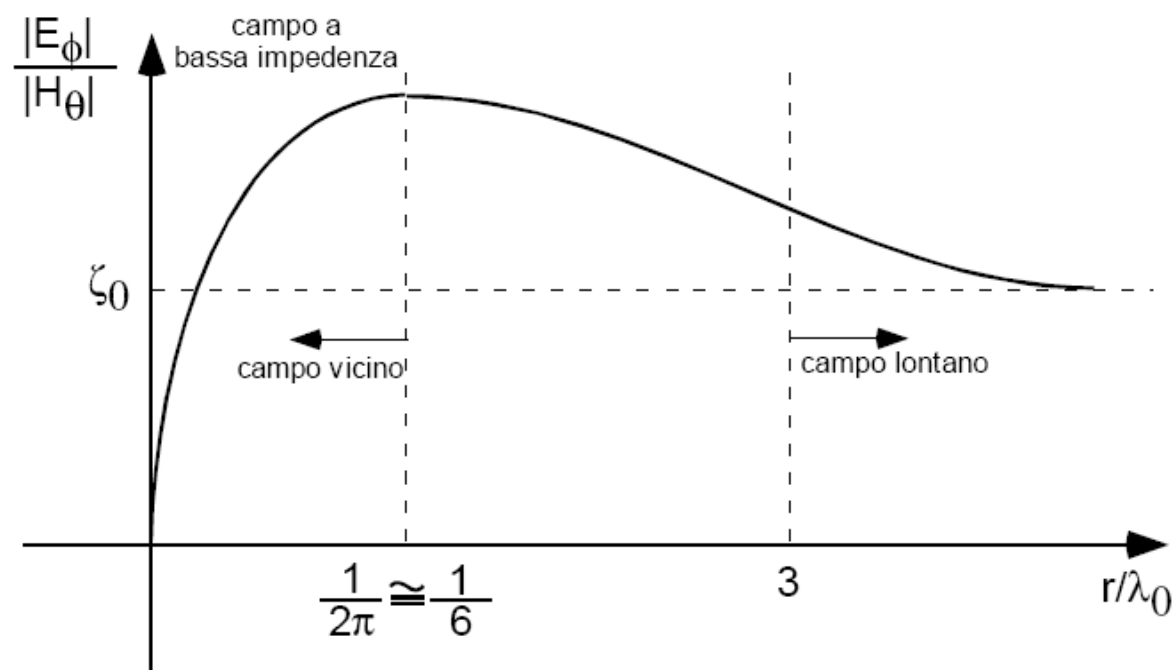
I trasformatori sono invece costituiti da spire su nuclei magnetici e sono tipicamente affini a sorgenti a bassa impedenza





## Sorgenti ad Alta e bassa Impedenza

In funzione della distanza...





## Sorgenti ad Alta e bassa Impedenza

Anche nel caso di campo vicino possiamo supporre di approssimare l'efficacia di schermatura con la somma dei tre termini:

- ❖ Perdite per riflessione
- ❖ Perdite per assorbimento
- ❖ Perdite per riflessioni multiple

Questo lo si fa sostituendo all'impedenza dello spazio libero l'impedenza d'onda

$$\zeta_0 \rightarrow Z_w$$



## Sorgenti ad Alta e bassa Impedenza

Perdite per riflessione:

$$R_{dB} \cong 20 \log_{10} \left| \frac{Z_w + \zeta}{2\zeta} \right| \left| \frac{Z_w + \zeta}{2Z_w} \right| = 20 \log_{10} \frac{|Z_w + \zeta|^2}{4|Z_w||\zeta|} \cong 20 \log_{10} \left| \frac{Z_w}{4\zeta} \right|$$

Perdite una sorgente ad *alta impedenza* è

$$|Z_w| = \frac{\zeta_0}{k_0 r} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \frac{1}{2\pi f \sqrt{\epsilon_0 \mu_0} r} = \frac{1}{2\pi \epsilon_0 f r}$$

*r* è la distanza dallo schermo

$$R_{dB} \cong 20 \log_{10} \left| \frac{\frac{1}{2\pi \epsilon_0 f r}}{4 \sqrt{\frac{\omega \mu_0 \mu_r}{2\sigma}} \sqrt{2}} \right| = 20 \log_{10} \left( \frac{1}{2\pi \epsilon_0 f r} \frac{1}{4} \frac{\sqrt{\sigma_{Cu} \sigma_r}}{\sqrt{2\pi f \mu_0 \mu_r}} \right) =$$

$$20 \log_{10} \left( \frac{\sqrt{\sigma_{Cu}}}{8\pi \epsilon_0 \sqrt{\mu_0} \sqrt{2\pi}} \right) + 10 \log_{10} \left( \frac{\sigma_r}{\mu_r f^3 r^2} \right) = 322 + 10 \log_{10} \left( \frac{\sigma_r}{\mu_r f^3 r^2} \right)$$



## Sorgenti ad Alta e bassa Impedenza

Perdite una sorgente a *bassa impedenza* è

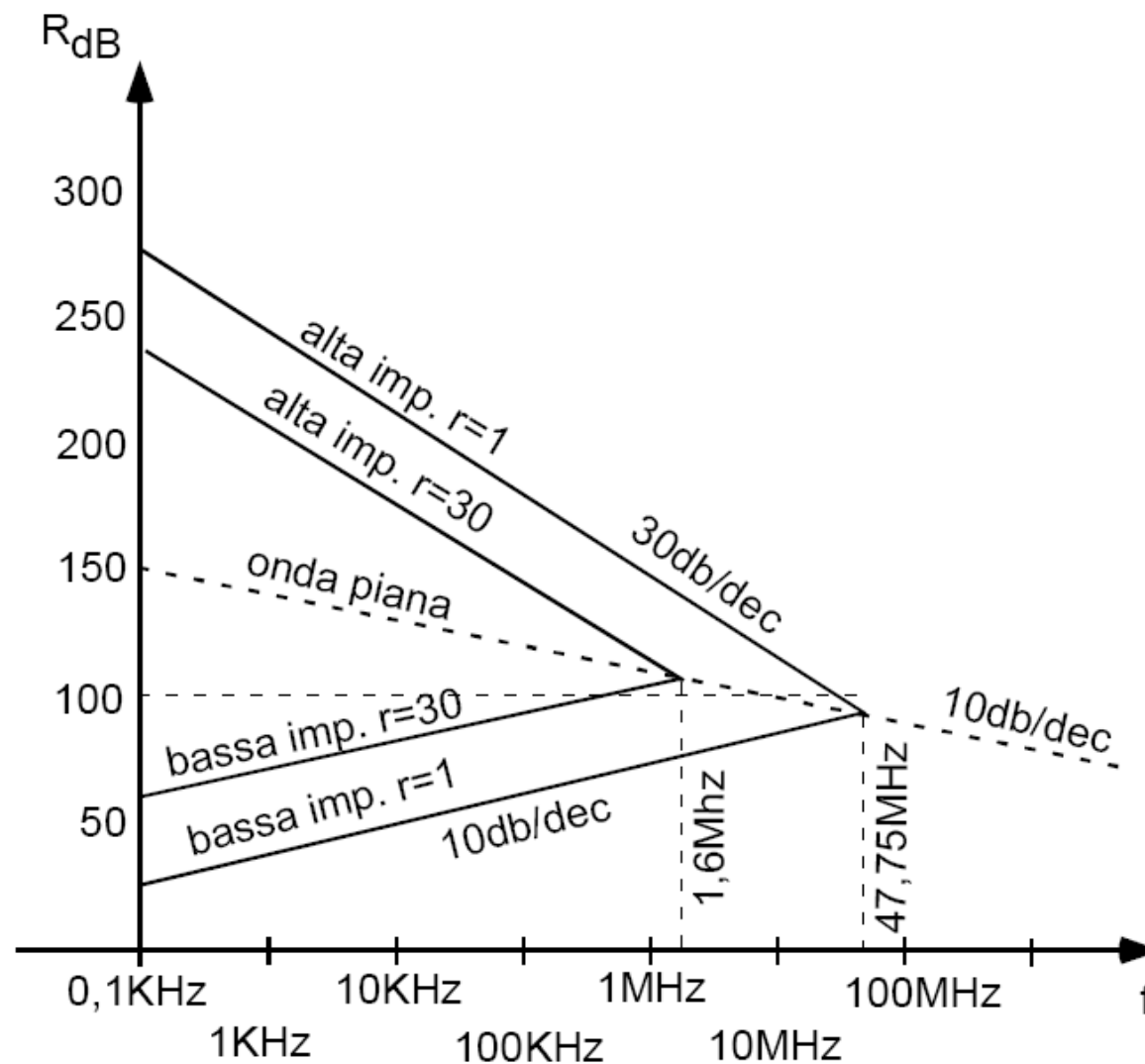
$$|Z_w| = \zeta_0 k_0 r = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} 2\pi f \sqrt{\epsilon_0 \mu_0} r = 2\pi \mu_0 f r$$

$$R_{dB} \cong 20 \log_{10} \left| \frac{2\pi \mu_0 f r}{4 \sqrt{\frac{\omega \mu_0 \mu_r}{2\sigma}} \sqrt{2}} \right| = 20 \log_{10} \left( \frac{\pi \mu_0 f r}{2} \frac{\sqrt{\sigma_{Cu} \sigma_r}}{\sqrt{2\pi f \mu_0 \mu_r}} \right) =$$
$$20 \log_{10} \left( \sqrt{\frac{\pi}{2}} \sqrt{\mu_0} \frac{\sqrt{\sigma_{Cu}}}{2} \right) + 20 \log_{10} \left( \sqrt{\frac{f \sigma_r r^2}{\mu_r}} \right) = 14.57 + 10 \log_{10} \left( \frac{f \sigma_r r^2}{\mu_r} \right)$$



## Sorgenti ad Alta e bassa Impedenza

Perdite per riflessione in uno schermo di rame, in funzione di  $r$





## Schermi per il Campo Magnetico

Si noti come le sorgenti a bassa impedenza siano legate, a basse frequenze, a basse efficienze schermanti.

Se si considera che le perdite per assorbimento non dipendono dall'impedenza d'onda, e quindi non variano rispetto all'onda piana, unitamente alla considerazione che tali perdite sono basse a basse frequenza si perviene alla conclusione che

Gli schermi sono poco efficaci per sorgenti magnetiche (a bassa impedenza) vicine e a bassa frequenza.

Questo è quindi il caso più interessante da studiare.



## Schermi per il campo magnetico

Per sorgenti vicine a bassa impedenza le perdite per riflessione sono trascurabili e l'efficacia schermante è legata alle sole perdite di assorbimento.

Queste perdite sono basse a bassa frequenza, per cui occorre studiare altre tecniche per la schermatura del campo magnetico.

Vi sono due tecniche principali:

- ❖ La *deviazione del campo magnetico* tramite materiali ad alta permeabilità
- ❖ La *generazione di un flusso opposto* tramite spire in corto circuito

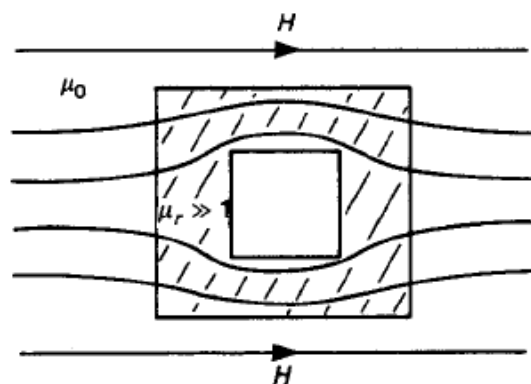


## Schermi per il campo magnetico

### *deviazione del campo magnetico*

Un materiale ad alta permeabilità offre per le linee di campo magnetico un percorso a bassa riluttanza.

Le linee tenderanno quindi a concentrarsi nel mezzo ferromagnetico e a non interessare la cavità interna







## Schermi per il campo magnetico

### *deviazione del campo magnetico*

Vi sono però due fattori che limitano l'applicabilità della tecnica:

- ❖ La permeabilità di un mezzo ferromagnetico è una funzione decrescente della frequenza
- ❖ La permeabilità di un mezzo ferromagnetico è una funzione decrescente dell'intensità di campo

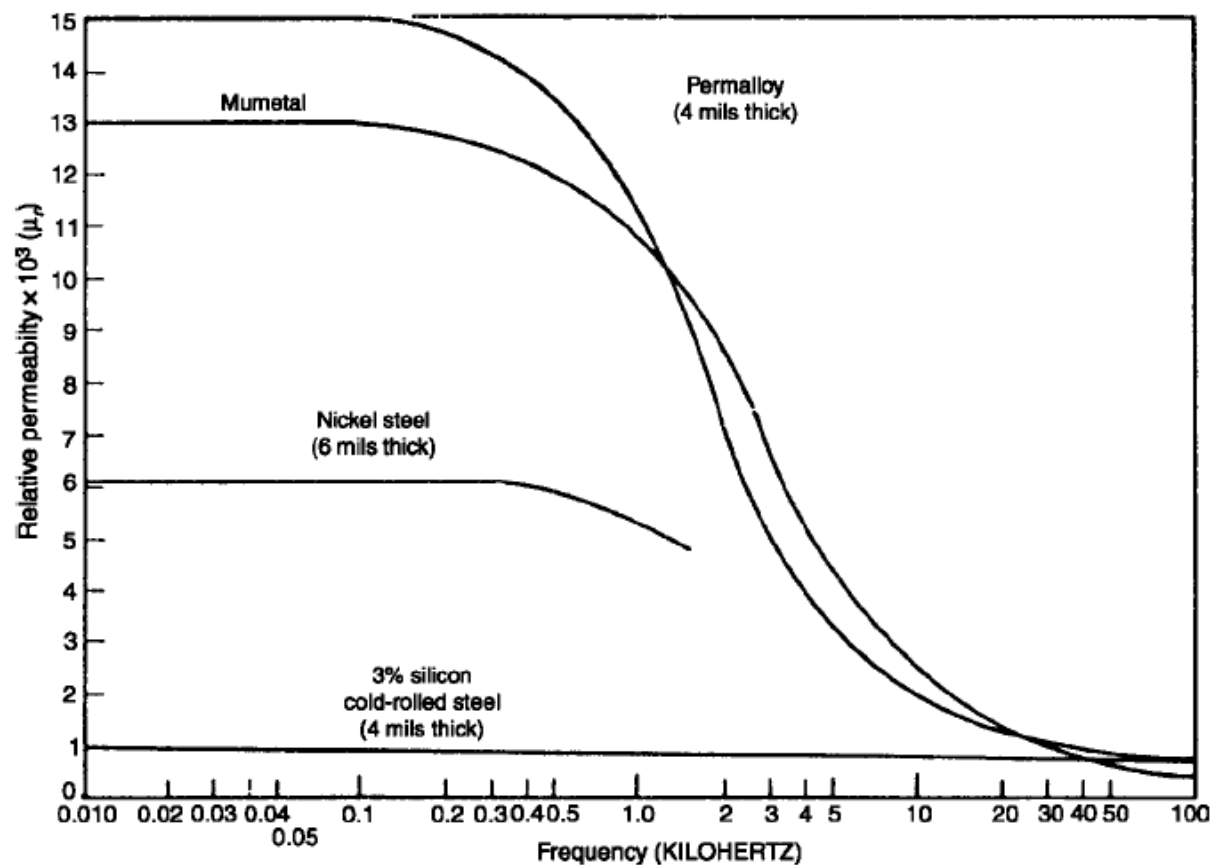
I produttori di materiali ferromagnetici tendono quindi a fornire il valore di permeabilità a una frequenza fissata e relativamente bassa. Tipicamente 1kHz.



## Schermi per il campo magnetico

### *deviazione del campo magnetico*

Esempio di comportamento della permeabilità in funzione della frequenza





## Schermi per il campo magnetico

### *deviazione del campo magnetico*

Si noti come, sotto il kHz le leghe speciali presentino altissime permeabilità, mentre, sopra 20kHz praticamente tutte le leghe hanno lo stesso comportamento dell'acciaio laminato a freddo.

Di conseguenza le schermature degli alimentatori (che sono sorgenti a bassa impedenza, a causa delle spire dei trasformatori, principalmente interessate dai campi magnetici) vengono fatte in acciaio

La frequenza di switching degli alimentatori è infatti tipicamente dell'ordine dei 20-100kHz per cui le leghe come il Mumetal, molto costose, non presentano alcun significativo vantaggio di schermatura.

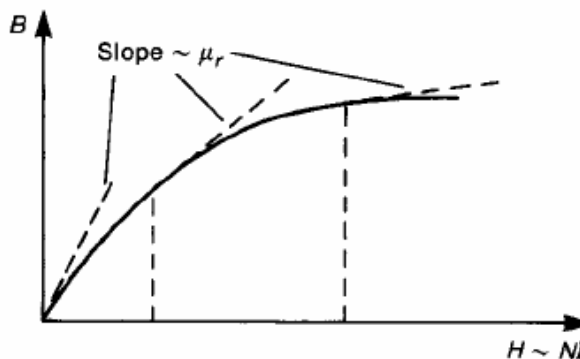
D'altro canto la frequenza di rete a 60Hz può essere efficacemente schermata dal Mumetal, soprattutto se i campi sono così intensi da portare in saturazione il materiale ferromagnetico.



## Schermi per il campo magnetico

### *deviazione del campo magnetico*

La saturazione provoca un abbassamento della permeabilità e, di conseguenza, delle capacità schermanti



La pendenza del grafico **B – H** è proporzionale alla permeabilità.

La permeabilità fornita dai costruttori, oltre che essere a 1kHz, è pure la *permeabilità iniziale*, ovvero la pendenza iniziale (massima!) della curva



## Schermi per il campo magnetico

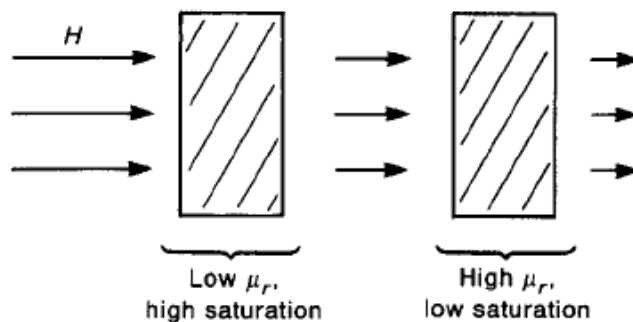
### *deviazione del campo magnetico*

Il Mumetal, quindi, che sembrerebbe ottimale per il suo alto valore di permeabilità a 60Hz potrebbe entrare in crisi per le alte correnti, e quindi campi, legate all'alimentazione di rete.

Inoltre più alta è la permeabilità iniziale, più è facile arrivare alla saturazione.

Il problema può essere affrontato con una doppia schermatura magnetica. La prima con un materiale a permeabilità relativamente bassa e che non saturi facilmente

La seconda con un materiale a permeabilità alta che non vada però in saturazione grazie al fatto che parte del campo magnetico è già stato schermato.

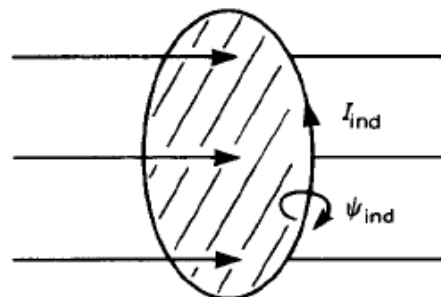




## Schermi per il campo magnetico

### *generazione di un flusso opposto*

Una spira cortocircuitata posta in aria risponde, in presenza di un flusso di induzione magnetica, con una corrente che a sua volta genera un flusso di induzione magnetica che tende ad annullare il flusso impresso.



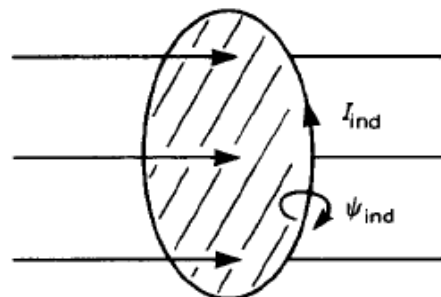
Vi è quindi una generale diminuzione del valore del campo magnetico internamente alla spira.



## Schermi per il campo magnetico

### *generazione di un flusso opposto*

Una spira cortocircuitata posta in aria risponde, in presenza di un flusso di induzione magnetica, con una corrente che a sua volta genera un flusso di induzione magnetica che tende ad annullare il flusso impresso.



Vi è quindi una generale diminuzione del valore del campo magnetico internamente alla spira.

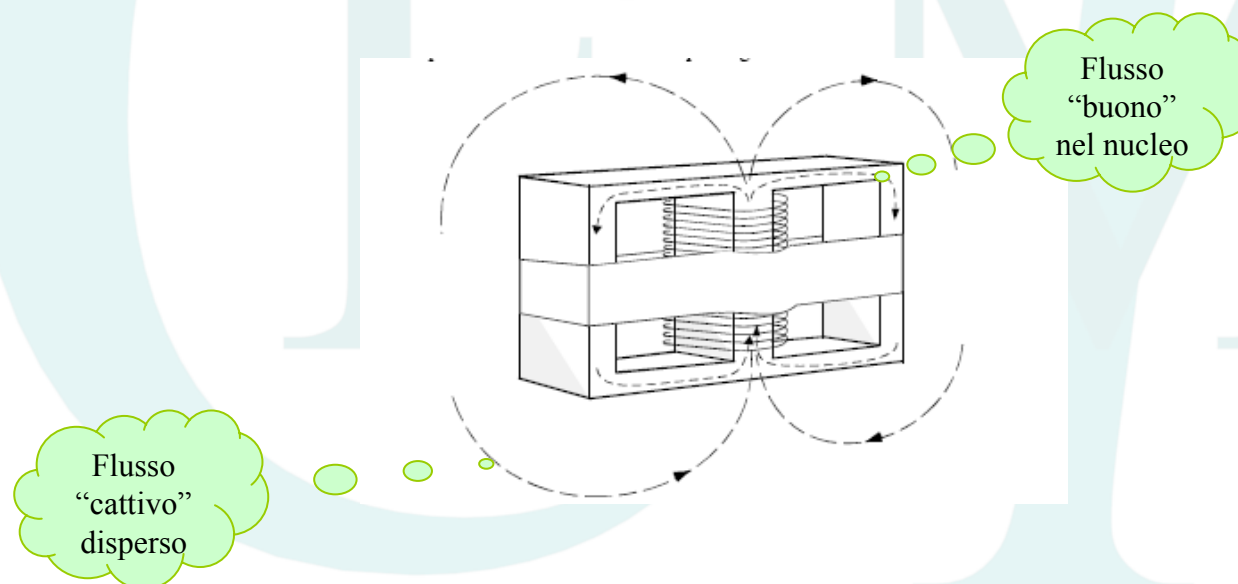


## Schermi per il campo magnetico

### *generazione di un flusso opposto*

Questa tecnica è utile ancora una volta per gli alimentatori che, come abbiamo visto, sono particolarmente critici.

L'alimentatore è costituito da un nucleo di acciaio laminato che forma il circuito per il flusso magnetico







## Schermi per il campo magnetico

### *generazione di un flusso opposto*

Il flusso disperso, responsabile delle EMI, è un'induzione magnetica presente fuori dal nucleo a bassa riluttanza.

Un loop conduttivo posto immediatamente a contatto col nucleo presenta, attraverso di esso, un flusso di induzione magnetica che è nullo per la parte “buona”, che si richiude dentro al nucleo, e non nullo per la parte “cattiva” che si richiude in aria.

Di conseguenza le correnti che si instaurano su questo anello tendono ad annullare questo flusso “cattivo”

