



ETEF15 Krets- och mätteknik, fk Fältteori och EMC — föreläsning 2

Daniel Sjöberg

daniel.sjoberg@eit.lth.se
Institutionen för elektro- och informationsteknik
Lunds universitet

- 1 **Introduktion**
- 2 **Magnetiska fält**
- 3 **Induktans**
- 4 **Induktiva kopplingar och skydd**
- 5 **Elektromagnetiska fält**
- 6 **Sammanfattning**

Outline

- 1 **Introduktion**
- 2 Magnetiska fält
- 3 Induktans
- 4 Induktiva kopplingar och skydd
- 5 Elektromagnetiska fält
- 6 Sammanfattning

Inslaget är en orientering om hur yttre störningar kan koppla in sig på en krets, samt hur de kan minimeras.

► Två föreläsningar idag:

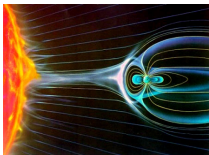
1. Elektriska fält
2. Magnetiska fält

Litteratur:

- A. Alfredsson och R. K. Rajput, Elkretsteori, kapitel 5.
- Föreläsningsanteckningar.

Magnetism

- ▶ Mycket påtaglig kraft (redan de gamla grekerna...)
- ▶ Jordmagnetiska fältet
- ▶ (Ferro)magnetiska material
- ▶ Magnetkameror
- ▶ Kan avlänska elektriska laddningar i rörelse (acceleratorer)



Jordmagnetiska fältet ($\sim 50 \mu\text{T}$)



Transformator ($\sim 1 \text{ T}$)



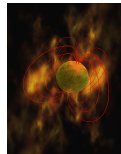
Neodym-magnet ($\sim 1 \text{ T}$)



Magnetkamera ($\sim 3 \text{ T}$)

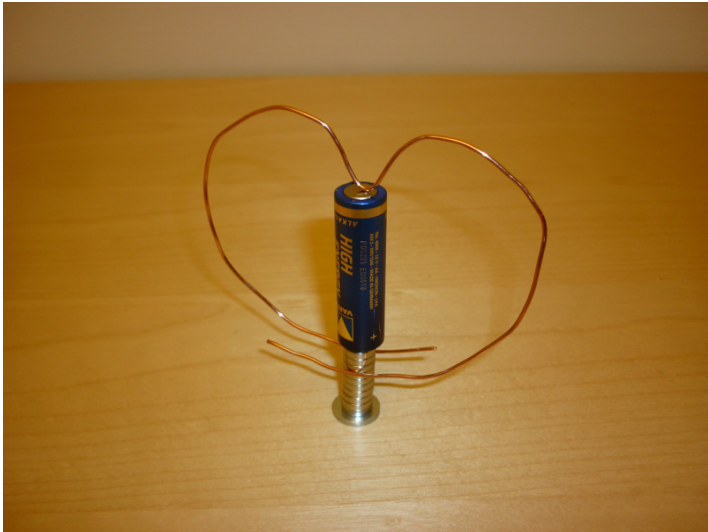


Svävande groda ($\sim 10 \text{ T}$)



Magnetar ($\sim 10^{10} \text{ T}$)

Enkel motor

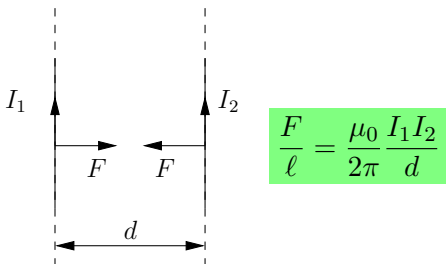


Outline

- 1 Introduktion
- 2 Magnetiska fält**
- 3 Induktans
- 4 Induktiva kopplingar och skydd
- 5 Elektromagnetiska fält
- 6 Sammanfattning

Kraft och ström

Kraften per längdenhet mellan två långa raka ledare är (har utgjort definitionen av enheten A)



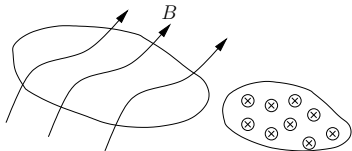
- Kraften är en *vektor*, som har både storlek och riktning.
- Enhet för ström: Ampere, $[I] = \text{A}$.
- Naturkonstanten μ_0 är *permeabiliteten i vakuum*,
 $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}}$.
- Kraften **attraherar** vid **lika** tecken på I_1 och I_2 .
- Kraften **repellerar** vid **olika** tecken på I_1 och I_2 .

Magnetiskt flöde

Det magnetiska fältet är ett mått på hur en ström påverkar sin omgivning. Kraften per längdenhet mellan två långa raka ledare är

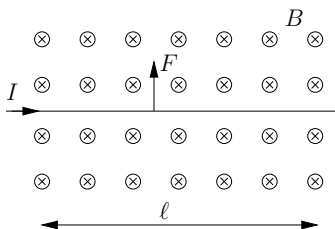
$$\frac{F}{\ell} = \underbrace{\frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I_1}{d}}_{=B} I_2 = B \cdot I_2$$

- ▶ B är den *magnetiska flödestätheten*, med enhet $[B] = \frac{\text{Vs}}{\text{m}^2} = \text{T}$ (tesla).
- ▶ Det magnetiska flödet ϕ genom en öppen yta ges av $\phi = \iint B_n \, dS$. Om B_n är konstant är $\phi = B_n A$, där
 - ▶ B_n är flödestätheten *normal* mot ytan.
 - ▶ A är arean (antar B_n är konstant).



Kraft

För en strömbana i ett homogent magnetfält gäller $F = BIl$



Högerhandsregeln:

► I = tummen

► B = pekfingeret

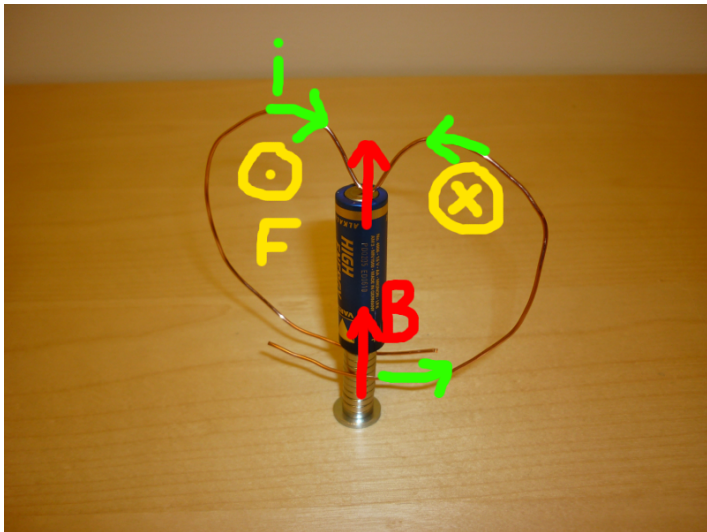
► F = långfingeret

Om I bildar vinkeln $\alpha < 90^\circ$ mot B , erhålls $F = BIl \sin \alpha$.

För ett godtyckligt riktat strömelement $j = I d\ell$ i godtyckligt fält B är generaliseringen $F = j \times B$.

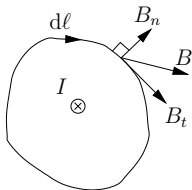
Observera att alla storheter i denna formel är vektorer (de har både storlek och riktning), samt att multiplikationen är en vektorprodukt, dvs F är vinkelrät mot både j och B och de ska ordnas enligt högerhandsregeln (se Linjär algebra).

Förklaring till den enkla motorn



Ampères lag

Magnetostatikens motsvarighet till Gauss lag är Ampères lag, som relaterar ström till magnetiskt fält:

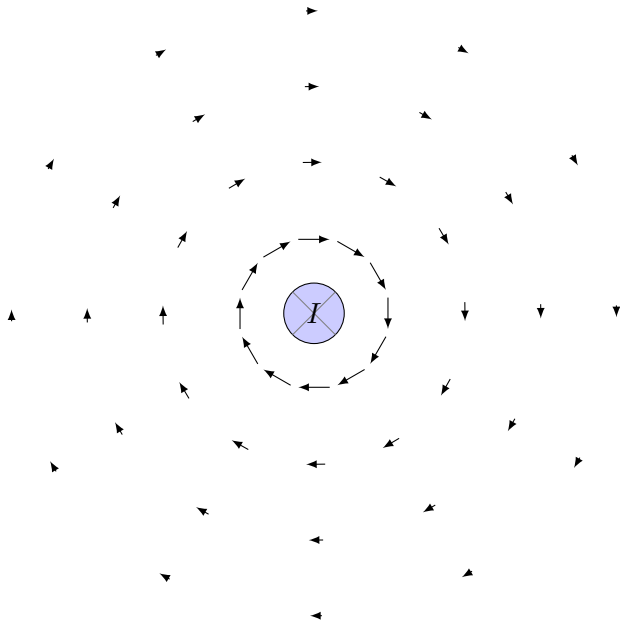


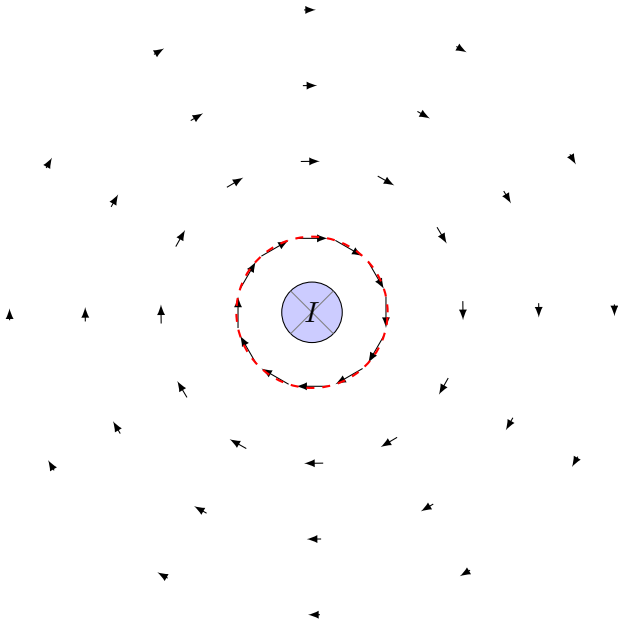
$$\oint B_t d\ell = \mu_0 I_{\text{tot}}$$

Samordna omloppsriktningen med strömriktningen enligt högerhandsregeln (strömriktningen längs med tummen).

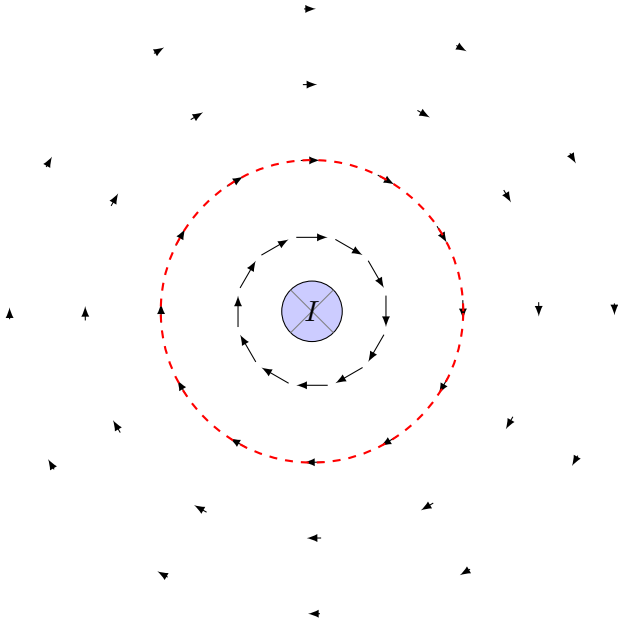
I ord: *den totala cirkulationen (integralen av tangentialkomponenten B_t) längs en sluten bana motsvaras av den omslutna strömmen.*

Då hela systemet är inneslutet i ett material, ersätts μ_0 med $\mu = \mu_r \mu_0$, där *relativa permeabiliteten* μ_r är en materialkonstant, som är $\mu_r \approx 1$ utom för ferromagnetiska material, där μ_r kan vara mycket stor.

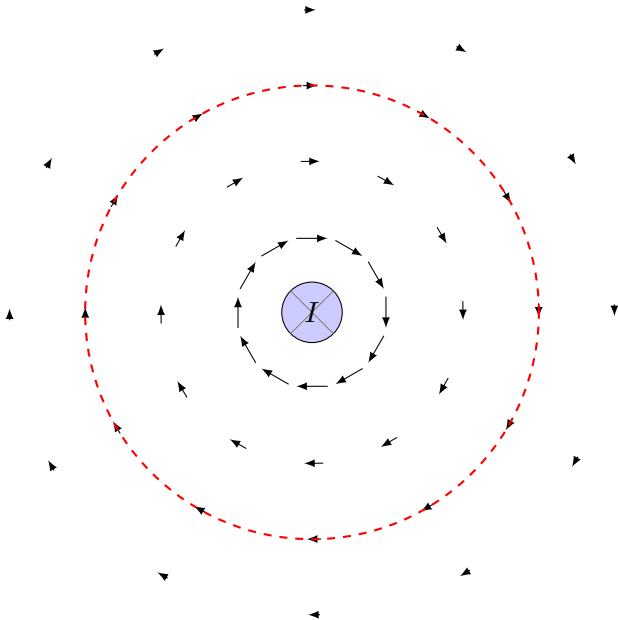




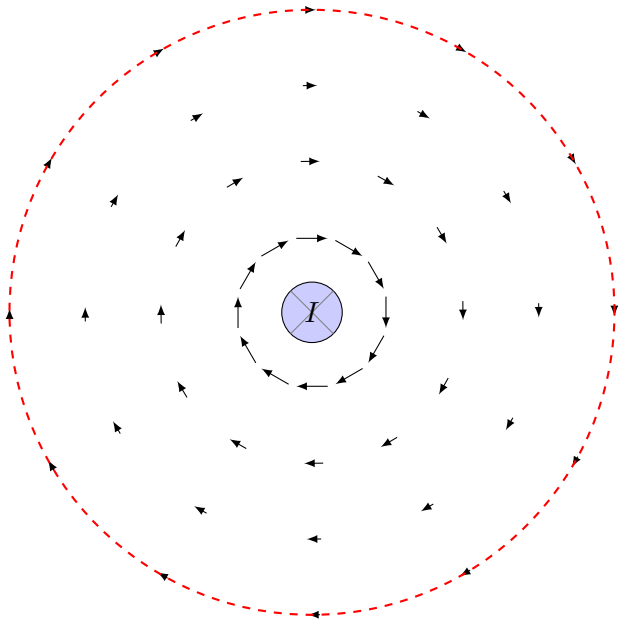
Integralen $\int B_t d\ell = \mu_r \mu_0 I$ oavsett storlek på integrationsytan.



Integralen $\int B_t d\ell = \mu_r \mu_0 I$ oavsett storlek på integrationsytan.

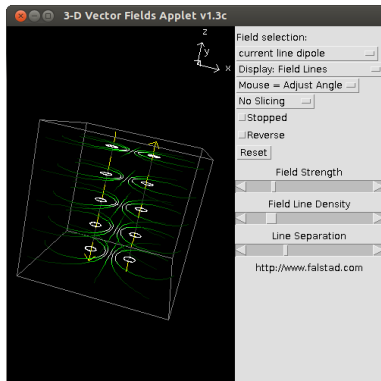
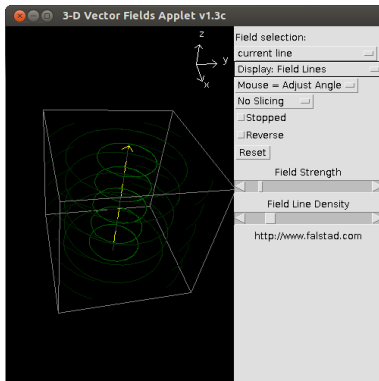


Integralen $\int B_t d\ell = \mu_r \mu_0 I$ oavsett storlek på integrationsytan.



Integralen $\int B_t d\ell = \mu_r \mu_0 I$ oavsett storlek på integrationsytan.

Fält kring lång rak strömbana



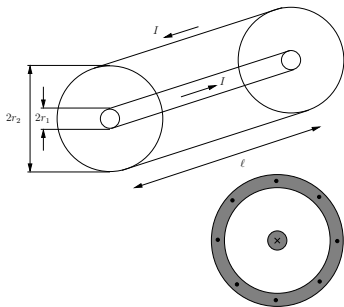
"Current line", och "current line dipole". Fältlinjerna går längs högerhandens fingrars riktning om tummen pekar i strömriktningen.

$$B = \frac{\mu_r \mu_0 I}{2\pi r}$$



Koaxialkabel

I en koaxialkabel har vi återledning genom den yttre ledaren, vilket ger



Olika områden:

- ▶ Mellan ledarna, $r_1 < r < r_2$:

$$\mu_r \mu_0 I = B 2\pi r \text{ ger}$$

$$B = \frac{\mu_r \mu_0}{2\pi r} I$$

- ▶ Utanför ledarna $r > r_2$: total omsluten ström

$$I_{\text{tot}} = I - I = 0, \text{ vilket ger}$$

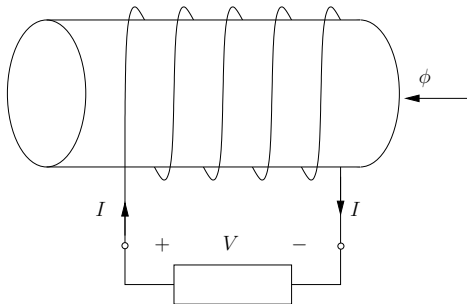
$$0 = B 2\pi r.$$

Koaxialkabeln har alltså perfekt skärmning av magnetiska fält (och även elektriska). Detta gäller dock inte fullt ut när kabeln böjs, eftersom symmetrin rubbas då.

Outline

- 1 Introduktion
- 2 Magnetiska fält
- 3 Induktans**
- 4 Induktiva kopplingar och skydd
- 5 Elektromagnetiska fält
- 6 Sammanfattning

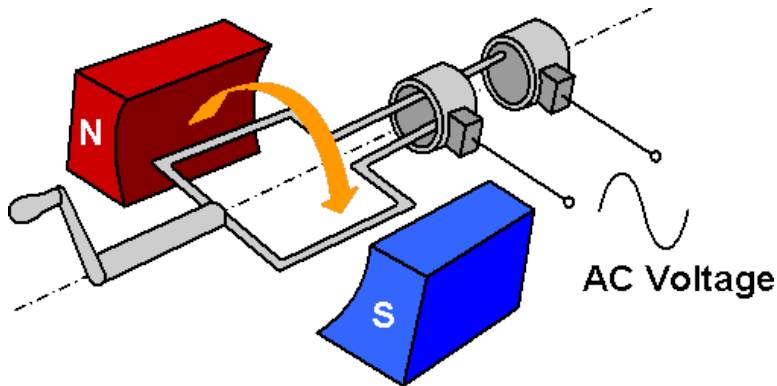
Induktion



Om strömriktningen samordnas med flödet enligt högerhandsregeln, och spänningen över spolen samordnas med ström enligt passiv teckenkonvention, blir induktionslagen

$$V = \frac{d\phi}{dt} = j\omega\phi$$

Generator



Typiskt drivs rotationen av vattenkraft, vindkraft etc. Det varierande magnetiska flödet ger upphov till en växelspanning.

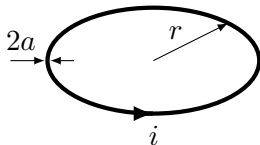
Induktans

För en ensam spole ges det magnetiska flödet av självinduktansen L (enhet Henry, $[L] = \text{H} = \text{Vs/A}$):

$$\phi = LI$$

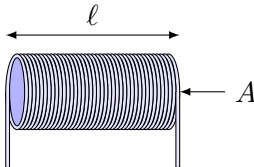
För en *plan cirkulär slinga* med radie r och trådradie a ges självinduktansen av

$$L = \mu_0 r \left(\ln \frac{8r}{a} - 2 + \frac{1}{4} \right)$$



För en *lång rak spole* med längden ℓ , N varv och tvärsnittsytan A

$$L = \frac{\mu_0 N^2 A}{\ell}$$

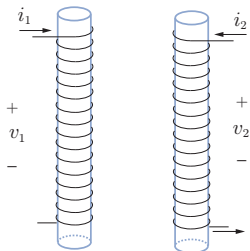


I båda fallen växer induktansen med tvärsnittsytan.

Ömsesidig induktans

Med två spolar ges den inducerade spänningen av

a)



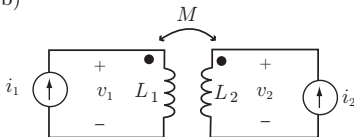
$$V_1 = j\omega\phi_1 = j\omega(L_1 I_1 + M I_2)$$

$$V_2 = j\omega\phi_2 = j\omega(L_2 I_2 + M I_1)$$

Självinduktanserna i spolarna är L_1 och L_2 medan M är den ömsesidiga induktansen. Det gäller att

$$|M| = k\sqrt{L_1 L_2}, \quad 0 \leq k \leq 1$$

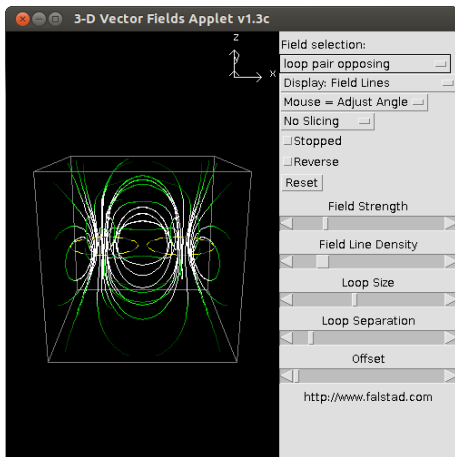
b)



där k är kopplingsfaktorn, och tecknet på M avgörs genom spolarnas respektive orientering.

Den ömsesidiga induktansen M är proportionell mot $N_1 N_2$.

Visualisering av kopplade strömslingor



"Loop pair opposing". Slingornas storlek, läge och omloppsriktning kan ändras.

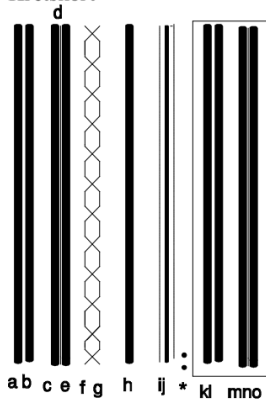
Outline

- 1 Introduktion
- 2 Magnetiska fält
- 3 Induktans
- 4 Induktiva kopplingar och skydd**
- 5 Elektromagnetiska fält
- 6 Sammanfattning

Typexempel

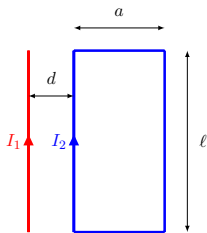
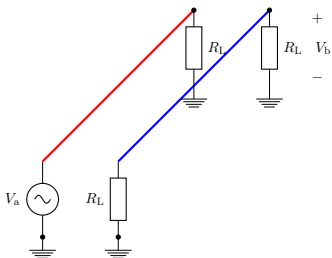


Kretskort

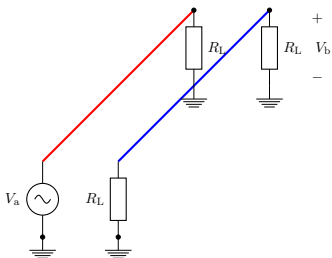


* jordplan

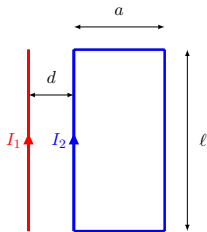
Induktiv koppling rektangulär slinga



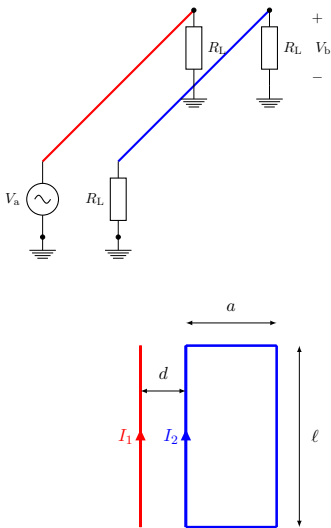
Induktiv koppling rektangulär slinga



Fältet från en lång rak ledare: $B = \frac{\mu_0}{2\pi r} I_1$.



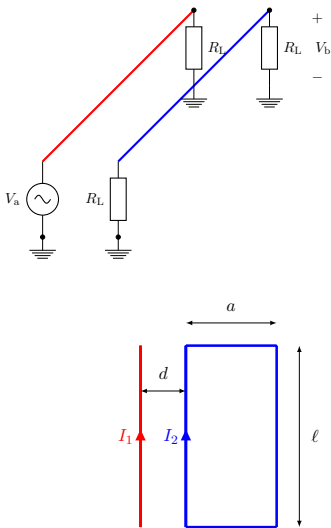
Induktiv koppling rektangulär slinga



Fältet från en lång rak ledare: $B = \frac{\mu_0}{2\pi r} I_1$.
Flöde genom rektangulär slinga:

$$\begin{aligned}\phi &= \int B \, dS = \int_d^{d+a} \frac{\mu_0}{2\pi r} I_1 \cdot \ell \, dr \\ &= \frac{\mu_0 \ell}{2\pi} I_1 \int_d^{d+a} \frac{dr}{r} = \frac{\mu_0 \ell}{2\pi} I_1 [\ln r]_d^{d+a} \\ &= \frac{\mu_0 \ell}{2\pi} I_1 (\ln(d+a) - \ln d) = \frac{\mu_0 \ell}{2\pi} I_1 \ln \frac{d+a}{d}\end{aligned}$$

Induktiv koppling rektangulär slinga



Fältet från en lång rak ledare: $B = \frac{\mu_0}{2\pi r} I_1$.
 Flöde genom rektangulär slinga:

$$\begin{aligned}\phi &= \int B \, dS = \int_d^{d+a} \frac{\mu_0}{2\pi r} I_1 \cdot \ell \, dr \\ &= \frac{\mu_0 \ell}{2\pi} I_1 \int_d^{d+a} \frac{dr}{r} = \frac{\mu_0 \ell}{2\pi} I_1 [\ln r]_d^{d+a} \\ &= \frac{\mu_0 \ell}{2\pi} I_1 (\ln(d+a) - \ln d) = \frac{\mu_0 \ell}{2\pi} I_1 \ln \frac{d+a}{d}\end{aligned}$$

Inducerad ström: $I_2(R_L + R_L) = -\frac{d\phi}{dt}$, dvs
 $V_b = I_2 R_L = -\frac{1}{2} j\omega \phi$.

En åtgärd, men många realiseringar

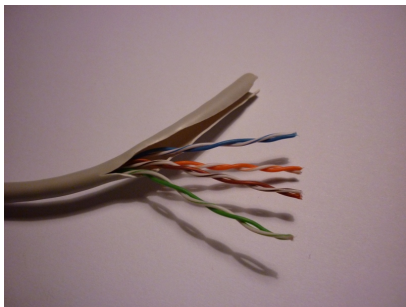
Den inducerade spänningen blir alltså proportionell mot $j\omega\phi = j\omega BA = j\omega MI_1$, dvs ju högre frekvens, desto starkare koppling.

Minska slingarean A :

- ▶ Undvik signalledningar som bildar stora slingor med jord.
- ▶ Tvåtrådsledningar bör ha så små avstånd som möjligt mellan ledarna.
- ▶ För tvåtrådsledningar måste båda ändar kopplas till respektive signal och jord för att möjliggöra strömbanorna.
- ▶ Koaxialkablar släcker idealt sett ut alla fält omkring sig.
- ▶ Två parallella trådar bildar en liten slinga, som kan minimeras ytterligare genom att tvinna trådarna (twisted-pair kablar).

Twisted pair (ethernet)

De vanligaste kablarna som kopplar ihop våra datorer finns i flera olika varianter.



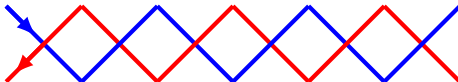
Oskärmad (U/UTP)



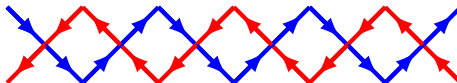
Skärmad (S/FTP)

Såväl de enskilda paren som hela kabeln kan skärmas, typiskt med metallfolie eller fläta.

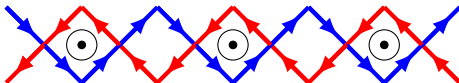
Varför är det bra att tvinna trådarna?



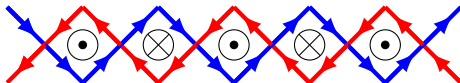
Varför är det bra att tvinna trådarna?



Varför är det bra att tvinna trådarna?

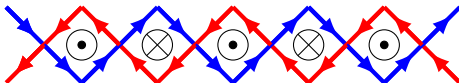


Varför är det bra att tvinna trådarna?



Varje liten slinga är motriktad sin närmaste granne, vilket minskar det totala flödet.

Varför är det bra att tvinna trådarna?



Varje liten slinga är motriktad sin närmaste granne, vilket minskar det totala flödet.

Ytterligare skydd ges genom skärmning.

Beteckningar

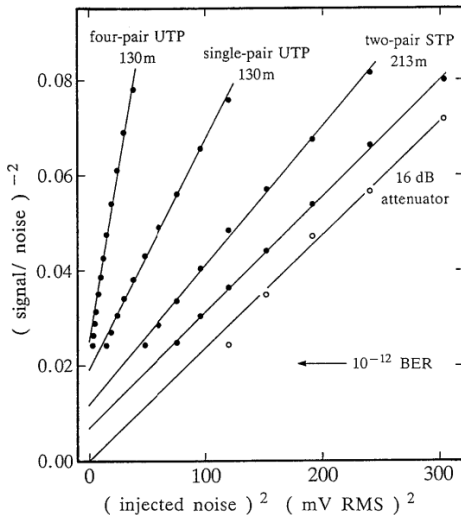
Enligt ISO/IEC 11801:

Gammal	Ny	Kabelskärm	Parskärm
UTP	U/UTP	ingen	ingen
STP	U/FTP	ingen	folie
FTP	F/UTP	folie	ingen
S-STP	S/FTP	fläta	folie
S-FTP	SF/UTP	folie, fläta	ingen

- ▶ TP = tvinnade par (twisted pair)
- ▶ U = oskärmad (unshielded)
- ▶ F = folie (foil shielding)
- ▶ S = fläta (braided shielding)



Jämförelse med och utan skärm



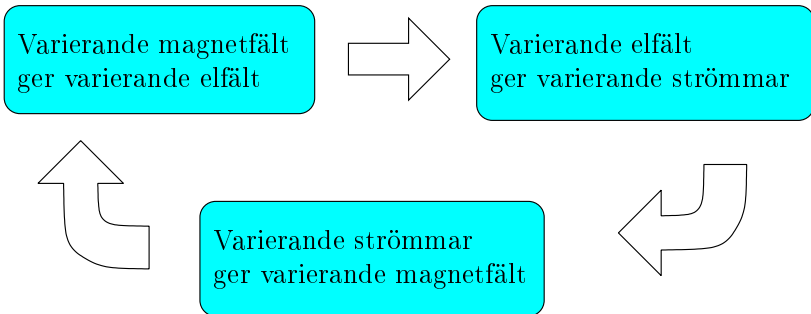
"Transmission of STS-3c (155 MbWsec) SONET/ATM Signals over Unshielded and Shielded Twisted Pair Copper Wire", W. E. Stephens, T. C. Banwell, G. R. Lalk, T. J. Robe, and K. C. Young, 1992.

Outline

- 1 Introduktion
- 2 Magnetiska fält
- 3 Induktans
- 4 Induktiva kopplingar och skydd
- 5 Elektromagnetiska fält**
- 6 Sammanfattning

Virvelströmmar

I en kropp med ledningsförmåga induceras ström i flera nivåer:



Ju högre frekvens desto starkare koppling mellan rutorna
($V = -j\omega\phi$). Mycket komplicerat problem att lösa i detalj!

Inträngningsdjup

I vissa starkt förenklade geometrier kan virvelströmmarna beräknas exakt. För en plan geometri avtar alla fält med faktorn $e^{-d/\delta}$, där

δ är inträngningsdjupet $\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \sigma \mu}}$ och

- ▶ f är frekvensen
- ▶ σ är ledningsförmågan för metallen
- ▶ $\mu = \mu_r \mu_0$ är permeabiliteten för metallen

Detta betyder att **all ström koncentreras till ett område med tjocklek $\approx \delta$ kring ytan av en ledare**. För en god ledare som koppar ($\sigma = 5.8 \cdot 10^7 \text{ S/m}$, $\mu = \mu_0$) får vi

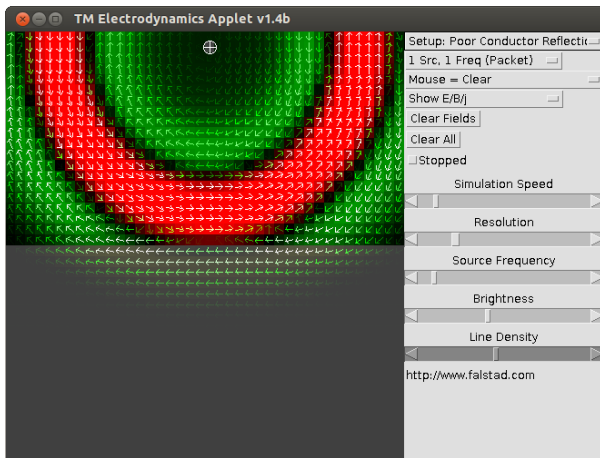
$$f = 50 \text{ Hz} \qquad \delta = 9.35 \text{ mm}$$

$$f = 1 \text{ kHz} \qquad \delta = 2.09 \text{ mm}$$

$$f = 1 \text{ MHz} \qquad \delta = 0.07 \text{ mm}$$

$$f = 1 \text{ GHz} \qquad \delta = 2.09 \mu\text{m}$$

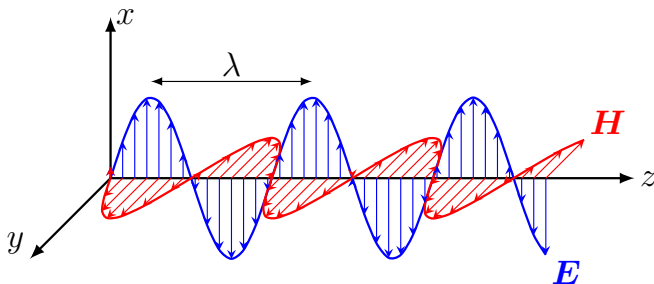
Visualisering inträngningsdjup



"Poor conductor reflection". Det går att ta bort och lägga till pixlar med metall, ändra ledningsförmåga etc.

Elektromagnetiska vågor

För höga frekvenser bildas elektromagnetiska vågor ($\mathbf{H} = \mathbf{B}/\mu$).



Elektriskt och magnetiskt fält är vinkelräta mot varandra och utbredningsriktningen. Kvoten är $|\mathbf{E}|/|\mathbf{H}| = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0} = 377 \Omega$. Våglängd och frekvens ges av

$$\lambda = c/f, \quad c = 299\,792\,458 \text{ m/s} \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

där c är ljushastigheten i vakuum (högsta möjliga hastighet enligt relativitetsteorin).

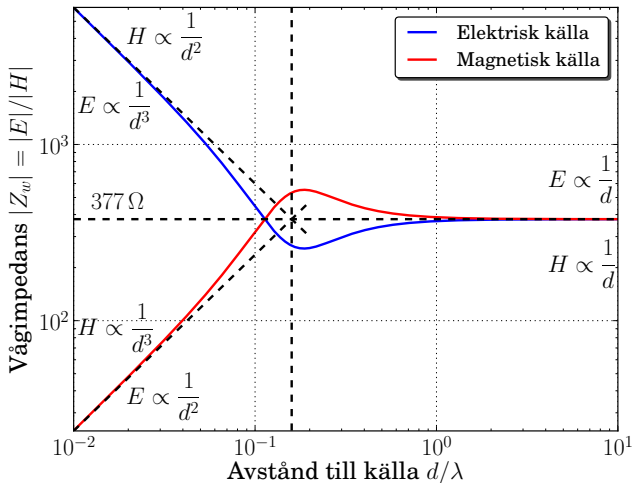
Elektromagnetiska fält kan typiskt skapas av elektriska och magnetiska källor.

- ▶ Elektriska källor: laddningar
 - ▶ Spröstantenner
 - ▶ Urladdningar
- ▶ Magnetiska källor: slutna strömbanor
 - ▶ Trådslingor
 - ▶ Motorer

Oavsett källa blir fälten på stort avstånd d (mycket större än våglängden) proportionella mot $1/d$ och kvoten blir $|E|/|H| = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0} = 377 \Omega$. På detta avstånd går det inte att skilja på elektriska och magnetiska källor.

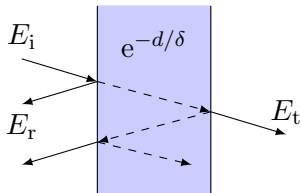
Vågimpedans $Z_w = |E|/|H|$

Vågimpedans (kvoten mellan E och H) beror på källa och avstånd.



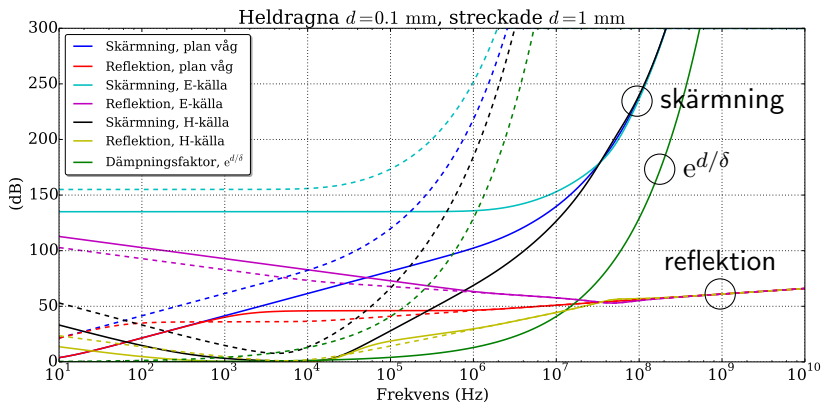
Skyddsstrategi kan bero på kännedom om källa och avstånd.

Skärmnings- och reflektionseffektivitet (kopparplåt)



$$\text{Skärmning} = \left| \frac{E_i}{E_t} \right|^2$$

$$\text{Reflektion} = \frac{|E_i|^2}{|E_i|^2 - |E_r|^2}$$



Outline

- 1 Introduktion
- 2 Magnetiska fält
- 3 Induktans
- 4 Induktiva kopplingar och skydd
- 5 Elektromagnetiska fält
- 6 Sammanfattning**

Sammanfattning

Vi har studerat magnetiska fält från synvinkeln om hur störningar kan kopplas in på ett nätverk.

- ▶ Magnetiska fält skapas av strömmar.
- ▶ Kopplingen mellan två skilda strömbanor kvantifieras med ömsesidiga induktansen M .
- ▶ Den frekvensberoende kopplingen kan fås genom en kretsmodell av systemet.
- ▶ Den främsta åtgärden vid induktiva störningar är att minska slingarean.
- ▶ Vid högre frekvenser genereras både elektriska och magnetiska fält, där våglängd $\lambda = c/f$ är den typiska längdskalan.
- ▶ Skärmningseffektiviteten för en plåt beror på frekvens, plåttjocklek och materialegenskaper.