



ETEF15 Krets- och mätteknik, fk Fältteori och EMC — föreläsning 1

Daniel Sjöberg

daniel.sjoberg@eit.lth.se
Institutionen for Elektro- och informationsteknik
Lunds universitet

Outline

- 1 **Introduktion**
- 2 **Elektriska fält**
- 3 **Kapacitans**
- 4 **Kapacitiva kopplingar och skydd**
- 5 **Sammanfattning**

Outline

- 1** Introduktion
- 2 Elektriska fält
- 3 Kapacitans
- 4 Kapacitiva kopplingar och skydd
- 5 Sammanfattning

Översikt

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.

Exempel på störningar

Irritation, fördröjningar

Värdeförluster

Dödsfall, allvarlig skada

- Radio/TV
- WLAN
- Mobil



- Kritiska kommunikationer
- Pengaöverföringar
- Tjänsteavbrott (elavbrott)



- Radar, landningssystem
- Airbags löser ut fel
- Felaktig eldgivning



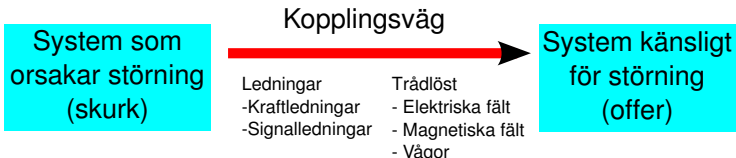
- ▶ Starka krav och omfattande regelverk (bl.a. CE-märkning).
- ▶ Viktigt att ta hänsyn till störningar tidigt i utvecklingsprocessen.

EMC = ElectroMagnetic Compatibility

Definition enligt International Electrotechnical Vocabulary:

“The ability of a device, equipment or system to function satisfactorily in its electromagnetic environment without introducing intolerable electromagnetic disturbance to anything in that environment.”

Grundläggande problem:



Lösningsmetoder (behöver ofta kombineras):

- ▶ Minska störningarna från skurken (emission).
- ▶ Minska känsligheten hos offret (immunitet).
- ▶ Minska kopplingsvägarna.

De kommande föreläsningarna fördjupar detta.

Många störningar ännu inte i standarder

Table 1.1 Disturbance phenomena

Electromagnetic disturbance phenomena	Coverage in EMC standards	
	Emissions	Immunity
Conducted low frequency phenomena (< 9kHz)		
Harmonics and interharmonics	Increasing	None
Signalling voltages	Existing	None
Voltage fluctuations, dips and interruptions	Increasing	Increasing
Voltage unbalance	None	None
Power frequency variations	None	None
Induced low frequency voltages	None	Rare
DC in AC networks	None	None
Radiated low frequency phenomena (<9kHz)		
Magnetic fields	Rare	Rare
Electric fields	None	None
Conducted high frequency phenomena (>9kHz)		
Induced CW voltages or currents	Widespread	Increasing
Unidirectional and oscillatory transients	None	Widespread
Radiated high frequency phenomena (>9kHz)		
Magnetic fields	Rare	None
Electric fields	None	None
CW electromagnetic fields	Widespread	Widespread
Transient electromagnetic fields	None	None
Electrostatic discharge	N/A	Widespread

* excepting the discontinuous disturbance provisions of EN 55014

Från "EMC for Systems and Installations", Tim Williams och Keith Armstrong, tillgänglig som e-bok via biblioteket.

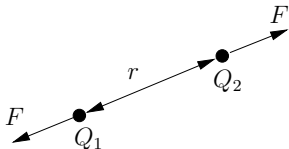
Se även en ytterligare bok av Tim Williams, "EMC for product designers". <http://www.lub.lu.se>

Outline

- 1 Introduktion
- 2 Elektriska fält**
- 3 Kapacitans
- 4 Kapacitiva kopplingar och skydd
- 5 Sammanfattning

Kraft och laddning

Kraften mellan två kroppar med laddningar Q_1 och Q_2 ges av

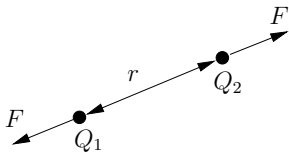


$$F = K_e \frac{|Q_1| \cdot |Q_2|}{r^2}, \quad K_e = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$$

- ▶ Kraft är en *vektor*, som har både storlek och riktning.
- ▶ Enhet för laddning: Coulomb, $[Q] = C = As$.
- ▶ En elektron har laddning $e = 1.602 \cdot 10^{-19} C$, ett åskmoln har några tiotal C.
- ▶ Naturkonstanten ϵ_0 är *permittiviteten i vakuum*,
 $\epsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12} F/m$.
- ▶ Kraften **repellerar** vid **lika** tecken på Q_1 och Q_2 .
- ▶ Kraften **attraherar** vid **olika** tecken på Q_1 och Q_2 .
- ▶ Kraften är riktad längs linjen mellan laddningarna.

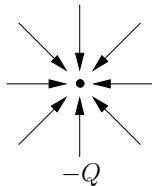
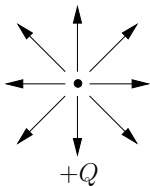
Elektriskt fält

Det elektriska fältet är ett mått på hur en testladdning (Q_2 nedan) påverkas av sin omgivning (representerad av Q_1).



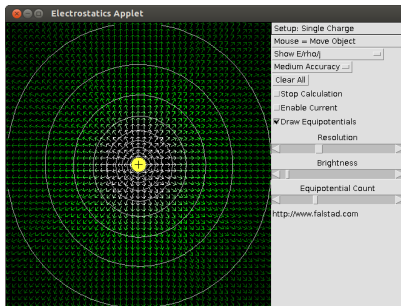
$$F = \underbrace{\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|Q_1|}{r^2}}_{=E} |Q_2| = E \cdot |Q_2|$$

E -fältet har enhet $[E] = \left[\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|Q_1|}{r^2} \right] = \frac{C}{\frac{C}{Vm} m^2} = V/m$, och pekar rakt ut från positiv laddning och rakt in mot negativ.

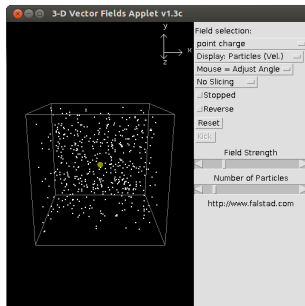


Fältet har olika storlek och riktning i olika punkter i rummet!

Visualisering av elektriska fält



2D



3D

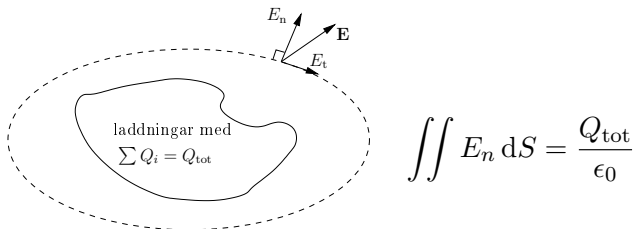
En samling java-program finns tillgängliga för att visualisera elektriska fält, och hur de påverkar en samling testladdningar.

<http://falstad.com/mathphysics.html>

Se särskilt avdelningen "Electricity and Magnetism: Statics".

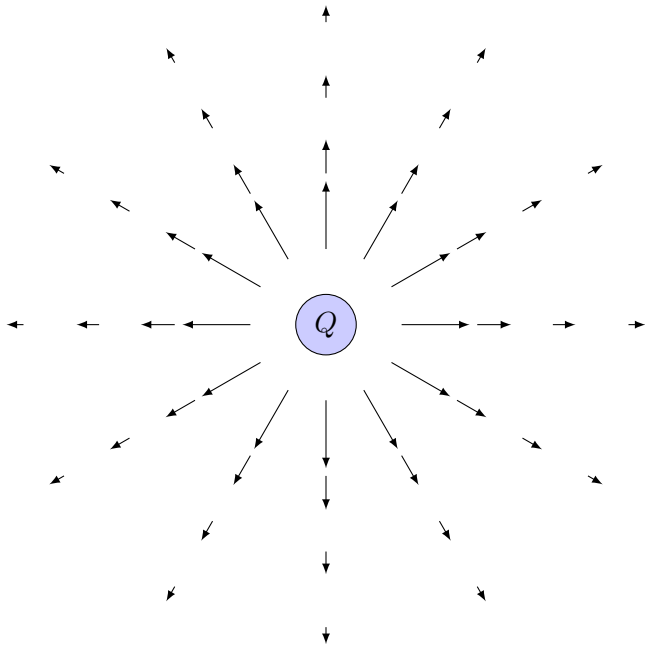
Gauss lag

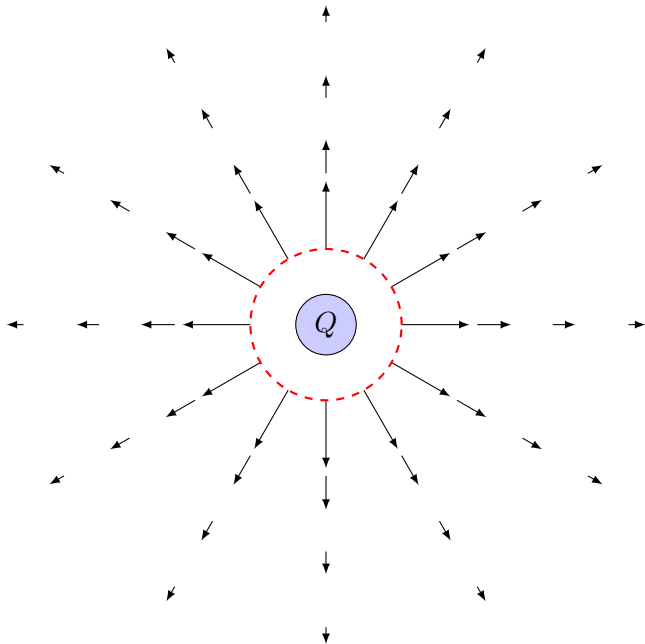
Det finns ett allmänt förhållande mellan laddning och elektriskt fält som kallas Gauss lag:



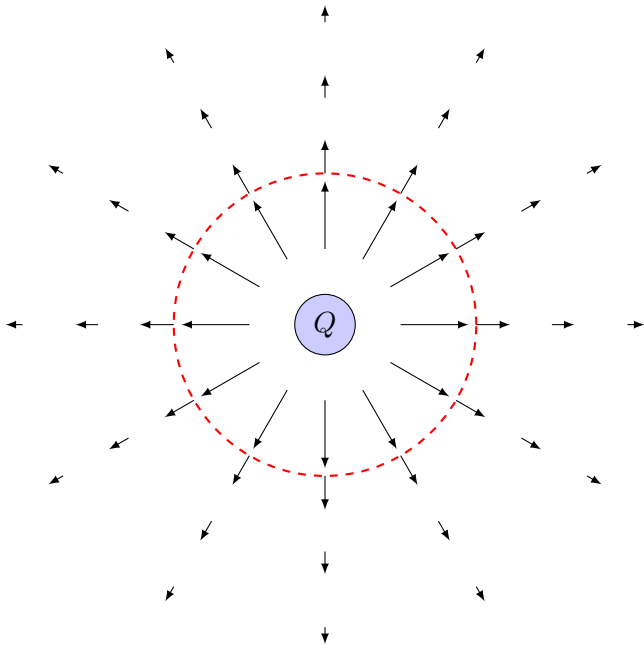
I ord: *totala utflödet (integralen av normalkomponenten E_n) genom en yta som omsluter laddningsfördelningen motsvaras av den inneslutna laddningen.*

Då hela systemet är inneslutet i ett material, ersätts ϵ_0 med $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$, där *relativa permittiviteten* är en materialkonstant, typiskt $1 \leq \epsilon_r \leq 5$.

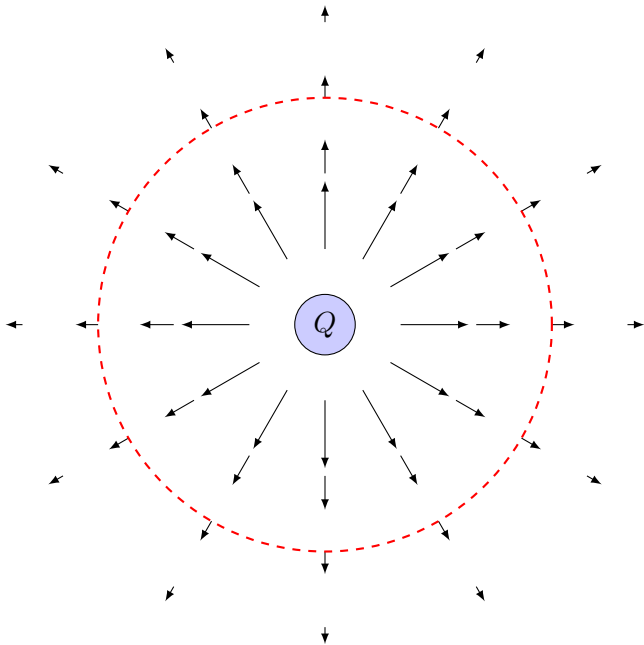




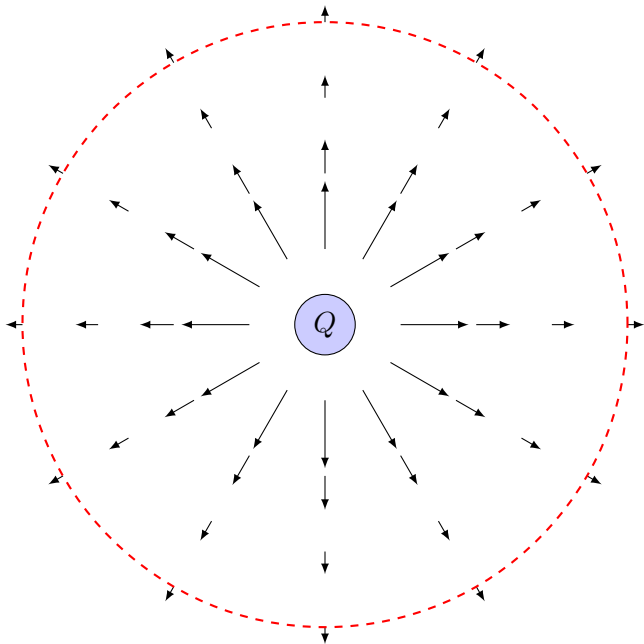
Integralen $\iint E_n dS = Q/\epsilon_0$ oavsett storlek på integrationsytan.



Integralen $\iint E_n dS = Q/\epsilon_0$ oavsett storlek på integrationsytan.

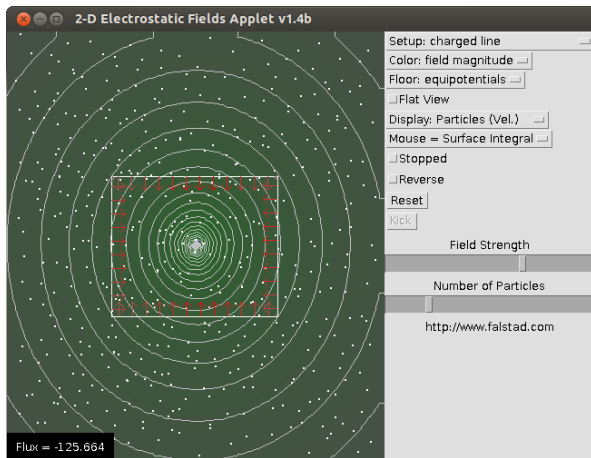


Integralen $\iint E_n dS = Q/\epsilon_0$ oavsett storlek på integrationsytan.



Integralen $\iint E_n dS = Q/\epsilon_0$ oavsett storlek på integrationsytan.

Visualisering av Gauss lag



2D-programmet kan räkna ut flödesintegralen genom en godtycklig rektangulär yta.

Avståndsberoende

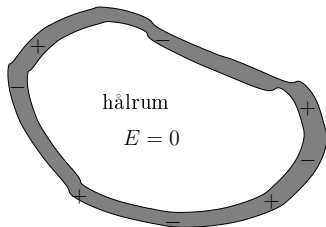
Med hjälp av Gauss lag kan vi härleda följande formler för fältet från

- ▶ Punktladdning Q : $E = \frac{Q}{\epsilon_r \epsilon_0 4\pi r^2} \sim \frac{1}{r^2}$
(samma flöde genom alla sfärytor, $A = 4\pi r^2$).
- ▶ Linjeladdning $\rho_\ell = Q/\ell$: $E = \frac{\rho_\ell}{\epsilon_r \epsilon_0 2\pi r} \sim \frac{1}{r}$
(samma flöde genom alla cylindrars mantelyta, $A = 2\pi r\ell$).
- ▶ Ytladdning $\rho_S = Q/A$: $E = \frac{\rho_S}{\epsilon_r \epsilon_0 2} \sim \text{konstant}$
(samma flöde genom alla ytor A ovanför och under ytladdningen, totalt $2A$ oberoende av avstånd).

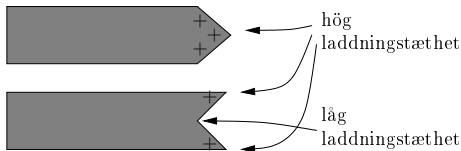
Fälten avtar olika snabbt beroende på hur laddningen är fördelad.

Faradays bur och kantinverkan

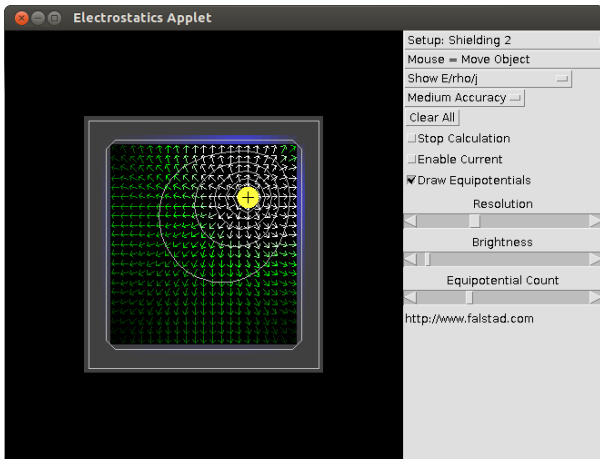
På en metallyta är laddningar lättrorliga och fördelar sig så kraftverkan (E) blir noll. Särskilt medför detta att fältet endast kan peka i normalriktningen till ytan i det omgivande mediet.



Laddningar tenderar att samlas vid spetsar och fly från inbuktningar.

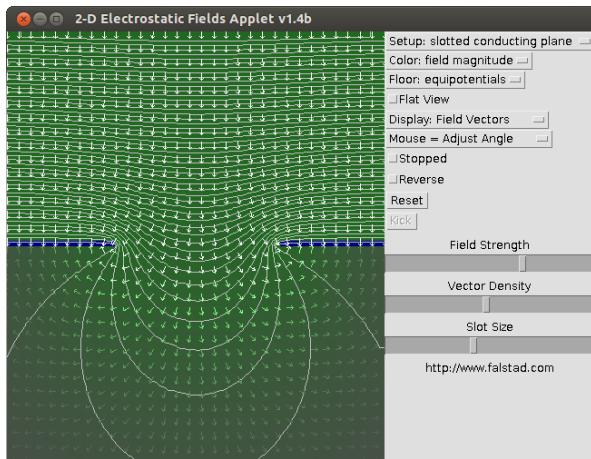


Visualisering av skärmning



"Shielding 2". En jordad metallbur i närvaro av en laddning. Det går att flytta runt laddningen samt lägga till eller ta bort pixlar av metall. Färgen på burens yta visar ytladdningen.

Läckage genom ett hål



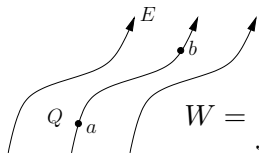
"Setup: slotted conducting plane". Om buren har ett hål så läcker fältet igenom, beroende på hålets storlek (kan varieras i programmet).

Outline

- 1 Introduktion
- 2 Elektriska fält
- 3 Kapacitans**
- 4 Kapacitiva kopplingar och skydd
- 5 Sammanfattning

Potential

Den elektriska potentialen svarar mot arbetet för att flytta en laddning i ett elektriskt fält:



The diagram shows three curved lines representing electric field lines, labeled with E and arrows pointing upwards and to the right. Two points, a and b , are marked on the field lines. Point a is on the leftmost line, and point b is on the middle line, higher up. A charge Q is indicated near point a .

$$W = \int_a^b \mathbf{F} \cdot d\boldsymbol{\ell} = \int_a^b Q\mathbf{E} \cdot d\boldsymbol{\ell} = Q \int_a^b \mathbf{E} \cdot d\boldsymbol{\ell} = Q(V_a - V_b)$$

Potentialändringen (eller spänningen) mellan a och b är

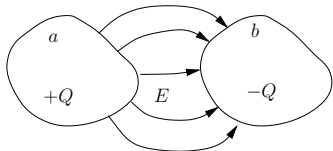
$$V_a - V_b = \frac{W}{Q} = \int_a^b \mathbf{E} \cdot d\boldsymbol{\ell}$$

Enheten är $[V_a] = [E] \cdot [L] = \frac{\text{V}}{\text{m}} \cdot \text{m} = \text{V}$.

Jämför tyngdkraft: arbetet att förflytta sig från en punkt till en annan svarar mot höjdskillnaden.

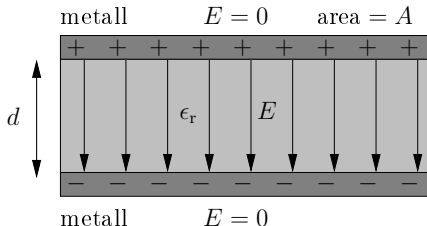
Kapacitans

Kapacitans är ett mått på hur mycket laddning vi kan lagra i ett system (beror på geometri och material):



$$C = \frac{Q}{V_a - V_b}, \quad [C] = \frac{C}{V} = F$$

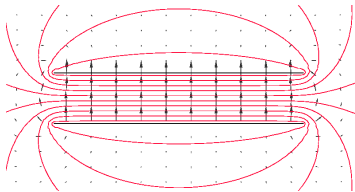
Enklaste modell (plattkondensatorn):



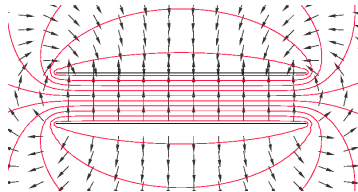
$$C = \epsilon_r \epsilon_0 \frac{A}{d}$$

Noggrannare fältbild för plattkondensatorn

Genom numeriska beräkningar kan en mer exakt fältbild ges (pilar svarar mot E , linjer svarar mot konstant potential).



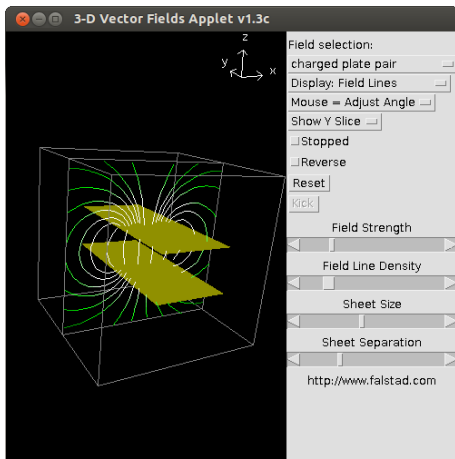
Pilar proportionella mot E



Pilar visar endast riktning

De extra fälten runt kanterna ger en något högre kapacitans.

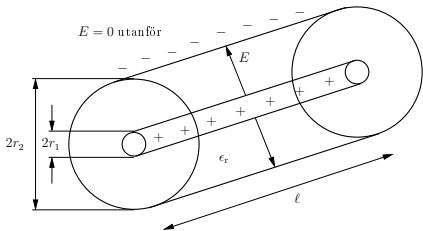
Visualisering för plattkondensatorn



"Charged plate pair". Plattornas storlek och avstånd kan varieras.

Koaxialkabel

Med hjälp av tidigare uttryck för fältet i en cylindrisk geometri ($E = \frac{\rho\ell}{\epsilon_r\epsilon_0 2\pi r}$) kan kapacitansen per längdenhet härledas:



$$\frac{C}{\ell} = \epsilon_r \epsilon_0 \frac{2\pi}{\ln \frac{r_2}{r_1}}$$

Vanlig koaxialkabel RG58: $r_2 = 2.5$ mm, $r_1 = 0.5$ mm, $\epsilon_r = 3$:

$$\frac{C}{\ell} = 3 \cdot 8.854 \cdot 10^{-12} \frac{2\pi}{\ln \frac{2.5}{0.5}} \text{ F/m} = 100 \text{ pF/m}$$

En 1 m lång kabel har alltså kapacitans 100 pF mellan inner- och ytterledare, en 2 m lång har 200 pF etc.

Outline

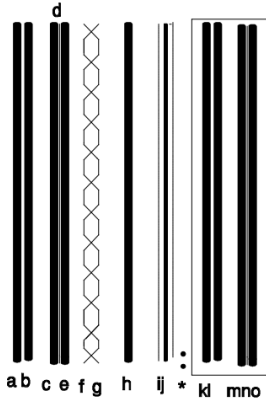
- 1 Introduktion
- 2 Elektriska fält
- 3 Kapacitans
- 4 Kapacitiva kopplingar och skydd**
- 5 Sammanfattning

Typexempel

Vi studerar ett typexempel på hur signaler kan kopplas mellan ledningar som ligger mellan varandra.



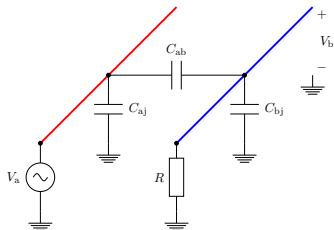
Kretskort



* jordplan

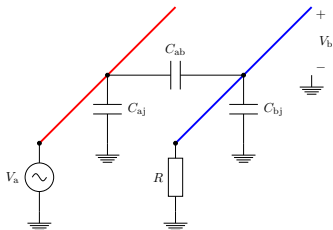
Frekvensberoende kapacitiv koppling

Spänningen V_a representerar en störning, som via kapacitiv koppling ger spänningen V_b .



Frekvensberoende kapacitiv koppling

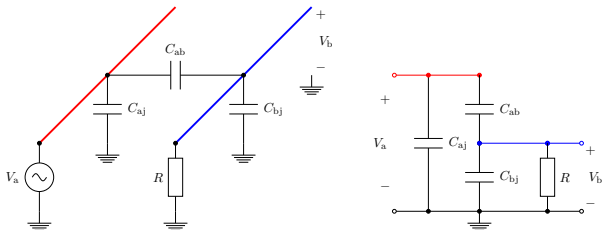
Spänningen V_a representerar en störning, som via kapacitiv koppling ger spänningen V_b .



Spänningen V_b fås genom komplexa metoden och spänningsdelning

Frekvensberoende kapacitiv koppling

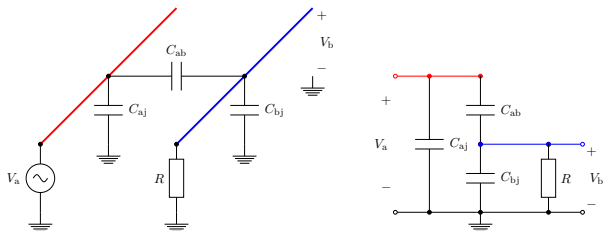
Spänningen V_a representerar en störning, som via kapacitiv koppling ger spänningen V_b .



Spänningen V_b fås genom komplexa metoden och spänningsdelning

Frekvensberoende kapacitiv koppling

Spänningen V_a representerar en störning, som via kapacitiv koppling ger spänningen V_b .

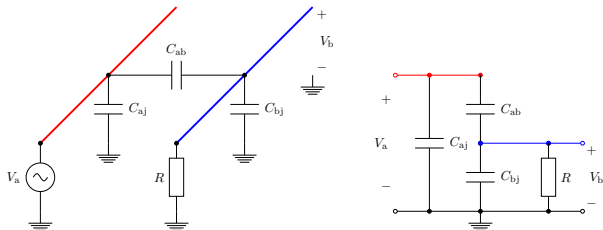


Spänningen V_b fås genom komplexa metoden och spänningsdelning

$$V_b = \frac{R // Z_{C_{bj}}}{R // Z_{C_{bj}} + Z_{C_{ab}}} V_a, \quad Z_C = \frac{1}{j\omega C}, \quad R // Z_C = \frac{R / (j\omega C)}{R + 1 / (j\omega C)} = \frac{R}{1 + j\omega RC}$$

Frekvensberoende kapacitiv koppling

Spänningen V_a representerar en störning, som via kapacitiv koppling ger spänningen V_b .



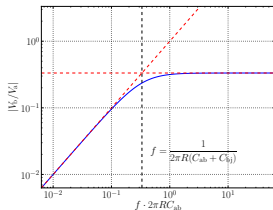
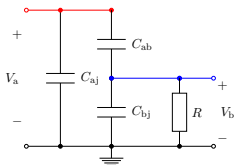
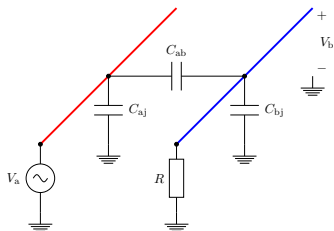
Spänningen V_b fås genom komplexa metoden och spänningsdelning

$$V_b = \frac{R // Z_{C_{bj}}}{R // Z_{C_{bj}} + Z_{C_{ab}}} V_a, \quad Z_C = \frac{1}{j\omega C}, \quad R // Z_C = \frac{R / (j\omega C)}{R + 1 / (j\omega C)} = \frac{R}{1 + j\omega RC}$$

Detta ger $\frac{V_b}{V_a} = \frac{\frac{R}{1 + j\omega RC_{bj}}}{\frac{R}{1 + j\omega RC_{bj}} + \frac{1}{j\omega C_{ab}}} = \frac{R}{R + \frac{1 + j\omega RC_{bj}}{j\omega C_{ab}}} = \frac{j\omega RC_{ab}}{1 + j\omega R(C_{ab} + C_{bj})}$.

Frekvensberoende kapacitiv koppling

Spänningen V_a representerar en störning, som via kapacitiv koppling ger spänningen V_b .



Spänningen V_b fås genom komplexa metoden och spänningsdelning

$$V_b = \frac{R // Z_{C_{bj}}}{R // Z_{C_{bj}} + Z_{C_{ab}}} V_a, \quad Z_C = \frac{1}{j\omega C}, \quad R // Z_C = \frac{R / (j\omega C)}{R + 1 / (j\omega C)} = \frac{R}{1 + j\omega RC}$$

Detta ger $\frac{V_b}{V_a} = \frac{\frac{R}{1 + j\omega RC_{bj}}}{\frac{R}{1 + j\omega RC_{bj}} + \frac{1}{j\omega C_{ab}}} = \frac{R}{R + \frac{1 + j\omega RC_{bj}}{j\omega C_{ab}}} = \frac{j\omega RC_{ab}}{1 + j\omega R(C_{ab} + C_{bj})}$.

Flera möjliga åtgärder

Enligt vår modell blir störningen proportionell mot

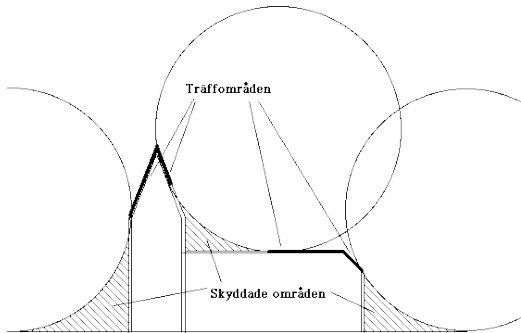
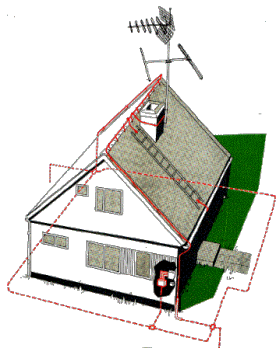
$$\frac{j\omega RC_{ab}}{1 + j\omega R(C_{ab} + C_{bj})}$$

Faktorn ω i täljaren visar att problemen växer med frekvensen.

Uttrycket ger oss flera sätt att minska de kapacitiva störningarna:

- ▶ Minska resistansen R . Svarar mot ingångsresistansen i vår apparat eller resistansen i ledningarna.
- ▶ Minska kapacitansen C_{ab} . Åstadkoms genom att öka avståndet mellan ledarna.
- ▶ Öka kapacitansen C_{bj} så att $C_{bj} \gg C_{ab}$, leder till att uttrycket blir $\approx C_{ab}/C_{bj}$ om $\omega \gg 1/(RC_{bj})$. Åstadkoms genom skärmning.

Ofta är skärmning den effektivaste åtgärden, vilket kräver god jord.



$$\text{Skyddsklotets radie } R = 2 \hat{I} + 30 [1 - \exp(-\hat{I}/6,8)]$$

[R] = meter; [\hat{I}] = kA

Flera delar att ta hänsyn till: takledarsystem, nedledarsystem, jordledarsystem, materialval, högspänningsskydd etc. Se hemsidan ovan för mer detaljerad information.

Outline

- 1 Introduktion
- 2 Elektriska fält
- 3 Kapacitans
- 4 Kapacitiva kopplingar och skydd
- 5 Sammanfattning**

Sammanfattning

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

- ▶ Elektriska fält skapas av laddningar.
- ▶ Kopplingen mellan två skilda metallkroppar kvantifieras med kapacitansen C .
- ▶ Den frekvensberoende kopplingen kan analyseras genom en kretsmodell av systemet.
- ▶ Den främsta åtgärden vid kapacitiva kopplingar är skärmning.