

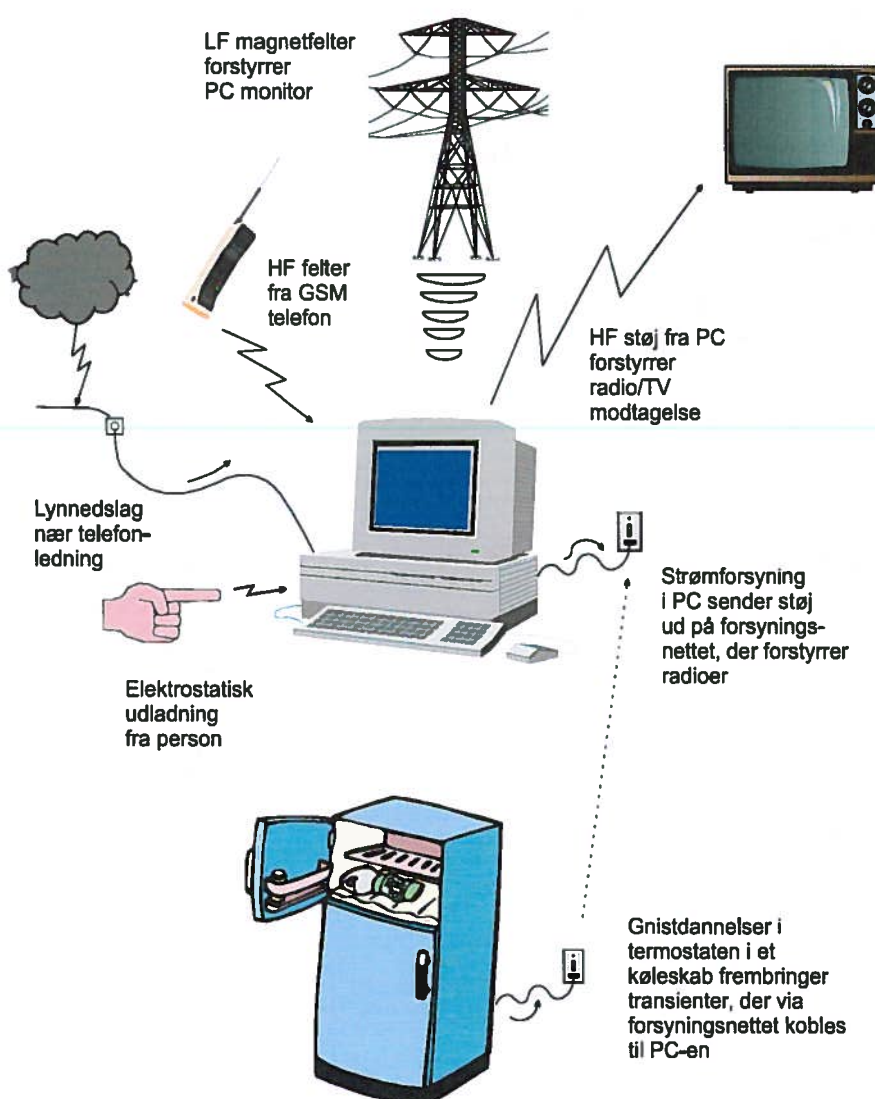


iha.dk
Ingeniørhøjskolen i Århus

T-306

GRUNDLÆGGENDE EMC I

- fænomener og konstruktionsprincipper -



Keld Skov
Lars Mandrup
Leif Johannsen
Per Lysgaard

Udgave 1.0 December 1997
Revision 1.1 November 1998
Revision 1.2 December 1999
Revision 1.3 December 2001

Grundlæggende EMC I - fænomener og konstruktionsprincipper -

©1997, 1998, 1999, 2001 by Keld Skov, Lars Mandrup, Leif Johannsen, Per Lysgaard.

Udgivet af:
INGENIØRHØJSKOLEN I ÅRHUS
Elektro- og Informationsteknologi

1. udgave 1997, 1998, 1999, 2001

Fotografisk, mekanisk eller anden gengivelse
af denne bog eller dele af den er ikke tilladt
uden forfatterens skriftlige tilladelse ifølge
gældende dansk lov om ophavsret.

Kopiering er dog tilladt i overensstemmelse
med overenskomst mellem
Undervisningsministeriet og Copy-Dan.

Forfattere: Keld Skov, Lars Mandrup, Leif Johannsen, Per Lysgaard.

Trykt på Ingeniørhøjskolen i Århus.

Bogen er udgivet med støtte fra
Ingeniøruddannelsernes EMC Netværk.

ISBN 87 - 986161 - 5 - 3

Bogen kan rekvireres hos:
Teknisk Boglade
Ingeniørhøjskolen i Århus
Dalgas Avenue 2
8000 Århus C
Tlf: 86 12 36 99
Fax: 86 12 37 30
Email: teknisk-boglade@iha.dk

Eller ved henvendelse til:
Lars Mandrup
Ingeniørhøjskolen i Århus
Dalgas Avenue 2
8000 Århus C
Tlf: 87 30 24 40
Fax: 87 30 27 31
Email: lma@iha.dk

Side 21 – 32 incl.

3. Koblingsmekanismer

EMC-problemer kan kaldes et trekants drama. EMC-problemer kan nemlig kun opstå, hvis der er 3 aktører til stede:

- en støjkilde
- en koblingsvej for støjen
- et offer



Figur 3.1.
EMC - et trekantdrama.

Der skal selvfølgelig være en **støjkilde**, der udsender den elektromagnetiske støj, og et **offer**, som kan blive generet af den. Kilde og offer kan være dele af samme apparat/print, eller det kan være to uafhængige apparater eller systemer, men der skal altid være en **koblingsvej** for støjen, så den kan blive koblet fra støjkilden til offeret.

Hvis én af disse dele mangler, er der ikke noget EMC-problem. Man kan altså opnå kompatibilitet på tre måder:

1. Støjkilde: Minimere **emissionen** af støj.
2. Koblingsveje: Afskære **koblingsvejene** for støjen.
3. Offer: Gøre offeret (apparatet) **immunt** overfor støj.

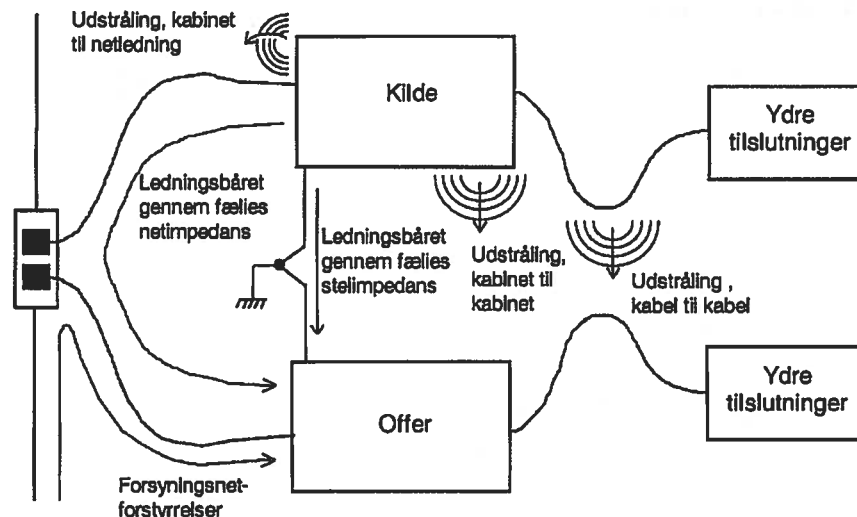
Det samme apparat/system kan være kilde i én situation og offer i en anden situation. Det kan altså være både kilde for støj og offer for støj. En forbedring af apparatets EMC-egenskaber vil dog ofte virke både på udsendelsen og optagelsen af støj.

Vigtigt inden for EMC er det at kende de forskellige støjtyper og deres koblingsveje og koblingsmekanismer fra støjkilden til et muligt offer. Støjtyperne kan groft inddeles i to typer:

- Støjtyper:
- feltbåret elektromagnetisk støj
 - galvanisk eller ledningsbåret støj

Koblingsmekanismerne kan være meget komplicerede, men vil være sammensatte af følgende elementer:

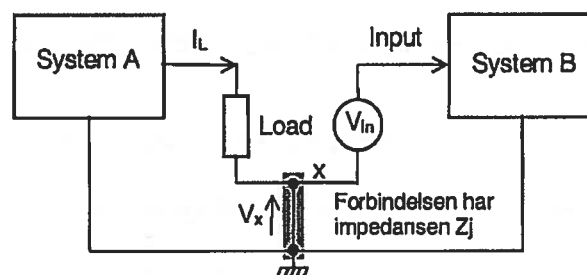
- Koblingsmekanismer:
- impedanser i fælles strømveje
 - induktiv og kapacitiv kobling mellem ledninger/printbaner/kabinetter
 - ledningsstykker og strømsløjfer kan virke som antenner, der udsender og opfanger elektromagnetisk feltbåret støj
 - støj direkte overført via signal- og netledninger



Figur 3.2.
Koblingsveje.

3.1. Impedanser i fælles strømveje

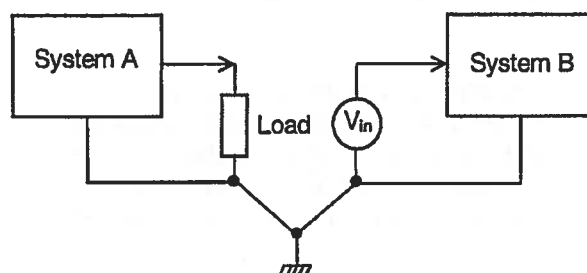
En almindelig kilde til interferens er impedanser i fælles ledningsforbindelser, f.eks. fælles jordledninger og fælles spændingsforsyninger.



Figur 3.3.
Fælles jordimpedans.

System A og system B på fig. 3.3 er begge koblet til jord via knudepunktet X. Går der en strøm i_L ud af A via X til jord, vil denne strøm give en spænding $V_x = i_L \cdot Z_j$ i X, hvor Z_j er impedansen af ledningsstykket fra X til jord. Da system B også bruger X som referencepunkt, vil denne spænding koble til indgangen af system B, således at $V_B = V_{in} + V_x$. Dette vil, afhængig af B, kunne føre til en fejl i B.

En mulig løsning af dette problem vil være at konstruere kredsløbene som på figur 3.4, så strømmene fra system A og system B ikke har fælles strømveje.



Figur 3.4.
Afkobling af fælles impedans.

Impedansen Z_l af det fælles lederstykke vil ved lave frekvenser være den ohmske modstand: $R_{DC} = \rho \cdot \ell / A$, hvor ρ er den specifikke modstand, ℓ er lederens længde og A er lederens tværsnitsareal. Er lederstykket en printbane, ses, at jo bredere printbanen er, desto mindre er modstanden, og desto mindre bliver interferensproblemet.

Ved højere frekvenser vil det inducerede magnetfelt inde i lederen fortrænge strømmen fra det indre af lederen ud mod overfladen. Dette kaldes strømfortrængning (eller skineffekten). Det effektive

tværsnitsareal af lederen mindskes derved og modstanden øges. Strømtætheden $\left(j = \frac{di}{dA} \right)$ i dybden x fra lederens overflade er givet ved:

$$j(x) = j_0 \cdot e^{-x/\delta}$$

hvor j_0 er strømtætheden ved overfladen, og indtrængningsdybden δ er givet ved

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\mu \sigma \omega}}$$

$\mu = \mu_r \cdot \mu_0$ er permeabiliteten af ledermaterialet (for de fleste ledere er $\mu \approx \mu_0$), $\sigma = 1/\rho$ er den specifikke ledningsevne af lederen og $\omega = 2\pi f$ er signalets vinkelfrekvens.

I dybden δ er strømtætheden aftaget til ca. 37% af værdien ved overfladen, mens den i dybden 2δ er aftaget til ca. 14%. Langt det meste af strømmen løber således i de yderste 2δ af lederen, og ved beregning af modstanden i lederen kan man antage, at al strømmen løber indenfor 2δ fra overfladen. Indtrængningsdybden δ aftager med stigende frekvens, så jo højere frekvens signalet har, desto mindre er indtrængningsdybden, og desto mindre er det område strømmen løber i. For en kobberleder er $\mu \approx \mu_0$ og $\sigma = 58 \cdot 10^6 (\Omega m)^{-1}$. For $f = 50$ Hz er indtrængningsdybden $\delta \approx 1$ cm for $f = 10$ kHz er $\delta \approx 0,7$ mm, mens for $f = 50$ MHz er $\delta \approx 10 \mu m$. For et 50 MHz signal giver det således ikke en reduktion i den ohmske modstand at benytte ledere, der er mere end ca. $40 \mu m$ tykke.

Ved frekvenser over ca. 10 kHz (afhængig af lederens form og materiale) er det dog ikke den ohmske modstand, der betyder mest for impedansen, men derimod lederens selvinduktion. På grund af det tidsvarierende magnetiske felt i og omkring lederen fra den tidsvarierende strøm i lederen, vil lederen have en selvinduktion. Lederens selvinduktion kan bestemmes ud fra den samlede energi i magnetfeltet i og udenom lederen:

$$L = \frac{2W_B}{i^2}$$

hvor W_B er den totale magnetfeltsenergi, som kan bestemmes fra energitætheden w_B (energi pr. volumen) i magnetfeltet:

$$w_B = \frac{\frac{1}{2} B^2}{\mu_0} \quad \text{og} \quad W_B = \int w_B dV$$

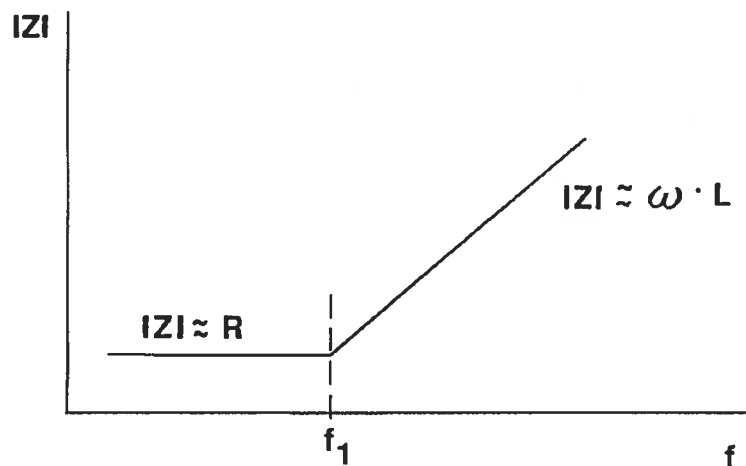
Med en passende approximation kan selvinduktionen i en cylinderformet leder med diameteren d og længden ℓ findes til:

$$L = 0,2 \cdot \left[\ln \left(\frac{4\ell}{d} \right) - \frac{3}{4} \right] \cdot \ell \quad [\text{nH}]$$

hvor ℓ og d indsættes i mm.

For ledere med en diameter op til ca. 10 mm ligger selvinduktionen i intervallet 1.0 - 1.5 $\mu H/m$. Ved overslagsberegninger kan selvinduktionen i en tynd ledning eller en smal printbane (op til 3 - 4 mm bredde) sættes til $L \approx 1.5 \mu H/m$ (1.5 nH/mm).

Impedanskarakteristikken af en tynd ledning eller smal printbane vil derfor se nogenlunde således ud:

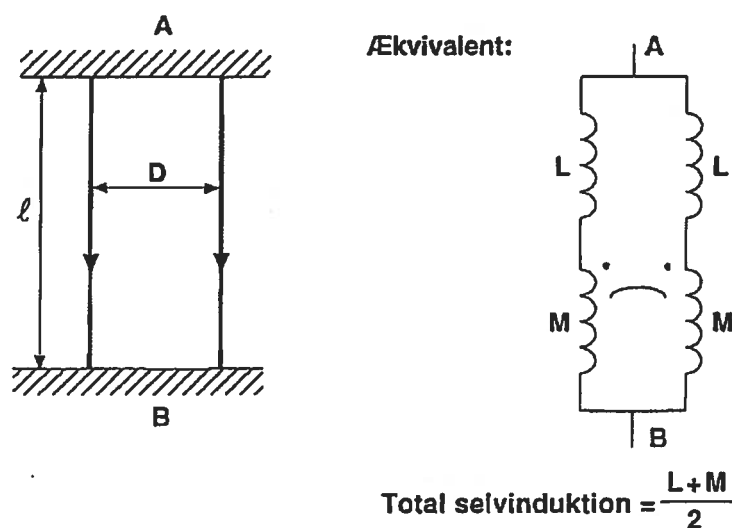


Figur 3.5.
Impedans af tynd leder.

Et ledende plan (stelplan) har næsten ingen selvinduktion. Impedansen af et stelplan er derfor bestemt af den ohmske modstand i stelplanet. På grund af strømfortrængningen vokser den ohmske modstand med \sqrt{f} . Det betyder, at impedansen i et stelplan vokser langsommere med frekvensen end impedansen af en tynd ledning eller en smal printbane gør. Jo højere frekvensen er, jo lavere er impedansen i et stelplan sammenlignet med impedansen i en ledning/printbane.

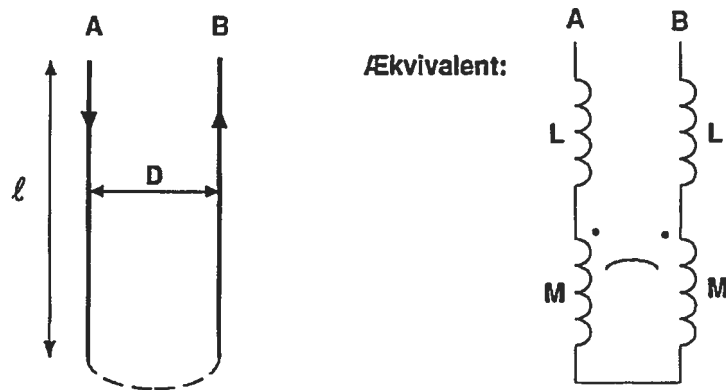
En bred printbane er en mellemting mellem en smal printbane og et stelplan. Jo bredere printbanen, desto lavere er dens selvinduktion (og dens ohmske modstand) og desto lavere er derfor dens impedans. (Se figur 3.9 + 3.10.)

Hvis to eller flere ledere kobles parallelt, vil dette påvirke ledernes samlede selvinduktion, idet der skal tages hensyn til den gensidige induktion M . Deles en strøm mellem to parallelle ledere med stor afstand imellem vil den samlede selvinduktion omtrent halveres. Er afstanden mellem lederne derimod lille, vil den gensidige induktion betyde en stort set uændret selvinduktion i forhold til kun én leder.



Figur 3.6.
Selvinduktion i parallelle ledere med ensrettede strømme.

For to parallelle ledere med ens modsatløbende strømme bevirker den gensidige induktion, at den samlede selvinduktion i ledersløjfen bliver reduceret.

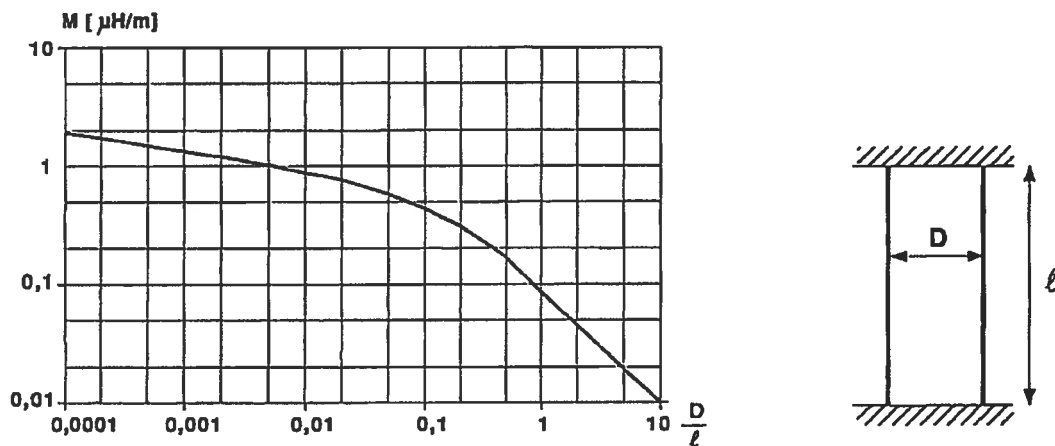


$$\text{Total selvinduktion} = 2 (L - M)$$

Figur 3.7.

Selvinduktion i parallelle ledere med modsatløbende strømme.

Størrelsen af den gensidige induktion mellem to cirkulære parallelle ledere afhænger, som det ses på figur 3.8, af afstanden mellem lederne.



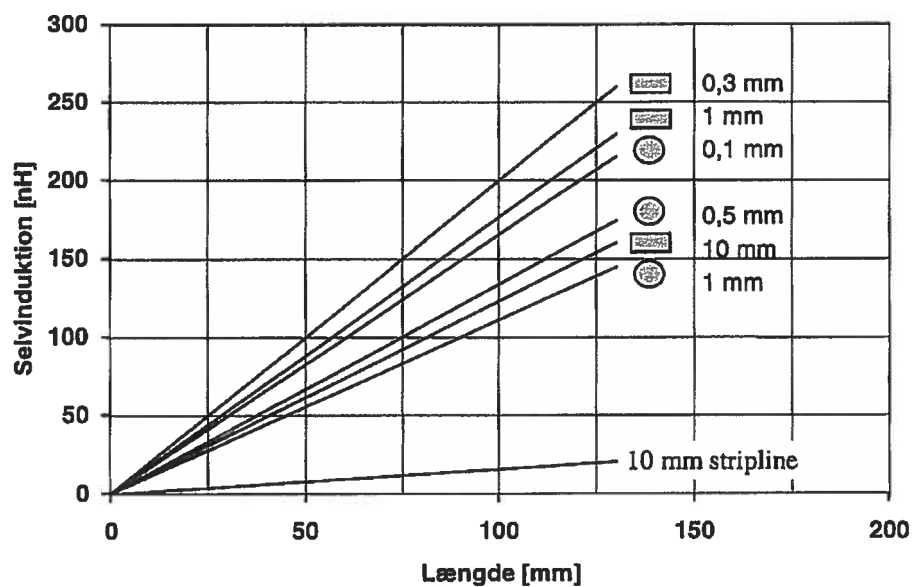
Figur 3.8.

Gensidig induktion mellem cirkulære parallelle ledere.

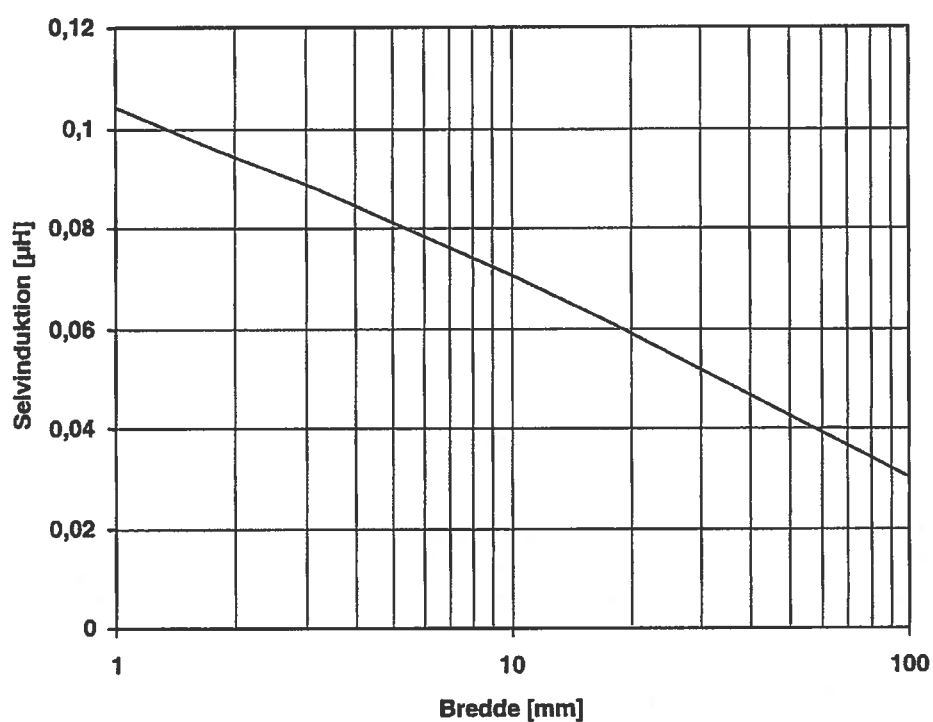
For ledere med en lille indbyrdes afstand er den gensidige induktion stor. Den er af samme størrelse som selvinduktionen for en enkelt leder. Der opnås derfor ikke nogen væsentlig reduktion i den samlede impedans ved at parallelforbinde to ledninger, hvis afstanden mellem dem er lille.

Derimod kan selvinduktionen i en leder, hvor returlederen ligger tæt ved siden af, reduceres væsentligt, idet lederens selvinduktion og den gensidige induktion modvirker hinanden. Dette udnyttes blandt andet i parsnoede ledere og i signalledere, der er placeret tæt ved stelplaner.

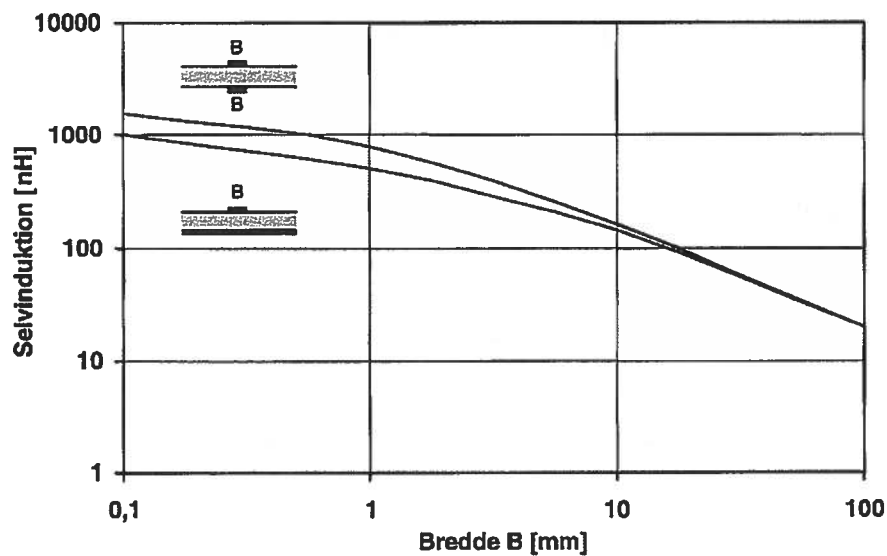
Tilnærmede udtryk for den samlede selvinduktion pr. længdeenhed for ledere og lederpar med forskellig geometri er vist i følgende oversigt og kurver. For lederparrene gælder udtrykkene, når strømmen løber ud gennem den ene leder og retur gennem den anden leder/stelplan.



Figur 3.9.
Selvinduktionen af enkelt leder som funktion af længden for forskellige ledertværsnit.

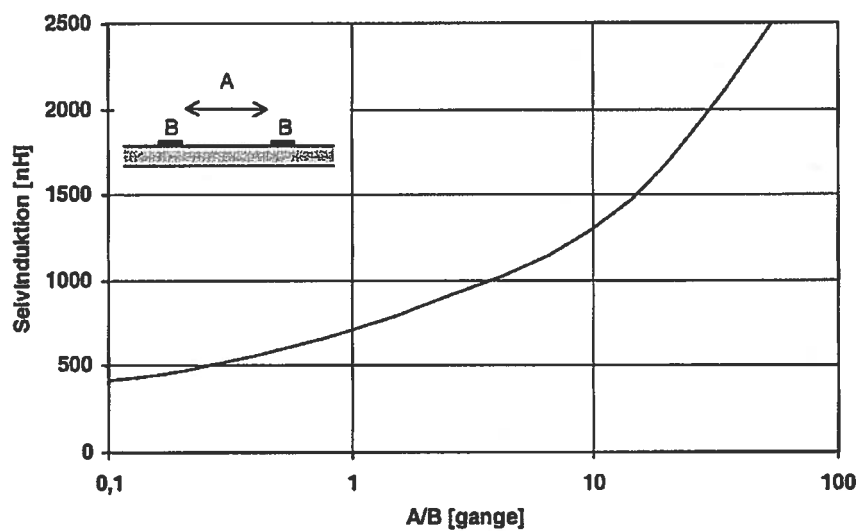


Figur 3.10.
Selvinduktionen som funktion af bredden af et 100 mm langt og 1 mm tykt metalbånd.



Figur 3.11.

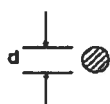
Selvinduktionen i en lederkreds bestående af to parallelle 1 meter lange printbaner over hinanden. Den øverste kurve gælder for to parallelle printbaner, mens den nederste kurve gælder for en printbane med stelplan. Printet er 1,6 mm tykt.



Figur 3.12.

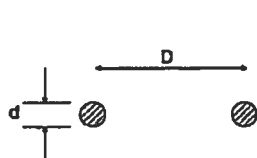
Selvinduktionen i en lederkreds bestående af to parallelle 1 meter lange printbaner med bredde B og afstand A ved siden af hinanden.

En cylindrisk tråd: længde: ℓ



$$L \approx 0,2 \left[\ln \left(\frac{4\ell}{d} \right) - \frac{3}{4} \right] \text{ [nH/mm]}$$

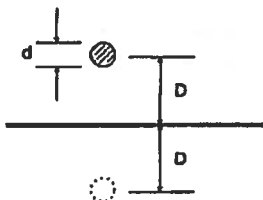
To cylindriske, parallelle tråde:



$$L \approx 0,4\mu_r \ln \frac{D + \sqrt{D^2 - d^2}}{d} \text{ [nH/mm]}$$

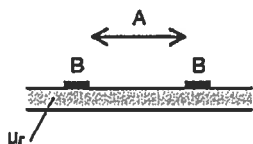
$$M \approx 0,2\mu_r \left[\ln \left(\frac{2\ell}{D} \right) + \frac{D}{\ell} - 1 \right] \text{ [nH/mm]} \quad \text{for} \quad \frac{D}{\ell} \ll 1$$

En cylindrisk tråd parallel med jordplan:



$$L \approx 0,2\mu_r \ln \frac{2D + \sqrt{4D^2 - d^2}}{d} \text{ [nH/mm]}$$

Parallelle, tynde lederbaner (på printplade):



$$L \approx 0,4\mu_r \ln \left[\frac{2(A+B)}{B} \left(1 + \sqrt{1 - \left(\frac{B}{A+B} \right)^2} \right) \right] \text{ [nH/mm]}$$

En tynd lederbane parallel med jordplan (på printplade):



$$L \approx 0,2\mu_r \ln \frac{8D}{B} \text{ [nH/mm]} \quad \text{for} \quad \frac{B}{D} \leq 1$$

$$L \approx 0,2\mu_r \ln \left(0,9 + 6,8 \frac{D}{B} \right) \text{ [nH/mm]} \quad \text{for} \quad 1 \leq \frac{B}{D} \leq 4$$

$$L \approx 0,2\mu_r \ln \left(1 + 2\pi \frac{D}{B} \right) \text{ [nH/mm]} \quad \text{for} \quad 4 \leq \frac{B}{D}$$

Tabel 3.1.

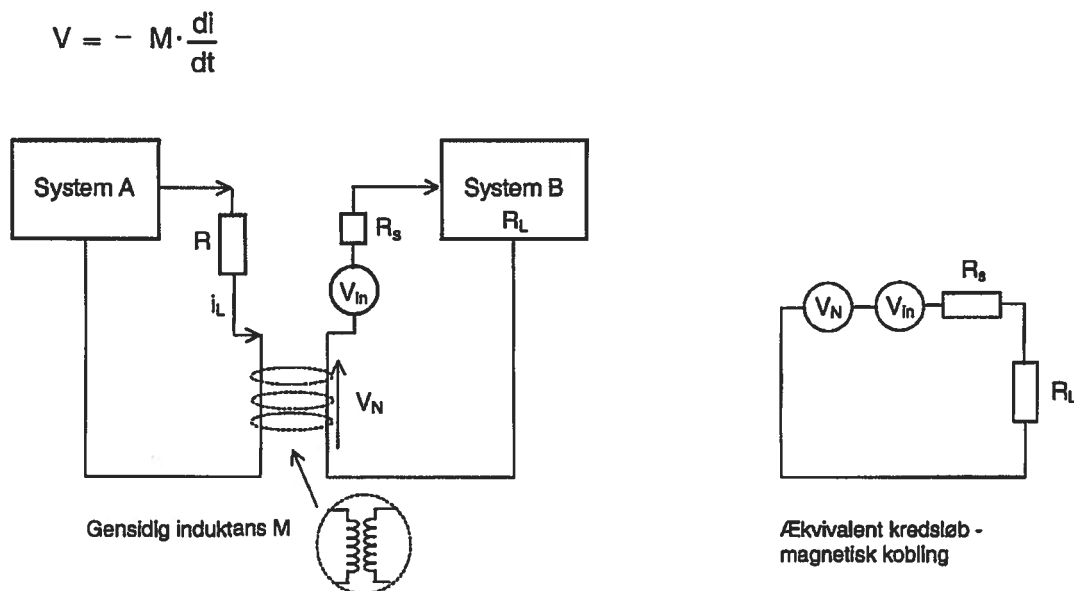
Udtryk til beregning af selvinduktioner i ledere og lederpar.

Bemærk at ovenstående udtryk og betragtninger er kun gyldige, når længden af en leder ikke overstiger ca. 1/10 bølgelængde af det signal, der transmitteres gennem lederen. Lange ledere skal betragtes som transmissionsledninger, og impedanserne bestemmes for sådanne.

3.2. Induktiv kobling

Selv hvor der ikke er en direkte forbindelse mellem to ledninger, er der fælles impedanser. Teoretisk set er alle **knudepunkter** koblet til hinanden via **fælles kapacitive** koblinger, og alle **strømsløjfer** er koblet til hinanden via **gensidige induktanser**. I praksis er det dog kun de nærmeste knudepunkter og strømsløjfer, der er koblet sammen, da koblingerne aftager kraftigt med afstanden ($\sim 1/r^2 - 1/r^3$).

To strømsløjfer vil påvirke hinanden via deres gensidige induktion:



Figur 3.13.
Induktiv kobling.

En strømvariation i system A på figur 3.13 vil inducere en støjspænding V_N i serie med V_{in} i system B, og vil dermed kunne forstyrre system B, uden at der er direkte forbindelse mellem de to systemer.

Da den induktivt overførte støj er spændingsstøj, er den specielt et problem for lavimpedansede kredsløb, idet spændingsstøjen vil give anledning til en stor fejlstrøm gennem system B.

Størrelsen af spændingsstøjen afhænger af den gensidige induktion M, som igen afhænger af geometrien af kredsløbene. Jo større strømsløjferne er, jo større er M. Ligger strømsløjferne lige over for hinanden, giver dette også en stor M. Men M aftager hurtigt med afstanden mellem strømsløjferne, da magnetfeltet typisk aftager som $1/r^2 - 1/r^3$.

Spændingsstøjens størrelse afhænger også af hastigheden af strømændringen, $\frac{di}{dt}$, i det støjende kredsløb.

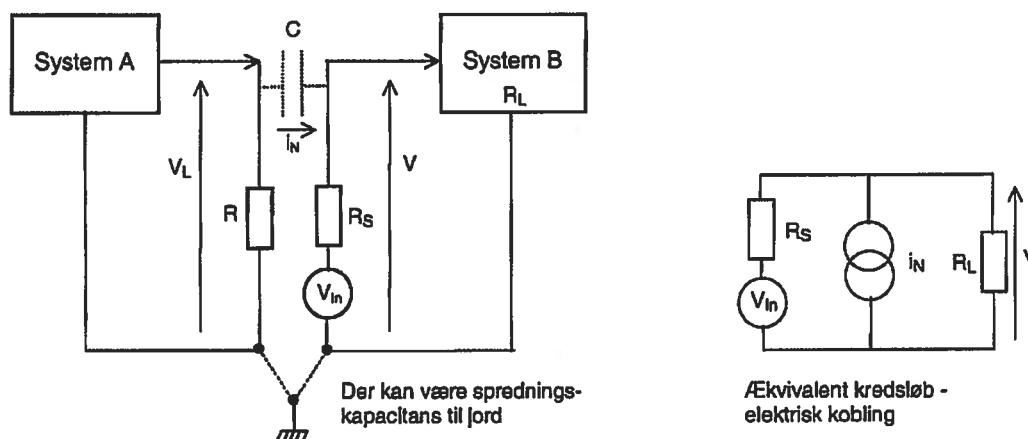
Højfrekvente og især digitale kredsløb er de værste støjkilder med hensyn til den induktive kobling.

Induktivt overført støj kan bekæmpes ved at lave så små strømsløjfer som muligt, placere støjende kredsløb (specielt digitale) og støjfølsomme kredsløb så langt fra hinanden som muligt og undgå hurtigere strømændringer end højst nødvendigt. Specielt vil et gennemgående stelplan på et print reducere den induktive kobling for høje frekvenser, idet strømsløjferne, dannet af printbanerne på printet og returvejene i det gennemgående stelplan, vil være meget små.

3.3. Kapacitiv kobling

Mellem to ledere (ledninger/printbaner/komponenter) er der en kapacitet. Det skyldes, at en ladning (spænding) på en leder vil tiltrække en tilsvarende ladning med den modsatte polaritet på en anden leder. En spændingsændring vil således inducere en ladningsændring på den anden leder og derved give anledning til en støjstrøm. Den capacitive kobling er givet ved:

$$i = C \cdot \frac{dV}{dt}$$



Figur 3.14.
Kapacitiv kobling.

En spændingsvariation V_L i system A på figur 3.14 vil inducere en kapacitiv støjstrøm i_N i system B, og vil dermed kunne forstyrre system B, uden at der er direkte forbindelse mellem de to systemer.

Da den kapacitivt overførte støj er strømstøj, er den specielt et problem for højimpedansede kredsløb, idet strømstøjen vil give anledning til en stor fejlspænding på system B.

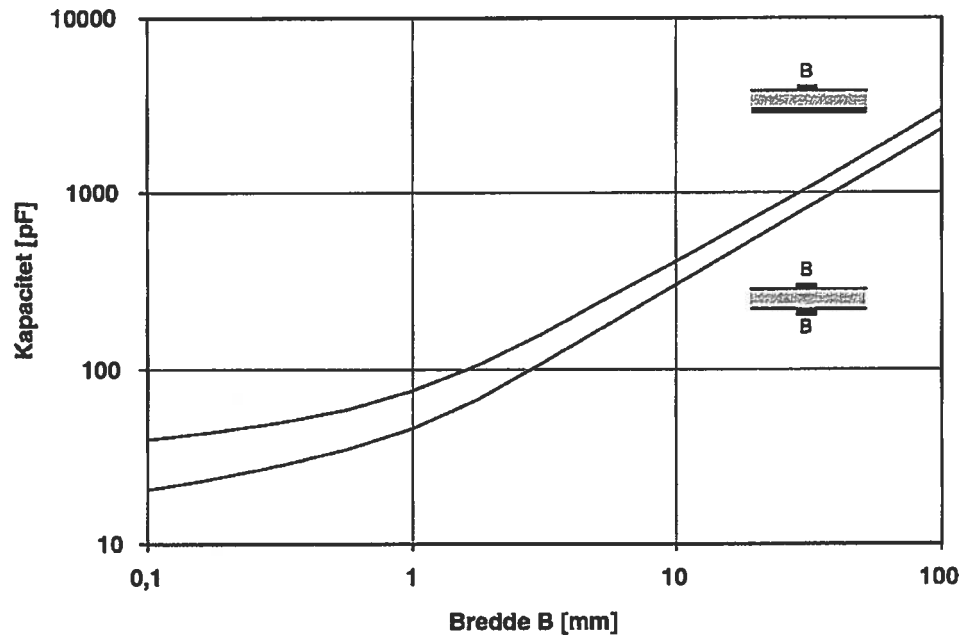
Størrelsen af strømstøjen afhænger af koblingskapaciteten C mellem lederne. Koblingskapaciteten afhænger igen af knudepunktens geometriske udformning og indbyrdes placering. To ledere placeret nær hinanden kan sammenlignes med en pladekapacitor, hvor kapaciteten er givet ved:

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

hvor ϵ_r er den relative permittivitet af materialet mellem pladerne, A er arealet af pladerne og d er afstanden mellem dem. De detaljerede udtryk er betydeligt mere komplicerede, men generelt gælder, at jo større ledernes areal er, og jo tættere de er på hinanden, desto større er koblingskapaciteten mellem lederne.

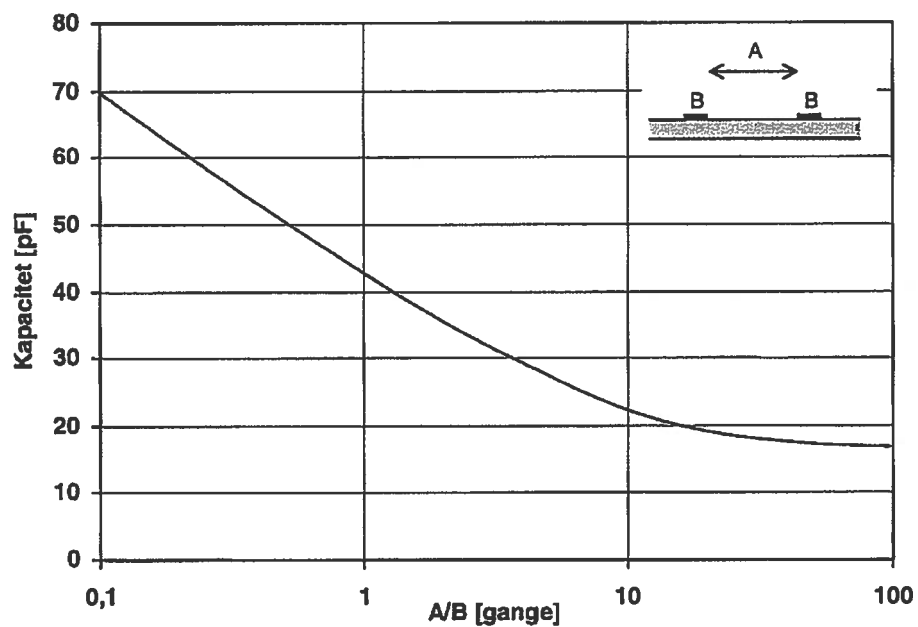
Strømstøjens størrelse afhænger også af hastigheden af spændingsændringen, $\frac{dV_L}{dt}$, i det støjende kredsløb. Højfrekvente og især digitale kredsløb er de værste støjklender med hensyn til den capacitive kobling.

Kapacitivt overført støj kan således bekæmpes ved at undgå hurtigere spændingsændringer end højst nødvendigt og ved at placere støjende kredsløb (specielt digitale) og støjfølsomme kredsløb så langt fra hinanden som muligt. Specielt skal man ikke trække printbaner med henholdsvis støjende og følsomme signaler tæt op ad hinanden. Eventuelt kan man lægge en stelforbundet printbane (guard) mellem de to printbaner, hvorved koblingen mellem de to baner mindskes betydeligt.



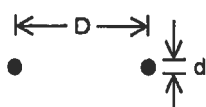
Figur 3.15.

Kapaciteten mellem to 1 meter lange printbaner/stelplan over hinanden. Den nederste kurve gælder for to parallelle printbaner, mens den øverste kurve gælder for en printbane med stelplan. Printet er 1,6 mm epoxyglasfiber ($\epsilon_r \approx 4,8$).

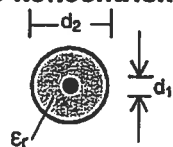


Figur 3.16.

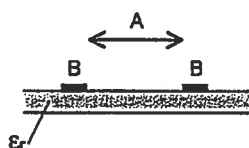
Kapaciteten mellem to 1 meter lange printbaner med bredde B og afstand A ved siden af hinanden på samme side af et 1,6 mm epoxyglasfiberprint ($\epsilon_r \approx 4,8$).

To cylindriske, parallelle tråde:

$$C \cong \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \pi \cdot \ell}{\cosh^{-1}\left(\frac{D}{d}\right)} \quad [F]$$

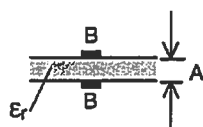
To koncentriske, cylindriske ledere:

$$C \cong \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot 2\pi \cdot \ell}{\ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right)} \quad [F]$$

Parallelle, tynde lederbaner ved siden af hinanden (på printplade):

$$\epsilon_{\text{reff}} = \frac{1 + \epsilon_r}{2}$$

$$C \cong \frac{\epsilon_{\text{reff}} \cdot \epsilon_0 \cdot \pi \cdot \ell}{\ln\left[2\left(1 + \frac{A}{B}\right)\left(1 + \sqrt{1 - \left(\frac{B}{A+B}\right)^2}\right)\right]} \quad [F] \quad \text{for} \quad \frac{B}{A} \leq 4$$

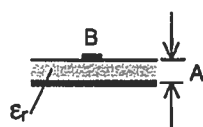
Parallelle, tynde lederbaner over hinanden (på printplade):

$$\epsilon_{\text{reff}} = \epsilon_r - \frac{\epsilon_r - 1}{2} \cdot e^{-0,256 \frac{B}{A}}$$

$$C \cong \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_{\text{reff}} \cdot \pi \cdot \ell}{\ln\left(\frac{4A}{B}\right)} \quad [F] \quad \text{for} \quad \frac{B}{A} \leq 0,5$$

$$C \cong \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_{\text{reff}} \cdot \pi \cdot \ell}{\ln\left(0,9 + \frac{3,4 \cdot A}{B}\right)} \quad [F] \quad \text{for} \quad 0,5 \leq \frac{B}{A} \leq 2$$

$$C \cong \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_{\text{reff}} \cdot \pi \cdot \ell}{\ln\left(1 + \frac{\pi \cdot A}{B}\right)} \quad [F] \quad \text{for} \quad \frac{B}{A} \geq 2$$

Tynde lederbaner parallel med jordplan (på printplade):

$$\epsilon_{\text{reff}} = 2 \left(\epsilon_r - \frac{\epsilon_r - 1}{2} \cdot e^{-0,127 \frac{B}{A}} \right)$$

$$C \cong \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_{\text{reff}} \cdot \pi \cdot \ell}{\ln\left(\frac{8A}{B}\right)} \quad [F] \quad \text{for} \quad \frac{B}{A} \leq 1$$

$$C \cong \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_{\text{reff}} \cdot \pi \cdot \ell}{\ln\left(0,9 + \frac{6,8 \cdot A}{B}\right)} \quad [F] \quad \text{for} \quad 1 \leq \frac{B}{A} \leq 4$$

$$C \cong \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_{\text{reff}} \cdot \pi \cdot \ell}{\ln\left(0,9 + \frac{2 \cdot \pi \cdot A}{B}\right)} \quad [F] \quad \text{for} \quad \frac{B}{A} \geq 4$$

Tabel. 3.2.

Koblingskapaciteten mellem to printbaner/stelplan. ℓ er printbanens længde i meter.