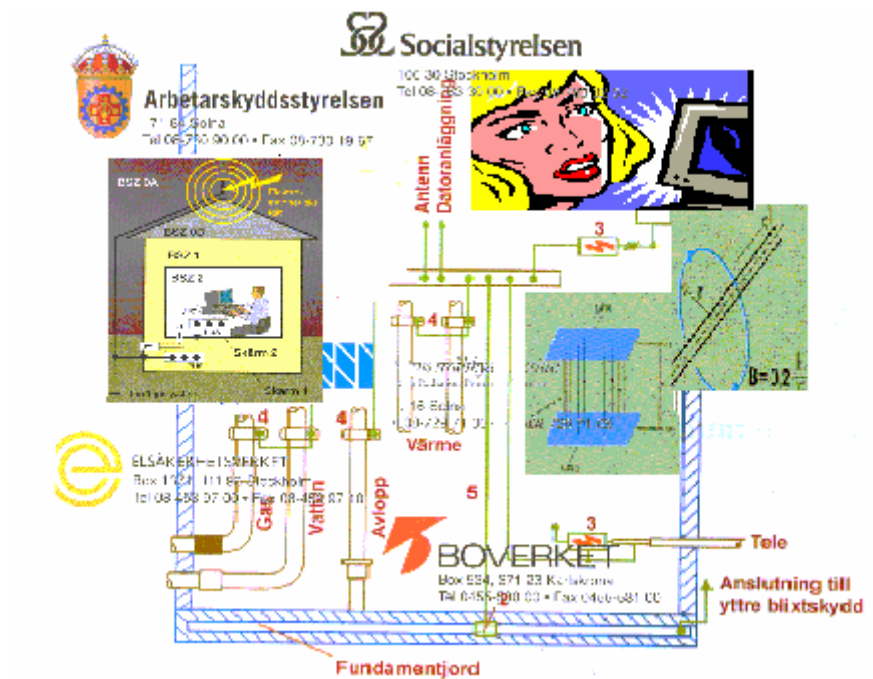


Potentialutjämnning med mera

EMC och åskskydd i byggnader,
medicinska konsekvenser och
reduktionsförslag till elektriska och magnetiska fält



Examensarbete av
Abdorrezza H. Toosi
e99aho
Lunds Tekniska Högskola
Hösten 2002

Förord

Följande arbete innehåller tre kapitel:

Kapitel 1 handlar om potentialutjämning i byggnader. Relevanta lagar och föreskrifter går genom. Potentialutjämnings fördelar och eventuella nackdelar tas upp. Även sambandet mellan jordning, potentialutjämning, åskskydd och elektromagnetisk kompatibilitet (EMC) diskuteras. Teoriavsnittet ger grunden för att förstå och lösa relevanta problem inom området.

Kapitel 2 är till stor del en genomgång och sammanfattning av de studier som har gjorts på området medicinska konsekvenser av elektromagnetiska fält. Både lågfrekventa och radiofrekventa fält har berörts.

Kapitel 3 tar upp ett verkligt projekt och ger en uppskattning av de magnetiska fält som kan förekomma. Även reduktionsmetoder diskuteras.

Abdorreza H. Toosi
Lunds Tekniska Högskola

Innehållsförteckning

Kapitel 1: Potentialutjämnning

1.1 Inledning 9

1.1.1 Vad är potentialutjämnning enligt föreskrifterna?

1.2 Definitioner och förkortningar 9

1.3 Potentialutjämnning, elsäkerhetsmässigt utförande 10

1.3.1 Krav och rekommendationer angående utförandet av huvudpotentialutjämnning

1.3.2 Krav och rekommendationer angående utförandet av kompletterande potentialutjämnning

1.3.3 Dimensionering och val av huvudpotentialutjämningsledare

1.3.4 Dimensionering och val av kompletterande potentialutjämningsledare

1.3.5 Färgmärkning av potentialutjämningsledare

1.3.6 Potentialutjämningsledares längd

1.3.7 Kontroll och provning av potentialutjämningsledare

1.3.8 Krav och rekommendationer om utförandet av kompletterande potentialutjämnning

1.3.8.1 En stationär apparat matas från undercentral, inom räckhåll finns vattenrör

1.3.8.2 Två stationära apparater skyddsjordade i samma central

1.3.8.3 En undercentral matar både stationära och handhållna apparater

1.4 Vissa andra situationer där potentialutjämnning är fördelaktig 20

1.4.1 Kortslutning mellan fas och PEN-ledare

1.4.2 PEN avbrott i huvudledning

1.4.3 Till- och frånslagning på nätet

1.4.4 Elektrostatisk urladdning

1.4.5 Magnetiska fält i 4- och 5-ledarsystem

1.5 Potentialutjämnning i befintliga byggnader 22

1.5.1 Frågor och svar om krav och rekommendationer på potentialutjämnning i äldre anläggningar

1.5.1.1 Retroaktiv krav vid ombyggnad av elektriska systemet

1.5.1.2 Endast delvis utförd potentialutjämnning

1.5.1.3 Utförandet av potentialutjämnning i en äldre anläggning

1.5.1.4 En ny central som matas från, en annan central i en gammal byggnad

1.6 Teorigenomgång 24

1.6.1 Kapacitiv koppling

1.6.2 Kapaciv koppling, med skärm

- 1.6.3 Induktiv koppling
 - 1.6.3.1 Ömsesidig induktans
 - 1.6.3.2 Sammanfattning av reduktion av induktiv koppling, utan skärm
- 1.6.4 Induktiv koppling, med skärm
 - 1.6.4.1 Skärmning av en störd krets
 - 1.6.4.2 Skärmning av en störande krets
 - 1.6.4.3 Skärmning för lägre frekvenser
 - 1.6.4.4 Sammanfattning av skärmens effekt för kablar
- 1.6.5 Konduktiv koppling
- 1.6.6 Reducering av induktans, L
- 1.6.7 Separation och isolation
 - 1.6.7.1 Transformatorer
 - 1.6.7.2 Common Mode Choke
 - 1.6.7.3 Optokopplare
 - 1.6.7.4 Balanserade kretsar
- 1.6.8 Filtrering
- 1.6.9 Signal jordning
 - 1.6.9.1 Singelpunkts jordsystem
 - 1.6.9.2 Multipelpunkt jordsystem
 - 1.6.9.3 Hybrid jordsystem

1.7 EMC i byggnader 41

- 1.7.1 Inledning
- 1.7.2 Byggnader med omfattande informationsteknologi
- 1.7.3 Generella krav som ställs på jordning och potentialutjämningsystem
- 1.7.4 De viktigaste åtgärderna för att eliminera störningar i en byggnad när metalliska kablar används
 - 1.7.4.1 EMC-miljön
 - 1.7.4.2 Balanserad transmission
 - 1.7.4.3 Skärmning av metalliska kablar
 - 1.7.4.4 Kraftförsörjningssystem
 - 1.7.4.5 Separation mellan signal och kraftkablar
 - 1.7.4.6 Jordning och potentialutjämnning, parallella ledningar och impedansen
 - 1.7.4.7 Filtrering
- 1.7.5 Praktiska exempel
 - 1.7.5.1 Signeljord för låga frekvenser (under 10 MHz)
 - 1.7.5.2 Jordning av skärmen för flerledarkablar
 - 1.7.5.3 En signalkabel är ansluten mellan två skyddsjordade apparater

1.8 Åskskydd för byggnader 49

- 1.8.1 Bedömning av behovet av åskskydd i en byggnad
- 1.8.2 Yttre åskskydd
 - 1.8.2.1 Några definitioner
 - 1.8.2.2 Beräkning av skyddsavstånd
 - 1.8.2.3 Tak- och nedledarsystem
 - 1.8.2.4 Jordtagssystem
 - 1.8.2.5 Exempel på integrering av åskskyddsanläggning och elinstallationen

- 1.8.2.6 Korrosion och materialval
- 1.8.3 Inre åskskydd
 - 1.8.3.1 Skyddskomponenter
 - 1.8.3.2 Zonindelningar och överspänningsskyddsklasser
 - 1.8.3.3 Val av överspänningsskydd, isolation och spänningshållfasthet, restspänning
 - 1.8.3.4 Ledningsdragning för kraft och tele i en byggnad med åskskydd

Kapitel 2: Medicinska konsekvenser av elektriska och magnetiska fält

2.1 Inledning 64

2.2 Elektriska och magnetiska fält 64

- 2.2.1 Enheter och formler
- 2.2.2 Frekvens uppdelningar och vanliga beteckningar
- 2.2.3 Reduktionsbehov av elektromagnetiska fält och försiktighetsprincipen
 - 2.2.3.1 Reduktion av elektriska fält
 - 2.2.3.2 Vagabonderande strömmar, en stor magnetfältskälla
- 2.2.4 Vissa källor till fält och typiska värden
 - 2.2.4.1 Statiska fält
 - 2.2.4.2 Lågfrekventa fält på arbetsplatser och bostäder, typiska värden
 - 2.2.4.3 Radiofrekventa fält, typiska värden
- 2.2.5 Mätning av lågfrekventa elektriska och magnetiska fält

2.3 Biologiska effekter av lågfrekventa fält 72

- 2.3.1 Elöverkänslighet och lågfrekventa fält
 - 2.3.1.1 Vanliga symtom och eventuella orsaker till elöverkänslighet
 - 2.3.1.2 Andra icke elektriska faktorer som kan leda till hudproblem vid bildskärmsarbete (kan påverka trovärdigheten av vissa studier)
 - 2.3.1.3 Lågfrekventa fält och hudproblem
 - 2.3.1.4 Elöverkänslighet, hormonnivåer och andra ändringar i cellerna
 - 2.3.1.5 Neurastena besvär
 - 2.3.1.6 Amalgam och elöverkänslighet
 - 2.3.1.7 Argument och sammanfattning gällande elöverkänslighet
- 2.3.2 Cancer och lågfrekventa fält
 - 2.3.2.1 Starka extremt lågfrekventa fält och biologiska effekter
 - 2.3.2.2 Epidemiologiska studier om extremt lågfrekventa elektromagnetiska fält
 - 2.3.2.3 Klassificering av hälsoeffekterna

2.4 Biologiska effekter av radiofrekventa fält 81

- 2.4.1 Fältkällor i GSM-kommunikationssystem
- 2.4.2 Sambandet mellan radiofrekventa fält, elöverkänslighet och neurologiska sjukdomar
- 2.4.3 Termiska effekter
 - 2.4.3.1 Termiska effekter på huvudet
 - 2.4.3.2 Jontransport genom cellmembran

- 2.4.3.3 Hjärntumör
- 2.4.3.4 Effekter på ögonen
- 2.4.3.5 Nervernas känslighet
- 2.4.3.6 Resultat och sammanfattning av studier om effekter av radiofrekventa fält med höga intensiteter
- 2.4.4 Icke termiska effekter
 - 2.4.4.1 Energi aspekter
- 2.4.5 Experimentala studier på djur
 - 2.4.5.1 Kalcium i hjärnceller cellerna
 - 2.4.5.2 Polarisering av cellerna
 - 2.4.5.3 Inlärningsförmåga och minnet, exponeringsgränser
 - 2.4.5.4 Cancerrelaterade studier för radiofrekventa fält
 - 2.4.5.5 Fältexponering och ODC
 - 2.4.5.6 Kan radiofrekventa strålningar intensifiera effekten av andra cancerframkallande medel ?
 - 2.4.5.7 Slutsatser från cancer-studier på djur
 - 2.4.5.8 Sammanfattning och slutsatser av experiment på djur
- 2.4.6 Effekter av radiofrekventa fält på människor
 - 2.4.6.1 Hjärnfunktioner
 - 2.4.6.2 Slutsatser av studier på hjärnfunktioner
 - 2.4.6.3 Mobiltelefoner och dödlighet
 - 2.4.6.4 Negativt publicitet och frågeformulär
 - 2.4.6.5 Exponering på arbetet eller fritiden
 - 2.4.6.6 Slutsatser om exponering på arbetet eller fritiden
- 2.4.7 Epidemiologiska studier på människor boende nära radio och teve stationer
 - 2.4.7.1 Sammanfattning av några studier
 - 2.4.7.2 Diskussion om brister i epidemiologiska studier nära kraftledningar och basstationer

2.5 Gränsvärden för elektromagnetiska fält och rekommendationer 91

- 2.5.1 Gränsvärden i Sverige
- 2.5.2 Gränser för radiofrekventa fält enligt National Radiological Protection Board, England
- 2.5.3 Rekommendationer

Kapitel 3: Projekt ombyggnad av Centralstation

3.1 Inledning 95

3.2 Teori genomgång 96

- 3.2.1 Härledning av magnetfält från en rak ledare
- 3.2.2 Härledning av magnetfält från trefasiga strömskenor
- 3.2.3 Magnetfält från en transformator

3.3 Fältreduktions åtgärder	99
3.3.1 Strömmen	
3.3.2 Avstånd till transformatorstationen	
3.3.3 Avstånd till skenförband och kabelförband	
3.3.4 Avståndsskillnad mellan fältpunkter och de tre faserna	
3.3.5 Längden av strömbanan	
3.3.6 Rätt materialval	
3.3.7 Skärmning av magnetiska och elektriska fält	
3.4 Skärmningens Teori	103
3.4.1 Viktiga konstanter och ordförklaringar	
3.4.2 Skärmningseffekt p g a absorption, A	
3.4.3 Skärmningseffekt p g a reflektion, R	
3.4.4 Multipel reflektion i skärmen, B	
3.4.5 Sammanfattning och slutsatser	
3.4.6 Läckage vid skärmning	
3.4.7 Praktisk skärmning	
3.4.7.1 Skärmning av hela transformatorstationen	
3.4.7.2 Upprätta en lokal anordning	
3.4.7.3 Skärmade transformatorer	
3.5 Beräkning av magnetfält ovanför transformatorstationen under centralhallen	116
3.5.1 Uppskattning av magnetfält ovanför transformatorn	
3.5.2 Beräkning av fält ovanför lågspänningsställverket	
3.5.2.1 Fält från skenor i ställverket, högtmonterade	
3.5.2.2 Fält från skenor i ställverket, lågtmonterade	
3.5.3 Beräkning av fält från skenor mellan transformatorn och lågspänningsställverket	
3.5.4 Magnetfält från kabelförband	
3.6 Sammanfattning och rekommendationer	130
Appendix 1 Systembeteckningar (Starkströmsföreskrifterna)	132
Appendix 2 Beräkning av förväntad beröringsspänning ΔU	134
Appendix 3 Utlösningstider för knivsäkringar	137
Appendix 4 Teknisk data för distributionstransformatorer	138

Appendix 5 140

A5.1 Kraftverkan mellan två ledare

A5.2 Induktans och frekvens

A5.3 Kapacitans och frekvens

Appendix 6 Exempel på rekommenderade potentialutjämningsystem
i byggnader **141**

Appendix 7 Impedansberäkning för transmissionsledningar

Kapitel 1: Potentialutjämning

1.1 Inledning

Rätt utförd jordning och potentialutjämning är grunden till ett välfungerande system, både funktions- och säkerhetsmässigt. Elkraft, datorer och telekommunikation spelar en mycket viktig roll i ett högteknologiskt samhälle som Sverige. Ett säkert informationsflöde, mellan olika användare, speciellt för övervakningssystem hos de stora operatörerna, är ett måste. Kraven på vissa av de tjänsternas tillgänglighet är mycket höga. Elanläggningar skall planeras och byggas på ett sätt som uppfyller de kraven.

Ett exempel på situationer som kan skapa systemfel eller skador in anläggningen är åska. Åska kan ge upphov till farliga potentialskillnader mellan olika metalliska delar i en byggnad eller orsaka brand. Potentialskillnaderna kan i sin tur vara farliga för person och egendom eller skada känsliga apparater. Potentialutjämning eliminerar till stor del potentialskillnaden mellan ledande delar vid fel utanför anläggningen (t ex blixtnedslag) eller inom anläggningen (t ex överledning till utsatt del).

Denna skrift kommer att ta upp de installationsmässiga krav och rekommendationer som finns i relevanta standard och föreskrifter inom området och även några praktiska exempel, om felsituationer, som kan tänkas förekomma.

Vid planering och utförandet av jordning och potentialutjämningsystem ska tänka på att:

- Elsäkerhet kommer alltid i första hand. Person och egendom ska skyddas. De krav som finns i föreskrifterna (blåa boken), angående skyddsjordning, ska följas. Det finns också rekommendationer som bör följas så långt det är ekonomiskt och praktiskt möjligt.
- EMC-störningar i systemet ska minimeras. Det här är speciellt viktigt när känsliga apparater installeras i systemet.
- Åska och överspänningar kan skada apparater och störa systemet.

Observera att beskrivningen av åskskydd och EMC är kortfattad. För mer information se relevanta standarder eller teoriböcker.

1.2 Definitioner och ordförklaringar

Obs! för mer definitioner och ordförklaringar se t ex Starkströmföreskrifterna (blåa boken) 1999.

Föreskrifter

§121: Föreskrifterna innehåller regler för utförande av elektriska anläggningar och elektrisk materiel för att tillgodose elsäkerhet och riktig funktion för att förebygga fara.

Potentialutjämning

Potentialutjämnings definition enligt Svensk Standard SS 437 10 02:

§ ”Begränsning av potentialskillnad mellan angränsande ledande delar av en utrustning och mellan sådana delar och konstruktionsdelar av byggnad, såsom armering, rörledning etc genom galvanisk förbindelse”.

Gruppledning: Kabel eller ledare direkt förbundna med strömförbrukande utrustning eller med uttag för sådan.

Gruppcentral: Kopplingsutrustning innehållande säkringar eller andra överströmskydd från vilka gruppledningar utgår

Huvudledning: Sammanfattande benämning för kablar eller ledare före gruppcentral.

Huvudjordningsskena: Plint eller skena avsedd för förbindning av skyddsledare, ledare för potentialutjämning, jordtagsledare och eventuell ledare för funktionsjordning.

Ställverk: Kopplingsutrustning, öppen delvis skärmad eller kapslad i skåp och huvudsakligen avsedd för montering på horisontell yta och fördelning av elektrisk energi.

Utsatt del: För beröring åtkomlig ledande del av elektrisk materiel, som normalt inte är spänningsförande, men som på grund av felförhållanden kan bli spänningsförande.

Främmande ledande del: En elektrisk ledande del som inte ingår i elektriska installationen och som kan anta en potential, i allmänhet jordpotential.

Klass I elmaterial: Elmaterial utformade så att skyddet mot elchock inte endast baserat på den grundläggande isolering, utan i vilken har ytterligare skyddsåtgärd antagits då berörbara ledande delar är förbundna med skyddsledaren i den fasta installationens ledningsnät.

TN-S system: Se Appendix 1

TN-C system: Se Appendix 1

TN-C-S system: Se Appendix 1

1.2 Potentialutjämning, elsäkerhetsmässigt utförande

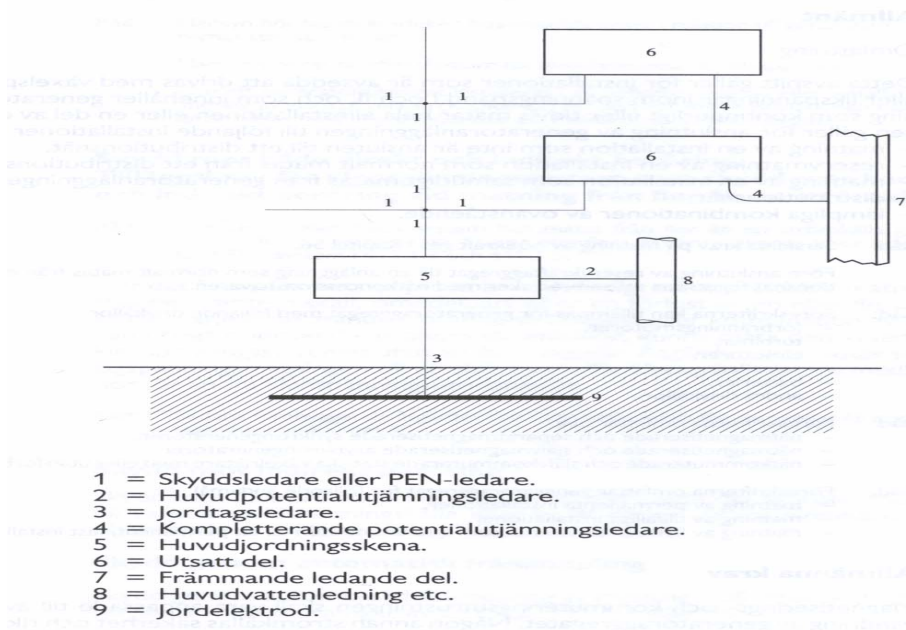
De krav och rekommendationer som används i denna skrift hämtas från Elsäkerhetsverkets föreskrifter [Elsäk-FS 1999:5] om utförande av elektriska starkströmsanläggningar av en nominell växelspanning av högst 1000 V. För att skydda person och egendom är det viktigt att följa föreskrifterna.

Två viktiga begrepp ska skiljas åt:

- Huvudpotentialutjämning
- Kompletterande potentialutjämning

Figur 1-1 är hämtad från kapitel 54, Starkströmföreskrifterna. Den visar sambandet jordning och skyddsledare och potentialutjämning på ett åskådligt sätt. Speciellt skiljes huvudpotentialutjämning och kompletterande potentialutjämning åt. Endast de ledare som kopplar huvudjordningsskena och inkommande servisirör kallas för huvudpotentialutjämning.

Kompletterande potentialutjämning är de ledningar som ansluts mellan apparaternas utsatta delar eller utsatta delar med främmande ledande del.



Figur 1-1

1.3.1 Krav och rekommendationer angående utförandet av huvudpotentialutjämnning

Elsäkerhetsverkets Starkströmsföreskrifterna (Elsäk-FS1999:5) ger krav och rekommendationer angående utförandet av huvudpotentialutjämnning. Observera att så långt möjligt bör man följa de rekommendationer som ges i råd för att få en förbättrad säkerhet i anläggning .

Obs! Kursiv text föregången av ” § ” är föreskrifttext. Inom klämmor skriver jag mina kommentarer.

Enligt § 413.1.2.1

I varje byggnad skall följande ledande delar anslutas till ett huvudpotentialutjämnningssystem:

- *skyddsledare eller PEN-ledare i huvudledning.*
- *huvudjordningsskena.*
- *ledande delar av metall som utifrån kommer in i byggnaden t ex telefon- och datakablar (via överspänningsskydd), rörledningar för gas, vatten, värme och kyla samt*
- *jordtagsledare om sådan finns.*

Sådana ledande delar, som utifrån kommer in i byggnaden skall förbindas till huvudpotentialutjämnningen nära det ställe där de införs i byggnaden.

Råd: *Sådana ledande delar som utifrån kommer in i byggnaden bör föras in nära varandra på samma plats.*

[Observera att om data- eller telefonkablar är skärmade ska skärmen potentialutjämnas]

Större metallkonstruktion inne i byggnaden

Angående större metallkonstruktion inne i byggnaden står det så här i föreskrifterna:

§ ”Även metallkonstruktioner med större utsträckning inom en byggnad bör anslutas till huvudpotentialutjämnningssystemt”.

Den här rekommendationen gäller till exempel metallkonstruktion ” med större utsträckning” såsom stålbalkar, kabelstegar, interna rör samt armering som finns inne i byggnaden, men eftersom de kan få jordpotentialen så kan det bli spänningsskillnad mellan dem och andra utsatta delar vid fel.

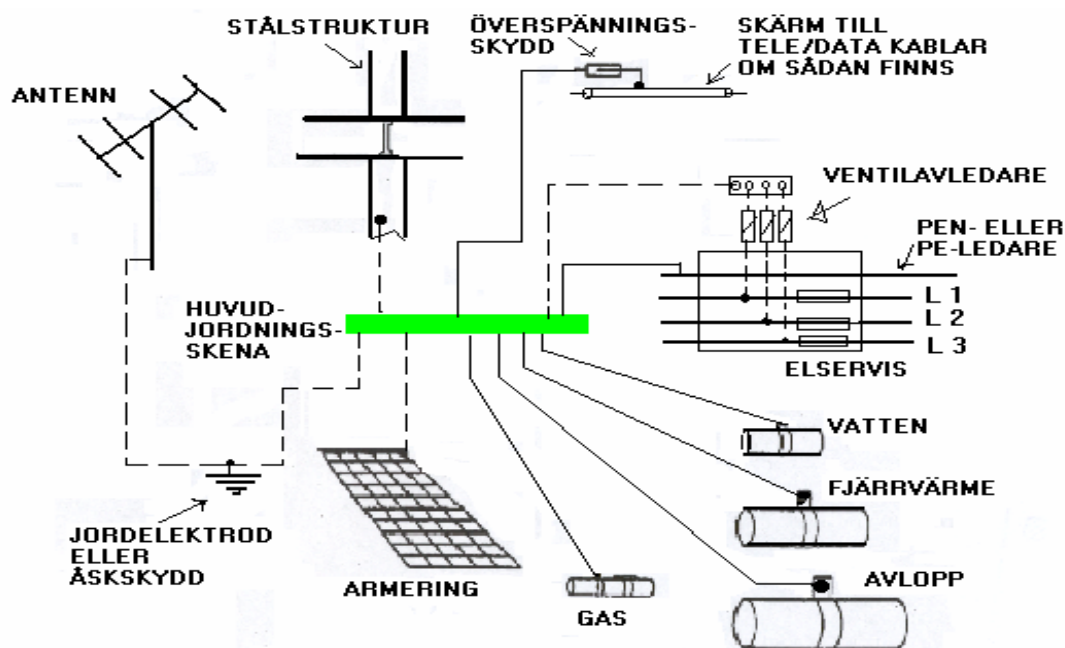
Större metallkonstruktioner bör potentialutjämnas i flera punkter. På det sättet byggs ett bättre jordplan. Ett bra jordplan är grunden till rätt funktion, bra elsäkerhet och minskning av störningar.

Anläggningar som matas via friledningar

Angående anläggningar som matas via friledningar eller om åskfrekvensen är hög:

§ ”Det rekommenderas att jordelektrod installeras i anläggningar som matas via friledning och i område med hög åskfrekvens”.

Figur 1-2 visar på ett schematiskt sätt vilka delar som ”skall” kopplas (heldragna linjer) och vilka som ”rekommenderas” (streckade linjer) bli sammanbundna till huvudpotentialutjämningskenan.



Figur 1-2 Krav och rekommendationer beträffande (Huvud) Potentialutjämnning i byggnader.

1.3.2 Krav och rekommendationer angående utförandet av kompletterande potentialutjämnning, relevanta föreskrifter

Det kan förekomma vissa fel inom en anläggning som medför för höga beröringsspänningar som varar under för lång tid, trots en bra utförd huvudpotentialutjämnning. Problemet blir speciellt märkbart vid stora anläggningar p g a långa avstånd mellan centraler. Det här kan vanligen åtgärdas med kompletterande potentialutjämnning. De relevanta föreskrifter är:

Enligt SSF 413.1: [Krav på automatisk fränkoppling]

§ ”Automatisk fränkoppling av matning vid fel krävs när det finns risk för personskador på grund av beröringsspänningens storlek och varaktighet.”

Enligt SSF 413.1.1.1: [Om högsta beröringsspänningen vid fel]

§ ”Skyddsapparat (överströmsskydd etc.) som ger skydd mot indirekt beröring skall automatiskt fränkoppla matning till krets eller utrustning när ett fel uppstår. Ett fel mellan spänningsförande del och utsatt del, skyddsledare eller PEN-ledare i kretsen eller utrustningen får inte ge en beröringsspänning som överstiger 50 V växelspänning eller 120 V likspänning under så lång tid att personfara uppstår vid samtidigt beröring av åtkomliga ledande delar”.

Enligt SSF 413.1.2.2: [Om spänningen på utsatt del blir för stor under för lång tid.]

§ ”Om förhållande för skydd enligt 413.1.1.1 inte kan uppfyllas i en installation eller en del av installation skall en lokal potentialutjämning benämnd kompletterande potentialutjämning enligt 413.1.6 användas.”

[och angående omfattningen av kompletterande potentialutjämning]

§ ”kompletterande potentialutjämning kan omfatta hela anläggningen, en del av anläggningen, en enskild apparat eller ett utrymme.”

Enligt SSF 413.1.3.3: [Kortslutningsströmmen ska vara så stor att säkringen hinner lösa ut dvs Z_s kan inte bli hur stor som helst: se Appendix 3: utlösningstider för

knivsäckringar. Se även Appendix 2]

§ ”Karakteristiken hos skyddsapparaten (se 413.1.3.8) och kretsens impedans skall vara sådant att vid fel med försumbar impedans var som helst i installationen mellan en fasledare och en skyddsledare eller utsatt del, automatisk fränkoppling sker inom angiven tid enligt följande $Z_s * I_a \leq U_0$ där:

Z_s är impedansen i felströmskretsen omfattande strömkällan, fasledare fram till felstället i den fasta installationen samt skyddledaren mellan felstället och strömkällan.

I_a är den ström som säkerställer automatisk funktion av den fränkopplande skyddsapparaten inom tid angiven i Tabell 41 A som funktion av nominell spänningen U_0 eller, under de förhållanden som anges i 413.1.3.5, inom 5 sekunder

U_0 är den nominella spänningen till jord.”

Nominell spänning U_0 V	Fränkopplingstid s
120	0,8
230	0,4
277	0,4
400	0,2
> 400	0,1

Tabell 1-1 Tabell 41A i Starkströmsföreskrifterna, längsta fränkopplingstider för TN-system

Observera att enligt § 413.1.3.4 längsta fränkopplingstider för gruppledningar som över uttag eller direkt matar handhållen eller flyttbar materiel av klass I, framgår av tabeller 41 A, för

TN-system. Tabellen visar att t ex för 230 V nominell spänning, får frånkopplingstiden bli högst 0,4 sekunder.

Enligt 413.1.3.5 : [Frånkopplingstider för huvud- och gruppledningar]

För huvudledningar tillåts en frånkopplingstid av längst 5 sekunder.

För gruppledningar som matar endast stationär materiel tillåts en frånkopplingstid som överstiger de tider som anges i Tabell 41A, dock inte längre än 5 sekunder.

Observerar speciellt att:

”Om till en och samma central eller huvudledning ansluts både gruppledningar för stationär materiel och gruppledningar för vilka krävs utlösningstider enligt Tabell 41A skall något av följande villkor vara uppfyllt:”

a) Skyddsledarens impedans mellan centralen och den punkt där skyddsledaren är ansluten till huvudpotentialutjämnningen får inte överstiga $(50 / U_0) * Z_s$ ohm [**d v s kravet att, spänningsfallet över skyddsledaren mellan huvud- och undercentralen är mindre än 50 V, uppfylls] eller**

b) Vid centralen ska finnas en potentialutjämnning som omfattar samma främmande delar som huvudpotentialutjämnning och som uppfyller kraven för huvudpotentialutjämnning i 413.1.2.1.

Enligt SSF 413.1.3.6:

”Om kraven enligt 413.1.3.3, 413.1.3.4, 413.1.3.5 inte kan uppfyllas genom att använda enbart överströmsskydd, skall kompletterande potentialutjämnning enligt 413.1.2.2 tillämpas. Alternativ kan skydd anordnas med jordfelsbrytare.

[**d v s om kravet i (a) inte kan uppfyllas, ska kompletterande potentialutjämnning utföras eller jordfelsbrytare användas].**

Enligt SSF 413.1.3.8

jordfelsbrytare får inte användas som ersättning för skyddsjordning utan endast som komplement till denna. Råd: i ett TN-system kan följande skyddsapparater användas.

- överströmsskydd
- jordfelsbrytare.

413.1.3.9 Råd:

Om jordfelsbrytare används för frånkoppling av matning för en strömkrets utanför det område som omfattas av huvudpotentialutjämnningen behöver de utsatta delarna inte anslutas till ett TN-system. Delarna kan istället anslutas med skyddsledare till en jordelektrod vars resistans är tillräckligt låg i förhållande till jordfelsbrytarens märkutlösningström.

Strömkrets skyddad på detta sätt betraktas som TT-system, för vilket 413.1.4 gäller. Utanför det huvudpotentialutjämnade området kan även användas

- matning från isolertransformator
- skydd genom extra isolering.

[**Observera att detta råd är viktigt och speciellt användbart vid gränsen mellan potentialutjämnade och icke-potentialutjämnade områden.]**

1.3.3 Dimensionering och val av huvudpotentialutjämningsledaren

Ledare för potentialutjämningsledare skall i första hand uppfylla minimikraven enligt punkt Starkströmsföreskrifterna §(547.1.).

§ "Huvudpotentialutjämningsledare skall ha en area som är minst halva arean av den största skyddsledaren i installationen dock lägst 6 mm². Arean behöver dock inte överstiga 25 mm² om ledaren är av koppar eller för andra metaller en area som har motsvarande ledningsförmåga".

Observera att:

- Främmande ledande del får inte användas som huvudpotentialutjämningsledare.
- Att dimensioneringen av potentialutjämningsledare görs efter skyddsledare som ligger efter huvudcentralen.
- I speciella fall t ex när det finns många känsliga utrustningar eller långa sträckor eller problem med åsköverspänningar kan grövre kablar användas.
- En potentialutjämningsledare som förbinder en lokal jordningsskena med främmande delar ska uppfylla kraven för potentialutjämningsledare vid dimensionering. (Se även SEK handbok).

I en väl avgränsad del av en byggnad, till exempel en kontorsdel i en fabriksbyggnad med särskild matning till en egen undercentral, kan, vid dimensionering av huvudpotentialutjämningsledarna, utgå från den största skyddsledarearean inom denna avgränsade byggnadsdel och inte skyddsledaren för hela anläggningen men minst 6 mm².

1.3.4 Dimensionering och val av kompletterande potentialutjämningsledare

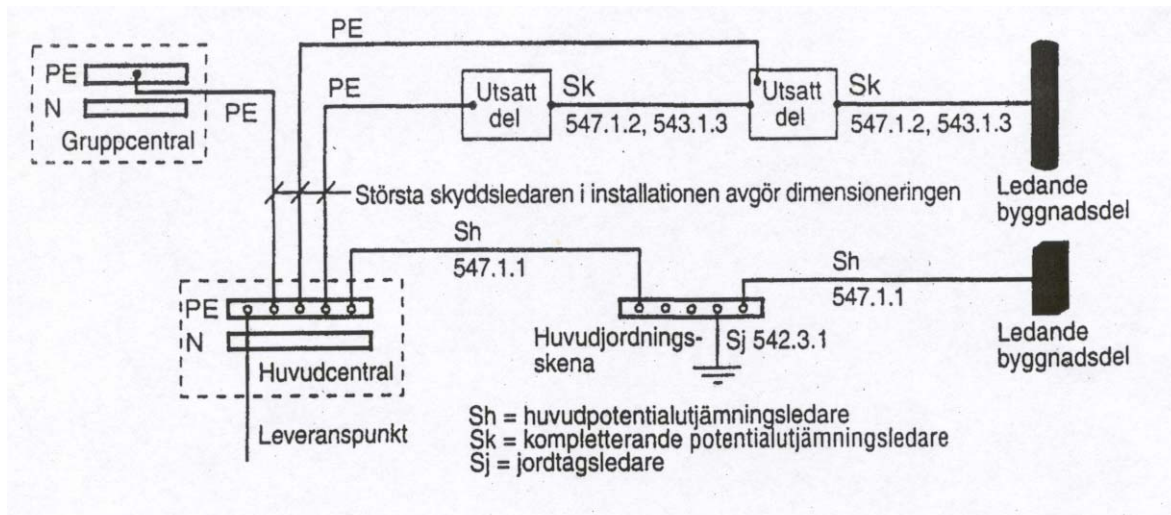
Enligt SSF §547.1.2 :

En kompletterande potentialutjämningsledare mellan två utsatta delar skall ha en area som inte är mindre än den minsta arean hos skyddsledaren för skyddsjordning av de utsatta delarna.

En kompletterande potentialutjämningsledare mellan utsatta delar och främmande ledande delar skall ha en area som inte är mindre än halva arean hos motsvarande skyddsledaren.

Kompletterande potentialutjämningsledare kan utgöras av främmande ledande del av permanent slag såsom delar tillhörande byggnadens stomme eller av extra ledare eller av en kombination av dessa. Ledningsförmågan skall överensstämja med respektive krav enligt föregående stycke.

Huvud potentialutjämningsledare (Sh i **Figur 1-3**) får inte utgöras av främmande ledande del. Däremot kan kompletterande potentialutjämningsledare (Sk i **Figur 1-3**), bestå av främmande ledande delar, av permanent slag, som uppfyller kraven. Till exempel PU-märkta kabelstegar (märke WIBE t ex). **Figur 1-3** från Starkströmshandboken ger bra översikt om dimensionering av potentialutjämningsledare och relevanta föreskrifter.



Figur 1-3 Dimensionering av potentialutjämningsledare (enligt Starkströmsguiden)

1.3.5 Färgmärkning av potentialutjämningsledare,

Enligt föreskrifterna bör isolerade potentialutjämningsledare och jordtagsledare som anordnas av elsäkerhetsskäl vara grön/gul.

Utjämningsledare för elektriska fält som anordnas av enbart funktions-skäl får inte vara grön/gul.

Potentialutjämningsledare som används endast av funktions-skäl får inte vara grön/gul. (SEK handbok, se även Starkströmsföreskrifterna §514.3.1)

1.3.6 Potentialutjämningsledares längd

Vid potentialutjämning ska hur som helst strävas efter så korta ledningar som möjligt. På så sätt blir ledningens impedans mindre (se **Avsnitt 1.6 Teori**) och minskas spänningsfallet över ledningen som orsakas av felströmmar. På detta sätt minskas beröringsspanningarna vid fel. Tidigare nämndes att inkommande rör och metalldelar bör föras in på samma plats, vilket just möjliggör kortare potentialutjämningsledare. Men i vissa befintliga byggnader är kanske detta inte praktiskt möjligt. Därför, i starkströmsföreskrifterna, är detta bara en rekommendation och inget krav.

1.3.7 Kontroll och provning av potentialutjämningsledare

Kontroll och provning av potentialutjämningsledare ska utföras enligt Svensk Standard *436 46 61*. Potentialutjämningsledarens kontinuitet ska provas, färgmärkningen kollas. Även material som används ska vara korrosionsbeständiga (Se avsnittet om korrosion). Allt detta ska naturligtvis göras av behörig personal. Det är god ledningsförmåga som eftersträvas. Standarden rekommenderar att kontinuiteten kontrolleras med en provutrustning som har en tomgångsspänning mellan 4 V och 24 V lik- eller växelspanning och som kan lämna en ström av minst 0,2 A.

För bättre beskrivning se kapitel 61 Starkströmsguiden.

1.3.8 Krav på utförandet av kompletterande potentialutjämning, några konkreta exempel

Ofta är det svårt att avgöra om kompletterande potentialutjämning ”skall” utföras så att elsäkerhetsmässiga krav uppfylls. TN-S system förutsätts i detta exempel. **Se Appendix 1.**

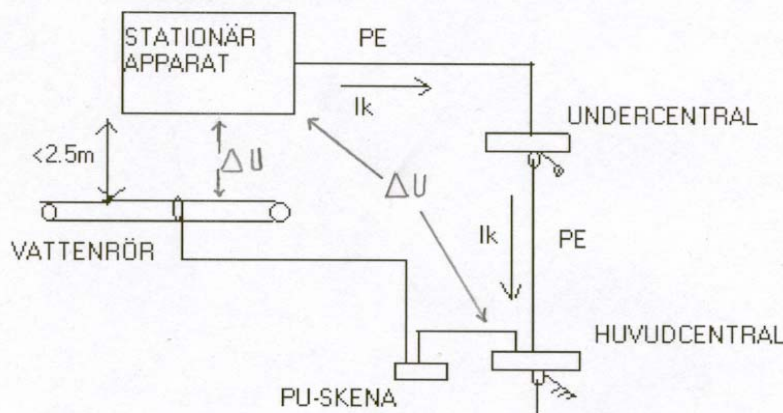
- Krav på utförandet av kompletterande potentialutjämning har ett nära samband med storleken på felströmmar och att, om fränkopplingsapparater kan koppla ifrån felet under angivna tiden i föreskrifterna. Behovet av elsäkerhetsmässigt kompletterande potentialutjämning är mer förekommande vid stora anläggningar. Anledningen är att långa avstånd mellan huvudcentral och undercentralerna gör att spänningsfallet över själva skyddsledaren kan bli för stort.

1.3.8.1 En stationär apparat matas från undercentral, inom räckhåll finns vattenrör

Se **Figur 1-4**. Om ett isolationsfel inträffar i den stationära apparaten, blir apparathöljet spänningssatt. Det gör att kortslutningsströmmen I_k går tillbaka till huvudcentralen, genom skyddsledaren, och orsakar en spänningsskillnad ΔU , mellan apparatens hölje och huvudcentralens skyddsjordningsskena. Vattenröret är också kopplat till huvudpotentialutjämningskenan enligt rådet i föreskrifterna. Därför vid fel skapas spänningsskillnaden ΔU mellan apparathöljet och vattenröret. ΔU kan beräknas enligt **Appendix 2**.

- Om $\Delta U > 50$ V och avståndet mindre än 2.5 meter och säkringen kan ta bort felet under 5 sekunder, så bör kompletterande potentialutjämning utföras d v s den utsatta delen (apparathöljet) förbindas med vattenröret.

- Om säkringen inte kan lösa under 5 sekunder (Se utlösningskurvor för knivsäckringar, **Appendix 3**), då skall potentialutjämning utföras.



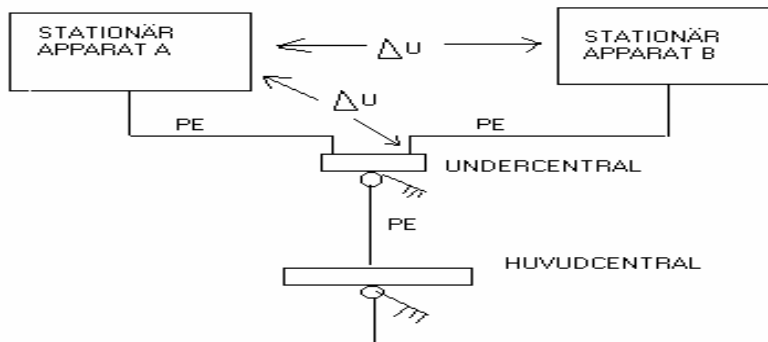
Figur 1-4 En stationär apparat matas från undercentral, inom räckhåll finns vattenrör

1.3.8.2 Två stationära apparater, skyddsjordade i samma central

Se **Figur 1-5**. Ett isolationsfel antas inträffa i apparat A. Utsatta delar till apparat A och B är skyddsjordade i samma undercentral. ΔU beräknas som i Appendix 2. ΔU blir normalt mindre än det i **1.3.8.1**, eftersom spänningsfallet är bara över den bit av skyddsledare som ligger mellan apparaten A och undercentralen (kortare avstånd jämfört med 1.3.8.1). Fränkopplingstiderna får vara upptill 5 sekunder (p g a att apparaterna är stationära) därför bör det inte bli något problem för säkringarna att fränkoppla felet.

- Om $\Delta U > 50$ V och avstånd mellan apparaternas utsatta delar $< 2.5\text{m}$, även om fränkopplingstiden är uppfylld, rekommenderas att apparaternas utsatta delar kopplas ihop d v s kompletterande potentialutjämning utföras.

- En alternativ åtgärd till potentialutjämnning, är att minska frånkopplingstiderna med ett snabbare överströmskydd eller komplettera med jordfelsbrytare.



Figur 1-5 Två stationära apparater skyddsjordade i samma central

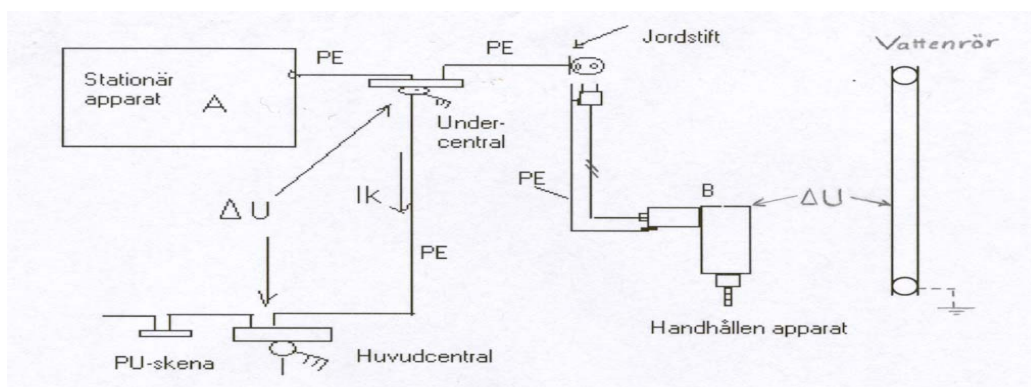
1.3.8.3 Till en undercentral är båda stationära och handhållna apparater kopplade.

Se **Figur 1-6**. Om ett isolationsfel inträffar i stationära apparaten A (frånkopplingstid upp till 5 sekunder), blir därmed skyddsjordningsskenan i undercentralen spänningssatt. I detta fall kan ΔU mycket väl bli mer än 50 V om avståndet mellan under- och huvudcentral är stort. Jordstift i eluttag i samma gruppleddning är också ansluten till samma skyddsjordningsskena. Handhållna apparaten B (frånkopplingstid högst 0.4 sekunder) är ansluten till uttaget. På det sättet är höljet till apparat B i direkt kontakt med höljet av apparat A genom jordstiftet i uttaget och skyddsledaren.

Säkringarna för den stationära apparaten löser inte ut förrän upp till 5 sekunder. Det innebär att mellan höljet, i den handhållna apparaten, och främmande ledande delar i omgivningen (vattenrör i figuren t ex) finns över 50 V i mer än 0,4 sekunder vilket är oacceptabelt ur elsäkerhetssynpunkt. Det här kan åtgärdas på två sätt enligt SSF § 413.1.3.6:

Alternativ 1: Kompletterande potentialutjämnning

Intill undercentralen monteras en lokal jordningsskena som kopplas till skyddsledarskenan i centralen och kopplas även till alla andra främmande ledande delar som rörledningar, kabelstegar etc, i de utrymmen som matas av just denna gruppcentral. På så sätt elimineras de farliga potentialskillnader som kan uppstå.

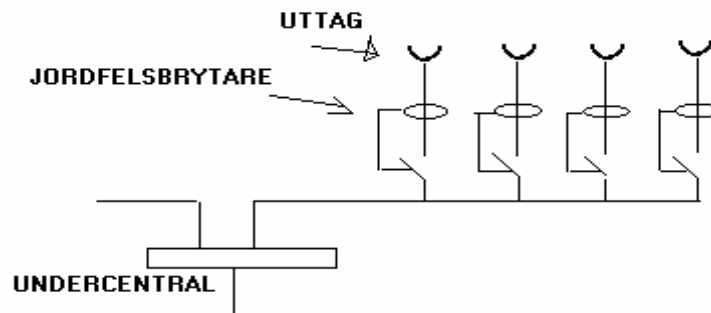


Figur 1-6 Till en undercentral är båda stationära och handhållna apparater kopplade.

Alternativ 2: Jordfelsbrytare

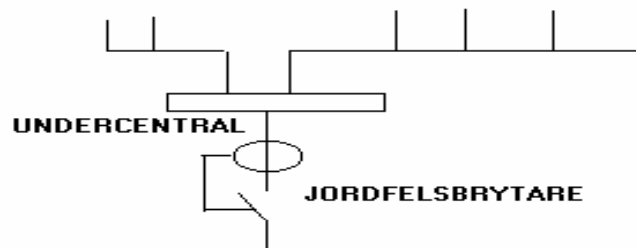
Det kan istället ordnas kortare frånkopplingstid med en eller flera jordfelsbrytare. Genom att installera jordfelsbrytare för de undercentraler eller grupper som matar de handhållna utrustningarna, nedbringas frånkopplingstiden.

Antal jordfelsbrytare som installeras och var de installeras är naturligtvis en fråga om ekonomin och situationen. Ett bra exempel är omklädningsrummet på en badplats. Där finns det flera eluttag för hårtorkare. Fel i en hårtorkare kan orsaka fara och strömavbrott för andra besökare. I detta fall är det bra att ha en jordfelsbrytare kopplad till var och en utgående ledning (**Figur 1-7**) eller använda uttag med inbyggd jordfelsbrytare.



Figur 1-7

Ett billigare alternativ är att bara installera en jordfelsbrytare innan undercentralen. I detta fall blir alla utgående ledningar strömlösa vid fel i någon strömförbrukare. Se **Figur 1-8**



Figur 1-8

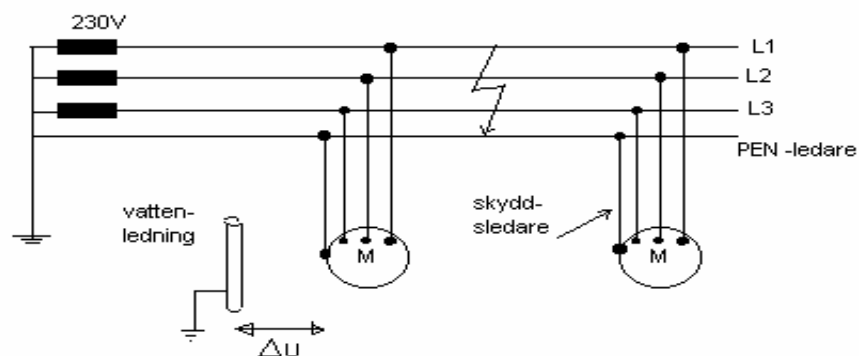
1.4 Vissa andra situationer där potentialutjämning är fördelaktig

1.4.1 Kortslutning mellan fas och PEN-ledare i fyrledarsystem

I anläggningar med 4-ledarsystem (TN-C-system, se Appendix 1), finns det en gemensam PEN-ledare, som fungerar både som neutralledare (N) och skyddsledare (PE). Se **Figur 1-9**. En kortslutning mellan fas och PEN-ledare kan ge upphov till oacceptabla spänningshöjningar på motorernas utsatta delar. Detta på grund av spänningsfallet på PEN-ledaren. Skyddet ska väljas så att apparaterna kopplas bort inom föreskriven tid.

Potentialutjämning mellan motorhöljet och vattenröret (eller andra metalliska delar i kontakt med jord) kan lokalt minska risken för elchock.

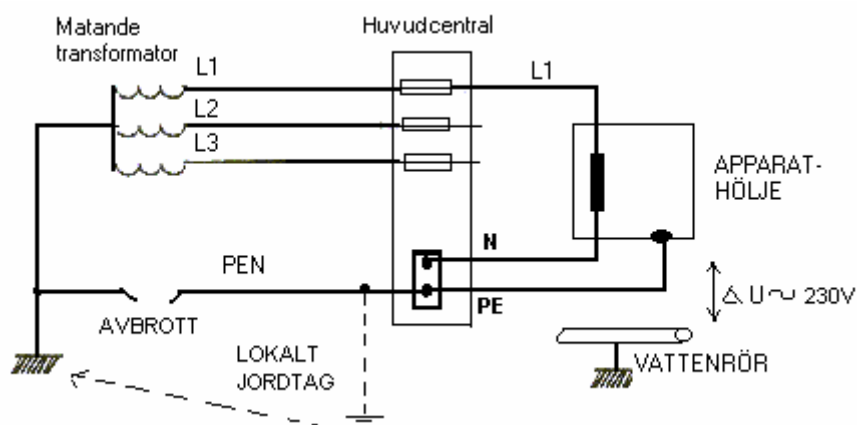
Även potentialutjämning mellan motorernas höljen minskar risken för elchock, vid samtidig beröring.



Figur 1-9 Kortslutning mellan fas och PEN-ledare i TNC-system

1.4.2 PEN-avbrott i huvudledning

Mellan transformatorns nollpunkt och huvudcentraler finns det normalt fyrledarsystem d v s tre fas- och PEN-ledare. Avbrott i PEN-ledaren mellan transformatorn och huvudcentralen i matande ledning kan innebära ödesdigra konsekvenser för elsäkerheten. Se **Figur1-10**



Figur 1-10 Avbrott i PEN-ledare

Vid PEN-avbrott flyter ju ingen ström i kretsen. Det innebär att säkringar löser inte ut. Både neutralledare (N) och skyddsledare (PE) kommer att få ungefär samma spänning som fasan L_1 gentemot jord, det vill säga 230V. På det sättet får apparaternas utsatta delar spänningar gentemot främmande ledande del, som är antagligen i kontakt med jord (t ex vattenrörssystem).

Potentialutjämning minskar risken för elchock vid en PEN-avbrott eftersom främmande metalliska delar och apparatens utsatta del kopplas ihop.

Enligt rekommendationer i § 413.1.2.1, när matning sker genom luftledningar, där det finns större risk för PEN-avbrott, bör lokalt jordtag installeras. Systemet kommer att fortsätta fungera eftersom återströmmen går genom jord istället för PEN-ledaren. I sådana anläggningar bör rutinkontroll av PEN-ledaren införas.

1.4.3 Till- och frånslagning på nätet

Till och frånslagning av induktiva och kapacitiva belastningar i lågspänningsnätet kan ge höga spänningsspikar och transienter och skada apparaterna. Även kortslutningar i kraftnätet kan ge höga transienta spänningar. Till exempel vid manövrering av frånskiljare och strömbrytare uppstår störspänningar med frekvenser mellan 10 kHz till 3 MHz. Potentialskillnader på upp till 20 kV har uppmätts för 400 kV anläggningar. Rätt spänningsskydd i kombination med ett bra potentialutjämningsystem kan jämna ut överspänningarna. Överspänningsskydd diskuteras i **Avsnitt 1.8, åskskydd**.

1.4.4 Elektrostatisk urladdning

Gnistbildning kan ge upphov till brand och explosion, speciellt i områden där det finns explosiva gaser. Potentialutjämnning minimerar riskerna på så sätt att laddningarna leds bort innan de samlas och bildar gnista. Ytor som kan successivt uppladdas ska, med tillräcklig låg resistans, överkopplas för att laddningarna leds bort. Föremål kan behövas kopplas ihop med utjämningsledare. Särskild stora krav ställs inte på resistans eller area hos dessa ledare. En sådan ledare har ingenting att göra med elsäkerheten så de får inte ha färgkombinationen grön/gul. (SEK handboken)

Även elektroniska kretsar kan bli skadade genom elektrostatisk urladdning. Skyddssystem för elektronik kräver rätt design och rätt jordning. (För mer information se t ex boken Noise Reduction Techniques Henry W Ott).

1.4.5 Potentialutjämnning och magnetiska fält i 4- och 5-ledarsystem

I lågspänningskablar finns fram och återgående strömmar i fas- och nolledare som normalt ska vara lika. Magnetiska fältet från dessa strömmar mer eller mindre, tar ut varandra, eftersom kablarna ligger tätt intill (Se Kapitel 3 denna skrift om reduktion av magnetfält).

I anläggningar med 4-ledarsystem (Se Figur 2-2), finns det en tendens för återströmmen att hitta alternativa vägar via skyddsjordade föremål och byggnadsstomme och/eller rörledningar. De så kallade vagabonderande strömmar ger stora magnetfält. Det här gör att det blir obalans i kabeln (fram- och återgående ström i kabeln är inte lika längre) och ger ytterligare magnetfält runt kabeln. Problemet löses som bekant genom användning av 5-ledarsystem. (Se **Avsnitt 2.2.3.2**).

När potentialutjämnning utförs i en byggnad som är gjord med 4-ledarsystem, ansluts egentligen parallella ledningar med byggnadsdelar d v s minskas resistansen i byggnadsstommen och däremot ökar vagabonderande strömmarna. Så en rätt utförd potentialutjämnning ska helst göras i 5-ledarsystem för att magnetfältet inte ska öka.

1.5 Potentialutjämnning vid befintliga byggnader

Enligt Starkströmsföreskrifterna § 1.4 gällande äldre anläggningar:

”I fråga om anläggning utförd före dessa föreskrifters ikraftträdande gäller föreskrifter angående anläggnings utförande endast beträffande utvidgning, ombyggnad eller omläggning av sådan anläggning eller om anläggningens användning eller förutsättningarna förändras på sätt som har väsentlig betydelse för elsäkerheten”.

- ”Utvidgning” avser tillkommande installation.

- ”Ombyggnad” avser total ombyggnad, men för orörda delar, såsom befintliga installationsrör och dosor, får de gamla föreskrifterna tillämpas.

- ”Omläggning” avser spänningshöjning från exempelvis 127/230 V till 230/400 V vilket är ej aktuellt eftersom distributionsnät för 127/230 ej förekommer.

Övrigt utbyte är ”underhåll” och då gäller de gamla föreskrifterna. Utbytt materiel skall dock uppfylla nuvarande materielföreskrifter.

Enligt rådet i §1.4, om användningen av lokaler förändras på ett väsentligt sätt ur elsäkerhetssynpunkt, kan det bli aktuellt att utföra elsystemet enligt de nya föreskrifterna.

Exempel på dessa är:

- *Användning av flera icke potentialutjämnade apparater i klass I utförande, inom räckhåll från varandra, i samma rum eller ihopkoppling av apparater till ett nätverk.*

1.5.1 Frågor och svar om krav och rekommendationer på potentialutjämning i äldre anläggningar

Elsäkerhetsverket har svarat på intressanta frågor angående potentialutjämning i befintliga byggnader (utdrag ur El paragrafen som utgörs av Elsäkerhetsverkets svar på frågor från allmänheten och företag, AMA-nytt VVS. El 1/2000 och 2/99).

1.5.1.1 Retroaktiv krav vid ombyggnad av elektriska systemet

Elsäkerhetsverket har införts vissa krav på potentialutjämning §(413.1.2) 1999: Kravet på föreskrifterna gäller potentialutjämning på utifrån inkommande ledningar, så som skyddsledare eller PEN-ledare i huvudledning, eventuellt metallskärm i data- och telekablar, rörledningar för gas, vatten, värme och kyla samt, i förekommande fall, jordtagsledare. Dessutom skall en huvudjordningsskena finnas § (542.4.1) och anslutas till huvudpotentialutjämning. I rådet anges bland annat att även metallkonstruktion med större utsträckning inom en byggnad bör anslutas till huvudpotentialutjämningsystemet. Föreskrifterna skall enligt starkströmsföreskrifterna §1.4 vad gäller äldre anläggningar enbart tillämpas vid utvidgning, ombyggnad eller omläggning.

Fråga : Skall föreskriftens krav tillämpas i en äldre anläggning vid ombyggnad eller då nya rörledningar eller elektriska ledningar förs in utifrån?

Svar : Vid ombyggnad berörs ofta inte inkommande ledningar. Därvid finns inte krav på att potentialutjämning utförs. Om en ny rörledning dras in, t ex för vatten eller fjärrvärme är detta inte en ombyggnad av det elektriska starkströmanläggningen. Det finns då inte grund för att ställa krav på potentialutjämning. Detta gäller även data- och telekablar.

1.5.1.2 Endast delvis utförd potentialutjämning

Fråga : Ska potentialutjämning utföras när en ny starkströmskabel vill dras in till en befintlig byggnad?

Svar : Dras in en ny starkströmskabel, kan den utgöra en utvidgning av anläggningen.

Men enligt Starkströmsföreskrifterna §61.1.4:

En utökning eller ändring av en befintlig installation får inte minska elsäkerheten hos den

befintliga installationen”.

Då de skilda slagen av ledningar i regel förts in på olika ställen i en äldre byggnad och ofta svåra att lokalisera, kan en senare, endast ”delvis utförd potentialutjämning” medföra ökade risker för farliga beröringsspänningar inom anläggningen. I praktiken kan en ändamålsenlig potentialutjämning överhuvudtaget inte utföras. Det ställs därför inte krav på potentialutjämning.

1.5.1.3 Utförandet av potentialutjämning i en äldre anläggning

Fråga : Hur ska potentialutjämning göras i en äldre anläggning om man så önskar?

Svar : I det fall man önskar utföra potentialutjämning i en äldre anläggning är det av stor vikt att koppla samtliga inkommande ledningar till potentialutjämningskenan för att kravet i §61.1.4 skall vara uppfyllt. Naturligtvis är det fördelaktigt om samtidigt elsystemet bytas från 4- till 5-ledarsystem. En fördel med 5-ledarsystem är att magnetfältet inte ökar. Se Avsnitt 1.4.5.

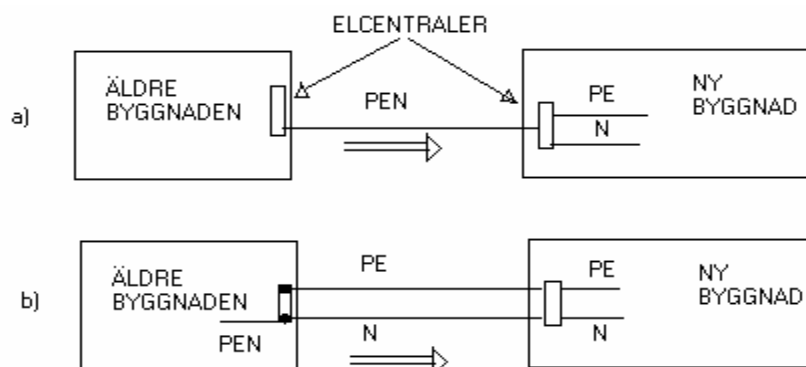
1.5.1.4 En ny central som matas från en annan central i en gammal byggnad

Fråga: Hur blir det med potentialutjämning i en ny byggnad, när den nya centralen matas från en annan elcentral i en gammal byggnad ?

Svar : Om en fristående byggnad ska byggas, t ex ett garage eller uthus, som matas från en äldre byggnad, kan det bli aktuellt med potentialutjämning av ledningar som dras in i den nya byggnaden. Detta krävs dock endast om byggnaden har egen central och inkommande vattenledning eller liknande.

Om den gamla byggnaden har 4-ledarsystem kan PEN-ledaren dras till centralen i den nya byggnaden. Därifrån ordnas skilda skydds- och neutralledare dvs 5-ledarsystem (**Figur 1-11a**). PEN-ledaren ska vara minst 10 mm² i detta fall, annars ska två separata ledningar för PE och N dras till den nya centralen (**Figur 1-11 b**).

Observera att eventuella vagabonderande strömmar kan förflyttas från det gamla byggnaden med 4-ledarsystem till den nya med 5-ledarsystem genom PEN-ledaren och andra servisledningar, om inte speciella åtgärder vidtas. Åtgärderna beror naturligtvis på vad den nya byggnaden ska användas till och de ekonomiska medel som finns. Se **Avsnitt 2.2.3.2**



Figur 1-11

1.5 Kapacitiv, induktiv och konduktiv koppling, teorigenomgång

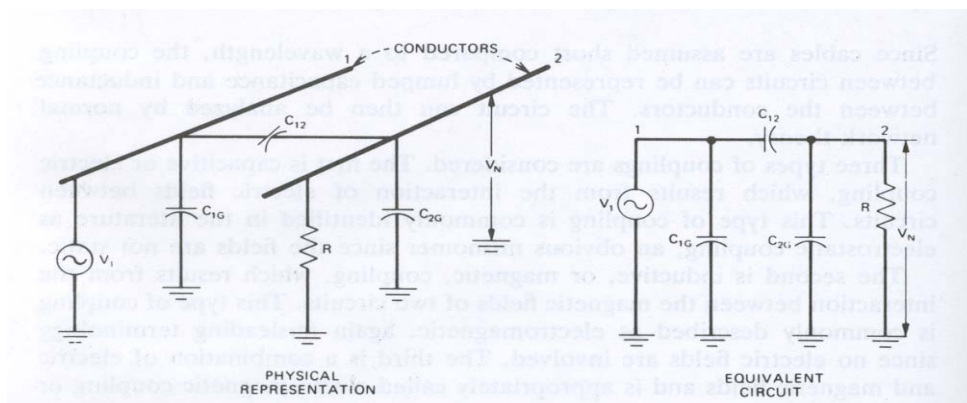
Störningar uppkommer normalt på tre olika sätt:

- Kapacitiv koppling, genom elektriska fält
- Induktiv koppling, genom magnetiska fält
- konduktiv koppling d v s störningar som sprider sig genom ledningar.

I kommande avsnitt om skärmning, antas att kabeln ha tunn skärm av icke magnetiska material. Tjockare skärmar som är dessutom gjorda av magnetiska material diskuteras i Avsnitt 3.2.4. Dessutom för bättre förståelse används kretsteori för att kunna visa effekten av skärmning och jordning.

1.6.1 Kapacitiv koppling, utan skärm

Mellan två ledare finns alltid en kapacitiv koppling eftersom ledarna bildar en kondensator. Den ekvivalenta kretsen visas i **Figuren 1-12**. Det finns en kapacitans C_{12} mellan ledarna och kapacitanser C_{1G} och C_{2G} mellan ledarna och jord.



Figur 1-12 Kapacitiv koppling utan skärm (Noise Reduction Techniques Henry W.Ott)

Ledning 1 antas vara storkällan och ha spänningen V_1 . På grund av kapacitiv koppling mellan krets 1 och 2, produceras en störspänning V_N mellan krets 2 och jord som kan skrivas enligt Ekvation 1-1. Observera att R är impedansen mellan ledare 2 och jord.

$$V_N = \frac{j\omega[C_{12}/(C_{12} + C_{2G})]}{j\omega + 1/R(C_{12} + C_{2G})} * V_1 \quad (1-1)$$

Fall 1: I många praktiska fall är impedansen $R \ll \frac{1}{j\omega(C_{12} + C_{2G})}$ och Ekvation 1-1 kan reduceras till:

$$V_N = j\omega R C_{12} V_1 \quad (1-2)$$

Ekvation 1-2 är viktig och visar att störspänningen i ledare 2 är direkt proportionell med

frekvens ($\omega = 2\pi f$), V_1 (spänning i ledare 1), kapacitansen mellan ledarna C_{12} och speciellt resistansen R mellan den störda ledaren 2 och jord.

Reduktion av den kapacitiva kopplingen

Normalt kan frekvensen (ω) och V_1 (spänningen i källan) inte ändras vid installation. För att minska den kapacitiva kopplingen kan C_{12} eller R reduceras.

- C_{12} kan reduceras genom lämplig skärmning eller fysisk separation mellan ledarna.
- Minskning av jordresistansen R , minskar störningarna i ledare 2

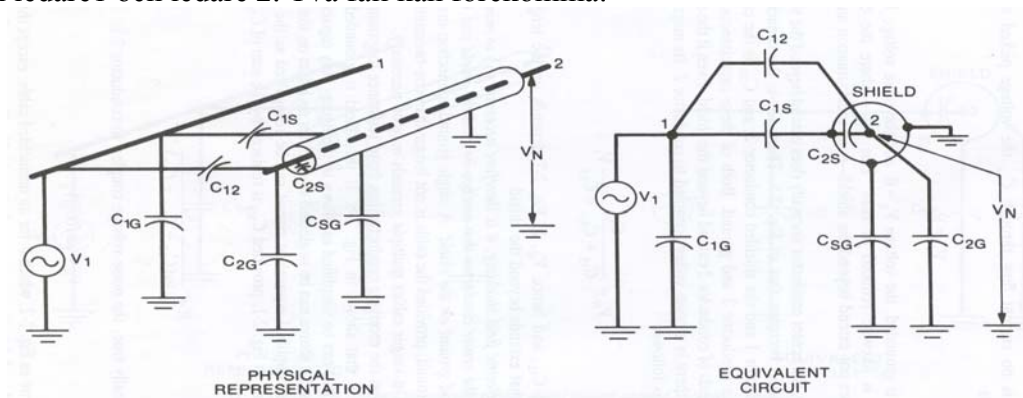
Fall 2 : Om resistansen mellan ledare 2 och jord $R \gg \frac{1}{j\omega(C_{12} + C_{2G})}$ blir störspänningen V_N

oberoende av frekvens, enligt ekvationen 1-3. V_N i fall 2 är större än fall 1 d v s när R var mindre.

$$V_N = \left(\frac{C_{12}}{C_{12} + C_{2G}} \right) * V_1 \quad (1-3)$$

1.6.2 Kapacitiv koppling, med skärm

Med en jordad skärm runt ledare 2, blir då situationen som **Figur1-13**. I praktiken kan skärmen aldrig täcka hela längden av ledaren och en bit av ledaren brukar sticka ut ur skärmen. Även om skärmen är jordad finns det ändå en liten kapacitans C_{12} mellan ledare 1 och ledare 2. Två fall kan förekomma:



Figur 1-13 Kapacitiv koppling V_N för en jordad skärm (Noise Reduction Techniques Henry W.Ott)

Fall 1 (Figur 1-13): Resistansen mellan ledare 2 och jord är oändlig. Störspänningen kan beräknas enligt:

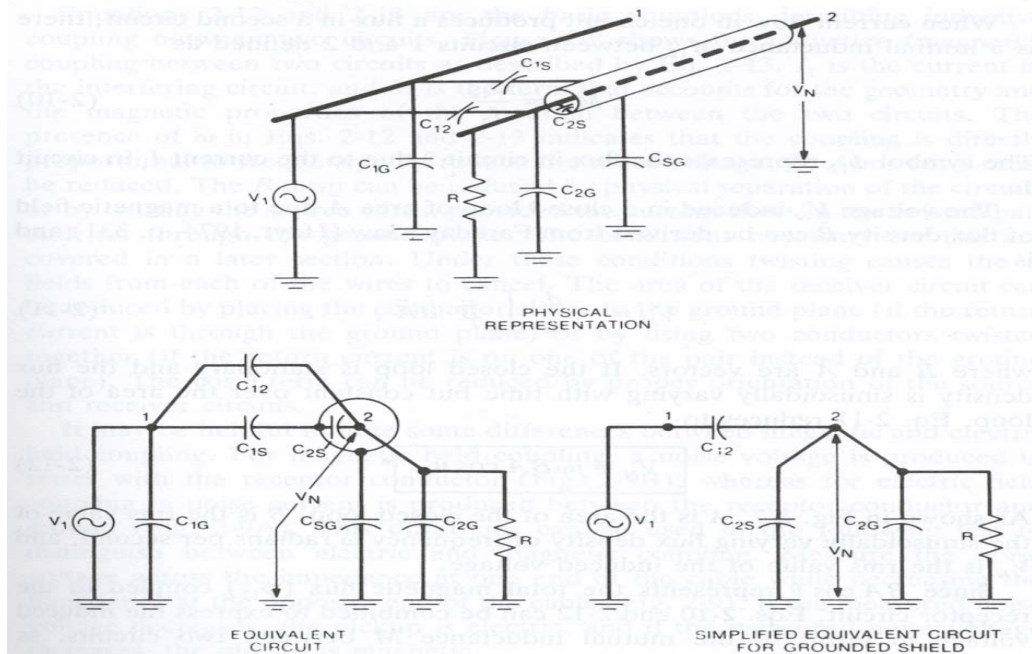
$$V_N = \left(\frac{C_{12}}{C_{12} + C_{2G} + C_{2S}} \right) * V_1 \quad (1-4)$$

Värdet av C_{12} beror på den längd av ledare, som sticker ut ur skärmen. För att reducera störspänningen (kapacitiva kopplingen) ska ordnas så att:

- ledarlängden som sticker ur skärmen vara minimal.
- jordningen av skärmen ska vara god.

Fall 2 (Figur1-14): Om resistansen mellan ledare 2 och jord inte är oändlig blir situationen enligt **Figur 1-14**.

Om skärmen är jordad och $R \ll \frac{1}{j\omega(C_{12} + C_{2G} + C_{2S})}$, vilket är fallet vid många praktiska sammanhang, kan störspänningen räknas enligt $V_N = j\omega RC_{12}V_1$. Observera att den här är samma ekvation som Ekvation 1-2 för icke skärmad kabel. Skillnaden är förstås att C_{12} är betydligt mindre här jämfört med ekvation 1-2, p g a skärmen. Här är ju C_{12} kapacitans mellan ledare 1 och den icke skärmade delen av ledare 2.



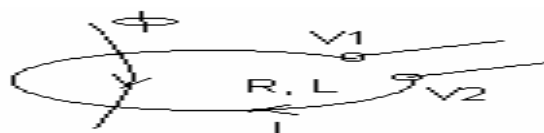
Figur 1-14 Kapacitiv koppling av en ledare som har resistans till jord (Noise Reduction Techniques Henry W. Ott)

1.6.3 Induktiv koppling

Sambandet mellan magnetiska flödet ϕ , induktansen L och ström I , i en sluten slinga är:

$$\phi = L I \quad (1-5)$$

Ekvation 1-5 visar att ju starkare magnetfält ϕ desto starkare ström induceras i slingan och tvärtom. Konstanten L är induktansen och beror på hur ströbanan ser ut rent fysiskt och vilken media som omger kretsen. R är resistansen i slingan. Om ϕ varierar med tiden induceras en ström som varierar med tiden. Se Figur 1-15



Figur 1-15 Ström och magnetiska flödet i en slinga

$$V_1 - V_2 = RI + d\phi / dt \quad (1-6)$$

- För en öppen slinga är $I = 0 \Rightarrow V_1 - V_2 = d\phi / dt$

- För en kortsluten slinga är $V_1 - V_2 = 0 \Rightarrow RI = -d\phi / dt$
 Insättning av ekvation 1-5 i ekvation 1-6 ger:

$$V_1 - V_2 = RI + L \, dI / dt \quad (1-7)$$

Ekvation 1-7 kan komplext skrivas som :

$$V_1 - V_2 = RI + j \, 2\pi f \, L \, I \quad (1-8)$$

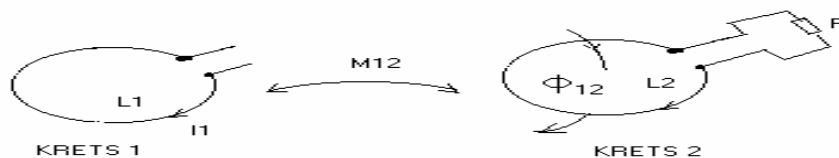
- Det innebär att ökad resistans, induktans, ström eller frekvens, ger ökad spänningsskillnad $V_1 - V_2$ i en slinga.

1.6.3.1 Ömsesidig induktans

Om det finns två kretsar, kan strömmen i den ena kretsen ge flöde som passerar den andra kretsen. Då finns det ömsesidig induktans M_{12} mellan kretsarna. Ömsesidig induktans blir:

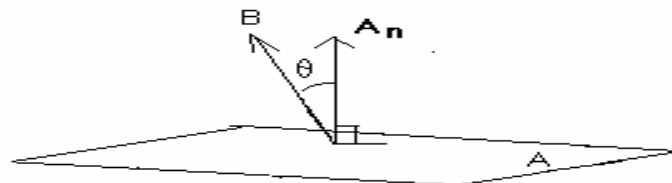
$$M_{12} = \phi_{12} / I_1 \quad (1-9)$$

ϕ_{12} presenterar flödet i krets 2 producerat av ström I_1 i krets 1. Se Figur 1-16



Figur 1-16 Ömsesidig induktans mellan två kretsar.

Se Figur 1-17. A_n är en normalvektor till ytan A och B är en vektor som visar styrka och riktningen av flödestätheten som passerar ytan. θ är vinkeln mellan B och normalvektorn.



Figur 1-17 Magnetiska flödestätheten B passerar slingaren A, med vinkeln θ .

För att härleda den inducerade spänningen (störspänningen) V_N , producerat av fältet B, i en slinga med area A, kan Faradays lag användas:

$$V_N = -d/dt \int_A \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A}_n \quad (1-10)$$

eftersom $\phi_{12} = \int_A \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A}_n \Rightarrow$

$$\phi_{12} = B \, A \, \cos\theta \quad (1-11)$$

Om fältet varierar sinusformat med frekvensen $f = \omega/2\pi$ och det finns vinkel θ mellan fältet B och normalvektor A_n till ytan A, kan störspänningen V_N skrivas som:

$$V_N = j \omega B A \cos\theta = j \omega \varphi_{12} \quad (1-12)$$

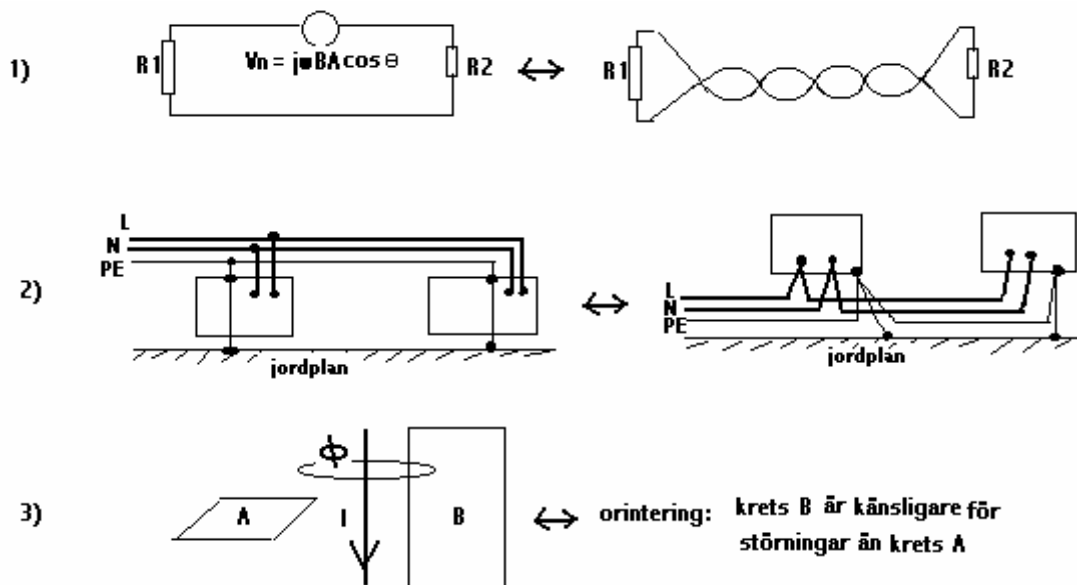
Enheten för V_N är [volt], för frekvensen är [Hz] och för B är [Tesla] (eller Weber/m²). Enheten för arean A är [m²]. Jämförelse mellan ekvation 1-9 och 1-12 ger:

$$V_N = j \omega M I_1 = M dI_1/dt \quad (1-13)$$

1.6.3.2 Sammanfattning reduktion av induktiv koppling, utan skärm

Ekvationerna 1-11 och 1-12 och 1-13 beskriver de grundläggande sambanden för magnetiska (induktiva) kopplingen mellan två kretsar. För att minska den störande spänningen V_N i en slinga, kan B , A eller $\cos\theta$ eller frekvensen reduceras. Frekvensen antas ha ett visst värde och inte kan ändras. Se **Figur 1-18**.

- B reduceras genom fysisk separation av kretsar eller genom att tvinna störcällans ledningar (om returströmmen inte går genom jorden förstås). Figur 1-18-1.
- $\cos\theta$ kan minskas med rätt orientering av stör- och mottagarkällan. Figur 1-18-3
- Mottagarkretsens area, A , kan reduceras genom att:
 - placera signalledningen nära jordplanet, om returströmmen går genom jord. Figur 1-18-2.
 - tvinna signalledning och returledningen. Figur 1-18-1.

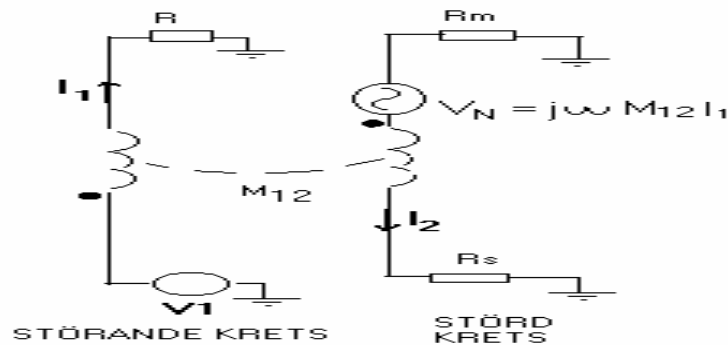


Figur 1-18 Rätt kabeldragning reducerar störningarna.

Observera att även när det gäller kraftkablar, är det fördelaktigt att kablarna ligger så nära jordplanet som möjligt, för att minska den magnetiska kopplingen. Systemet blir mindre känsligt, genom minskning av slingarean. Jordströmmar producerade av yttre magnetiska fält reduceras.

1.6.4 Effekten av skärm på induktiv koppling

Figur 1-19 visar störspänningen V_N , som induceras genom induktiv koppling, från krets 1 till krets 2, utan skärmning. Enligt ohms lag blir störströmmen $I_2 = -V_N / (R_s + R_m)$ och enligt ekvation 1-12 kan I_2 skrivas som:



Figur 1-19

$$I_2 = (-1 / (R_s + R_m)) * (d\phi_{12} / dt) \quad (1-14)$$

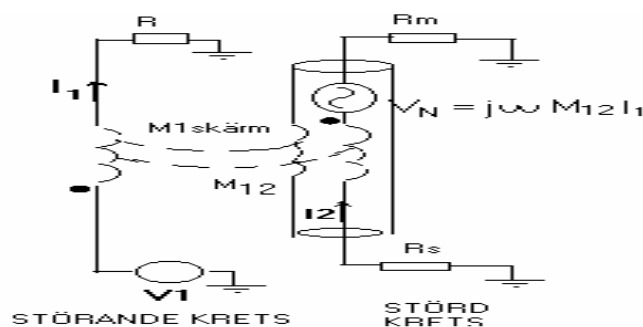
eller:

$$I_2 = (-1 / (R_s + R_m)) * M_{12} (dI_1 / dt). \quad (1-15)$$

Effekten av skärm runt en kabel

Kablar är normalt mycket långa och kan fungera som antenner d v s tar emot eller skicka ut störningar i högfrekvent sammanhang. Om en icke magnetisk skärm placeras runt ledare 2, utan att jordas i någon ända (se **Figur 1-20**), blir det ingen ändring i geometri eller magnetiska egenskaper av den miljö som omger ledare 2. Med andra ord ändras inte den ömsesidiga induktansen M_{12} mellan kretsarna.

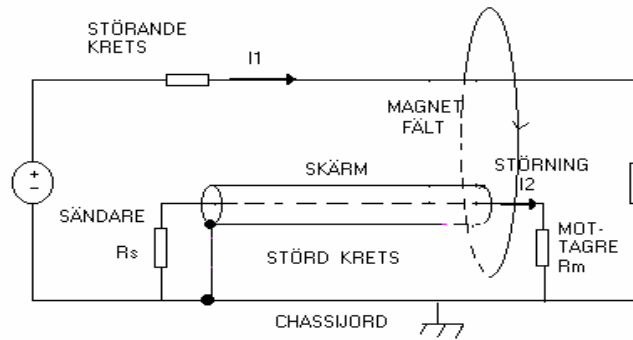
Observera att det kommer ändå att finnas en magnetisk koppling mellan krets 1 och skärmen. Spänningen $V_{skärm} = j \omega M_{1skärm} I_1$ induceras i skärmen.



Figur 1-20 Skärm utan anslutning till jord.

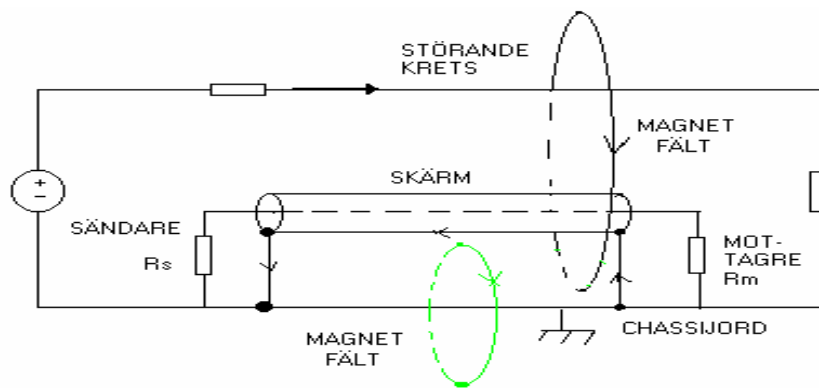
1.6.4.1 Skärmning av en störd krets

Om ena ändan av skärmen jordas, går magnetfält från den störande kretsen genom slingan ändå och ger en störande ström i krets 2. Se **Figur 1-21**



Figur 1-21 Skärm med anslutning till jord i en punkt

- Om båda ändarna av den störda kretsen jordas, erhålls en sluten slinga som innehåller skärmen. Strömmen som går genom denna slingan, ger ett magnetfält som motverkar det störande magnetfältet enligt Lenz lag. Se **Figur 1-22**. Returströmmen i den störda kretsen, omsluter en mindre yta och gör att störning i kretsen, från omgivningen, blir mindre.



Figur 1-22 Jordning i båda ändar av skärmen när kretsen är jordad i båda ändar

Frekvensens betydelse

Tidigare påpekades att från den störande kretsen induceras en spänning $V_{\text{skärm}} = j \omega M_{1\text{skärm}} I_1$ i skärmen. Om L_s och R_s är skärmens induktans och resistans, kommer skärmens ström $I_{\text{skärm}}$ att inducera en spänning V_N i centerledaren. V_N kan skrivas som:

$$V_N = (j\omega / (j\omega + (R_s / L_s))) * V_s \quad (1-16)$$

- V_N är noll vid frekvensen noll (likström).
- V_N blir nästan lika stor som V_s om frekvensen blir ungefär $\omega = 5 * R_s / L_s = 5 * \omega_c$. ω_c kallas för skärmens brytfrekvens.
- Skärmen blir effektiv i **Figur 1-22** när frekvensen är större än $5 * \omega_c$.

1.6.4.2 Skärmning av en störande krets

En störande krets bör skämmas och skärmen bör jordas i båda ändarna. Se **Figur 1-23**. Minskning av slingans area är den egentliga orsaken som minskar störningarna från ledaren till jordanslutningen mellan punkterna A och B.

- Men varför ska returströmmen gå genom skärmen och inte genom jordens nollresistans?

Anledningen är den ömsesidiga induktansen M , som finns mellan signalledning och skärmen,

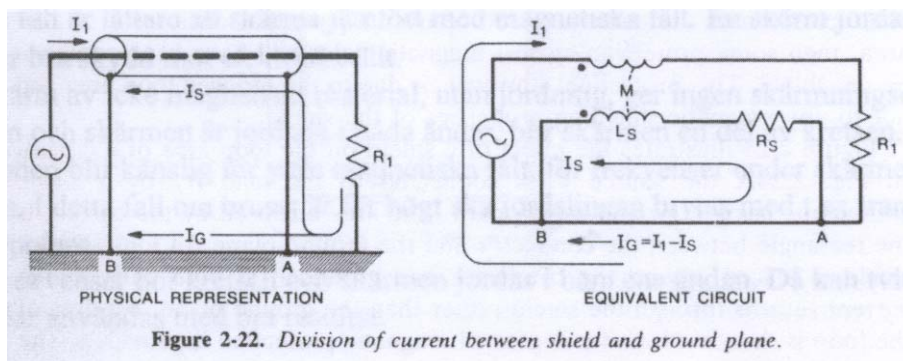
gör att skärmen skapar en väg för returströmmen som har mindre impedans än returvägen genom jord. Observera slingan A-Rs-Ls- B-A i **Figur 1-23**. $M = L_s$ (För härledning: se Noise Reduction: Henry W. Ott) ger:

$$I_s(j\omega L_s + R_s) - I_1(j\omega M) = 0 \Rightarrow I_s = I_1(j\omega / (j\omega + (R_s/L_s))) \Rightarrow$$

$$I_s = I_1 * (j\omega / (j\omega + \omega_c)) \quad (1-17)$$

Om frekvensen är minst fem gånger så stor som brytfrekvensen för skärmen ω_c blir strömmen i skärmen I_s , lika stor som strömmen i kretsen I_1 enligt Ekvation 1-17.

- Med andra ord går hela returströmmen genom skärmen och störningar flyttas inte till jordsystemet.



Figur 1-23 Effekten av skärmning på en störande krets (Noise reduction techniques in electronic systems: Henry W.Ott)

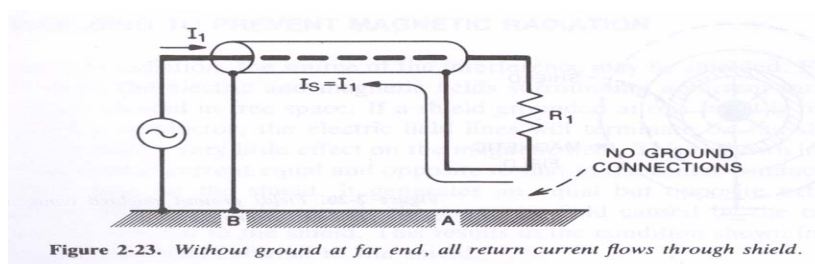
1.6.4.3 Skärmning vid lägre frekvenser

Vid lägre frekvenser än $5 * \omega_c$, går en del av returströmmen genom jorden och minskar effekten av skärmningen. Det finns även andra nackdelar, när frekvensen ligger under skärmens brytfrekvens:

- Skärmen är en del av kretsen, varje störning på skärmen utifrån, flyttas till signalkretsen.
- Om det finns någon potentialskillnad mellan skärmens två ändar (i jordsystemet), kommer detta att uppträda som störspänning i kretsen.

- Detta gör att arrangemanget i **Figur 1-23**, inte bör användas för lägre frekvenser än skärmens brytfrekvens. Alltså kretsen ska inte jordas i båda ändarna vid låga frekvenser.

För att förhindra magnetiska störningar att påverka en sådan krets i lägre frekvenser, bör både kretsen och skärmen, jordas i bara ena ändan enligt **Figur 1-24**. Hela returströmmen går genom skärmen och inte jorden.



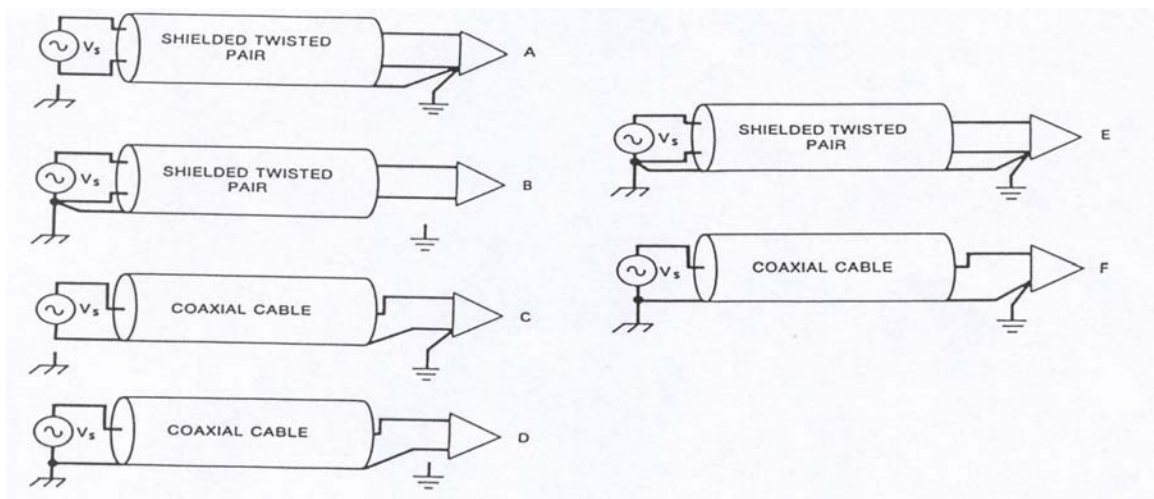
Figur 1-24 Jordning av krets och skärmen i ena ändan är bra för låga frekvenser. (Noise reduction techniques in electronic systems: Henry W.Ott)

Tvinnade kablar

Hittills har bara koaxialkablar diskuterats. En annan möjlighet är att använda tvinnade kablar, med eller utan skärm. Tvinnade kablar har mindre slingarea och blir mindre känsliga mot magnetisk koppling i lägre frekvenser (ytan A, som tar emot störningar, blir mindre). Samtidigt blir mindre B-fält från ett par tvinnade ledningar, eftersom fält från signal- och returström nästan tar ut varandra. **Se Figur 1-18.**

1.6.4.5 Sammanfattning av skärmens effekt för kablar

- Elektriska fält är lättare att skärma jämfört med magnetiska fält. En skärm jordad i en punkt eller fler, ger bra skydd mot elektriska fält.
 - Bara en skärm av icke magnetiskt material, utan jordning, ger ingen skärmningseffekt.
 - När kretsen och skärmen är jordade i båda ändar, blir skärmen en del av kretsen. Det gör att konfigurationen blir känslig för yttre magnetiska fält, för frekvenser under skärmens brytfrekvens. I detta fall om störningen är för hög ska jordslingan brytas med t ex transformator eller optokopplare **Se Avsnitt 1.6.7.**
 - Vid låga frekvenser bör kretsen och skärmen jordas i bara ena ändan. Då kan tvinnade eller koaxial kablar användas med bra resultat. **Se Figur 1-25.**
-
- Fall A, B, C och D visar de rekommenderade metoderna för kabeldragning, vid låga frekvenser.
 - Fall E och F är mer tillämpliga för höga frekvenser ($f > \text{fem gånger skärmens brytfrekvens}$) men om metoderna används för låga frekvenser, kan det bli slingströmmar och galvanisk separation kan behövas.



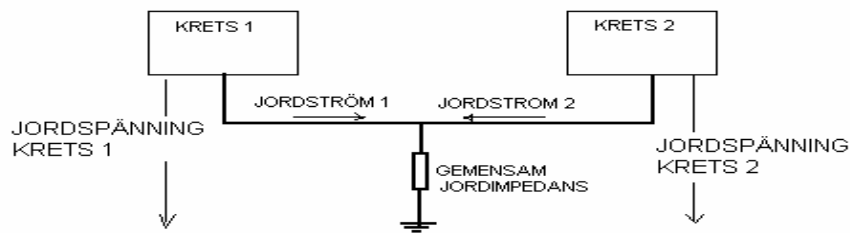
Figur 1-25 Lämplig kabeldragning vid olika frekvenser (Noise reduction techniques in electronic systems: Henry W.Ott)

1.6.5 Konduktiv koppling

Ett mycket vanligt sätt för störningar att sprida sig är genom konduktiva ledningar.

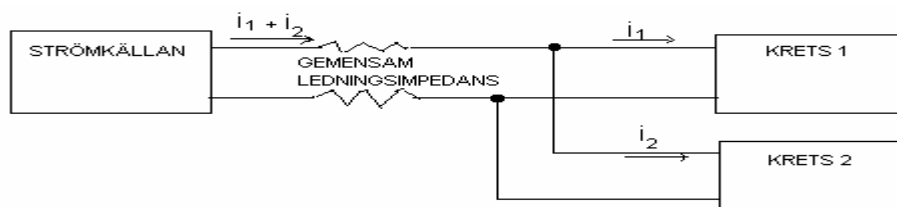
- En dataledning som passerar genom en miljö med mycket störning, kan överföra störningarna till elektroniska apparater.
- Störningar kan även nå apparaten genom kraftledningar.

- När två apparater har samma jordimpedans, kan störning från en apparat överföras till den andra apparaten. Se **Figur 1-26**. Krets 1 och 2 har samma jordimpedans. En brusig signal som går till jord t ex från krets 2, gör att jordspänningen för krets 1 ändras. På detta sätt flyttas störningar från krets 2 till krets 1.



Figur 1-26 Exempel på konduktiv koppling mellan två kretsar

- Två kretsar som matas via samma kraftledning, kan också störa varandra. Se **Figur 1-27**. Om krets 2 drar ström, kan det bli spänningsskillnader vid krets 1:s ingång. Problemet blir speciellt märkbart när en stor och strömkrävande apparat (vid start av en motor t ex), matas på samma ledning som en känslig apparat.



Figur 1-27 Exempel på konduktiv koppling mellan två kretsar

1.6.6 Reducering av induktans, L

Elektrisk ström i en ledare, ger magnetiskt flöde φ , runt ledaren enligt **Ekvation 1-18**:

$$\varphi = L I \quad (1-18)$$

Konstanten L kallas för induktansen av ledaren. Induktans beror på ledarens geometri och magnetiska egenskapen av miljön som omger ledaren.

När en rak ledaren har cirkulärt snitt med radie r [meter] och längden ℓ [meter] kan induktansen L [mikro Henry], beräknas ungefär enligt:

$$L \approx 0.2 * \ell * \ln (2\ell / r) \quad (1-19)$$

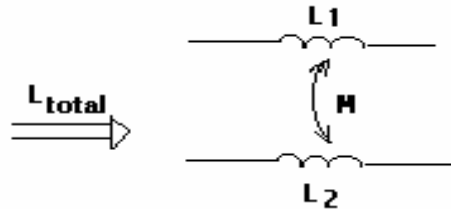
Ekvation 1-19 visar att:

- En ledares induktans är direkt proportionell med längden av ledaren. För att reducera induktansen ska, i första hand, längden av ledaren reduceras.
- Induktans kan även reduceras med ökning av ledarens area men åtgärden är inte lika effektiv som minskning av längden, eftersom L minskar med logaritmen av r . Till exempel en fördubbling av ledarens diameter, ger endast en induktansminskning på cirka 20 %.

Induktans för två parallella ledare

Två parallella ledare (se Figur 1-28) har förutom varsin självinduktans L_1 och L_2 en ömsesidig induktans M mellan varandra. Den totala induktansen för två parallella ledare kan skrivas som:

$$L_{\text{total}} = (L_1 L_2 - M^2) / (L_1 + L_2 - 2M) \quad (1-20)$$



Figur 1-28 Den totala induktansen mellan två parallella ledare

Om de två parallella ledarna är identiska dvs $L_1 = L_2 = L$ kan ekvation 1-20 skrivas som

$$L_{\text{total}} = (L + M) / 2 \quad (1-21)$$

Ekvation 1-21 visar att:

- Om M är liten (vilket är fallet när ledarna ligger långt ifrån varandra), kommer L att halveras, när två ledare är parallella.
- Om ledarna är mycket nära varandra blir $M \approx L$ och därmed:

$$L_{\text{total}} = (L + L) / 2 = L \quad (1-22)$$

Ekvation 1-22 visar att:

- Två parallella ledare som ligger tätt intill varandra, har ungefär samma induktans som om det fanns bara en enda ledare.

1.6.7 Separation och isolation

Jordströmmar kan vara en bruskälla speciellt när systemet är jordat i flera punkter (multipel jordat: se Avsnitt 1.6.9 signaljordning. Problemet blir speciellt märkbart när det finns långa avstånd mellan jordpunkterna eller när signaljord är kopplad till kraftsystemets jord. Någon form av separation eller isolation kan behövas, för att motverka brus från jordströmmarna på signalsystemet. Graden av åtgärder, bestäms naturligtvis av apparaternas känslighet och den elektromagnetiska miljön i anläggningen. De vanligaste metoderna för att nå detta ändamål är:

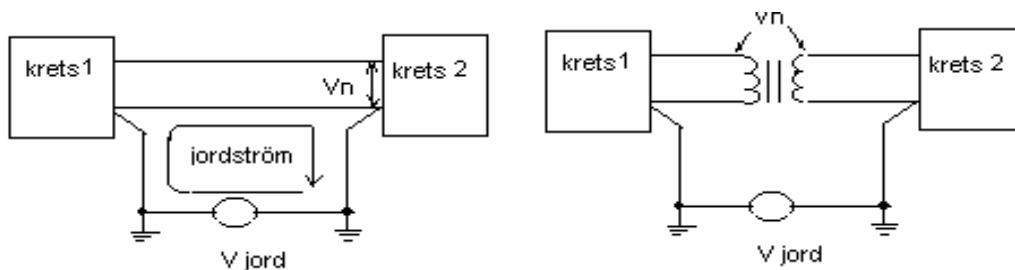
- Transformatorer
- Common Mode Choke
- Optokopplare
- Balanserade kretsar
- Frekvensselektiv jordning (hybridjord)

1.6.7.1 Transformatorer

För att skapa galvanisk separation i en krets kan transformatorer användas. Se **Figur 1-29**. Utan separation, kan en spänningsskillnad i jordsystemet eller yttre magnetiska fält, gör att jordströmmen flyter, och därmed brusspänningen V_n uppstår vid ingången av krets 2. Om

transformator används för separation, gör att V_n hamnar mellan transformators lindningar och inte på krets 2:s ingång. Nackdelar med transformatorer är att:

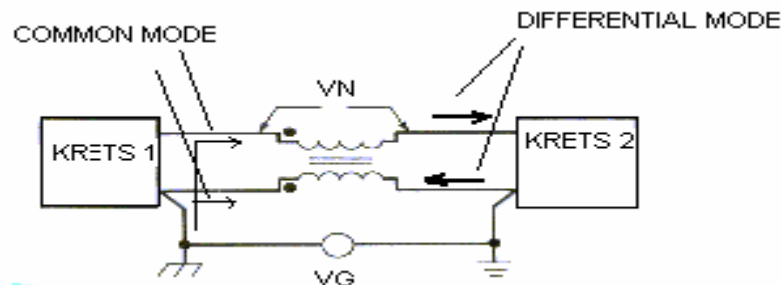
- För högre frekvenser kan det bli kapacitiv koppling mellan transformators lindningar och parasitströmmar når krets 2 i alla fall. Någon form av skärm kan behövas mellan lindningarna.
- Transformatorer är stora och dyra. De har begränsade frekvensrespons, kan inte leda likström t ex.
- För varje signalledning ska finnas en transformator.



Figur 1-29 Galvanisk separation mellan två kretsar

1.6.7.2 Common Mode Choke

I en Common Mode Choke är induktansen L_1 och L_2 för lindningarna lika. Lindningarna ligger väldigt nära varandra och detta gör att $L_1 = L_2 = M$. (Se avsnittet Induktans för två parallella ledare). Brusspänningen V_n , hålls borta från krets 2 och ligger istället på lindningarna, enligt **Figur 1-30**. Koppling i **Figur 1-30** har många fördelar jämfört med kopplingen av transformatorn i **Figur 1-29**.

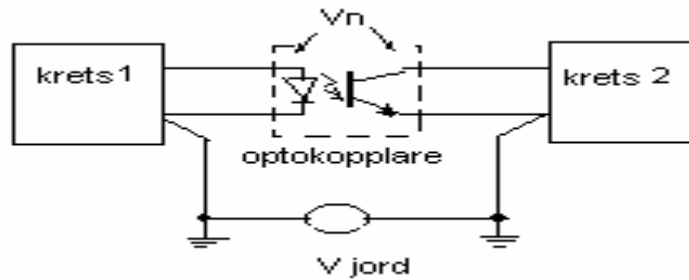


Figur 1-30 Common Mode Choke

- Likström och önskade differential mode signaler, som går fram och tillbaks i kretsen, kan passera, medan oönskade common mode signaler, som har samma riktning, blockeras. Se **Avsnitt 1.6.4 ekvation 1-17**. Samma princip med ömsesidig induktans, gäller även lindningarna här.
- För flera signalledningar kan samma transformator användas.

1.6.7.3 Optokopplare

Galvanisk separation kan även uppnås med optokopplare enligt **Figuren 1-31**. Optokopplare är speciellt bra för digitala kretsar, men inte analoga. Den oönskade common mode brus (se ballanserade kretsar), kan elimineras radikalt även om spänningsskillnaden är stor. Brusspänningen V_n , ligger över optokopplaren istället för krets 2.



Figur 1-31 Principen för optokopplare

1.6.7.4 Balanserade kretsar

En metod att reducera störningar är att använda balanserade kretsar. En balanserad krets är en krets med två ledningar. Se **Figur 1-32**. Ledningar och de inkopplade kretsarna har samma impedans i förhållande till jord. Störningar som förekommer i omgivningen, blir lika mycket på båda ledningar och tar ut varandra i lasten.

- Graden av balans (graden av symmetri) i en krets, kallas för Common Mode Rejektion Ratio (CMRR). Ju högre CMRR desto bättre skydd mot störningar. Det här är alltså ett effektivt sätt att reducera störningar i elektroniken och förbättra EMC:n i systemet.

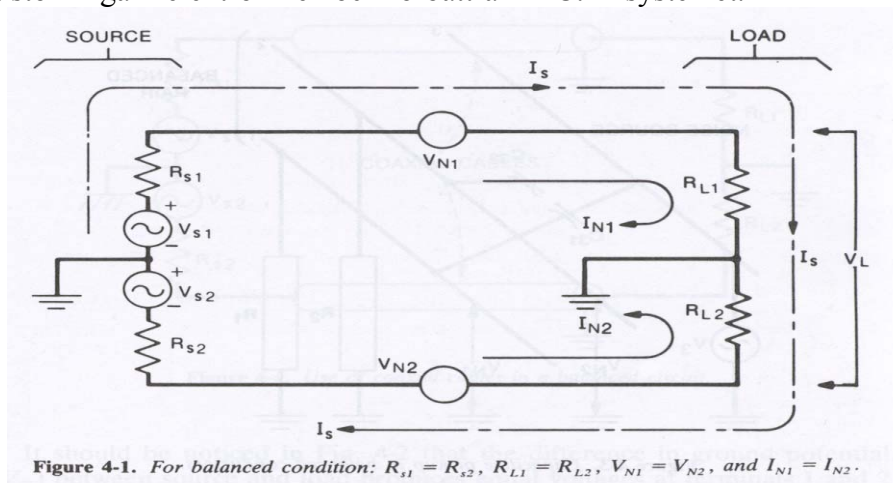


Figure 4-1. For balanced condition: $R_{s1} = R_{s2}$, $R_{L1} = R_{L2}$, $V_{N1} = V_{N2}$, and $I_{N1} = I_{N2}$.

Figur 1-32 En balanserad krets (Noise reduction techniques in electronic systems: Henry W.Ott)

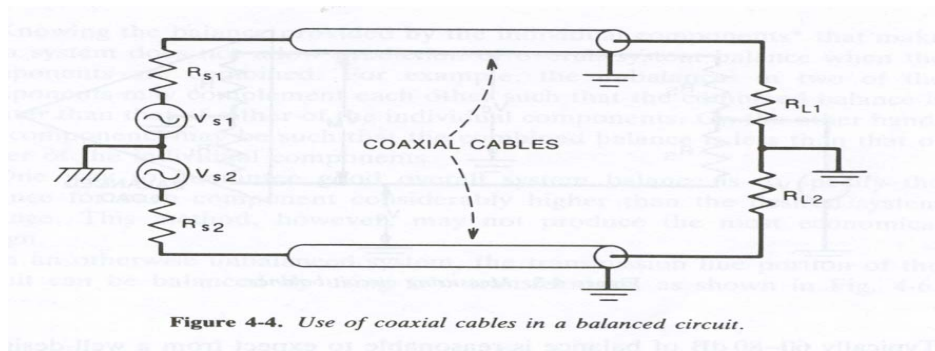
På ledning 1 i Figur 1-32, finns det störspänningen V_{N1} och på ledning 2 finns det störspänningen V_{N2} (Common Mode: har samma riktning). De ger störströmmar I_{N1} och I_{N2} i lasten. I_s är den önskade signalströmmen. Den totala spänningen över lasten blir då:

$$V_L = (I_{N1} R_{L1}) - (I_{N2} R_{L2}) + I_s (R_{L1} + R_{L2}) \quad (1-23)$$

I ekvation 1-23 är $V_{N1} = I_{N1} R_{L1}$ och $V_{N2} = I_{N2} R_{L2}$ de oönskade signalspänningar och $I_s (R_{L1} + R_{L2})$ är den önskade spänningen i mottagaren. Om $V_{N1} = V_{N2}$ blir då spänningen över lasten lika med den önskade signalspänningen.

- En balanserad krets, i kombination med tvinnade kablar och skärmning, ger bra skydd mot både induktiva och kapacitiva kopplingar.
- Tvinnade kablar är ju själva en balanserad konfiguration. Skärmning ger ännu bättre resultat där kretsen är inte fullt balanserad.

- Koaxial kablar har däremot ingen balanserad konfiguration. Om koaxial kablar ska användas i en balanserad krets, då ska helst två kablar användas, för att hålla balansen. **Se Figur 1-33**



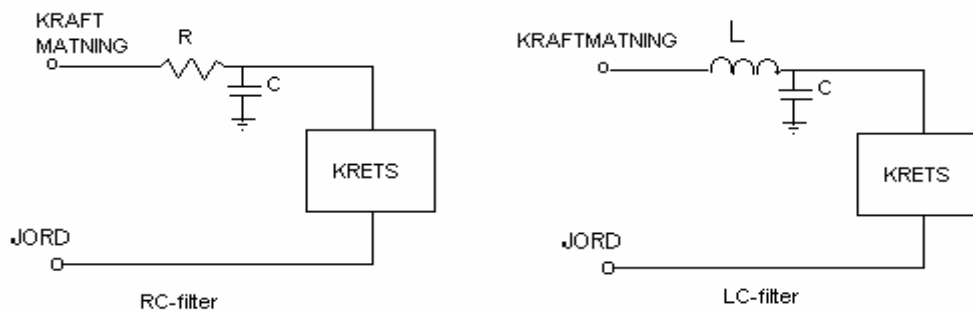
Figur 1-33 Användning av coaxial kablar i balanserade kretsar (Noise reduction techniques in electronic systems: Henry W.Ott)

1.6.8 Filtrering

Kraftförsörjning är inte helt störningsfri. Därför är det fördelaktigt att använda något slags filter, för att förhindra störningarna att nå elektroniska kretsar.

R-C eller R-L filter kan med fördel användas till detta ändamål. Det blir förstås spänningsfall över resistorer som reducerar filteringsgraden.

L-C filter ger bättre filtrering med samma spänningsfall i matningsspänningen speciellt för högre frekvenser. **Se Figur 1-34**



Figur 1-34 RC och LC filter

Observera att LC- filter har en viss resonans frekvens, $f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ och dämpningsfaktor

$\zeta = R/2\sqrt{C/L}$ vid resonans. Kretsen dimensioneras så att f_r blir mycket mindre än

överföringsfrekvensen och ζ ska vara större än 0.5, annars dämpningen av signalen blir för stor. R är resistansen hos induktorn. För brusiga kretsar är RC- filtret att föredra p g a att en del av bruset omvandlas till värme i resistansen.

För ännu högre frekvenser, används kretsar som är totalskärmade. Skärmen förhindra brusiga kretsar att störa andra apparater. Alla ingående eller utgående ledningar filtreras så ett förhindra störningar att sprida sig till andra kretsar.

1.6.9 Signal jordning

En bra definition för en signaljord är: En "lågimpedans väg" för strömmen att återvända till källan.

- Det är returströmmarnas väg som bestämmer jordslingans storlek och därmed systemets känslighet mot magnetiska kopplingen. Därför vid design av jordsystem ska hänsyn tas till returströmmarnas väg.
- Även impedansen för jordledningar är viktig. Impedansen är viktig eftersom det uppstår potentialskillnad över en ledning p g a ledningens impedans.

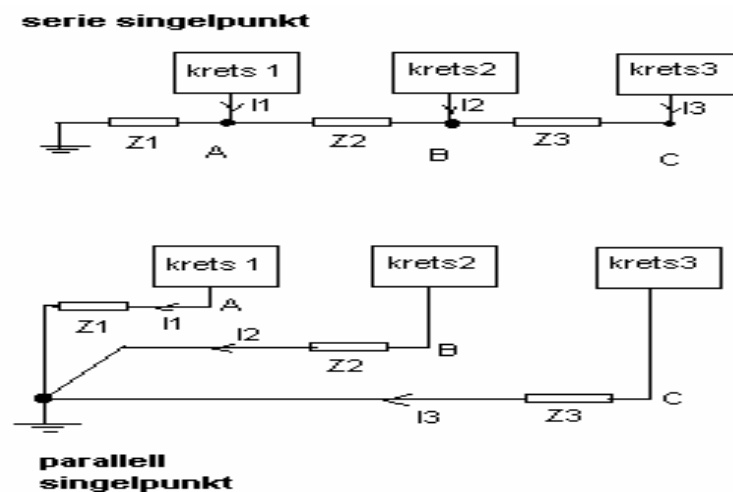
Kraftsystemets jord går i praktiken inte att användas som signaljord. Anledningen är att de uppmätta spänningar mellan två olika punkter i jordningssystemet kan gå upp till flera millivolt eller till och med flera volt. Dessa potentialskillnader är helt enkelt för stora för ett elektroniskt system som jobbar med låga spänningar. Signal jord kan delas i tre kategorier:

- 1) Singelpunkt jord
- 2) Multipelpunkt jord
- 3) Hybrid jord

- Beroende på systemets storlek, funktion och frekvens ska en speciell kategori av jordning eller en kombination av dessa användas. Normalt finns krav att koppla signaljorden till kraftjord, i en punkt, för elsäkerhet.

1.6.9.1 Singelpunkt jordsystem

Singelpunkt jord, kan vara serie eller parallell enligt **Figur 1-35**.



Figur 1-35 Singelpunkt jordsystem

Serie singelpunkt jord är väldigt vanlig p g a sin enkelhet. Däremot är den inte bra för system som jobbar med olika kraftnivåer. Anledningen är att p g a den konduktiva kopplingen som finns, påverkar kretsarna varandra. Punkt A i figuren för serie singelpunkt har t ex potentialen: $V_A = Z_1 (I_1 + I_2 + I_3)$ men däremot har punkt C potentialen:

$V_C = Z_1 (I_1 + I_2 + I_3) + Z_2 (I_2 + I_3) + Z_3 (I_3)$. Strömmen i andra kretsar påverkar alltså V_C .

Parallell singelpunkt jord är den bästa konfigurationen för låga frekvenser (under 1 MHz). Det finns ingen konduktiv koppling i jordsystemet och kretsarna kan inte påverka varandra genom konduktiv koppling. Potentialen i punkten C blir t ex: $V_C = Z_3 (I_3)$ och för punkten A blir $V_A = Z_1 (I_1)$. Jordpotentialen för varje krets är nu en funktion av jordström och jordimpedans för just denna krets och inte de andra kretsarna.

Nackdelen med denna typ av jordning är:

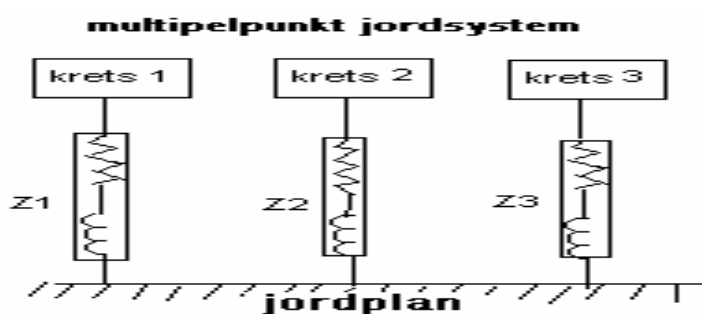
- den är dyr eftersom antalet jordledningar kan bli jätte många.
- Singelpunkt jordsystem har begränsningar för högre frekvenser. Induktansen för jordledningar ökar med längden av ledningen och gör att impedansen för jordsystemet blir för stort för höga frekvenser.
- I ännu högre frekvenser, kan längden av jordledning bli lika stor som udda multiplar av kvartsvåglängden. Detta resulterar i att impedansen i jordledning blir jätte stor och jordsystemet försämras. **Se Appendix 7.**
- Även jordledningar som är längre än tjugondel våglängden, kan börja att fungera som antenner och störa andra system.

1.6.9.2 Multipelpunkt jordsystem

För höga frekvenser (över 10 MHz) och digitala system används multipla jordpunkter, enligt **Figur 1-36**. Kortare ledningar gör att jordimpedansen minimeras. Alla kretsar ansluts till närmaste jordplan som brukar vara apparatens chassi. Anslutningarna ska naturligtvis hållas så korta som möjligt.

- Denna typ av signaljordning ska inte användas för låga frekvenser.

För frekvenser mellan 1-10 MHz kan fortfarande singelpunkt jord användas. Förutsättningen är att längsta jordledningen är kortare än $1/20$ våglängden.

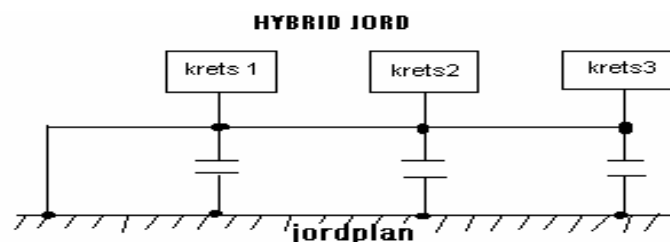


Figur 1-36 Multipelpunkt jordsystem

Jordplanet kan vara en metallplatta, av bra elektrisk ledande material som silver t ex. Men även en maskformat nät fungerar bra.

1.6.9.3 Hybrid jordsystem

Figur 1-37 visar ett hybrid jordsystem. Ett sådant system fungerar bra för både låga och höga frekvenser. Systemet blir singelpunkt jord för låga frekvenser (kondensatorerna blockerar strömmen) och multipelpunkt jord för höga frekvenser (kondensatorerna blir kortslutna).



Figur 1-37 Hybrid jordsystem

1.7 EMC i byggnader

1.7.1 Inledning

Kravet som finns i starkströmsföreskrifterna gäller maximala spänningar för personskydd. Skyddsjordning ger emellertid normalt inte tillräckligt skydd för att EMC-kraven ska uppfyllas. Detta innebär att en förbättring av jordning och potentialutjämningsystem är nödvändig.

Enligt Starkströmsföreskrifterna 1999:5, ska potentialutjämnning utföras vid nybyggandet och det här gäller för såväl små som stora byggnader. I vilken omfattning ska potentialutjämnning utföras, är en fråga om hur stora ekonomiska medel som finns och vilken funktion byggnaden ska ha. Observera att enligt Svensk Standard (SS-EN 50310) ökar komplexiteten av jordning och potentialutjämningsystem, gradvist, med de krav som ställs på anläggningen. (Se Appendix 6).

En liten byggnad

I en liten byggnad som ligger mitt i stans tätbebyggda område, utan några avancerade elektriska och teletekniska utrustningar, som matas via en liten elcentral, behöver jordning och potentialutjämnning, ur EMC-synpunkt, inte utföras i samma utsträckning som i en telekommunikationscentral t ex, som innehåller många dyra och känsliga elektroniska utrustningar.

- Elsäkerhetsmässiga krav i starkströmföreskrifterna ska följas. EMC är inget större problem i en sådan liten byggnad.

Det som ska göras i en liten byggnad är att sätta upp en huvudjordningsskena och ansluta inkommande media, t ex skärm på inkommande teleledning, fjärrvärmeröret, avlopp. Huvudjordningsskena förbinds också mot elcentralens jordskena. Större metallutsträckning som armerad järn och stålkonstruktion enligt rådet §413.1.2.1 bör anslutas. Rådet är en rekommendation men åtgärden är i de flesta fall enkel vid nybyggnation och ger ett bra jordplan.

- Om det är en fristående byggnad som matas från luftledningar eller det finns risk för åska (Se även avsnittet åskskydd ”bedömningen av behovet av åskskydd”), bör enligt föreskrifterna jordningselektrod installeras. §(413.1.2.1)

1.7.2 Byggnader med omfattande informationsteknologi

- En ganska detaljerad beskrivning av planering och installation av fastighetsnät och kablage inne i byggnader med omfattande informationsteknologi finns på Svensk Standard SS-EN 50 174-2. Standarden gäller ”vanliga byggnader” d v s inga extraordinära elektromagnetiska miljöer och spänning under 1000 V.
- **Avsnittet 1.6 Teori** ger en bra förståelse om innehållet i standarden.

I större byggnader som sjukhus, skolor, byggnader med mycket informationsteknologi (IT), fabriker, telekommunikationscentraler, finns det en hel del tekniska utrustningar. Det finns t ex telefonväxel, antennenläggning, datanät, larm och passagekontroll. Till byggnaden kommer tele, elkraft, fjärrvärme, vatten och avlopp. I en sådan byggnad kommer huvudcentralen att se ut som en mindre ställverk. I byggnaden kommer det att förmodligen finnas flera undercentraler. Jordningsskenor installeras vid de undercentralerna.

Eftersom verksamheten i en större byggnad, innehåller mycket elektroniska utrustningar därför måste hänsyn tas till apparatskador, EMC-störningar och de funktionfel som kan

förekomma i systemet. EMC-skydd i en sådan byggnad kommer att ställa större krav på potentialutjämning och jordningssystemet.

Nyprojektering (SS-EN 50 174 -2)

För att uppnå ett bra EMC-utförande i en byggnad är det ändamålsenligt att, redan vid nyprojektering, tänka på följande:

- En viss koordination ska finnas mellan byggnadens metalliska struktur och det kompletta informationsteknologisystem som ska installeras.
- En pålitlig fundamentjord och/eller ringlina planeras.
- Betongarmering och stålkonstruktion förses med anslutningsterminaler (svetsade). Dessa förenklar anslutning till jordning och potentialutjämningsystemet.
- Metalliska delar som servisirör, kanaler sammankopplas helst i flera punkter och inkluderas i potentialutjämningsystemet.
- TN-S system bör användas.
- I rum med känslig elektronik, ska solidjord typ maskformad jord eller metalliska plattor planeras.
- Åskskydd bör installeras.

1.7.3 Generella krav som ställs på jordning och potentialutjämningsystem

1) Elsäkerhet

Elsäkerheten kommer alltid i första hand. Skyddsjordning och potentialutjämning ska utföras noggrant, enligt starkströmföreskrifterna,. Även rekommendationer i föreskrifterna bör följas. För kabeldragning i kabelkanaler, där det finns både kraft- och IT-kablar, finns det detaljerade installationsbestämmelser, för att uppnå bättre säkerhet. Se EN 50174-2:2000

2) Signalreferens

För att bibehålla ett bra referensplan bör både kraftsystem och informationsteknologisystem potentialutjämnas på rätt sätt. För att uppnå detta ändamål, bör jordningssystemets impedans hållas så låg som möjlig. Signal returströmmar bör hållas borta från kraftdistributionsjord. För komplicerade system bör ”maskade nät” eller ”solida plattor” med hög konduktivitet, användas. Frekvens och den magnetiska miljön bestämmer storleken på maskens storlek.

3) EMC-krav

Svensk Standard (Se EN 50174-2:2000) har specificerat de grundläggande krav för planering, implementering och operation av informationsteknologi installation i byggnader.

Enligt de EMC-krav som finns i relevanta standarder (EMC-direktiv):

- Störningar från ett installerat system ska hållas under de bestämda gränserna.
- Elektriska och elektroniska apparater ska kunna arbeta utan att störa varandra.

För att uppnå detta ändamål (enligt europeiska och internationella standard):

- Elektromagnetiska störningar, från de installerade apparater eller system i en anläggning, ska ligga under en viss nivå.
- Krav som ställs på installationens utförande varierar, beroende på elektromagnetiska miljön. Se vidare nästa avsnitt.

1.7.4 De viktigaste åtgärder för att eliminera störningar i en byggnad, när metalliska kablar används

1.7.4.1 EMC-miljön

Europeiska standard definierar olika elektromagnetiska miljöer. Vid val av apparater, ska hänsyn tas till apparatens immunitetsgrad och känslighet mot elektromagnetiska fält. (CE-märkning).

1.7.4.2 Balanserad transmission

Balanserad transmission förbättrar immuniteten för ledningen och minskar de eventuella störningarna från signalledningen. (Se teori delen för balanserade kretsar).

- Balansering ska utföras för hela frekvensspektrumet.
- Beroende på apparaternas känslighet och den elektromagnetiska miljön, kan olika krav ställas på symmetrigraden (Common Mode Rejection Ratio, CMMR).

1.7.4.3 Skärmning av metalliska kablar

Kabelskärm separerar det externa elektromagnetiska fältet som finns i omgivningen och den signalledningen som finns inne i kabeln. En skärm kan även isolera en störande krets.

En rätt utförd jordning av skärmen är en viktig förutsättning att skärmningen blir effektiv, enligt diskussionerna i **Avsnitt 1.6 teori**.

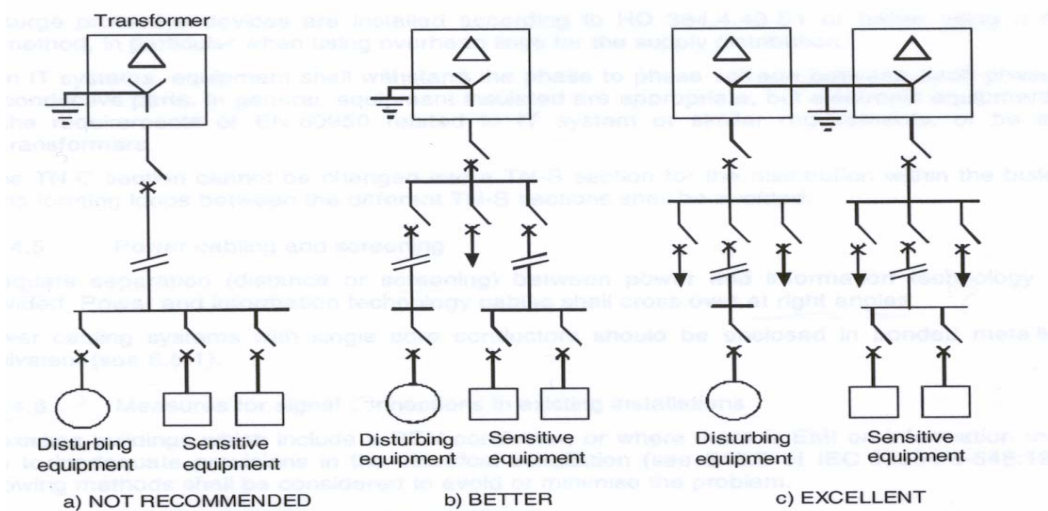
De viktigaste riktlinjerna vid installationen av skärmade kablar är: (EN 50174-2:2000)

- Skärmen rekommenderas att kopplas till apparathöljet.
- Om skärmen ska vara effektiv, måste den anslutas till apparathöljet med hela 360°. Om skärmen kopplas till höljet med en ledare, utgör detta en induktans mellan skärmen och jord vilket inte är fördelaktigt, speciellt för höga frekvenser.
- Skarpa böjningar av signalkablar ska undvikas för att behålla symmetrin i kretsen.
- Installation ska utföras så att bästa EMC-skydd uppnås över ”hela det frekvensspektrum” apparaterna jobbar med. (skärmning och jordsystem för olika frekvenser)
- Skärmen ska täcka hela längden av kabeln.

1.7.4.4 Kraftförsörjningssystem

De viktigaste riktlinjerna vid installation av kraftförsörjningssystem är:

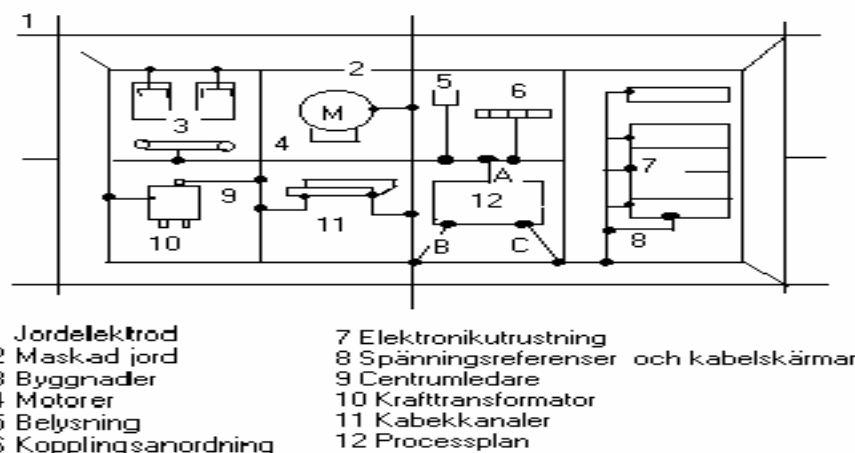
- TN-S system är det bästa kraftförsörjningssystem ur EMC-synpunkt och bör användas där det finns möjlighet.
- Följ krav och rekommendationer enligt starkströmsföreskrifterna för potentialutjämning. **Se Figur 1-2**
- Försök att få balanserad strömfördelning mellan olika faser i trefasssystem. Detta minskar det magnetiska fältet i omgivningen.
- En kraftigare neutralledare (minst lika kraftig som fasledare) bör användas, för att motverka överbelastningen av neutralledaren p g a asymmetri och övertonsströmmar.
- Störande och känsliga belastningar bör matas från separata skenor. **Figur 1-38** visar hur matningssystem för både känsliga och störande apparater kan förbättras. Den konduktiva kopplingen minskar steg för steg. (Se **Avsnitt 1.6 teori**)



Figur 1-38 Separation mellan matningssystem av känsliga och störande apparater (Enligt Svensk Standard EN 50174-2:2000)

Även den fysiska separationen mellan störande och känsliga apparater är viktig. Se **Figur 1-39**. Det minskar magnetiska kopplingen.

- Det ska finnas ett visst avstånd mellan de (distans principen). En transformatorstation ska naturligtvis inte byggas bredvid ett rum med känslig utrustning.
- Olika zoner ska upprättas, elektronikzon, maskinzon o s v. Dessa zoner kopplas förstås ihop genom jordningssystemet.



Figur 1-39 Sammankoppling mellan olika apparater, system och jordplan i en större anläggning (Sten Benda, ABB-kontrollskola)

Signalkablar i byggnader med fyrledarsystem

Vid existerande byggnader med fyrledarsystem, finns PEN-ledare i byggnaden. Asymmetri och övertonströmmar belastar då PEN-ledaren. Även problemet med vagabonderande strömmar (**Se avsnitt 2.2.3.2**) och magnetiska fält är mer förekommande i byggnader med fyrledarsystem. Magnetfältet kan direkt påverka känslig utrustning, därför:

- Fyrledarsystem är inte tillämpligt för byggnader med känslig informationsteknologi utrustningar.

Om det är tänkt att installera informationsteknologi i gamla byggnader med fyrledarsystem, är det bäst att installera ett lämpligt och separat försörjningssystem för just denna IT-avdelning. (SS 50174-2: 6-4). För att minimera problemet kan följande åtgärder vidtas:

- För signalledningar kan fiberoptiska ledningar användas.
- Klass II apparater (med dubbel eller förstärkt isolering) användas i större utsträckning.
- Galvaniskt separera signalkretsen med lämpliga transformatorer.

1.7.4.5 Separation mellan signal och kraftkablar

Mellan Kraft- och signalkablar ska finnas ett visst avstånd för att förhindra elektriska och magnetiska kopplingen. De viktigaste faktorerna som bestämmer detta avstånd är:

- Frekvensen.
- Den lokala elektromagnetiska miljön.
- Immunitetsgrad av apparater som är kopplade till signalkablarna.
- Typen av kabel (koaxial eller tvinnade, skärmad eller icke skärmad).
- Längden av sträckan där kablarna ligger parallellt med varandra.
- Kvaliteten av kopplingsanordningar för kablarna mellan kabelskärmar och chassin.
- Jordningssystemets utförande.

För mer detaljerade beskrivning se SS 50174:2

1.7.4.6 Jordning och potentialutjämning, parallella ledningar och impedansen

En bra beskrivning av utförandet av ett optimalt jord- och potentialutjämningsystem finns på Svensk Standard 50310:2000. Standarden bör följas i alla nya byggnader och även i äldre byggnader så långt det är möjligt.

Potentialutjämning och jordning har två grundläggande uppgifter:

- **Elsäkerheten:** Att begränsa beröringsspänningen och utgöra en säker väg med låg impedans, för jordströmmar.
- **EMC (Elektromagnetisk kompatibilitet):** Att utgöra jordreferenspunkt, utjämna potentialskillnader och ge skärmningseffekt för att känsliga apparater ska kunna arbeta utan att bli störd eller störa andra apparater.

Parallella ledningar och impedansen

I en flervåningshus med omfattande informationsteknologi, uppnås bästa resultat när jordning och potentialutjämningsystem byggs i en tredimensionell form (engelska: Bonding Network).

- På detta sätt liknar byggnaden mer och mer en ”Faradays bur” och yttre elektromagnetiska fält från t ex åskskyddssystem eller andra högfrekventa transienter motverkas på ett bra sätt. Även de ofrånkomliga jordströmmarna minimeras.

- Det har visat sig att störströmmar har ett brett frekvensspektrum. Varje strömväg genom jordningssystemet har en viss impedans och en viss resonansfrekvens. Vid vissa frekvenser kan den uppvisa stora impedanser. Stora impedanser betyder stora spänningsfall, vilket inte alls är bra ur elsäkerhetssynpunkt eller EMC. Många parallella strömvägar har många olika resonansfrekvenser. Det är bra ur elsäkerhetssynpunkt att en strömbana shuntas med andra strömbanor som har andra resonansfrekvenser.

- Rent praktiskt, ska jordningssystem i två efterföljande våningar in en byggnad, kopplas ihop med hjälp av alla de vertikala metalliska delar som utsträcker sig mellan de olika våningarna.

Avstånd mellan parallella ledare

Extra parallella ledare av tillräcklig stor dimension kan användas som komplettering. Det optimala avståndet mellan två vertikala ledare, med tanke på den ömsesidiga induktansen (Se **Avsnitt 1.6.6, och Appendix 6.3**) är 3-4 m. På det sättet minskas den totala jordimpedansen vilket är nödvändigt där det finns stor koncentration av känslig utrustning

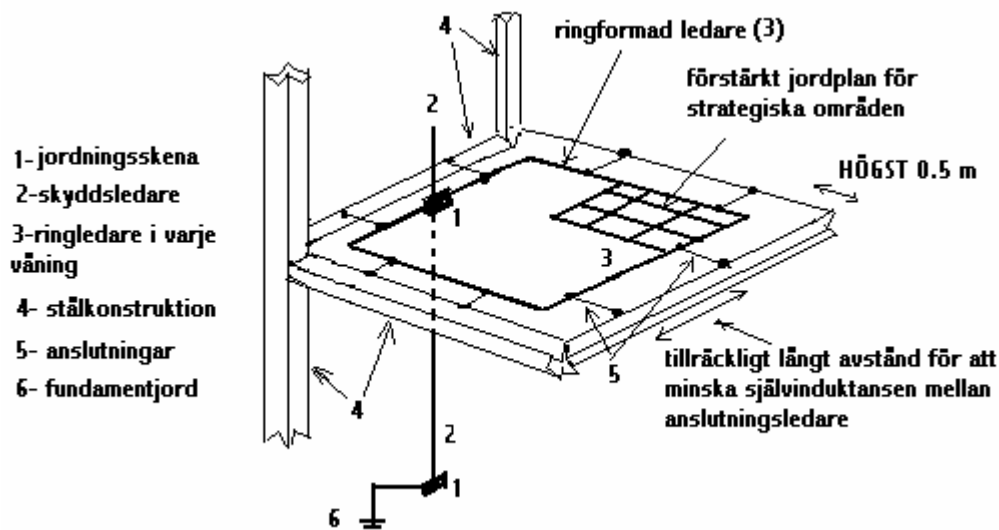
Typ och formen av metallen

Observera att när det gäller högfrekventa störningar kommer ”typen av metallen” inte spela en stor roll. Två olika ledare med samma area och längd, den ena av koppar och den andra av stål, har kanske inte samma resistans, men de har nästan samma högfrekventa impedans. Anledningen är att vid höga frekvenser, går merparten av strömmen över ledarens yta på så kallade ”skin effekten” (se **Teoriavsnitt 3.4: Inträngningsdjup**).

Potentialutjämningsystem (Bonding Network) i en våning

I varje byggnad finns metalliska delar t ex huvudjordningsskenan, skyddsjordledare, metalliska servisirör, stålkonstruktion, som enligt krav och rekommendationer kopplas ihop och utgör ett gemensamt utjämningsystem (Bonding Network). För byggnader med omfattande informationsteknologi kan detta system förbättras, genom anslutning till extra utjämningsledare.

Se **Figur 1-40** och **Bilaga 6**. I varje våning finns en ringformad ledare för potentialutjämnning som är ansluten till jordningsskena i respektive våning som i sin tur är ansluten till den gemensamma skyddsledaren (PE) i byggnaden. Denna ringledare i varje våning, kopplas till byggnadens stålstruktur och betongarmering. Anslutningen sker med två parallella ledare som är högst 0.5 m långa och ligger tillräckligt långt från varandra för att minimera ömsesidiga induktansen. Detta för att uppnå de generella krav som ställs på jordningssystemets impedans. Där det finns större koncentration av känsliga utrustningar, kan jordsystemet förstärkas med jordmaskar enligt figuren.



Figur 1-40 Potentialutjämnning till varje våning i en byggnad med omfattande informationsteknologi (Se även Appendix 6)

1.7.4.7 Filtrering

Filter kan användas för att minska störningar i både kraft och signal distribution när generella installationsbestämmelser inte är tillräckliga för att hålla störningarna i systemet under

apparaternas immunitetsnivåer. Bara energi med de frekvenser, som apparaterna är avsedda för att jobba med, släpps genom ett filter. (Se teori delen)

Det är viktigt att ett filter installeras rätt annars tappar det mycket av sitt effektivitet. De viktigaste riktlinjerna för installation av filter är:

- Filtret ska installeras så nära apparaten som möjligt. Filter installeras därför ofta inne i apparatskåpet med en gemensam solid jordplatta.
- Filttrade och icke filttrade ledningar ska inte löpa parallellt, nära varandra.
- Jordanslutningar för ett filter ska vara så korta som möjligt. På detta sätt minskar Common Mode störningar som kan förekomma på höga impedanser i jordanslutningar. (Se **Avsnitt 1.6 teori: Filtrering**).
- När filter installeras i ett kanalsystem eller på ett kabelstege, bör alla kablar som ligger i samma kanal filtreras. Detta för att magnetiska kopplingen från andra kablar inte minskar filtreringseffekten.
- Vid filtrering av kraftkablar ska skyddsledaren inte passera filtret.
- När filter ligger utanför ett apparat, bör kablar från filter till apparaten vara tvinnade, för att minimera känsligheten mot störningar.

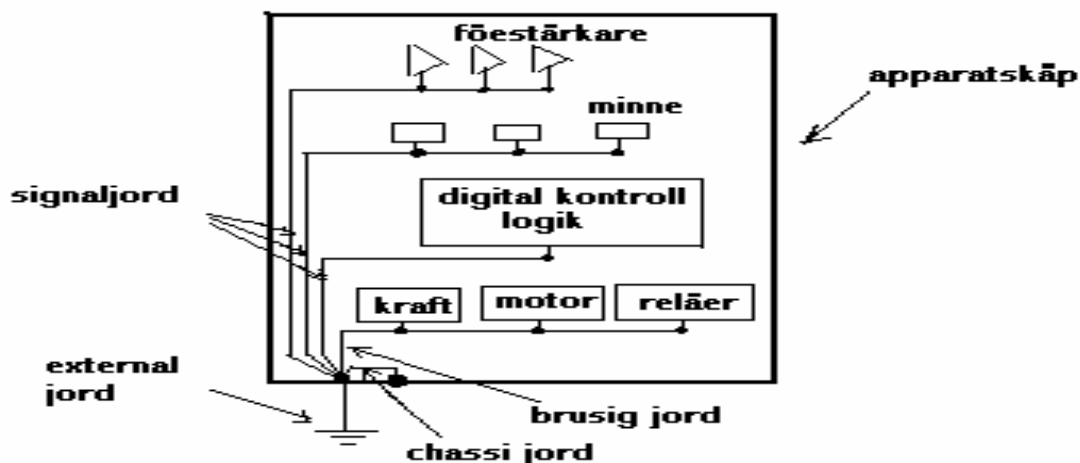
Det finns säkert mycket mer att tänka på vid installationen av signal och kraftkablar, speciellt för att minimera Common Mode signaler. För mer information se EN 50174-2:2000 och EN50174-3.

1.7.5 Praktiska exempel

1.7.5.1 Signaljord för låga frekvenser (under 10 MHz)

På apparatnivå bör störande kretsar, t ex små motorer eller reläer, separeras från känsliga kretsar som förstärkare eller minne. Chassin bör signaljordas separat. Alla jordar bör kopplas ihop i en punkt. Chassi ska normalt även skyddsjordas enligt föreskrifterna.

Figur 1-41 visar ett praktiskt exempel för signaljordning för låga frekvenser, för en digital kassettspelare. En kombination av serie och parallelljordning används för bästa resultat.

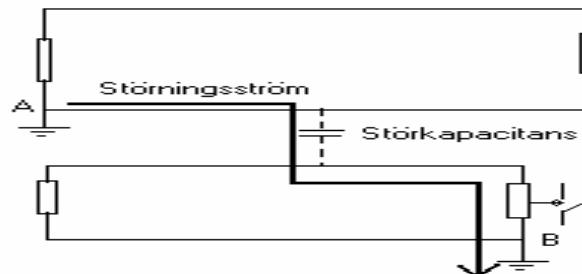


Figur 1-41 Signaljordning i ett apparatskåp

1.7.5.2 Jordning av skärmen för flerledarkablar

När flerledarkablar används är det viktigt att alla ledare jordas på samma ställe vid ena ändan annars kan störcapacitanser ställa till problem. **Figur 1-42** visar en felaktig jordning av en

flerledarkabel som för signaler till ett känsligt kontrollsystem. Spänningsskillnad mellan punkterna A och B i jordsystemet gör att störström går genom kapacitiv koppling från punkten A till punkten B och kan orsaka funktionfel eller skada i apparaten som är kopplad vid punkt B. Observera att störströmmen ökar med ökad frekvens. (Se **Teoriavsnitt 1.6**)



Figur 1-42 Högspänningsstörningar från en kabel till en annan kabel

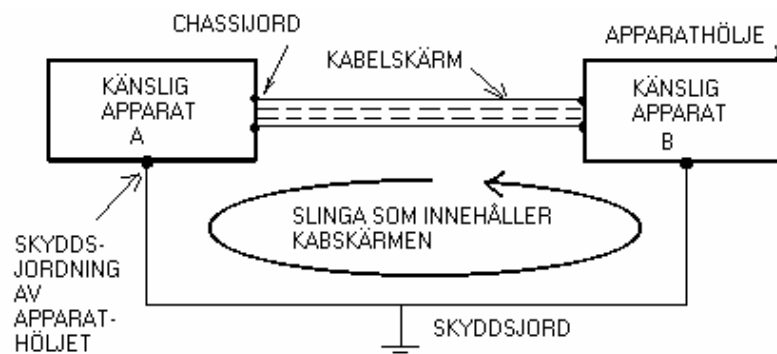
1.7.5.3 En signalkabel är ansluten mellan två skyddsjordade apparater

Det är skillnad mellan chassijord och skyddsjord. En kabel mellan två apparater chassijordas på apparathöljen i båda ändarna. Skärmen ska kunna leda högfrekventa returströmmar. (Se **Teoriavsnitt 1.6.4**).

De flesta elektriska apparater, behöver även kraftförsörjning och apparathöljen normalt ska skyddsjordas enligt starkströmsföreskrifterna. Med andra ord blir en kabelskärmen mellan två apparater, både chassijordad och skyddsjordad i båda ändarna (så kallade dubbeljordning).

Vid händelse av isolationsfel i någon av apparaterna A eller B i **Figur 1-43**, kan stora spänningsskillnader mellan apparathöljen uppstå och skärmen skadas. Speciellt när skyddsledare till apparaten är lång och apparathöljen inte är potentialutjämnad. Att följa endast starkströmsföreskrifterna här, räcker inte till för att skydda kabelskärmen:

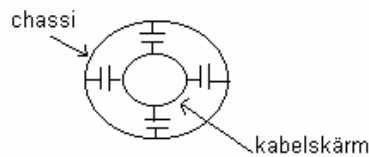
- Inget krav på kompletterande potentialutjämnning mellan apparaterna föreligger ju om spänningsskillnaden är < 50 V och avstånd mellan apparaterna > 2.5 m.



Figur 1-43 Problemet med dubbeljordning

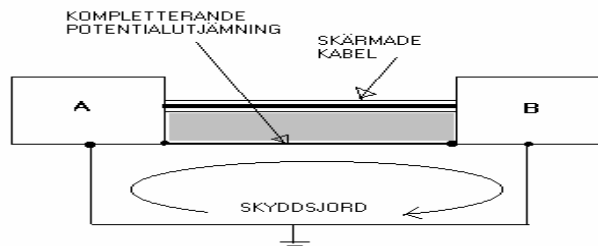
Teoretiskt sett ska kabelskärmen jordas i båda ändarna för att motverka störningar, men i praktiken kan skärmen brännas sönder på grund av skyddsjordningen.

Åtgärd 1: För att undvika detta, används kopplingsanordningar för chassijordning, som innehåller kondensatorer. Se **Figur 1-44**. Kondensatorerna mellan skärmen och apparathöljet blockerar för lågfrekventa strömmar från kraftförsörjning men samtidigt är lågohmiga för högfrekventa strömmar (hybrid jord).



Figur 1-44

Åtgärd 2: Med en rätt dimensionerad potentialutjämningsledare mellan de två apparathöljen, i händelse av isolationsfel, går felströmmar i denna ledare och inte genom skärmen. Lågfrekventa strömmar i jordningssystemet går till stor del genom potentialutjämningsledaren och inte genom skärmen. Se teori delen Avsnitt 1.6.



Figur 1-45

Figur 1-45 visar hur utförandet av kompletterande potentialutjämningsledning mellan två apparathöljen A och B motverkar störningar genom att ytan av den slingan som innehåller kabelskärmen blir betydligt mindre och gör att systemet blir mindre känsligt mot yttre magnetiska fält.

1.8 Åskskydd för byggnader

Inledning

En vanlig orsak till fara och fel i elsystemet är blixten. Direkt blixtnedslag på anläggningen ger stora spänningshöjningar i byggnadsstomme, jordledare och skyddsledarsystem på bara några millisekunder. Detta kan vara farligt för människor och djur och även förödande för elektroniska apparater och datanät. Genom att förbinda åskskyddsanläggningar och byggnadens installationer förebygger man potentialskillnader mellan systemen.

Även blixtnedslag längre bort kan vara farliga eftersom höga spänningar fortplantar sig väldigt snabbt i systemet. Till och med blyxt mellan två moln kan bilda spegelfält i marken och på det viset uppstår vandringsvågor på nät- och datakablar. Vid blixtnedslag blir marken strömförande och en spänning uppstår på marken så kallad stegspänning, som kan vara flera hundra volt och är farlig för djur och människor som vandrar där.

Till och frånslagning av induktiva och kapacitiva belastningar i lågspänningsnätet kan också ge höga spänningsspicar och transienter och skada apparaterna. Till exempel vid manövrering av frånskiljare och strömbrytare uppstår mellanfrekventa störspänningar med frekvenser mellan 10 kHz till 3 MHz. Potentialskillnader på upp till 20 kV har uppmätts för 400 kV anläggningar.

För byggnader med informationsteknologi rekommenderas att åskskydd installeras. (Se Avsnitt 1.7.2 och 1.8.1.

En **kortfattad beskrivning** av åskskyddets planering finns i kommande kapitel.

- För detaljerade beskrivningar och dimensionering av skyddsmateriel se Internationell Standard IEC 61024-1-2 eller Svensk Standard SS 487 0110 (handlar om åskskydd) och ABB-kontrollskola. Även kataloger från överspänningsskyddstillverkarna t ex Novum eller Elrond kan vara till stor hjälp.

1.8.1 Bedömning av behovet av åskskydd i en byggnad (Enligt Svensk Standard 487 01 10)

Skydd mot åska är inte reglerat genom lagstiftning i Sverige (med undantag för explosionsfarliga utrymme).

- Observera att oavsett byggnadens utförande, storlek, läge och användning, kan installationen av åskskyddssystem vara önskvärd.

Följande bör beaktas vid bedömning av behovet av åskskydd:

- För stora byggnader är utförandet av åskskydd motiverat från ekonomisk synpunkt.
- Byggnader som p g a byggnadssätt eller läge eller höjd över omgivningen kan vara särskild utsatta för åska.
- Byggnader som är värdefulla från kulturhistorisk synpunkt.
- Byggnader där många åldringar, barn eller rörelsehindrade vistas.
- Byggnader som används som samlingslokaler.

Svensk Standard SS 487 0110, åskskydd i byggnader, innehåller ganska detaljerad beskrivning av åskskyddets utförande. Observera att normen gäller inte byggnader som är:

- högre än 40 m.
 - byggnader som deras längd och bredd samtidigt överstiger 40 m.
 - speciella anläggningar som ska uppfylla strängare krav.
 - vid planeringen och dimensionering av åskskyddssystem ska experter anlitas för att de skadliga elektriska, mekaniska och elektromagnetiska effekterna avverkas på rätt sätt.
- I denna skrift har även den nya internationella standarden IEC 61024-1-2 berörts.

1.8.2 Yttre åskskydd

1.8.2.1. Några definitioner

Skyddsgrad: Det innebär att byggnaden garderas mot en viss procent av alla förekommande blixtförmor i Sverige. Till exempel ur ekonomisk synvinkel är det lämpligt att ha åskskydd med hög skyddsgrad (90% t ex) i byggnader med en byggvärde på flera miljoner kronor.

Sidurladdning: Elektrisk överslag mellan blyxtledare och föremål i blyxtledarens närhet.

Strömfördelningsfaktor: Beroende på hur åskskyddets form ser ut beräknas en strömfördelningsfaktor för byggnaden. Se standarden SS 4871001.

Skyddsavstånd (d): Det minsta avstånd som erfordras mellan två föremål, för att elektrisk överslag mellan de inte kan förekomma, vid blyxturladdning. På Svensk Standard finns det en bra beskrivning om hur skyddsavstånd ska beräknas.

Beräkning av det erforderliga skyddsavståndet i Sverige baseras på följande förutsättningar:

- blyxtströmmens toppvärde 70 kA
- blyxtströmmens branthet 70 kA / μ s

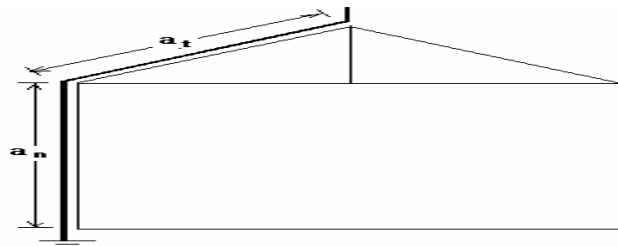
- blyttledarens egeninduktans $1 \mu\text{H/m}$
- isolationsmediets dielektriska hållfasthet 500 kV/m

- Dessa värden ger en skyddsgrad på ca 90% för de vanligast förekommande blyttar i Sverige.

1.8.2.2 Beräkning av skyddsavstånd

Vid beräkning av skyddsavstånd är det viktigt att ta hänsyn till:

- blyttströmmens fördelning på tak- och nedledare som beror på formen och antal ledare i det yttre åskskyddet. (ges av strömfördelningsfaktorn)
- avståndet till jordreferens mellan anslutningspunkten av utsatt föremål och nedledarsystem.



Figur 1-46

Se **Figur 1-46**. Maximala skyddsavståndet, d , blir då:

$$d \geq 0.07 (a_n + a_t) \quad (1-24)$$

där a_n är den vertikala nedledarens längd och a_t är den resulterande takledarlängden från nedslagspunkten till närmaste nedledare. Observera att:

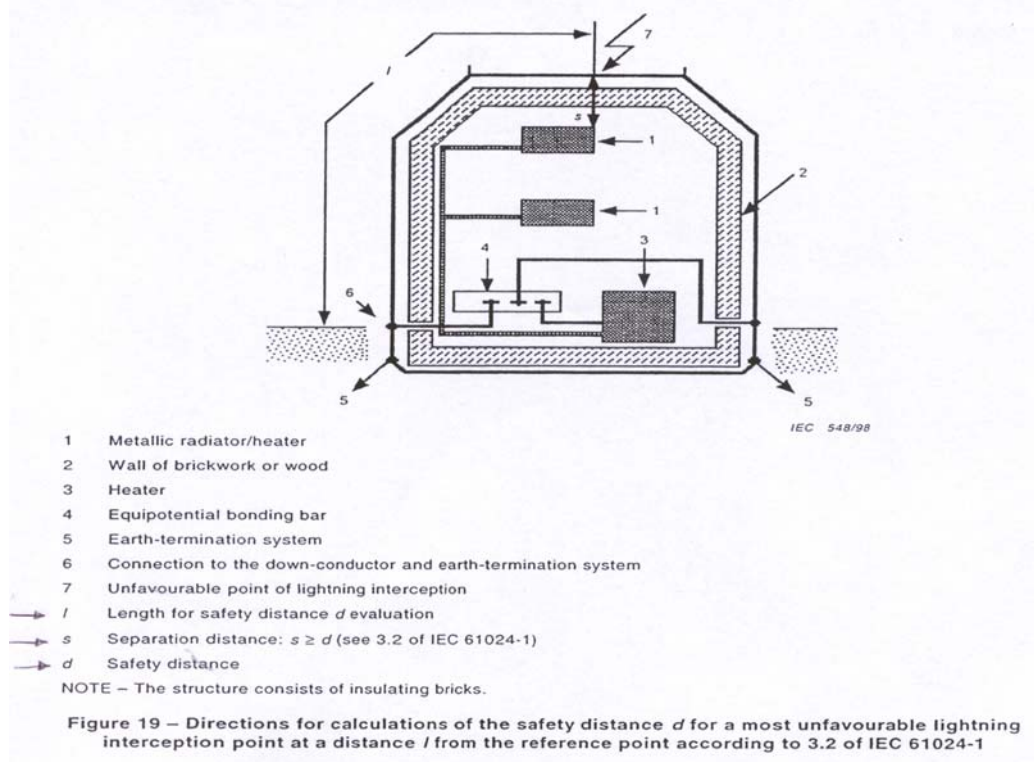
- Beroende på åskskyddssystemets form kan detta avstånd (d), minskas enligt beräkningar i Svensk Standard 4871001.
- Alla utsatta föremål utan anslutning till nedledarsystem, utanför och även innanför byggnader, ska ha ett minimum avstånd (s). Detta innebär att $s \geq d$. Se **Figur 1-47**
- Observera att detta avstånd ska hållas när åskutsatta föremål är utan anslutning till åskskyddssystem. Ibland är det praktiskt omöjligt att hålla detta avstånd. Data, telefon, teve antenner ska då integreras i åskskyddssystemet och blir en del av denna.
- För utsatta föremål med anslutning till nedledarsystem beräknas skyddsavstånd ungefär på samma sätt. Se IEC 61024 1998

1.8.2.3 Tak- och nedledarsystem

På byggnadens högsta delar installeras lämpliga anordningar för att infånga blytten och leda bort strömmen till jord, utan att stora spänningar uppstår. Detta innebär att ledarna ska vara dimensionerade så att de tål att leda de höga strömmarna från blytten (för dimensionering se svensk Standard). Metalliska delar som TV-antennar, plåttak, metalliska skorstenar som tål blyttströmmen kan användas som komplement till blyttfångare. Dessa ska kopplas ihop på ett säkert sätt och anslutas till byggnadens åskledare så att, vid blyttnedslag, inga farliga spänningsskillnader uppstår.

Nedledarna

Blyttströmmen leds genom nedledarna till jorden. Nedledare kan även fungera som blyttfångare. Strömmen kan vara flera kA (typiska dimensioneringsvärde i Sverige 70 kA enligt SS 487 0110) med varierande frekvens som ger stora magnetfält och kan inducera stora



Figur 1-47 Skyddsavstånd enligt IEC 61024-1-2

spänningar i andra ledare och riskerar skada elektroniska utrustningarna inne i byggnaden (se avsnitt induktiv koppling). Därför:

- Det ska planeras så att nedledarna utomhus inte passerar nära känslig elektronik inne i byggnaden. (På grund av risk för sidoumladdning)
- För att minska magnetfältet används flera nedledare och de dras symmetriskt och parallellt.

Se Figur 1-48. På så sätt blir strömmarna mindre och ungefär lika i varje nedledare.

Magnetfält från varje ledare minskar och eftersom strömmen i ledarna har samma riktning kommer fält från olika ledare till stor del ta ut varandra.

- Byggnader skall förses med minst två nedledare. Enligt Svensk Standard.

- Vid hushöjd upptill 20 m väljs nedledarnas antal och placering så, att ingen punkt på yttre väggen har större avstånd än 10m till nedledare. För byggnader med höjd mellan 20-40m, skall angivna avståndet minskas med 1m för varje höjdkning om 5m. Anledningen med detta är att minska blixstens träffsannolikhet på andra utsatta föremål än åskledarna.

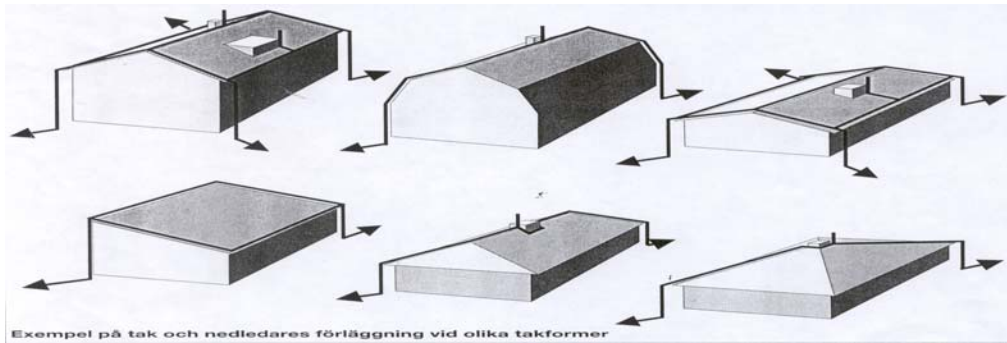
- Nedledarna ska helst vara en direkt fortsättning på takledarna (inga skarvar) för att minska risken för urladdning.

- Byggnadens metalliska delar som armeringsjärn kan anslutas till nedledarsystem men ska inte ersätta det.

- Invändig förläggning av blyttledare bör undvikas.

- Alla ledare i åskskyddssystemet, ska vara så korta som möjligt för att minska induktansen hos ledaren. (För mer om detta se avsnittet inre åskskydd.)

Mer detaljerad beskrivning om dimensionering och förläggning av nedledare finns på bl a Svens Standard 487 1001 eller IEC 61024-1-2.



Figur 1-48 Tak- och nedledarsystem (Figur från: Novum Betterman)

1.8.2.4 Jordtagssystem

Enligt svenskstandard SS 487 0110, bör jordtagssystem till en åskskyddsanläggning ha följande egenskaper:

- Låg impedans för snabba elektriska transienter, eftersom dI/dt är mycket stor för blixtrömmen. (70 kA/ μ s för typiska blixtar i Sverige).
- Symmetrisk utformning för att motverka farliga potentialskillnader inom en byggnad därför används ringledare.
- Låg avledningsresistans, R_j för lägre frekvenser (20 Ω enligt SS 487 01 10) Se **Figur 1-49**

Ringledare

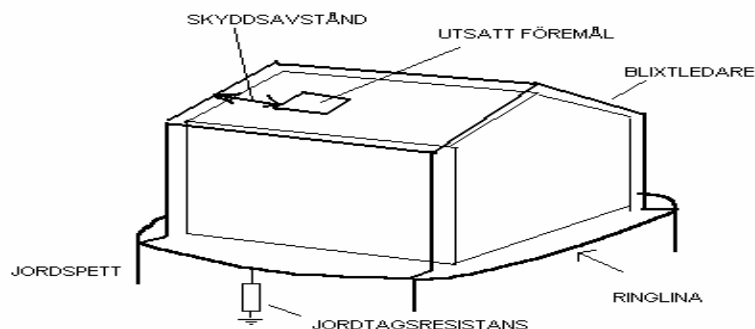
Genom användning av jordtagssystem, som helt eller delvis omsluter en byggnad (ringledare), kan en tillfredställande symmetri i systemet uppnås. Ringledare för en åskskyddad byggnad åstadkommer spänningsutjämning mellan olika nedledare. Olika nedledare kan anta olika potentialer p g a en ojämn fördelning av blixtrömmen i de vid variationer i jordtagsresistanserna. Potentialskillnader skapar utjämningsströmmar i ringledaren så att den maximala jordpotentialen reduceras och referensplanet i marknivå får ungefär samma potential. Ringledare ska ha ett avstånd på ca 2m till byggnaden och ska förläggas minst 0.5 m djupt.

Fundamentjordtag

Ringledare kan även anslutas till fundamentets armering, så kallad fundamentjordtag som ger bra jordning. Fundamentjordtag kan kombineras med vanliga jordelektroder som ger ytterligare bättre resultat.

Jordplanet ska i första hand förläggas i den naturliga jorden, inte i fyllnadsmassor, och om möjligt i fuktig jord.

Observera att i befintliga byggnader där ett bra jordsystem är önskvärt, är det inte alltid lätt att komma åt fundamentet. Då kan jordspett använda eller/och lägga ringlina i mark runt byggnaden.(ABB)

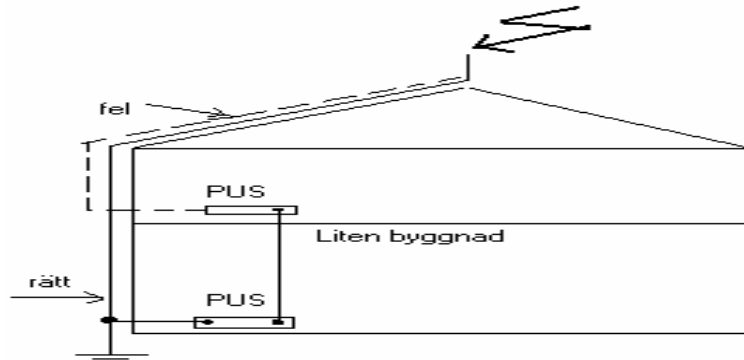


Figur 1-49 Yttre åskskydd

1.8.2.5 Exempel på integrering av åskskyddsanläggning och elinstallationen

Mindre byggnader

För att en elinstallation inne i en byggnad skall kunna hållas isolerad från överspänningar från åskskyddsanläggningen vid ett blixtnedslag, krävs ett visst skyddsavstånd (skyddsavstånd). I byggnader med litet våningsantal är detta lättare att genomföras. Jordelektroden brukar vara den enda förbindelsen mellan blyxtfångaren och jordningssystemet inne i byggnaden. Se **Figur 1-50**

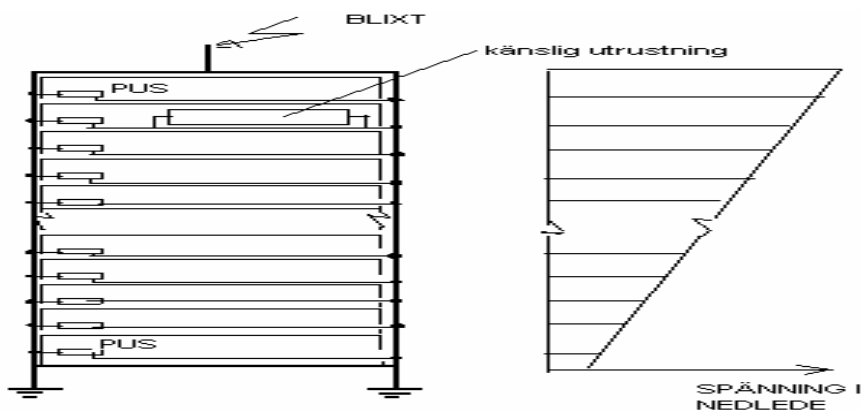


Figur 1-50

Större industri och hus med flera våningar

I större industri och hus med flera våningar: Se **Figur 1-51**.

- finns det större risk för sidourladdningar p g a större längd på åskledarna.
- är det praktiskt omöjligt att hålla åskskyddsanläggningen helt separerat (på skyddsavstånd) från elinstallationen inne i anläggningen.
- I byggnader med omfattande elektronikinstallationer t ex datacentraler, telefonväxlar rekommenderas fasader av plåt och/eller fler nedledare än vanliga byggnader.
- Ur elsäkerhets- och EMC-synpunkt är det viktigt att koppla nedledarna till byggnadsstommen och jordplanet (potentialutjämnningssystemet) i varje våning för att minska risken för sidourladdning vid blixtnedslag speciellt i de översta våningarna. Den här konstruktionen och symmetrin gör att merparten av blyxtströmmen kommer att passera genom externa ledare och endast småströmmar som är nödvändiga för potentialutjämning kommer att flyta på byggnadens insida. Naturligtvis ska nedledarsystemet vara symmetriskt byggt, så ett blyxtströmmar fördelas på bästa sättet.



Figur1-51 Risken för sidourladdning ökar ju högre byggnaden blir.

Mekaniska krav

Det finns också mekaniska krav på åskskyddsanläggningar som ger bra hållfasthet och motverkar gnistbildningar vid fogar och skarvar. Nedledarna ska helst vara sammanhängande utan skarvar, över hela sin längd. För kraftverkan mellan två ledare se **Appendix 5:A5.1**

1.8.2.6 Korrosion och materialval

Materialval är viktigt, inte bara med hänsyn till elektriska och mekaniska påkänningar, utan också korrosionsrisken, speciellt i utomhusmiljö.

När två olika metaller har kontakt med varandra i en fuktig miljö, kommer den ädlare metallen att fungera som katod och den andra metallen som anod. Det uppstår en elektrokemisk spänning mellan metallerna och gör att den mindre ädla metallen korroderar snabbare än den normalt skulle göra.

Erfarenhet visar att denna ”elektrokemisk eller galvanisk spänning” över kontaktytan, ska helst hållas lägre än 300 mV.

Tabell 1.2 visar galvaniska spänningar för vanliga metaller när elektrolyten är vatten (plus %2 NaCl). För mer information se Svensk Standard EN 50174-2:2000.

- För att minimera korrosionsrisken ska helst kompatibla metallpar som ligger i det markerade området i tabellen användas.

	Platinum	Stainless steel	Silver	Nickel or Monel	Copper	Brass	Tin	Lead	Soft steel	Aluminium 99.5%	Hard steel	Cadmium	Chromium	Zinc
Platinum	0	250	350	430	570	650	800	840	1 000	1 090	1 095	1 100	1 200	1 400
Stainless steel	250	0	100	180	320	400	550	590	750	840	845	850	950	1 150
Silver	350	100	0	80	220	300	450	490	650	740	745	750	850	1 050
Nickel or Monel	430	180	80	0	140	220	370	410	570	660	665	670	770	970
Copper	570	320	220	140	0	80	230	270	430	520	525	530	630	830
Brass	650	400	300	220	80	0	150	190	350	440	445	450	550	750
Tin	800	550	450	370	230	150	0	40	200	290	295	300	400	600
Lead	840	590	490	410	270	190	40	0	160	250	255	260	360	560
Soft steel	1 000	750	650	570	430	350	200	160	0	90	95	100	200	400
Aluminium 99.5%	1 090	840	740	660	520	440	290	250	90	0	5	10	110	310
Hard steel	1 095	845	745	665	525	445	295	255	95	5	0	5	105	305
Cadmium	1 100	850	750	670	530	450	300	260	100	10	5	0	100	300
Chromium	1 200	950	850	770	630	550	400	360	200	110	105	100	0	200
Zinc	1 400	1 150	1 050	970	830	750	600	560	400	310	305	300	200	0

Tabell 1.2 Visar galvaniska spänningen för vissa metaller (Svensk Standard SS-EN 50174-2)

- Korrosion ökar resistansen på kontaktytan och försämrar det installerade skyddssystemet i anläggningen.

Praktiska tips

- Ovanför jord kan koppar, aluminium, varmförzinkat eller rostfritt stål användas.

- Under jord används koppar, varmförzinkat eller rostfritt stål. Koppar har den bästa hållbarheten men kan orsaka korrosion på andra metallföremål. Koppar har även en vis miljöpåverkan, detta innebär att stål bör väljas i största möjliga utsträckning under jorden.

- Massiva ledare är mindre känsliga mot korrosion jämfört med tvinnade ledare. Svetsning ger bättre resultat än mekaniskt klämförband. (ABB kontrollskola)

1.8.3 Inre åskskydd

Farliga spänningar som kan tränga in i byggnaden, utifrån, genom servisor, starkströmledningar eller telefon, data eller TV- kablar kan reduceras genom direkt ihopkoppling eller genom överspänningsskydd till jordningssystemet enligt starkströmsföreskrifterna. (Figur 1-2)

1.8.3.1 Skyddskomponenter

Standardkurvor

För att testa och normera skyddskomponenter, används så kallade standardkurvor som "liknar" åskpulser. Till exempel en, $[8/20\mu s]$ puls (norm enligt IEC 60060-1), har en stigtid på $8 \mu s$ och en halveringstid på $20 \mu s$.

Skyddskomponenter (för grov-, mellan- och finskydd se nästa avsnitt)

Skyddskomponenter som gasurladdningsrör, varistorer och suppressordiod eller en kombination av dessa används för att leda bort farliga strömmar till jord. Alla skyddskomponenter fungerar med samma princip d v s när spänningen ökar då leder komponenten och kortsluter kretsen. Detta sker naturligtvis väldigt snabbt.

- Gasurladdningsrör: Används för grovskydd eftersom det tål avleda stora strömmar upptill $15kA$ (8/20 kurvan). Nackdelen är att den är långsam för transienter som har långa stigtider $dU/dt \approx 100V/s$. Andra nackdelen är att de lämnar en så kallade, nätföljeström, efter tändningen. För att bryta denna ström måste säkring anslutas före gasurladdningsröret.
- Varistorer: Används som mellanskydd eftersom de klarar mindre ström än gasurladdningsrör. Fördelen är att de har mindre nätföljeström och snabbare reaktionstider än gasurladdningsrör (nanosekund område). Nackdelar med varistorer är att de har stor kapacitans och är inte lämpliga för högfrekventa datatransmissions ledningar, plus att de föråldras snabbt.
- Suppressordiod: Används som finskydd. Fördelen är att reaktionstiden ligger på picosekund område alltså den är jätte snabb. Nackdelen är att den inte kan leda stora strömmar och har stor kapacitans. Se Figur 1-52.

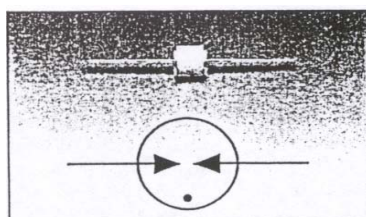


Fig. 10a: Gas-filled surge arrester

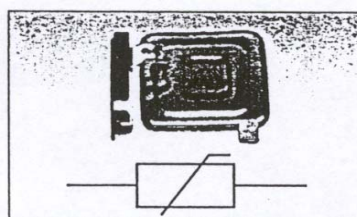


Fig. 11a: Varistor

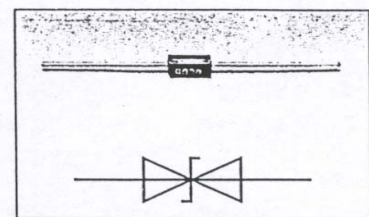


Fig. 12a: Suppressor diode

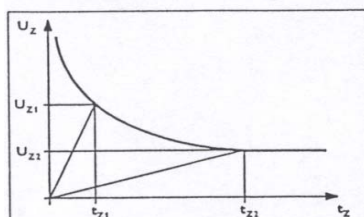


Fig. 10b: Charact. curve of a gas-filled surge arrester

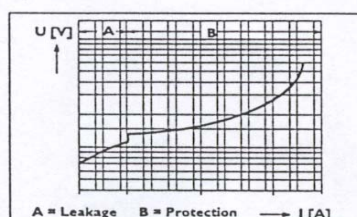


Fig. 11a: Characteristic curve of a varistor

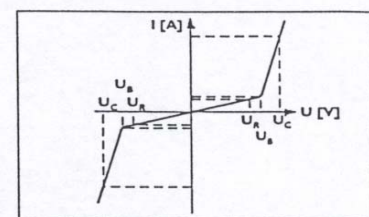
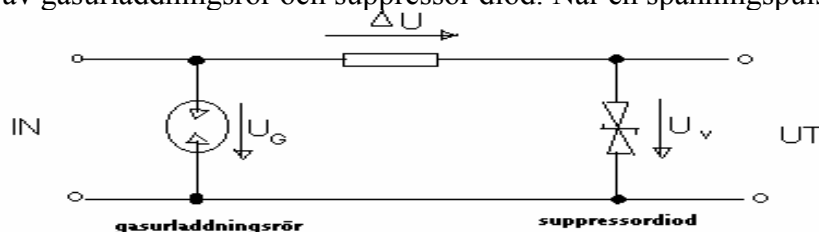


Fig. 12b: Characteristic curve of a suppressor diode

Figur 1-52 Karaktäristiken för olika överspänningsskydd. Från vänster :

gasurladdningsrör, varistor och suppressordiod. (Phoenix Contact: Åskskydd tillverkare)

En kombination av dessa överspänningsskydd, kan ge de fördelar som finns i var och en av de komponenterna och eliminera nackdelarna. **Figur 1-53** visar ett enkelt exempel på kombination av gasurladdningsrör och suppressordiod. När en spänningsspulser förkommer vid



Figur 1-53 Kombination av olika skyddskomponenter (Phoenix Contact)

ingången av kretsen, reagerar suppressordioden först eftersom den är snabbast. Gasurladdningsröret ska börja operera, innan suppressordioden blir skadad. Därför är kretsen designad för att $U_v + \Delta U \geq U_G$. U_v är spänningen över suppressordiod, ΔU är spänningen över induktansen och U_G är spänningen som gasurladdningsröret behöver, för att börja leda. På detta sätt blir kretsen både snabb och tålig för stora strömmar och spänningar. För mer information se t ex tillverkarnas kataloger. (Phoenix Contact eller Novum Betterman).

1.8.3.2 Zonindelningar och överspänningsskyddsklasser

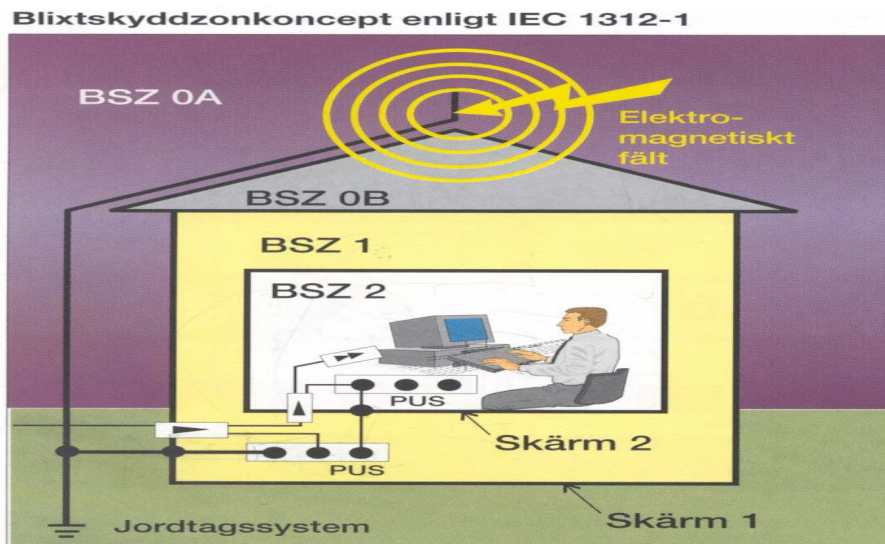
Zonindelningar

För att minimera överspänningar som kan skada elektriska och elektroniska apparater som finns i en byggnad, indelas byggnaden i olika skyddszoner och skyddas med olika klasser av skyddsapparater. **Tabell 1-3** visar olika benämningar för olika skyddsklasser:

Svensk klassning		IEC 61643-11 (Internationell)	VDE 0675 (tysk)
Grovskydd	Primärskydd	Klass I testad	B
Mellanskydd	Sekundärskydd	Klass II testad	C
Finskydd	Apparatskydd	Klass III testad	D

Tabell 1-3 Olika skyddsklasser (Novum Betterman)

För att avgränsa dessa zoner kan byggnadsstrukturen användas, detta innebär att varje zon skärmas med t ex armeringsjärn eller potentialutjämningsystem. Ledningar som passerar de olika zonerna förses med lämplig klass av högspänningsskydd (se nästa avsnitt) som kopplar inkommande ledningen till rummets skärm eller potentialutjämningsystemet. **Se Figur 1.54.**



Figur 1-54 Åskskydd, zonindelningar och potentialutjämningsystem (Novum Betterman)

Blixtskyddszoner; definieras enligt följande:

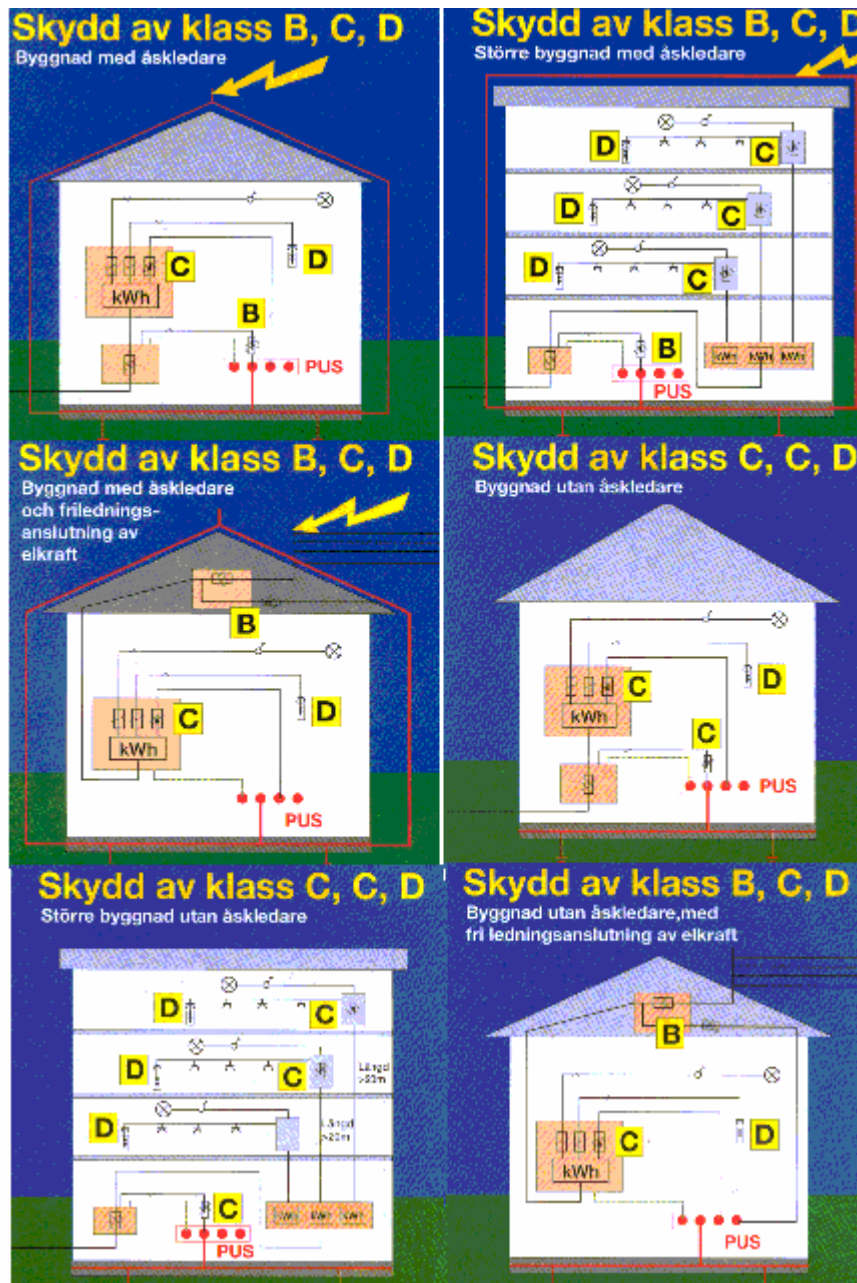
- Blixtskyddszon 0A: Där det finns risk för direkt blixtnedslag. Elektromagnetiska fältet verkar med full styrka.
- Blixtskyddszon 0B: Området är skyddat mot direkt blixtnedslag och elektromagnetiska fält verkar med minskad styrka.
- Blixtskyddszon 1: Genom avledare och potentialutjämning (som fungerar som skärm 1, i Figur 1-54) kan bara delar av strömmen uppträda och blixterns elektromagnetiska fält dämpas.
- Blixtskyddszon 2: Här reduceras strömmarna ytterligare genom skärm 2. I området kan finnas känslig elektronik i ett extra skärmtat rum
- Blixtskyddszon 3: Ytterligare reducering av strömmar och fält. Kan tänkas vara apparatskydd som leder överströmmarna till apparatens metallhölje.

Överspänningsskyddsklasser definieras enligt nedan:

- Klass B eller grovskydd används där höga spänningar (strömmar) förekommer t ex anläggningar med egen åskledare där det finns risk för direkt blixtnedslag. Klass B-skydd monteras i zonövergång 0-1.
- Klass C eller grovskydd / mellanskydd monteras i anläggningar utan åskledare och där endast överspänningar på elkraftnätet kan förekomma. Klass C-skydd kan installeras i zonövergång 0-1 och i flerstegsskydd även i zonövergång 1-2.
- Klass D eller finskydd används för att skydda enskilda apparater. Finskydd ska placeras vid apparatens nätanslutning. Klass D-skydd ska alltid kombineras med klass C-skydd.

Skyddsklasser för olika byggnader

Beroende på om byggnaden har åskskydd eller inte, ska, enligt tyska normen VDE 0675, olika uppsättning av skyddsklasser användas. Se **Figur 1-55**. Till exempel i byggnader med åskledare, ska skydd med klass B användas för att avleda blixten till jord.



Figur 1-55 Olika byggnadstyper och olika skyddsklasser enligt tyska normen VDE 0675 (Figur från: Betterman Novum)

1.8.3.3 Val av överspänningsskydd, isolation och spänningshållfasthet, restspänning

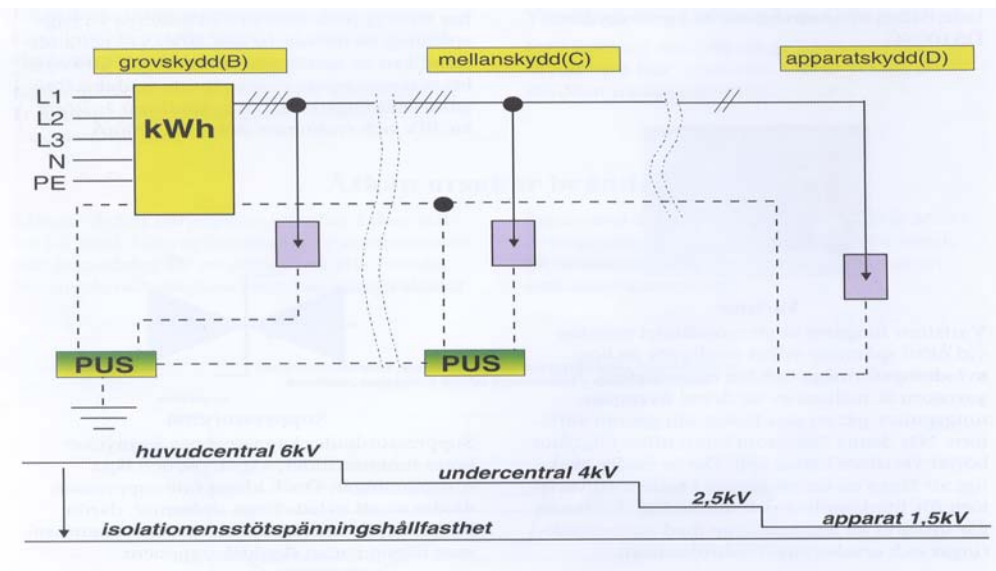
Blixtskydd till installation och elektroniska apparater ska väljas och dimensioneras så att överspänningsskyddet träder i funktion innan installation eller apparatens isolation skadas. Detta görs på följande sätt:

- Elleverantören garanterar högst 6kV vid leveranspunkten. Om matningen är via luftledningar förväntas höga avledningsströmmar. Därför ska grovskydd användas.
- Inne i stadskärnan räcker normalt med mellanskydd.
- Grovskydd tål mycket stor ström (10-15 kA), men lämnar ändå en så kallade restspänning.

Till exempel gnistgap modell DS 100SG av märke CITEL, lämnar en restspänning upptill 4000 V. Denna spänning kommer att skada en vanlig elektrisk apparat som har en isolationshållfasthet på mindre än 1500 V. I detta fall ska grovskyddet kompletteras med mellanskydd som lämnar en restspänning på mindre än 1500 V.

- Uttag ska ha en hållfasthet på 2500 V.

- Finns det risk att större spänningar än 1500 V förekommer på gruppledningar, ska även apparatskydd installeras. **Se Figur 1-56**



Figur 1-56 Grovskydd, mellanskydd, apparatskydd och isolationsstötspänningshållfastheten (Elrond Komponent AB)

Observera att det finns risk att spänningen i "nästa skyddssteg" blir större än den beräknade restspänningen. Anledningen är att:

- Överströmskyddets restspänning är beräknade efter normerade pulser. Dessa pulser har en viss stigtid och halveringstid. Om den verkliga blixtpulsen inte är identisk med denna, kan restspänningarna bli större än de som anges i tillverkarnas kataloger och skada isolationen i nästa skyddssteg.

Beräkning av spänning

Avledningsströmmen för grovskydd kan bli 15kA, under bara 1 μ s (se Avsnitt 1.8.2.1). Exempelvis en 10 cm lång ledare med 25 mm² area, har en induktans på ca 0.1 μ H. (Se Ekvation 1-19). Om ledaren används för att ansluta överspänningsskyddet, kommer det att bli en spänningsfall på ca 1500 V över ledaren, Eftersom:

$U = L \, di/dt = 0.1 \, \mu\text{H} * 15\text{kA}/1\mu\text{s} = 1500 \, \text{V}$. Denna spänning kommer att adderas med restspänningen för skyddskomponenten. **Se Figur 1-58.**

Åtgärder

- Anslutningar till överspänningsskydd ska vara så korta som möjligt. **Se Figur 1.57** (enligt Svensk Standard 50 174 -2)

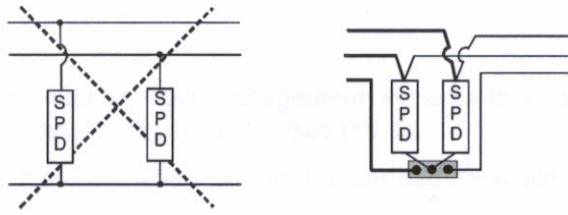
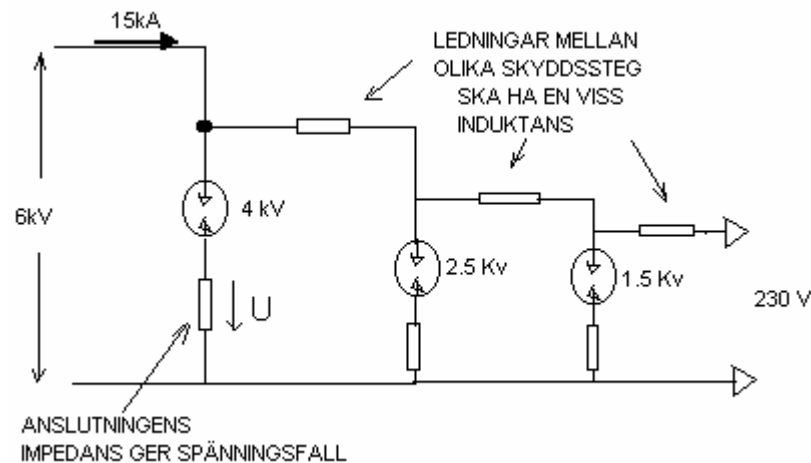


Figure 30 – Short connections of surge protective devices

Figur 1-57 Anslutning för överspänningskydd

- Det ska finnas ett visst avstånd mellan olika skyddssteg. Anledningen är att ledningar fungerar då som fränkopplingsinduktanser. Spänningsfallet över dessa induktanser gör att det blir mindre spänning till nästa skyddssteg. Se **Figur 1-58**. Mellan grov- och mellanskydd t ex räknas med ca 10m avstånd. Mellan mellan- och finskydd ska finnas ca 5m avstånd.
- Alternativt kan induktanser installeras mellan olika skyddssteg om inte är praktiskt möjligt att hålla dessa avstånd.



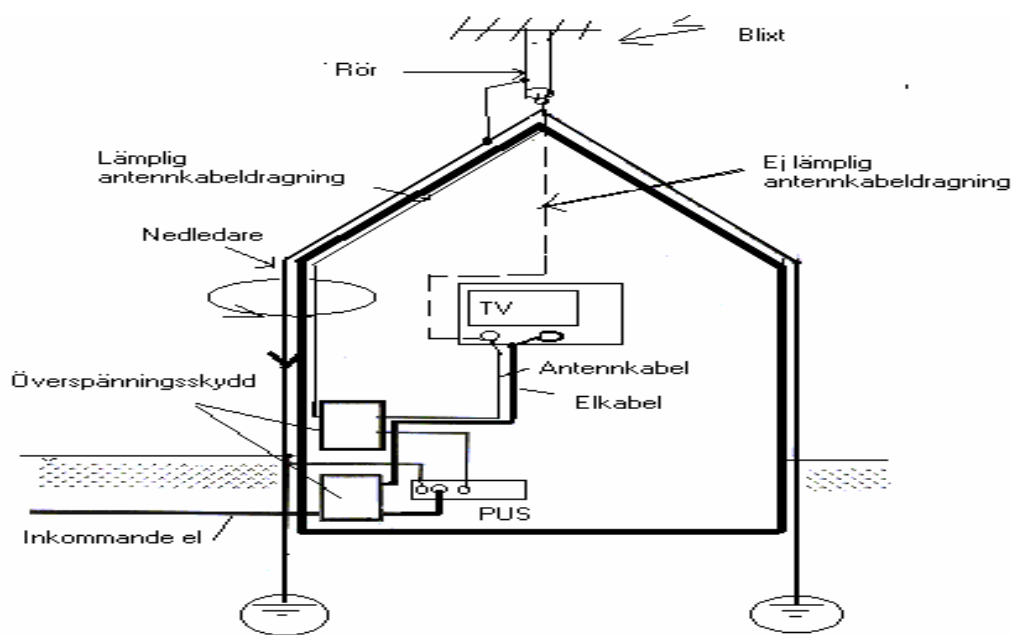
Figur 1-58 Det är viktigt med längden av anslutningar för åskskyddskomponenter och mellan skyddskomponenter

- Finns det alldeles för långa ledningar mellan olika steg, kan induktiva kopplingen från yttre fält, skapa högre spänning än restspänning i nästa skyddssteg. Så ledningarna ska verken vara för långa eller för korta.

1.8.3.4 Ledningsdragning för kraft och tele i en byggnad med åskskydd

Om antenn- och kraftkabeln till datorn är dragna på fel sätt, bildar de en slinga. Om det blir åskströmmar i nedledaren, induceras stora spänningar i slingan och sannolikheten att teven skadas är stor. Se **Figur 1-59**.

Samtidigt ska det finnas ett visst avstånd mellan kraftkablar och signalkablar **Se Avsnitt 1.7.4.5**.



Figur 1-59 Lämplig och ej-lämplig kabeldragning för kraft och tele

Kapitel 2: Medicinska konsekvenser av elektriska och magnetiska fält

2.1 Inledning

Enligt World Health Organisation (WHO), att vara frisk är inte bara frånvaron av sjukdomar, utan man ska vara fysiskt, mentalt och socialt välmående på alla sätt.

Elektricitet har använts i över hundra år och har spelat en mycket stor roll i ökad levnadsstandard och vetenskapliga framgångar, i alla länder, hos människor över hela jordklotet. Elenergi antogs vara en ren energiform och det enda hälsoproblem man kunde tänka sig var att komma i kontakt med elektriskt ledande delar eller brandfara på grund av fel i systemet.

Vissa epidemiologiska studier under 80 talet, visade svagt förhöjda cancerfall hos folk som bodde i närheten av kraftledningar. Den eventuella cancerrisken skapade diskussioner och sen dess har en hel del studier gjorts för att hitta ett samband mellan vissa sjukdomar och elektriska samt magnetiska fält.

Socialstyrelsen i Sverige gav 1995 ut en rapport om sambandet mellan elektromagnetiska fält och vissa hälsorisker. Rapporten kunde inte vare sig bekräfta eller motsäga att det finns något samband mellan hälsorisker och exponering för elektromagnetiska fält. Många fler studier har gjorts sedan 1995 och fortfarande är mycket kvar att göra.

Kapitel 2 i detta arbete är en sammanfattning av olika intressanta studier som har gjorts i Sverige och i andra länder om biologiska effekter av elektromagnetiska fält på djur och människor. En del studier visar att levande celler reagerar på fälten. Reaktionen kan vara t ex ökad temperatur eller ändrade hormonnivåer när de blir utsatta för låg- eller högfrekventa magnetiska och elektriska fält. Kan ändringarna vara skadliga för människor och djur? Följande rapport är ett försök att svara på den frågan.

2.2 Elektriska och magnetiska fält

2.2.1 Enheter och formler

Elektriska och magnetiska fält är väldigt nära förknippade. Där det finns spänningsskillnad finns alltid elektriska fält. Spänning gör att det blir elektrisk ström i en ledare och strömmen ger magnetiskt fält.

[Teoretiska sambandet mellan magnetiska flödet Φ och elektriska fältet E kallas för Maxwells andra ekvation $\oint E dl = -d\Phi/dt$. Ekvationen säger att varje ändring av ett magnetisk fält Φ , resulterar i ett elektriskt fält E .]

Enheter och samband

Enheter för elektriskt fält E , är Volt [V]/ meter[m]. Om det finns en spänningsskillnad mellan två stora ledande skivor och med liten avstånd mellan skivorna då kan man räkna elektriska fältet mellan skivorna enligt $E = \text{spänning} / \text{avstånd}$. Om ledarna har andra former då ska integrering användas för att beräkna fältet.

Det magnetiska fältet beskrivs med två storheter:

- Magnetiska fältstyrkan H , som har enheten A/m.
- Magnetiska flödestätheten B , som anges i enheten Tesla [T]. Tesla är en mycket stor enhet därför används mest mikro Tesla [μT] vid beräkningarna.

Varje punkt i ett magnetiskt fält har både fältstyrka H , och flöde B , och sambandet mellan de är följande formel:

$$B = \mu_0 \mu_r H = \mu H$$

I formeln är μ_r en materialkonstant som anger det omgivande mediets permeabilitetstal, t ex för tomrum eller luft är $\mu_r = 1$. Magnetiska material som järn har stort μ_r . Värdet på μ_0 är lika med $4 \pi * 10^{-7}$.

I USA mäts magnetiska flödestätheten med enheten Gauss. [1 Tesla = 10000 Gauss].

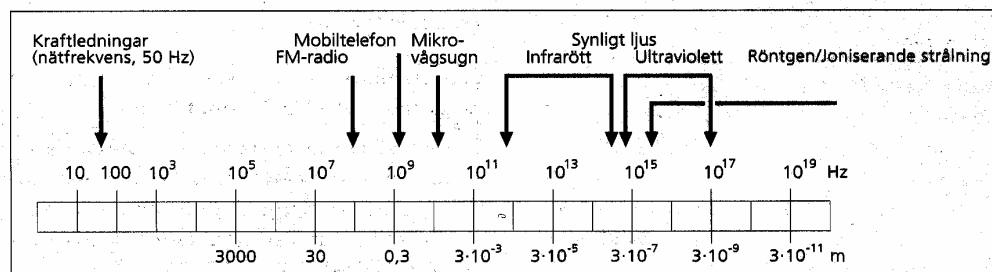
Källan till lågfrekventa magnetiska fält i byggnader är i många fall elserviskablar, parallella skenor i ställverk och även så kallade vagabonderande strömmar. Även själva distributionstransformatorer som ligger inne i byggnader kan vara källan till magnetiska fält. Fält från dessa källor ska tas upp i Kapitel 3.

2.2.2 Frekvens uppdelningar och vanliga beteckningar

Det är känt att elektriska och magnetiska fält som varierar med tiden kan inducera strömmar och spänningar i levande celler. Extremt lågfrekventa elektriska fält kan t ex inducera varierande elektriska laddningar på huden som i sin tur gör att polariserade laddningar, i kroppen, resulterar i strömmar inom kroppen. Variationer för extremt lågfrekventa fält är så pass liten att de inducerande effekterna blir mycket små. Elektriska fält inom kroppen i det fallet kan bli ca en million gånger mindre än yttre fältet. (Repacholi WHO)

Även varierande magnetiska fält kan inducera strömmar i kroppen. För sinusformade magnetiska fält är inducerade strömmen direkt proportionell med frekvensen av det yttre fältet.

Olika studier visar att biologiska effekter av elektromagnetiska fält är frekvensberoende. Elektromagnetiskt spektrum presenteras enligt Figur 2.1.



Elektromagnetiskt spektrum.

Figur 2-1 Elektromagnetiska spektrum

Vanligt förekommande beteckningar inom facklitteratur

Lågfrekventa (LF) fält, delas i olika kategorier som statiska, nät-, bild-, och linje frekventa fält. De vanligt förekommande beteckningarna i litteraturen är enligt nedan:

- Statika fält med frekvensen 0 Hz
- ELF (Extremely Low Frequency), under 300 Hz
- VLF (Very Low Frequency), 3-30 KHz
- IF eller mellanfrekvens, ca 100 kHz upp till ca 10 MHz
- Bildfrekventa och nätfrekventa fält som man brukar kalla frekvens mellan 0 och 10 kHz
- Kraftfrekventa elektriska och magnetiska fält med frekvens mellan 10 och 450 Hz (ABB Handbok)
- RF (radiofrekvent) fält med frekvenser över 5-10 MHz upp till 60 GHz kallas för a fält som används i kommunikationssystem.

Det bör påpekas att det inte finns klara gränser när det frekvens uppdelningar. Gamla AM radio använder 30 kHz till 3 MHz t ex eller det finns litteratur som kallar 3 - 30 kHz frekvens från dator skärmar för radiofrekventa.

- Gamla AM-radio använder 30 kHz-3 MHz.
- FM-radio använder 30-300 MHz
- GSM (Global system for Mobiltelefoni) använder frekvensen 0.9 och 1.8 GHz
- Industriella induktionsvärmare använder 0.3 - 3 MHz
- Medicinska apparater för termisk behandling 3 - 30 MHz. (Repacholi WHO)

SAR-värde

För användare av en mobiltelefon beskrivs exponeringen genom så kallade SAR-värden (Specific Absorbtion Rate) som ger absorberad effekt i watt per kg kroppsvikt. Denna exponering kan väntas variera med en faktor 2 beroende på hur telefonen hålls i förhållande till huvudet. Användning av handsfree minskar exponeringen mot huvudet dramatiskt. Forskare använder komplicerade modeller för att omvandla V/m och μT värdena till SAR värden som tas inte upp i denna skrift.

2.2.3 Reduktionsbehov av elektromagnetiska fält och försiktighetsprincipen

Elektriska installationen i en byggnad ger både elektriska och magnetiska fält. Okontrollerade fält kan göra att apparater stör varandra. Starka fält kan vara störande eller skadlig för människor som bor eller jobbar i byggnaden. Ett antal svenska myndigheter uttalat sig för ett försiktig undvikande av onödig exponering bl.a. Statens Strålskyddsinstitut 1991, Elsäkerhetsverket 1993 och 1994, Boverket 1994 och Socialstyrelsen 1994. Vid nybyggande bör man alltid sträva efter att, med smarta lösningar och rätt materialval, sänka elektromagnetiska fälten till en rimlig kostnad. Reduktion av magnetiska fält tas upp i Kapitel 3, denna skrift.

2.2.3.1 Reduktion av elektriska fält

Elektriska fält är enklare att skärma av jämfört med magnetiska fält. Utbredningen är begränsad eftersom elektriska fält avtar med kvadraten på avstånd (Se teori delen Kapitel 3). Förutom fasta installationen kan även elektrisk apparater som bildskärmar, kopiator, laserskrivare avge elektriska fält.

- Genom jordning av apparaterna och metalliska kanaler och kabelskärmar kan elektriska fältet begränsas.
- Ledningar dragna i rör, skärmas av väggarna och omgivningen i viss utsträckning beroende på väggmaterial. Betong ger bättre skärmning än t ex spånskivor och gips.
- Gipsskivor kan t o m förstärka elektriska fältet.
- Det finns speciellt gjorda kablar, bildskärmar, belysningsarmaturer och andra elutrustningar som ger låg elektriskt och magnetiskt fält.

Praktiska tips

Elektriska fält från kablar kan reduceras genom att:

- förlägga kablarna i jordade metalliska fönsterbänkskanaler, kabelrännor eller t ex Protecör.
- Alternativt kan skärmade kablar som EKLK användas, om kabeln ej kan förläggas i rör eller kanal.
- Kabelskärmar behöver inte jordas om de förläggs i kanaler med metallhöljen skärmade.

- I rännor behövs ej jordade dosor, men däremot bör alla dosor i samband med Protecören vara jordade. Dosorna ska jordas noggrant speciellt där de sitter i gipsskivor. Om dosorna är dåligt jordade kan gipsskivan bli kapacitivt spänningssatt.
- Jorda plåtreglarna som skivor sitter på. Åtgärden är alltid bra eftersom gipsskivor kan bli spänningsatta även från apparatsladdar eller belysningsarmaturer.
- Ramen till strömbrytare och uttag ska också jordas. (Yngve Hamnerius, reduktionsförslag till Universitetssjukhuset Lund).

2.2.3.2 Vagabonderande strömmar, en stor magnetfältskälla

Många gamla byggnader som använder 4-ledarsystem har problem med så kallade vagabonderande strömmar. Vagabonderande strömmar är den vanligaste källan för magnetfält i vårt boende och arbetsmiljö. **Se Figur 2-2, 4-ledarsystem.** Vid elcentralen har returströmmen två vägar att gå:

- genom neutralledare I_n
- genom skyddsledare PE, till apparatens utsatta delar I_v i figuren. Därifrån kan strömmen hitta sin väg genom jordade metalliska delar till jord (vattenrör system t ex). Rörsystemet går långa sträckor och gör att fältet är svårt att skärma och avtar väldigt långsamt.

En vagabonderande ström som motsvarar 10 A, ger ungefär $1 \mu\text{T}$ på ett avstånd av 2 m och $0.5 \mu\text{T}$ på 4 m avstånd enligt formeln för magnetfält från en lång och rak ledare (Se teori delen Kapitel 3).

Magnetfält från vagabonderande strömmar kan reduceras på flera olika sätt:

Åtgärd 1: Användning av 5-ledarsystem

Det mest effektiva sättet att reducera magnetfält från vagabonderande strömmar i en installation är att använda 5-ledarsystem ända ner till transformatorns nollpunkt.

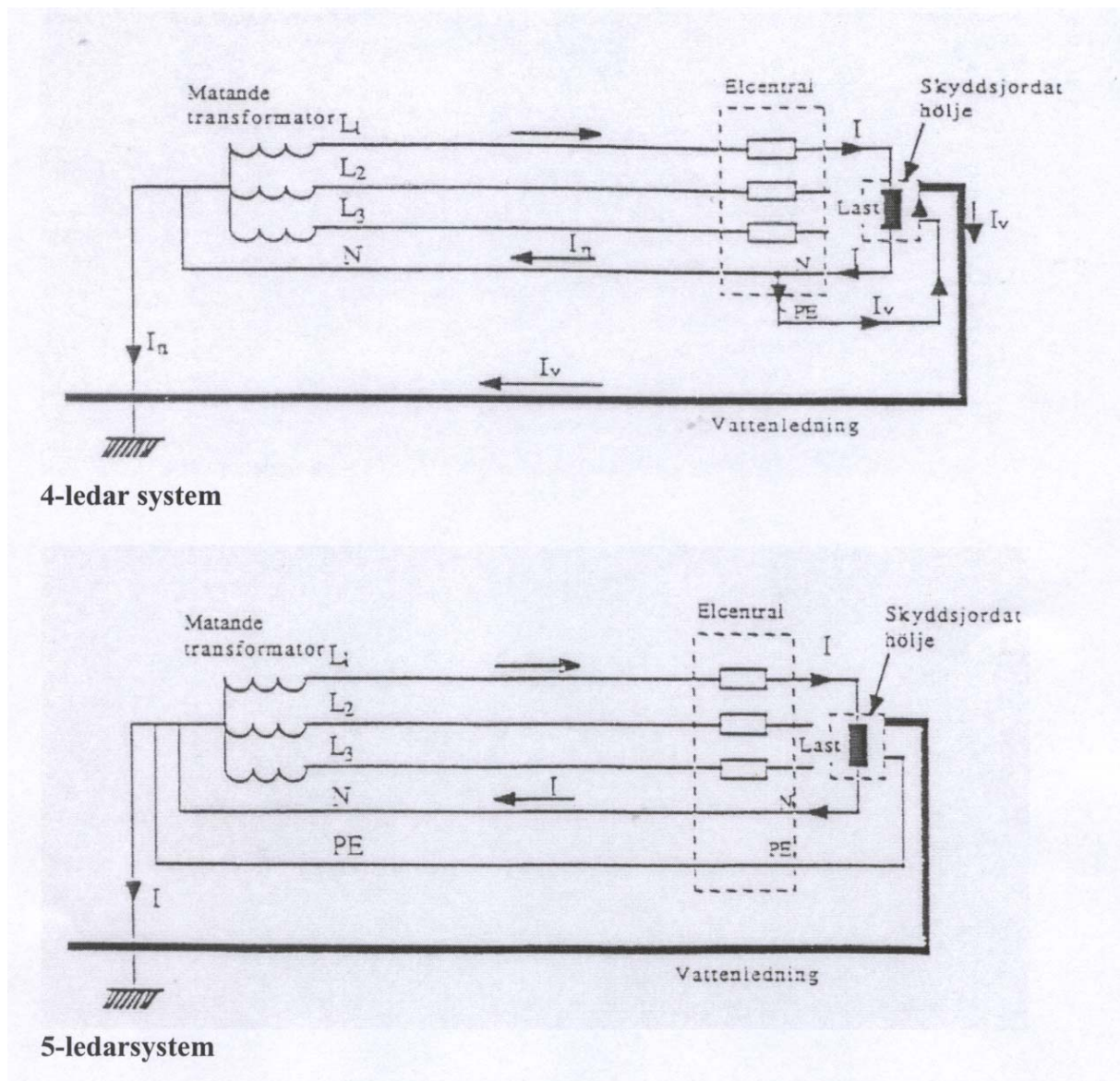
Se Figur 2-2 för 5-ledarsystem. Neutralledare kopplas inte ihop med skyddsledare förrän vid den matande transformatorns nollpunkt. På detta sätt går returströmmarna tillbaka till transformatorns nollpunkt endast genom neutralledaren och hålls borta från vattenledningar och andra metalliska föremål.

Observera att i Sverige är det vanligt med fyra ledare från distributionstransformatörer till huvudcentraler dvs TN-C-S system (Se Appendix 1).

Åtgärd 2: Användning av plastslang i vattensystem för att stoppa vagabonderande strömmar

En enkel och billig åtgärd som kan minska magnetfält är isolering av vattenrörssystem med plastslang. Där det finns misstankar om överledning mellan neutralledare och vattenledningar ska vanliga metalliska rör bytas ut mot plastslang (någon meter räcker). På detta sätt kan magnetfält från vagabonderande strömmar reduceras lokalt. Åtgärden kan alltså inte reducera fältet i hela huset radikalt.

Isolering av vattenledningar ökar jordimpedansen och därmed är inte bra ur EMC-synpunkt enligt diskussionerna i Kapitel 1.



Figur 2-2 Schematisk bild på 4- och 5-ledarsystem

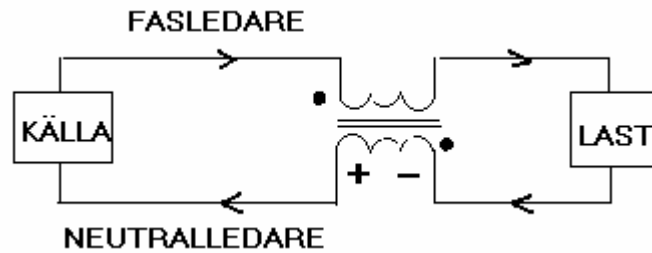
Åtgärd 3: Dra åt nollskruvarna

Lösa nollanslutningar gör att nollströmmen har mycket lättare att hitta fel väg. En enkel och billigt åtgärd, för att minska vagabonderande strömmar, är att kontrollera att nollskruvarna är åtdragna.

Åtgärd 4: Användning av sugtransformatorer

Metoden har använts i till exempel Banverkets anläggningar. Fasledarens ström går genom primärlindningen av en transformator som inducerar en spänning i motsatt riktning i sin sekundära lindning enligt Lenz lag. Den sekundära lindningen är i sin tur seriekopplad med neutralledaren. Därmed den inducerade spänningen i sekundärlindningen gör att det blir lättare för returströmmarna att gå tillbaka till källan genom just neutralledaren och inte hitta alternativa vägar genom märken. Samma metod kan användas i vanliga byggnader för att minska vagabonderande strömmar **Se Figur 2-3**.

Principen för en sugtransformator kan även förklaras genom ömsesidig induktans, som diskuterades i Avsnitt 1.6.4.2.



Figur 2-3 Principen för en sugtransformator

2.2.4 Vissa källor till fält och typiska värden

Studier har visat att biologiska effekter av elektromagnetiska fält beror på följande :

- Fältets styrka, som beror på hur stark källan är och hur stort avstånd finns till källan.
- Tid för exponeringen
- Fältets frekvens
- Fältets variationsform d v s pulsformen (ren sinus eller fyrkantpuls t ex) och hur modulationen ser ut t ex om frekvens eller amplitud modulerat.

Förutom vagabonderande strömmar som togs upp innan, finns det andra typiska fältkällor som kan delas beroende på fältets frekvens.

2.2.4.1 Statiska fält

Med statiska fält menas att ingen ändring i fältet sker över tiden d v s frekvensen är noll.

Statiska fält finns i naturen och kan uppdelas som:

- Vid åskväder kan styrkan på fältet blir upptill 100000 V/m.
- Jordmagnetiska fält ca $50\mu\text{T}$, stark förändras i närheten av järn föremål.
- Elektrostatiska fält fältstyrka kring 100 V/m finns naturligt.

En person kan omge själv med dylikt fält genom en elektrostatisk uppladdning när han eller hon går med vissa skor på t ex heltäckningsmattor eller sitter på en isolerad kontorsstol.

Denna uppladdning kan gå upp till tiotalet kilovolt, beroende på olika faktorer som:

- elektrisk isolering från jord,
- klädsel,
- torr hud,
- relativ luftfuktighet m.m. (1.4.2 A.L.I)

2.2.4.2 Lågfrekventa fält på arbetsplatser och bostäder, typiska värden

Det är mycket vanligt med magnetiska och elektriska fält från elförsörjningen med frekvensen 50 Hz i både bostäder och arbetsplatser.

- En stor lågfrekvent magnetfältskälla är vagabonderande strömmar som diskuterades i Avsnitt 2.2.3.2.
- En annan magnetfältskälla är bildskärmar. Median värdet av elektriska och magnetiska fält vid bildskärmsarbete i Sverige är $B = 0.21\mu\text{T}$ och $E = 20\text{ V/m}$. [1998]
- I vissa yrken som lokförare och svetsare kan exponeringen av magnetiska fält gå upp till flera hundra μT . (1.4.3 A.L.I)
- Även kraftledningar är en källa till lågfrekventa fält. Enligt Starkströmsföreskrifterna §B99 får hus inte byggas närmare än 10 meter från ytterledaren av en kraftledning över 55 kV. För en 400kV kraftledning t ex kan elektriska fältet, vid det här avståndet, gå upp till 3500V/m

2.2.4.3 Radiofrekventa fält, typiska värden

Det här Avsnittet har knappt någonting att göra med lågfrekventa fält i byggnader, men tas upp ändå, för att få en bättre helhetssyn om problemet med biologiska effekter av elektromagnetiska fält. Läsaren kanske tycker att det här kan vara intressant att läsa.

RF- fält från datorskärmar

Radiofrekvens fält från datorer och bildskärmar är väldigt lite. Fält som uppmättes var storleksmässigt runt 0.005 V/m respektive 2 pT (pico Tesla = 10^{-12} Tesla). Så det handlar om väldigt små mängder.

RF-fält från mobiltelefoner

I kommunikationssystem används väldigt höga frekvenser t ex 900 MHz för GSM systemet. Elektriska fältet från mobiltelefoner kan bli 100 V/m och på någon meter avstånd handlar om några V/m eftersom fältet sjunker snabbt med avståndet. Om inget samtal pågår och telefonen är enbart påslagen sänds normalt inga fält ut. GSM-telefoner skickar dock en kort ”handskakningspuls” ca en gång i halvtimmen men däremellan fungerar telefonen som en passiv radiomottagare. Data skickas digitalt i ett GSM-system. Vanliga SAR-värde för mobiltelefoner kan variera med en faktor två, beroende på hur man håller i telefonen.

Typiska uteffekter för sladdlösa bordstelefoner och mobiltelefoner

- Effekten från GSM 900 telefoner ligger som högst på 250 mW som motsvarar ett SAR-värde på 1.6 W/kg. I moderna mobiltelefoner finns effektkontroll. Det innebär att nära basstationen sänder mobiltelefonen med mindre effektnivå och längre bort från stationen sänder de med högre effekt, vilket speglas i mindre eller större SAR-värde.

- För sladdlösa bordstelefoner ligger typiska värden på 0.05 - 0.1 W/kg.

De sladdlösa bordstelefonernas basenheter kan ha en uteffekt på 10 - 125 mW, men avståndet från kroppen gör att fältet sjunker snabbt och däremot blir SAR-värden mycket lägre än gällande gränsvärden. (Statens strålskydds Institut).

- NMT-telefoner (NMT = Nordisk Mobiltelefon System) som fortfarande använder det gamla analoga systemet på 450 eller 900 MHz har också undersökts angående biologiska effekter.

En studie av Professor Lennart Hardell vid Örebro Universitetssjukhus visar 30 % ökning av cancer tumörer hos folk som använt NMT-mobiltelefoner under en längre tid jämfört med icke-användare.

2.2.5 Mätning av lågfrekventa elektriska och magnetiska fält

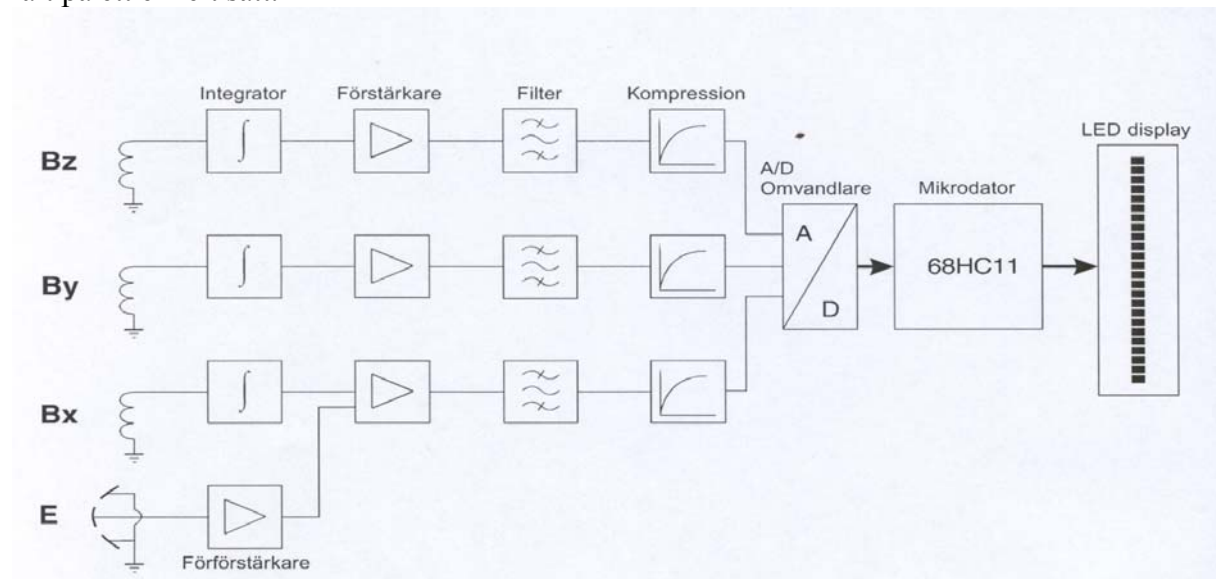
2.2.5.1 Mätapparater

Mätapparater för elektriska eller magnetiska fält utgörs i regel av en antenn som mottar fältet. Signalen förstärks och visas i displayen. Processen är ganska komplicerad. Här förklaras tekniken på ett förenklat sätt.

Mätning av lågfrekventa magnetiska fält

Mätinstrument för lågfrekventa magnetiska fält (Combinova model FD1, t ex) har ett frekvensområdet som ligger mellan 20-20000 Hz. Det finns också andra modeller som mäter

högre frekvensområden. **Figur 2-4** visar principen för mätning av magnetiska och elektriska fält på ett enkelt sätt.



Figur 2-4 Mätprincip för elektriska och magnetiska fält (märke Combinova, modell FD1)

- Tre ortogonala spolar fungerar som antenner som mottar magnetfältet i alla tre riktningar Bx, By, Bz.
- Signalen som mottas i antennen, varierar med tiden och är proportionell med dB/dt. Integrering ger en signal som är proportionell med RMS-värdet av B.
- Signalen B förstärks i förstärkaren. Eftersom mätningen ska utföras för ett visst frekvensområde så filtreras signalen i ett bandpass filter som i detta fall (Combinova FD1), släpper genom frekvenser mellan 20 och 20000 Hz.
- Amplituden på signalen kan variera mycket (från 40 nT-100 μ T). För att undvika distorsion komprimeras signalen med en kompressor, som omvandlar linjära skalan till en logaritmisk skala.
- Den komprimerade analoga signalen skickas till en A/D omvandlare. Digital data skickas till en mikrodator för att behandlas.
- De uppmätta värden visas på displayen.

Mätning av lågfrekventa elektriska fält

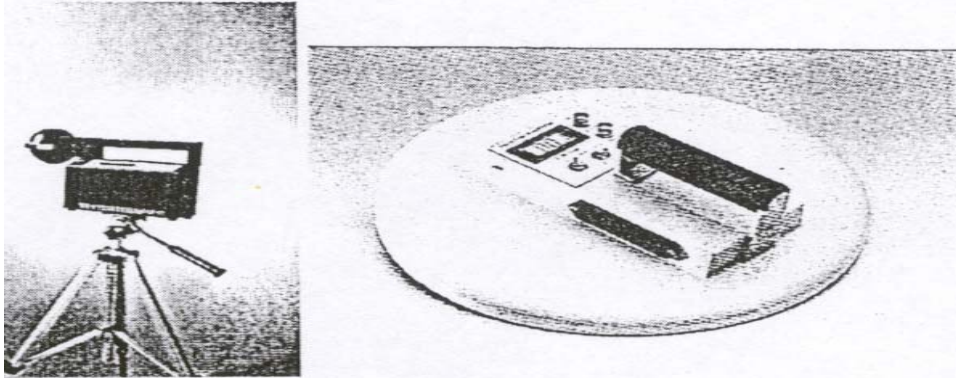
Speciella sensorer ”känner av” elektriska fältet innan signalen skickas till för-förstärkaren. Se **Figur 2-4** nedre delen av kretsen. Sensorerna liknar kondensatorplattor. När de befinner sig i ett elektriskt fält blir en spänning mellan plattorna. Spänningen är som bekant proportionell med elektriska fältet enligt sambandet Elektriskfält = Spänning / Avstånd. Mätområdet varierar t ex mellan 4 V/m till 10kV/m, för FD1-Combinova.

Man pekar med instrumentet mot den fältkälla som ska mätas. Vid mätningen, ska skärmning av fältkällan undvikas, d v s saker som är elektrisk ledande inte ska befinna sig mellan källan och mätinstrumentet. En hand eller en finger mellan fältkällan och instrumentet minskar mätresultatet avsevärt. (Se avsnittet om elektrisk skärmning Kapitel 3).

Mätning av elektriska fält med och utan yttre jordreferens

Utan användning av yttre jordreferens, mäter instrumentet, elektriska fältet mellan källan och den person som håller i instrumentet.

För att mäta elektriska fält mellan en skyddsjordad apparat och jord, bör instrumentets jordanslutning, anslutas till samma skyddsjord som är kopplad apparaten. På detta sätt får de samma jordreferens. Observera att mätning en av elektriska och magnetiska fält är ganska komplicerat. Speciellt för högre frekvenser. För mer information kan tillverkarnas kataloger användas. (Combinova t ex).



Figur 2-5 Mätinstrument för magnetiska- (till vänster) och elektriska fält (till höger)

Elektriska fält är inte lätt att mäta i praktiken. Den som mäter blir själv uppladdad, när denne går t ex på en halvledande matta. Fältet kan påverka andra föremål i närheten som i sin tur blir laddade och påverkar mätningen. Vissa typer av byggnadsmaterial som t ex gipsväggar, spånskivor kan fånga upp elektriska fältet och öka deras utbredning.

2.3 Biologiska effekter av lågfrekventa fält

2.3.1 Elöverkänslighet och lågfrekventa fält

Individer som lider av elöverkänslighet, visar symtom vid kontakt med vanliga ämnen som folk i allmänhet tål utan besvär. Det finns över 2000 elöverkänsliga i Sverige. Under perioden januari 1993 till september 1995 sökte 214 personer bostadsanpassningsbidrag från olika kommuner för att minska elektriska och magnetiska fält i sina hem. Personer som tillhör elöverkänsliga gruppen är mycket heterogena men kan delas i två huvudgrupper:

- Personer med övergående besvär vid bildskärmsarbete
- Allmän el-känsliga

Sambandet hudproblem vid bildskärmsarbete eller uppladdningen av operatörn själv, har studerats sedan 1980 talet. Flera studier har gjorts med blandade resultat. Cato Olsen förslog att statiska laddningar leder till ökade luftpartiklar som ger hudsymtom. Men senare studier i Sverige kunde inte bekräfta resultatet.

2.3.1.1 Vanliga symtom och eventuella orsaker till elöverkänslighet

En majoritet bland elöverkänsliga personer påstår att bildskärmsarbete är huvudanledningen för deras besvär. En grupp av de påstår sig få mer besvär med vanliga katodstråleskärmar jämfört med LCD-skärmar (Liquid Christall Display = flytande kristall skärmar) men för en annan grupp är precis tvärtom.

Förutom bildskärmar nämns även närheten till gamla lysrör med flimmer, TV-apparater och elspis som orsakskällan till besväret. För en del elöverkänsliga leder tillståndet till allvarliga konsekvenser för arbetet och livskvalitet. Trötthet, koncentrations- och minnessvårigheter

samt yrsel och huvudvärk och hjärtklappningar är vanligt förekommande hos elöverkänsliga. Vanligt förekommande hudymtom är rodnad, hetta, sveda, stickningar och domningar.

2.3.1.2 Andra icke elektriska faktorer som kan leda till hudproblem vid bildskärmsarbete (påverkar trovärdigheten av vissa studier)

Problemet med många studier är att de inte tagit hänsyn till andra faktorer som kan direkt bidra till hudbesvär. Några faktorer är:

- Låg relativ luftfuktighet (under 30%) och hög lufttemperatur har visat sig ha kopplingar till hudproblem.

- Stress är även en faktor att räkna med. Vissa studier visar ett samband mellan hög arbetstakt och hudproblem. När det är långt mellan pauserna kan man se ett samband. Se Tabell 2-1.

(Undersökningsrapport A.L.I)

Intressanta studier i Sverige visar att elöverkänslighet är:

- Vanligare bland kvinnor.

- Äldre visar mer symtom i nervsystemet (yrsel, stickningar och domningar, trötthet, samt huvudverk).

- Hög ambitionsnivå kan resultera i insjuknande (inte säkert). (Boverket 1998)

Studie	Hudreaktion	Exponering	Jämförelse	Oddsquot
Bergqvist och Wahlberg (31)	Symtom	Bildskärmsarbete med hög arbetstakt	Bildskärmsarbete med lägre arbetstakt	2,5 (1,2-5,5)
	Symtom	Ej bildskärm, hög arbetstakt	Ej bildskärm, lägre arbetstakt	0,8 (0,2-3,0)
	Hudrodnad (obj)	Bildskärmsarbete med hög arbetstakt och svårt att ta paus	Bildskärmsarbete med pausmöjlighet	3,9 (1,2-12,3)
	Hudrodnad (obj)	Bildskärmsarbete med hög arbetstakt och svårt att ta paus	Ej bildskärmsarbete	7,9 (0,9-69)
Stenberg m. fl. (140)	Symtom	Hög arbetstakt	Lägre arbetstakt	3,7 (1,3-10,3)

Oddsquot och 95% konfidensintervall för denna anges.

Tabell 2-1 Samband mellan arbetstakt och hudproblem i två epidemiologiska studier (Undersökningsrapport A.L.I)

2.3.1.3 Lågfrekventa fält och hudproblem

Elektriska fält med frekvenser 10-70 kHz studerats i samband med uppkomsten av hudsymtom. Med åtgärder som filtrering och jordning bildskärmar eller byte av lysrör och bildskärmar till lågstrålande typer, lyckades man minska hudsymtom.

Men studien har haft brister enligt andra forskare och resultatet ska tolkas med försiktighet.

En intressant svensk studie, sambandet överrisk för hudproblem och tiden

I en studie av Bergqvist och Wahlberg fann man en överrisk för hudbesvär i samband med exponering för linjefrekventa elektriska och magnetiska fält men denna överrisk verkade vara förbundet med den tid som individer satt vid dessa bildskärmar och inte till de fältnivåer som förekom.

Ett statistiskt klarare samband noterades också mellan elektriska fält uppmätta i andra delar av kontorsrummet och hudbesvär. Tolkningen av detta fynd är oklar. Om individernas hudproblem ökar med ökande bildskärmsarbete så är det oklart vilken mekanism som gör att dessa hudbesvär kopplas till fält uppmätta i andra delar av rummet men inte till bildskärmsplatsen.

En möjlig förklaring är att man konstaterar att mätning av elektriska fält är mycket tvivelaktiga och att de två uppmätta värdena bör ses som stickprov på den allmänna fältnivån och inte som specifika värden för de olika platserna i rummet.

- Enligt andra forskare är fyndet av intresse men det kan inte definitivt klargöra att det är elektriska fält som orsakar hudproblem vid bildskärmsarbete.

En norsk studie, effekten av filter på bildskärmar

I ett norskt arbete har man studerat effekten av filter på bildskärmar och dess förmåga att reducera hudsymtom i en ordinarie kontorsmiljö med skärmar, som personalen upplevt besvärande. Forskare har försökt hitta samband mellan fältminskning och minskade besvär. Det filtret som användes var antingen aktiv-anslutet till jord eller inaktiv och ej jordanslutet. Jordanslutningen medförde en kraftig reducering av det elektrostatiska fältet och det elektriska fältet i ELF-området, men endast en måttlig reduktion av elektriska fältet i VLF-området. I stort var hudsymtomen mindre under den period aktivt filter var applicerat jämfört med icke aktivt filter. Skillnaden var liten och endast för ett symptom; stickningar, pirrningar eller klåda.

- Enligt författaren kan studien ge ett svagt stöd för att reduktion av elektriska fält kan minska förekomsten av hudsymtom. (A.L.I)

Stickningar, pirrningar och lågfrekventa fält

I en studie som gjordes av Wadman fann man ett samband mellan symtomet stickningar, pirrningar i huden hos elöverkänsliga och uppmätta nivåer av extrem lågfrekventa elektriska fält fast detta symptom förekom bara i ett av fyra företag som undersöktes. Med tanke på att hänsyn inte tagits till icke fysikaliska faktorer (som stress och åldern t ex) så fyndet bör betraktas med viss försiktighet.

Föreningen för elöverkänsliga och bildskärmsskadade genomförde 1993, en studie genom att vidta åtgärder för att minska fältet och se reaktionerna på folk som hade problem innan. 72 personer av de 100, påstod att de mätte bättre men var inte helt friska. Sex personer svarade att de mätte bra.

Tester på elöverkänsliga

Studier gjordes på 30 stycken människor som påstod vara överkänsliga mot EMF. De utsattes för liknande fält som på fältet från bildskärmar för en timme. Fältet var bortkopplat emellanåt. Ingen av de kunde konsekvent berätta när fältet var på eller frånkopplat. Vid experimentet mättes blodtrycket, puls, kapillära blodflödet och hudkonduktivitet hos människorna men ingen signifikant skillnad mellan riktig och låtsas fält kunde konstateras. En annan liknande test gjordes fast med varierande amplitud på fältet. Inte heller denna studie visade någon signifikant resultat för fält identifikation. (Chalmers Universitet)

2.3.1.4 Elöverkänslighet, nivåändringar i hormoner

Ett antal studier har genomförts, där både personer med hudbesvär vid bildskärmsarbete och elöverkänsliga testats med avseende på elektriska och/eller magnetiska fält som de har varit exponerade för. Som mått på biologisk respons har man i samtliga studier valt att använda patientens egna berättelser vid detektion av fält och/eller rapportering av symptom.

I några av studier har man även valt att, som biologiskt svar, mäta hudtemperatur, halten av olika hormoner, respons från det autonoma nervsystemet med mera. (A.L.I 4.7.1)

Melatonin nivån

Melatonin är bland de viktigaste hormonerna i kroppen. Variationer i melatoninnivåer tycks spela en roll för ett antal symtom hos elöverkänsliga. Melatoninnivåer påverkas av ljus och man har även i ett antal studier undersökt hur även exponeringen för lågfrekventa elektriska och magnetiska fält påverkar produktion eller utsöndring av melatonin.

- I en artikel, har Lambrozo och medarbetare, sammanfattat nuvarande kunskap från djurförsök avseende melatonin och exponering för lågfrekventa elektriska eller magnetiska fält. Fyra studier på gnagare visar en reduktion av melatonin syntesen i tallocortikot eller ökade nedbrytningen av melatonin på elektriska 50 eller 60 Hz fält. Exponeringsnivåer varierade mellan 2 och 65 kV / m. En femte studie visade inget samband.

Vad gäller magnetfält mellan 0.02 till 100 μ T har också visat minskade melatoninnivåer på gnagare.

- Men det förekom studier som inte fann något samband.

Mätning av kromosom avvikelser [engelska: abnormality]

- Nordensson och Hansson Mild, presenterade en studie om effekten av of lågfrekventa magnetfälts på inre fosterhinneceller. De upptäckte en fördubbling av kromosom avvikelse i de exponerade cellerna.

- Jan Wahlström på Department av Klinisk Genetik, Östra sjukhuset i Sverige, försökte att göra samma studie som Nordensson och Hansson Mild gjorde. Celler utsattes för 30 μ T, RMS 50 Hz magnetisk fält för 72 timmar. Resultatet visade betydligt mindre kromosom avvikelse i de cellerna. Skillnaden i resultaten i två studier kunde inte förklaras. (Chalmers Universitet)

Mätning av ODC

Mätningar gjordes på koncentrationen av ODC, (en tillväxtrelaterad enzym) när de utsattes för magnetiska fält. ODC enzymer är kända att gynna tumör bildandet i kroppen och sedan tidigare är det känt att de blir påverkad av elektriska fält. Ingen statistisk skillnad i ODC nivå mellan de utsatta cellerna och kontroll celler kunde konstateras när de utsattes för magnetiska fält. (Chalmers Universitet)

Potassium jontransport

I ett annat experiment mätningar gjordes på potassium jontransport genom cellmembraner när de utsattes för lågfrekvent magnetfält. En liten likspänning applicerades över membranet och jonströmmen genom cellen mättes. Membranet även var utsatt för magnetfält från en Helmholtz-spole. Man kunde variera både likström och magnetfältet för att kunna se om det finns effekter.

- Inga statistisk signifikanta effekter kunde konstateras. (Chalmers Universitet)

Flödet av kalcium genom cellmembraner

Studier gjordes på celler från råttor. Cellerna utsattes för olika resonans effekter vid olika frekvenser. Ett dator simulationsprogram utvecklades på Chalmers Universitet som visade att joner har en resonans energi absorption vid vissa frekvenser. I vilken frekvens de resonerar beror på statiska magnetiska fältet och om de ens börjar att resonera beror på att vi har mycket låg viskositet i det medium som jonen förflyttar sig i.

- Resultatet visade inga upphöjda värden för kalcium flödet genom cellmembraner. (Chalmers Universitet)

Nervinflammation, bestämda frekvenser

Blackman rapporterade att nervinflammation kan öka i vissa celler om de utsätts för en kombination av magnetiska lik- och växelfält i bestämda frekvenser. Forskargruppen på Chalmers Universitet har försökt göra en exakt kopia av de här experimenten men preliminära resultat kan inte fullt bekräfta Blackmans upptäckter.

En intressant studie, fyrkant och sinusformade fält

Den studie som har dragit till sig största intresset genomfördes av Environmental Health Centre i Dallas under ledning av dr William Rea.

Hundra försökspersoner som påstod vara elöverkänsliga exponerades för ett svagt magnetfält (0.35 μ T i knähöjd) under en tre minuters period i en extremt kontrollerad inomhusmiljö. Försöket upprepades med 21 olika frekvenser, från 0.1 Hz till 5 MHz, med ca 5 slumpmässigt inlagda placebo (låtsas) exponeringar. Samtidigt mättes blodtryck, hjärtfrekvens, andningsfrekvens, temperatur och upplevda subjektiva besvär.

- Av totalt 100 personer, reagerade 25 positivt på fältexponeringen och dessutom reagerade de inte på placeboexponeringar. För de 25 personerna upprepades exponeringen, varav 16 personer utkristalliserades. Vid en ytterligare upprepning av testet med de frekvenser varje individ var känsligast för, reagerade samtliga personer positivt. (A.L.I 4.1.3)

- Den här studien blev kritiserad för att inte vara väldefinierad i de olika frekvensområden och att fyrkantpuls hade använts, samt att pulserna hade kraftigt distorsion. Uppreppningsförsök av studien, fast med ren sinuspuls och frekvenser mellan 10 - 300 Hz med en flödestäthet på 30 μ T, gav inte samma resultat som i förra studien.

2.3.1.5 Neurastena besvär

Symtom hos personer, som påstår vara elöverkänsliga, kan förutom hud och ögonbesvär vara olika symtom från nervsystemet. Till exempel mental uttrötthet, koncentrations- och minnessvårigheter samt huvudvärk även depressiva symtom och allmänna symtom från nervsystem som pirningar, stickningar, sveda i armar ben och ansikte kan förekomma.

Huvudvärk och Lågfrekventa fält

Många studier har gjorts för att hitta ett samband mellan huvudvärk och närheten av högspänningsledningar. En del av de studier har lyckats visa ett samband.

- En studie av Dawson, från 1988, visar en signifikant högre besvär med huvudvärk och migrän bland personer som bodde på ett visst avstånd (60 - 80 meter) från högspänningsledningar.

- Men senare studier Poole (år 1993) och Meyer (år 1995) kunde inte visa något samband mellan huvudvärk och fält från kraftledningar. (A.L.I 4.5.1)

Depressiva symtom

- Vissa studier som har gjorts visar ett samband mellan ökade exponering av magnetfält och depressiva symtom. Men det finns andra studier som inte visar något klart samband.

- Nyligen har det emellertid kommit en rapport om sömnstörningar hos 16 friska frivilliga försökspersoner som under sömn exponerats för ett 50 Hz, 1 μ T magnetfält. I jämförelse med nätter när personerna inte var exponerade, noterades vissa förändringar i sömnen. De sov mindre tid i SWS (Slow Wave Sleep), sömnen uppfattades också som mindre djup. Dessa studier har blivit kritiserade för att exponeringen inte varit enhetliga som kan bidra till svårigheter att dra klara slutsatser. (A.L.I 4.5.2)

Alzheimer sjukdom och andra demensformer

- I en rapport, från 1995, som är en sammanställning av tre studier, två finska och en amerikansk, fann man en högre andel av personer med Alzheimer sjukdom bland de personer som genom yrkestitel klassificeras som exponerade för elektromagnetiska fält jämfört med dem som bedömts inte hade exponerats nämnvärt via arbete. Författarnas slutsats var att exponering för måttlig till höga elektromagnetiska fält kunde associeras med orsak till sporadisk Alzheimer sjukdom.

- Det finns också andra studier som visar ett samband, men dessa studier har blivit kritiserade för att de inte har varit riktigt vetenskapligt utförda. (A.L.I 4.6.1)

- Senaste epidemiologiska studien i Sverige (år 2003) gjord av forskare i Karolinska sjukhus visade en fördubbling av risk för Alzheimer sjukdom bland svetsare och lokförare, dvs folk som är utsatta för starka lågfrekventa magnetiska fält på grund av sitt arbete. Studien gjordes på 1000 personer under 5 år.

2.3.1.6 Amalgam och elöverkänslighet

En sak som diskuterats i samband med elöverkänslighet är om fältexponering skulle kunna leda till kvicksilverfrisättning från amalgamplomber.

- Högstedt och Örtendahl fann en ökad frisättning från nygjorda amalgamkutsar i närheten av påslagna bildskärmar. Frisättningen varierade mellan olika bildskärmar, men utan att några samband kunde konstateras till uppmätta magnetfält.

- Andra studier visade inget samband mellan kvicksilverhalt i munnen och olika nivåer elektromagnetiska fält. Till exempel i Berglunds studie där 5 personer exponerades för 500 μT , 50 Hz magnetfält under 8 timmar. Noggranna mätningar visade ingen utökade frisättning av kvicksilver.

- Det går inte att göra klara bedömningar av de här studierna.

2.3.1.7 Argument och sammanfattning gällande elöverkänslighet

Hösten 1995 tillsattes en grupp forskare med uppdrag att utreda dels kunskapsläget avseende risker och orsaksfaktorer för elöverkänslighet, dels hur exponering för elektromagnetiska fält leder till elöverkänslighet eller liknande hälsoproblem. Uppdraget omfattade utredning om vissa neurologiska sjukdomar kan bero på exponering för elektromagnetiska fält.

- Enligt expertgruppen ger inga av dessa argument ett definitivt belägg för eller emot en roll för EMF vad gäller utvecklande av besvär. I Tabell 2-2 och 2-3 nedan finns en sammanfattning av diskussionen enligt expertgruppen.

Kunskap som idag talar för ett samband mellan elöverkänslighet och EMF	Kunskap som idag talar mot ett samband mellan elöverkänslighet och EMF:
Elöverkänsliga personers vittnesmål om hur närhet till elektrisk utrustning försämrar besvär efter att de drabbats av elöverkänslighet.	Elöverkänslighet debuterar vanligen ej i miljöer med de högsta exponeringarna för magnetisk flödestäthet eller elektrisk fältstyrka för extremt lågfrekventa (inkl nätfrekventa) fält
En person kunde korrekt ange förekomst av påslagen mobiltelefon i en metodstudie.	Besvärsbild har ej kunnat reproduceras vid dubbelblindexponeringar i provokationsstudier.
Noterat samband mellan arbetstid vid datorn och hudbesvär.	Extremt lågfrekventa elektriska fält från bildskärmar ger troligen ej ett signifikant tillskott till exponeringsnivåerna i majoriteten av kontorsmiljöer
Positiva erfarenheter i individuella fall av elsanering.	Elsanering ger ej alltid positiv effekt med bestående minskad besvärsgrad. Resultat från interventioner tyder på att god effekt kan nås med andra åtgärder än reducering av EMF.
Resultat som tyder på att det finns känsliga individer som reagerar avvikande, t. ex. med ökad reaktivitet i autonoma nervsystemet.	In vitrostudier har ej säkert kunnat visa biologiska effekter vid exponeringsnivåer motsvarande de här aktuella, t. ex. kontorsmiljöer.
Det finns vissa gemensamma drag i majoriteten av de drabbade; debut av hudsymptom med ofta karakteristisk brännande känsla, vid bildskärmsarbete.	Den kliniska bilden hos elöverkänsliga med en bred attribuering är mycket varierande och några säkra sjukliga förändringar har ej kunnat kopplas till elöverkänslighet. Det föreligger stora geografiska (nationella) variationer i besvärsbild och rapporterade utlösande faktorer.
Argument som av expertgruppen anses tillhöra de mest betydelsefulla är markerade med fetstil. Flera av argumenten (både för och emot) är dock beroende av tolkningar, och i en del fall begränsade till vissa fält (exempelvis extremt lågfrekventa fält) - se vidare diskussion i texten.	

Tabell 2-2 Argument som talar för respektive mot elektromagnetiska fält som orsaksfaktorer för elöverkänslighet och/eller hudbesvär vid bildskärmsarbete enligt expertgruppen. (ArbetsLivsInstitut)

	Andersson, 1996 (2)	Berg 1992 (15)	Graham 1996 (54)	Törnqvist 1998 (148)	Åkerstedt 1997 (159)
Population	Fall	Fall och icke-fall	Frivilliga, kvinnor	Kraftverksarbetare, män	Frivilliga
Studerade fält	Elektriska och magnetiska fält vid bildskärm	Studeras ej	Magnetiska fält	Magnetiska (B) eller elektriska (E) fält	Magnetiska fält
Jämförelse	Exp/ej exp	Fall/andra vid bildskärmsarbete	Exp/ej exp	Hög/lågexp	Exp/ej exp
ACTH	-	-	-	-	Ingen
Adrenalin	-	Ingen	-	-	-
Estradiol	-	Fall högre	Fält påverkade	-	-
Kortisol	Ingen	Ingen	Ingen	B: Ingen E: högre vid exponering	Ingen
Noradrenalin	-	Ingen	-	-	-
Prolaktin	Ingen	Fall högre vid bildskärm	Fält påverkade	Ingen	Ingen
Testosteron	-	Fall lägre vid bildskärm	-	-	-
Tillväxt-hormon	-	Ingen	-	-	Ingen
Tyroxin	-	Fall högre vid bildskärm	-	-	-

Fall=elöverkänsliga eller individer med hudproblem vid bildskärmsarbete. Beträffande noteringen "kvinnor" respektive "män" är dessa studier utförda på individer rekryterade utan hänsyn till eventuell "elöverkänslighet". "Ingen" = ingen signifikant skillnad avseende den aktuella jämförelsen. För ytterligare detaljer, se texten resp originalarbetena.

Tabell 2-3 Inverkan av lågfrekventa EMF eller andra jämförelser på nivåer av vissa hormoner. (ArbetsLivsInstitut)

2.3.2 Cancer och lågfrekventa fält

Människor i allmänhet är mest utsatta för fält som har frekvensen 50 eller 60 Hz (USA) eftersom kraftledningarna och de flesta elektriska apparater använder de här frekvenserna. Därför har forskning varit mest koncentrerat på (0 - 300Hz). Forskningen på frekvensområdet 300Hz - 10 MHz (mellanfrekvens), har däremot inte alls varit lika omfattande trots vissa användningsområde i industrin.

- De flesta studier som har gjorts kan inte visa några direkt skadliga biologiska effekter på människor eller djur från lågfrekventa elektromagnetiska fält med låg intensitet.
- Studier på djur som försökte hitta "gynnande effekter" (engelska: promoting effects), från ELF- EMF i låga intensiteter i närheten av t ex andra kända cancerframkallande kemiska medel kunde inte visa något samband.

2.3.2.1 Starka extremt lågfrekventa (ELF) fält och biologiska effekter

- Det har funnits vissa indikationer att ELF-magnetfält med intensiteter 20 till 100 μ T kan ha samband med bröstcancer.

B-fält över 100 μ T och E-fält över 5000V/m med frekvensen 50 Hz kan ha effekter på hjärtrytmen. (ALI 1.4.3)

- Det har rapporterats att ELF-magnetiska fält över 100 μ T, har effekter på tillväxt enzymen ODC. Andra studier kunde inte bekräfta detta. För mer om ODC se **Avsnitt 2.4.5.5**.

- Effekter på kalciumkoncentration i cellerna har konstaterats, när exponeringen var hög, men det är osäker att effekterna var skadliga.
- När djur exponerades för starka ELF- magnetiska fält (10 till 5000 μT), kunde vissa förändringar i beteendet och nervsystemet konstateras. Ändringar i melatonin nivån har också påträffats.
- Starka extremt lågfrekventa fält, har kända effekter på cellerna men om alla de här effekterna är skadliga går inte avgöra. Att starka fält har effekter innebär inte att resultatet kan extrapoleras för svaga fält eftersom mekanismen kan vara helt olika för starka och svaga fält.

2.3.2.2 Epidemiologiska studier om extremt lågfrekventa elektro- magnetiska fält (ELF-EMF)

De mest positiva samband mellan cancer och ELF-EMF som har påträffats är från de epidemiologiska studier som hittills har gjorts.

- 1979 kom en rapport av Wertheimer och Leeper om ökade cancerrisk (barnleukemi) hos barn som bor nära kraftledningar. Sedan dess har det gjorts enorma mängder studier angående biologiska effekter av EMF.

Barnleukemi är en mycket sällsynt sjukdom. Ungefär 4 av 100000 barn mellan 0 och 14 kan bli sjuka av den här sjukdomen i Sverige varje år. Motsvarande siffror är 5 av 10000 i USA enligt NIEHS (National Institute for Environmental Health Sciences).

- Fyra liknande epidemiologiska studier gjordes i USA för att hitta en eventuell relation mellan ökade barncancer och ELF-EMF. Två av studierna visade en ökning jämfört med resten av befolkningen och de andra visade inga samband.
- Kanske den mest oroväckande studien var en stor epidemiologisk studie i nordn (Ahlbom) som visade en fördubbling av barn leukemi bland folk som var exponerade för mer än 0.3 - 0.4 μT under längre period.

Ökade risk på arbetsplatser (i USA)

- Stora studier på olika arbetsplatser, med en höga exponeringar för magnetiska fält, visade en liten men signifikant ökning av risken (relativ risk = 1.21) för utveckling av olika sorters cancer som hjärntumörer och leukemi. [relativ risk = risk för exponerade individer / risk för icke exponerade individer].

Det ska konstateras att epidemiologiska studier har blivit kritiserade för att vara bristfälliga. Anledningen är att studierna la inte märke till individers bakgrund och använde bristfälliga mätningmetoder. Se även avsnitt 2.4.7.1 för epidemiologiska studiers bristfällighet.

2.3.2.3 Klassificering av hälsoeffekterna

För att klargöra hälsoeffekter av lågfrekventa magnetiska och elektriska fält gjorde IARC (International Agency for Research on Cancer) en stor undersökning (juni 2001). Målet var att sammanväga studier som hittills hade gjorts i det här området.

- Resultatet visade en ökad risk på ca 1.18 med 95% konfidens intervall. (Repacholi WHO)

Följaktligen klassades lågfrekventa magnetiska fält som "möjligen cancerframkallande" (engelska : possibly carcinogenic) för människor. Tabell 2-4 visar en gradering av olika medel och dess koppling till cancer. Observera att kaffe och ELF- EMF och avgas från bensinmotorer ligger i samma klass!

Klassifikation	Exempel på olika medel
Cancerframkallande för människor baserad på människoeffekter	Asbestos, Tobak, gammastrålningar
Sannolikt cancerframkallande baserad på starka bevis på djur	Avgas från diesel motorer Solarium lampor UV-strålningar
Eventuellt cancerframkallande för människor	Kaffe Avgas från bensinmotorer Svetsrök ELF-magnetiska fält

Tabell 2-4 Klassificering av vissa cancerframkallande medel enligt IARC.

2.4 Biologiska effekter av radiofrekventa fält

Följande avsnitt tas upp endast som ett komplement för avsnittet om biologiska effekter för lågfrekventa fält. Radiofrekventa fält är ju knappt förekommande i elinstationer som togs upp i Kapitel 1. Folk, som bor i byggnader nära radiostationer eller antennmaster, kan bli påverkade av de biologiska effekterna från radiofrekventa fält.

2.4.1 Fältkällor I GSM-kommunikationssystem (Global System for Mobiltelefoni)

Kommunikation mellan mobiltelefoner görs genom basstationer. Basstationer kan delas i tre kategorier:

- Makroceller som utgör huvudstrukturen för basstationsnätverket. Dessa stationer kan ha en uteffekt på tio tals Watt och kommunicera med mobiltelefoner över en radie på ca 35 kilometer. Mätningar visar att på grund av det långa avståndet, ligger fältet från dessa enheter under gränsvärden, för att ha några som helst biologiska effekter. Men uteffekter och antalet av de kan öka i framtiden.

- Mikroceller används för att ”fylla på” där trafikbehovet är högt, till exempel nära flygplatser och i stora städer. Dessa har en mindre uteffekt än makroceller och täcker över flera hundra meter avstånd. De har också en strålning som ligger under gränsvärdena om antennen är placerade på rätt sätt.

- Pikoceller som i stort sett placeras in i byggnader och ska vara konstruerad så att fältet överskrider inte gränserna.

Förutom basstationer för mobiltelefoner finns bland andra TV- och radio signaler också i vår omgivning som normalt ligger under gränsvärdena. (NRPB1.11)

Kommande kapitel är en sammanfattning av studier som har gjorts om biologiska effekter av radiofrekventa magnetiska och elektriska fält. Speciellt, de frekvenser som mobiltelefoner jobbar med är intressanta.

2.4.2 Sambandet mellan radiofrekventa (RF) fält, elöverkänslighet och neurologiska sjukdomar

En intressant studie

Det har förekommit diskussioner om mobiltelefoner är en källa till besvär hos elöverkänsliga. - I en studie lät man elöverkänsliga patienter avgöra om telefonerna är av eller på under dubbelblind förhållanden. Sju personer deltog i studien som gjordes i nio omgångar. En person prickade rätt i alla 9 omgångar. Resultatet är osäkert. Inga slutsatser kan dras för tillfället. (A.L.I)

Termiska och icke termiska effekter

De biologiska effekter av högfrekventa elektriska och magnetiska fält brukar delas i två grupper:

- Termiska effekter
- Icke termiska effekter

2.4.3 Termiska effekter

Energien från oscillerande högfrekventa elektriska fält, över en vis gräns, gör att temperaturen i cellerna ökar. Exponering för under 50 W/m² eller SAR-värde under 1W/kg anses inte skapa någon signifikant värmeökning i cellerna. En eventuell mekanism är att elektriskladdade joner som finns i kroppen blir påverkade av fältet och börjar röra sig, Jonrörelser resulterar i temperaturökning. Men det tar tid för kroppstemperaturen att öka när den blir utsatt för strålningar. Eftersom fält från mobiltelefoner är pulserande så används den absorberade effektens medelvärde (SAR = Specific Absorption Rate). Pulserande fält kan snabbt öka temperaturen i cellerna.

Vi tittar närmare på både termiska och icke termiska effekterna. Experimentella studier har gjorts med varierande frekvenser och modulations typer i väldigt höga intensiteter (över gränsvärdena). Dessa intensiteter orsakar värmeökning som i sin tur kan leda till patologiska (skadliga) effekter på celler och vävnader. (NRPB 5.36, 5.37)

2.4.3.1 Termiska effekter på huvudet

Eftersom mobiltelefoner hålls normalt vid huvudet när samtalet pågår så undersöks först och främst effekterna på hjärnceller. Om temperaturökning i hjärnceller är tillräcklig hög, kan blodcirkulationen i cellerna påverkas. Med hjälp av modeller som har utvecklats kan man beräkna SAR -värdet. En 915 MHz dipol antenn med en uteffekt på 0.25 W (typiska värden för mobiltelefoner), resulterar i ett SAR-värde av ungefär 1.6 W/kg som kan ge en temperaturökning på 0.11°C. Det här värdet anses inte vara farligt för blodcirkulationen i hjärncellerna. Men fler undersökningar bör göras med mera realistiska simuleringar av fält från mobiltelefoner som t ex innehåller 1800 MHz och olika typer av moduleringar. (NRPB 5.10)

2.4.3.2 Jontransport genom cellmembran

I ett forskningsprojekt, som gjorts av Chalmers Universitet (Bengt Nordén, John Sandblom), testades hypotesen att ”ifall högfrekvent elektromagnetiskt fält har effekter på jontransport genom cellmembraner”. Olika testsystem användes. Läckage av fluorescentfärg genom cellmembran testades i cellerna.

- Resultatet visade en ökning av läckaget in 2450 MHz frekvens (SAR-värde = 35 W/kg). Andra forskare påstår att resultatet är osäkert p g a brister i experimentet.

2.4.3.3 Hjärntumör

En pilot studie har börjats för att kontrollera allmän utbredning av hjärntumör i Göteborg regionen. 50 Hz elektromagnetiskt fält och radon koncentration mäts.

- Salford rapporterade viktiga upptäckter av läckage i blodhjärnbarriären (blood brain barrier) i samband med radiofrekventa fält även vid låga effekter. Studierna pågår för att förstå varför hjärnceller har reagerat så starkt på RF-fältet.

2.4.3.4 Effekter på ögonen

Ögonlinsen är känslig mot RF-fält. Anledningen är att det inte finns något blodflöde i ögonlinsen och därmed blir det svårt att föra bort värmen.

- Studier visar att vid exponering för frekvensen 2.45 GHz, kan ett SAR-värde på 100W/kg i mer än en timme, höja ögontemperaturen till över 43 °C och därmed resultera i ögonkatarakt.

Om ögonen blir utsatta för intensiteter strax under den här tröskeln, upprepade gånger, kan de bli skadade under förutsättningen att de skadade cellerna inte hinner repareras.

- Experiment på kaniner visar att kontinuerliga och långvariga RF-exponeringar med intensiteter på ca 17 W/kg SAR-värde i huvudet kunde inte orsaka ögonkatarakt. (Guy år 1980). (NRPB 5.100,101)

2.4.3.5 Nervernas känslighet

Det finns bevis som visar att exponering för höga intensiteter RF-fält kan höja temperaturen och därmed minska känsligheten (engelska = excitability) hos nerverna. Exponering för fält som inte skapar temperaturökning har inte påvisat någon effekt på nervcellerna.

2.4.3.6 Resultat och sammanfattning av studier om effekter av RF-fält vid höga intensiteter (termiska effekter)

Det finns bevis på att RF-fält kan påverka proteinmembran i cellerna och kan ändra rörelse mönstret av jonerna genom membraner. En del av de här effekterna verkar uppstå vid fält intensiteter som orsakar signifikanta termiska effekter (över 1W/kg).

Det finns studier som visar att fält från mobiltelefoner, även under normala förhållanden, kan påverka jonkanaler och membranproteiner i hjärncellerna. Det här kan leda till små förändringar i cellfunktioner men vilka effekter de har på människohälsan är fortfarande osäkert. (5.52 NRPB)

2.4.4 Icke termiska effekter

2.4.4.1 Energi aspekter

Svaga fält med SAR-värde under 1 W/kg har inte haft kända termiska effekter men vi ska undersöka om det finns andra icke termiska effekter.

Det behövs energi på minst 1 eV (electron Volt) för att bryta de svagaste DNA-molekylerna. Mobiltelefoner arbetar med frekvensen 0.9 och 1.8 GHz har en kvantumenergi på 4 - 7 μ eV som är betydligt mindre än den energi som behövs för att bryta DNA. Det ser omöjligt ut att RF-fält kan skada DNA-molekylerna ur energisynpunkt. (5.12 NRPB)

Men radiofrekventa fält kan producera andra effekter på levande molekyler. Alla komponenter av biologiska vävnader är i ständig rörelse (Brownisk rörelse över temperaturen -273 °C). Jämförelse med termiska brus i molekylerna är ett bra mått för att kontrollera om molekylen påverkas.

Känslighet vid vissa frekvenser

Det ska noteras att ibland är biologiska system känsliga mot vissa frekvenser och på grund av resonans, kan ett ganska svagt elektriskt fält producera detekterbara effekter. (5.13 NRPB)

2.4.5 Experimentala studier på djur

2.4.5.1 Kalcium i hjärnceller cellerna

Eftersom kalcium har en mycket stor roll i hjärncellers (och även andra cellers) funktion, har stora studier gjorts på just kalcium rörelse i hjärnceller. (NRPB 5.53)

Flera studier har studerat utflödet av kalcium ur hjärnceller som kan påverka känsligheten i nervsystemet.

Effekten av amplitudmodulering

- Bawin rapporterade 1975 att exponering för 147 MHz fält med intensiteter som var för små för att skapa värme i cellerna, har ökat utflödet av kalcium ur celler i kycklingshjärna, men bara när fältet var amplitudmodulerat med 16 Hz. Radiofrekventa fältet, ensam hade ingen uppenbar effekt. Bawins upptäckt blev senare bekräftad av Blackman 1979 som använde ett flertal amplitudmodulerade frekvenser mellan 3 och 30 Hz. Han kom på att effekten var maximal vid 16 Hz modulering.

- Kittel, år 1996, använde 2.45 GHz RF-fält amplitudmodulerat vid 16 Hz och upptäckte att exponeringen av levande mus ledde till en minskning av kalciumblåsor inne i nervceller och ökade kondenserade (precipitated) kalcium på cellens yta. (5.55 NRPB)

Studierna visade att RF-fält även i låga intensiteter (ingen termisk effekt) kan påverka kalciumrörelse in hjärnceller.

- Just nu används mobilsystem i ett väldigt begränsad utsträckning i de kritiska moduleringsfrekvenserna. Speciellt fält som är amplitudmodulerade med 16 Hz ska undvikas i framtida utvecklingen av mobiltelefoni.

2.4.5.2 Polarisering av cellerna

En annan eventuell icketermisk mekanism som gör att biologiska system blir påverkade är att cellerna blir polariserade i ett elektriskt fält d v s positiva laddningar flyttar åt ett håll och negativa åt annat håll. På det viset kan grannceller dras till varandra.

Elektriska fältet i en mobiltelefon är max 100 V/m. Hjärncellerna kan bli polariserade när vi pratar i telefonen men experimentala bevis som bekräftar den här mekanismen finns inte.

Basstationer med ett elektriskt fält på ca 5 V/m kan knappast ge någon effekt. Ingen experiment hittills har kunnat visa någon effekt från en så låg exponering. (NRPB 5.24, 5.25)

2.4.5.3 Inlärningsförmåga och minnet, exponeringsgränser

Med hjälp av vissa metoder kan man mäta förbättring eller försämring av inlärnings förmåga och minnet hos djur t ex med (radial-arm maze). Förvisso är modellen inte hundra procentig eftersom andra faktorer kan alltid spela roll. Fältets frekvensen, rumstemperaturen, relativ luftfuktighet, djurets storlek och art för att nämna några faktorer som kan påverka resultatet. Det finns t ex skillnad mellan gnagare och primat. Ändringar i lärningsförmåga hos primat börjar vid en högre frekvens av exponering för RF-fält.

- Experiment på apor visar att de reagerar vid 1.3 - 5.8 GHz fält vid ett SAR- värde av bara 4 - 5 W/kg. Vissa typer apor har en resonans frekvens på 225 MHz i vilken de absorberar maximum energi och resulterar i att” reducerade inlärningsförmåga börjar redan vid SAR- värde av ca 2.5 W/kg”.

- Man har tagit hänsyn till dessa värden, när man satt exponeringsgränser eftersom de här djuren är storleksmässigt lik människor. (5.80, 5.82, 5.83)

Termiska effekter och inlärningsförmåga

Fält som höjer kroppstemperaturen mer än 1° C, **kan definitivt påverka** inlärningsförmågan och minnet negativt, däremot har inga studier visat negativa ändringar i inlärningsförmåga vid exponering under de bestämda gränsvärdena. (NRPB 5.92)

Tabell 2-5 visar sammanfattningen av studier på inlärningsförmåga enligt National Radiological Protection Board (NRPB England).

Model	Exposure conditions	Results	References
Rats, 12-arm maze	2.45 GHz pulsed; 2 µs pulses; 500 pps; 0.6 W/kg; 20 min/day for 10 days	Fewer errors for two days, no effect overall	Lai <i>et al</i> , 1989a
Rats, 12-arm maze	2.45 GHz pulsed; 2 µs pulses; 500 pps; 0.6 W/kg; 45 min/day for 10 days	More errors each day	Lai <i>et al</i> , 1989a, 1994
Rats, Water maze	2.45 GHz pulsed; 2 µs pulses; 500 pps; 1.2 W/kg; 60 min/session; 2 sessions/day for 3 days	Took longer to locate submerged platform	Wang and Lai, 2000
Mice, 8-arm maze	900 MHz pulsed; 576 µs pulses; 217 pps; 0.05 W/kg; 45 min/day for 10 days	No effect	Sienkiewicz <i>et al</i> , 2000
Operant tasks: rats	2.8 GHz pulsed; 2 µs pulses; 500 pps; for 30 min	Impaired acquisition threshold at 1.7 W/kg whole-body exposure	Schrot <i>et al</i> , 1980
Operant task: rats	360, 480, 500, 600 MHz CW; up to 25 min or 55 min	Threshold for reduced performance > 4–6 W/kg whole-body exposure	D'Andrea <i>et al</i> , 1976, 1977
Operant task: rats	2.45 GHz CW; 110 5 h sessions over 22 weeks	Impaired performance at 2.3 W/kg whole-body exposure	Mitchell <i>et al</i> , 1977
Operant task: rats	2.45 GHz CW; 60 min	Threshold for reduced performance > 2.5–8 W/kg whole-body exposure	Sanza and de Lorge (1977); de Lorge and Ezell (1980)
Operant task: rhesus monkey	1.2 GHz CW; SAR 0.8 or 1.6 W/kg; 120 min	No effect	Scholl and Allen, 1979
Operant task: rhesus monkey	225 MHz CW OR 1.3 GHz pulsed; 3 µs pulses; 370 pps OR 5.8 GHz pulsed; 0.5 or 2 µs pulses; 662 pps	Threshold for impaired performance 2.5 W/kg (at 225 MHz) or 4–5 W/kg (at 1.3 and 5.8 GHz) whole-body exposure	De Lorge, 1984
Working memory task: rats	600 MHz (CW); SAR 0.1–10 W/kg; 20 min	Impaired performance at 1 °C rise in body and brain temperature (>9 W/kg) whole-body exposure	Mickley <i>et al</i> , 1994

Tabell 2-5 Sammanfattningen av studier på inlärningsförmåga enligt NRPB.

2.4.5.4 Cancerrelaterade studier för radiofrekventa fält

Det är DNAn i våra kromosomer som kontrollerar tillväxt och rätt funktion av våra celler. De är normalt mycket stabila. Det finns faktiskt en hel del mekanismer för att skydda DNA mot skador eller reparera skadorna. Men DNA kan bli skadade av t ex röntgen strålningar. Sådana substanser som skadar DNA kallas för genotoxisk eller mutagenisk. DNA-celler skadas p g a

naturliga och artificiella mutagent material och till stor del repareras hela tiden. (Men en viss sekvens av genetisk skada kan bli bestående och resultera in cancer. (NRPB 5.107, 5.108)

De flesta vetenskapsman är nu överens om att cancer initieras genom förändring (alteration) av genetiska material (DNA) i cellerna som ger en genotoxisk effekt. Tillväxt enzymen ODC som nämndes tidigare, är inblandad i celltillväxt och celldivision. Avsaknad av ODC-aktivitet försämrar tillväxten av båda normala och tumörceller. (NRPB 5.109, 5.111)

2.4.5.5 Fältexponering och ODC

En expert grupp från Kanada (Expert Panel of the Royal Society of Canada 1999) har studerat eventuella effekter av elektromagnetiska fält på ODC-nivån. Olika celler blev exponerade för fält som liknade fält från mobiltelefoner som var amplitudmodulerat med extrem lågfrekventa fält. Generellt visade sig att för modulationsfrekvenser mellan 10-60 Hz blev måttlig höjning av ODC-aktivitet. Se Tabell 2-6. (5.112 NRPB)

Model	Exposure conditions	Results	References
Reuber H35 hepatoma; Chinese hamster ovary; 294T human melanoma cells	450 MHz; AM at 5, 10, 16, 20, 60 and 100 Hz; 10 W/m ² ; SAR estimated as 0.08 W/kg; 1 h	Increased ODC activity by up to 100% at 12–20 Hz modulation	Byus <i>et al</i> , 1988 Byus and Hawel, 1997
L929 mouse fibroblasts	915 MHz; AM at 50, 60 or 65 Hz; SAR estimated as 2.5 W/kg; up to 8 h	Increased ODC activity by up to 100%	Litovitz <i>et al</i> , 1993
L929 mouse fibroblasts	835 MHz; AM at 6, 16, 55, 60, 65, or 600 Hz; SAR of 2.5 W/kg	Increased ODC activity by up to 100% at 16–65 Hz modulation	Penafiel <i>et al</i> , 1997

Tabell 2.6 Ornithine decarboxylase (ODC) aktivitet in vitro

Flera studier har visat att 50 - 60 Hz elektromagnetiskt fält, även utan RF-bärvåg, kan öka OCD-aktiviteter men inte alls lika mycket som andra cancerframkallande medel. Många forskare ser upptäckten med stor tveksamhet och påstår att sådana små ändringar i ODC aktiviteter kan överhuvudtaget inte vara tumörbildande. (5.113, 5.115 NRPB)

2.4.5.6 Kan radiofrekventa strålningar intensifiera effekten av andra cancerframkallande medel på djur?

En intressant studie

Det mest positiva beviset att RF-fält hjälper framkallandet av cancer, presenterades 1997 av Repacholi. I experimentet användes fält liknande det som används i digital mobiltelefoni (900 MHz pulsmodulerad) och gjordes på transgenisk möss d v s genförändrade möss som lätt kan bli cancersjuka. På det viset kan cancer framkallas i mycket kortare tid. Djuren delades i två grupper. Första gruppen utsattes för exponering en timme per dag för arton månader och den andra gruppen fungerade som kontrollgrupp. Det rapporterades att %43 av första gruppen fick cancer jämfört med %22 i andra gruppen. Mot slutet av experimentet ökade sjukdomen i båda grupperna lika mycket. Många forskare är skeptiska till resultatet. Kontrollstudier pågår i Europa (år 2000) för att se om man kan få samma resultat som Repacholi fick. (5.153 NRPB)

2.4.5.7 Slutsatser från cancerstudier på djur

Det fanns inga experiment som kunde bevisa att RF-fält under gränsvärden för termiska effekter kan ha någon cancer initierande effekt. Däremot finns studier (INCIRP, 1996;

Repacholi, 1998; Moulder, 1999; Royal Society of Canada, 1999) som visat att RF-exponering kan ha positiva effekter på tumörutbredning (engelska: tumour incidence). (NRPB 5.157)

2.4.5.8 Sammanfattning och slutsatser av experiment på djur

Det säkraste slutsatsen man kan dra för tillfället är att det blir effekter på levande celler när temperaturen i cellerna ökar mer än 1-2 °C. Studier på djur visar att RF-exponeringen över en viss gräns, ökar temperaturen i cellerna och därmed påverkar bland annat immunsystem och beteende. Andra icke termiska effekter är kontroversiella eftersom rent teoretisk är det omöjlig för fält med så lite energi kan bryta molekylära bandet. (NRPB 5.173, 5.174)

Det har rapporterats att pulserande (och ibland kontinuerliga) RF-strålningar med låga nivåer kan skada okulära vävnader i primater och producera icke specificerade stressliknande ändringar (engelska: non-specific stress-like changes) i råttors hjärnceller. Om sådana effekter finns även hos människor, kan de vara dåliga för människohälsan.

2.4.6 Effekter av radiofrekventa fält på människor

2.4.6.1 Hjärnfunktioner

Relativt små antal studier har gjorts på människor för att se om hjärnfunktioner förändras. (likt de på djur). Vi tittar på effekter på lång och kort minnet (engelska: long-term and short-term memory), selektiv uppmärksamhet (engelska: selective attention) och kvickheten i beslutfattandet (engelska: speed of decision-making).

En intressant studie

Preece (år 1999) använde 15 frivilliga för experimentet. Kontinuerliga och pulserande (217 Hz) 1W, 915 MHz signaler simulerade både analog (1W) och GSM (0.125W) mobila signaler. Reaktionerna jämfördes med icke exponerade kontrollgruppen. Statistisk analys visade signifikant skillnad in uppmärksamhetsuppgifter (engelska: attentional tasks).

- Senare analys visade inte samma signifikanta effekter.
- Effekter från analoga signaler var mer signifikanta. (NRPB 5.178, 5.179).
- Koivisto (år 2000) kunde visa liknande effekter på reaktionstider som Preece experiment hade visat. (NRPB 5.180)

2.4.6.2 Slutsatser av studier på hjärnfunktioner

Studierna visar att fälten från mobiltelefoner som till och med ligger under gränsvärden kan ha effekter på beteendet. Mekanismen är fortfarande inte känd men man misstänker att termiska effekter är inblandade. (5.194 NRPB)

2.4.6.3 Mobiltelefoner och dödlighet

En stor studie i Sverige av Hardell (år 1999) gjordes på patienter med hjärntumör. De utfrågades om deras vanor med mobiltelefonanvändning och även andra vanor. Sedan jämfördes dödligheten med befolkningen i allmänhet. Risken för folk som använde mobiltelefoner verkade inte vara större för verken analoga eller digitala system. Fast man i fortsatta studier upptäckte att användandet av analoga system hade ett icke statistiskt samband med tumörbildande på samma sidan av hjärnan man höll mobiltelefonen vid.

2.4.6.4 Negativt publicitet och frågeformulären

I en stor studie i Sverige och Norge (Hansson Mild 1998) utfrågades 11000 mobiltelefon-användare om de kände symtom som värme i örat eller huvudvärk. 13% i Sverige och 30% i Norge svarade att de hade minst en av de symtomen som de själva kopplade till användningen av mobiltelefon. De som använde GSM-systemet hade rapporterat ha mindre problem.

- Vilka slutsatser kan man dra av den här studien? Hur ska man förklara stora skillnaden mellan resultatet i Sverige och i Norge?

- Problemet med sådana studier är att kroppsliga klagomålet kan bero på andra saker än användandet av mobiltelefoner. Till exempel kan folkets psykologiska förhållanden vid den tid de blev tillfrågade påverka resultatet. Det visade sig att innan studien gjordes, fanns det en period av negativt publicitet om användandet av mobil-telefoner. Det var inte konstigt att folk som använde mobiltelefoner i stor utsträckning var mer villiga att rapportera de små symtomen.

2.4.6.5 Exponering på arbetet eller fritiden

Ett antal studier har gjorts på människor, som genom sina arbeten, eller på fritiden är ständigt exponerade för RF-strålningar. Resultatet sammanfattas i Tabell 2.7 och 2.8.

2.4.6.6 Slutsatser om exponering på arbetet eller fritiden

Sammanvägning av resultat från olika studier, kan inte visa att det finns en risk för cancer, bland folk som dagligen är exponerade för RF-strålningar genom sina arbeten. Många studier har visat en svag statistisk signifikans och en del studier lider av metodologiska brister.

Type of study	Study population	Exposure condition	Disease outcome	Number of exposed cases	Estimated relative risk (with 95% CI)*	References
Cohort	Radar technicians in US Navy	Occupations with higher exposure to RF radiation (radar)	Death from lymphatic or haematopoietic cancer	26	1.18	Robinette <i>et al</i> , 1980
Cross-sectional analysis of proportional mortality	Men age 20+ years in Washington State, USA	Radio and telegraph operators	Death from lymphatic or haematopoietic cancer	15	1.37	Milham, 1985
		Radio and television repairmen	Death from lymphatic or haematopoietic cancer	12	1.27	
Cohort	Amateur radio operators in California and Washington State, USA	Amateur radio operators	Death from lymphatic or haematopoietic cancer	89	1.23 (0.99–1.52)	Milham, 1988
Cohort	White male enlisted men in US Navy	Radiomen Aviation electronics technician	Non-Hodgkin's lymphoma	2 1	0.6 (0.1–2.0) 0.4 (0.0–2.2)	Garland <i>et al</i> , 1988
Case-control	Men aged 20+ years in New Zealand	Radio and television repairmen	Leukaemia	2	7.9 (2.2–28.0)	Pearce and Fraser, 1989
Cohort	White male enlisted men in US Navy	Radiomen Electronics technician	Leukaemia	4 5	1.1 (0.3–2.8) 1.1 (0.4–2.6)	Garland <i>et al</i> , 1990
Cohort	Norwegian electrical workers	Occupations with potential exposure to RF radiation	Leukaemia	9	2.85 (1.30–5.41)	Tynes <i>et al</i> , 1992
Cohort	Norwegian female radio and telegraph operators	Radio and telegraph operators	Leukaemia	2	1.1 (0.1–4.1)	Tynes <i>et al</i> , 1996
			Lymphoma	5	1.3 (0.4–2.9)	
Cohort	Polish military personnel aged 20–59 years	Occupational exposure to RF radiation	Lymphatic and haematopoietic cancer	Not given	6.31 (3.12–14.32)	Szmigielski, 1996
Cohort	Female employees in an Italian plastics factory	Exposure to RF radiation through work in a dielectric heat sealing department	Death from leukaemia	1	5.0	Lagorio <i>et al</i> , 1997
Cohort	Men and women employed in the design, manufacture and testing of wireless devices	Work in occupations with moderate or high peak exposures to RF radiation	Death from lymphatic or haematopoietic cancer	20	0.54 (0.33–0.83)	Morgan <i>et al</i> , 2000

*Confidence intervals, where shown, are as calculated by the authors

Tabell 2.7 Epidemiologiska studier av lymfatisk och haematopoietic cancer för människor som är potentiellt exponerade på RF-strålning genom sina arbeten eller på fritid hobby (National Radiological Protection Board 5.19)

Type of study	Study population	Exposure condition	Disease outcome	Number of exposed cases	Estimated relative risk (with 95% CI)*	References
Cross-sectional analysis of proportional mortality	Man aged 20+ years in Washington State, USA	Radio and telegraph operators	Death from brain cancer	1	0.38	Milham, 1985
		Radio and television repairmen		2	0.59	
Case-control	White men aged 30+ years from three areas of USA	Ever worked in a job with likely exposure to RF radiation	Death from brain cancer	69	1.6 (1.0-2.4)	Thomas et al, 1987
Cohort	Amateur radio operators in California and Washington State, USA	Amateur radio operators	Death from brain cancer	29	1.39 (0.93-2.00)	Milham, 1988
Cohort	Norwegian electrical workers	Occupations with potential exposure to RF radiation	Brain tumours	3	0.61 (0.13-1.78)	Tynes et al, 1992
Cohort	Norwegian female radio and telegraph operators	Radio and telegraph operators	Brain tumours	5	1.0 (0.3-2.3)	Tynes et al, 1996
Cohort	Polish military personnel aged 20-59 years	Occupational exposure to RF radiation	Tumours of the nervous system and brain	Not given	1.91 (1.08-3.47)	Szmigielski, 1996
Case-control	Male personnel in US Air Force	Potential exposure to RF radiation	Brain tumours	94	1.39 (1.01-1.90)	Grayson, 1996
Cohort	Female employees in an Italian plastics factory	Exposure to RF radiation through work in a dielectric heat sealing department	Death from brain cancer	1	10.0	Lagorio et al, 1997
Cohort	Men and women employed in the design, manufacture and testing of wireless devices	Work in occupations with moderate or high peak exposure to RF radiation	Deaths from cancers of the nervous system and brain	7	0.53 (0.21-1.09)	Morgan et al, 2000

*Confidence intervals, where shown, are as calculated by the authors

Tabell 2.8 Epidemiologiska studier av hjärncancer på människor delvis exponerade till radiofrekvent strålningar genom sina arbeten eller på fritiden (5.20 NRPB)

2.4.7 Epidemiologiska studier på människor boende nära radio- och tevestationer

2.4.7.1 Sammanfattning av Några studier

Många epidemiologiska studier har gjorts i bland annat USA, England och Australien för att ta reda på om utbredningen av cancer är större bland människor som bor i närheten av basstationer för mobiltelefoner.

- Selvin (år 1992) studerade området, i en radie av 3.5 km, kring basstationer i San Francisco i USA för att hitta ett eventuellt samband med ökad barnleukemi och lymfisk cancer. Han hittade inga ökning.
- Däremot hittade Maskarinec (år 1994) i en case-control studie i Hawaii en fördubbling av barnleukemi, i en radie av 4.2 km, runt en grupp radiomaster. Men antalet kontrollerade fall var små.
- Vidare undersökningar visade att det var kanske ren tur som var anledning till resultatet. Folk kan bli sjuka oftare i ett området, precis som om folk i ett annat område vinner oftare på lotteri.
- En annan studie i Sutton-Coldfield området i England visade en ökning av cancerutbredning runt basstationer. Relativa risken för cancer i urinblåsa var 1.5 jämfört med andra vanliga bostadsområden och resultatet var statistisk signifikant. Men vidare studerade man andra bostadsområden nära basstationer i England och fick inte samma resultat. Ökningen var bara 1.09 i relativ risk. Då drog forskarna slutsatsen att de höga siffrorna för relativa risken i Sutton Coldfield område kunde helt enkelt bero på slumpen. (NRPB 5.244)

2.4.7.2 Diskussion om brister i epidemiologiska studier nära kraftledningar och basstationer

Epidemiologiska studier om förekomst av cancer nära basstationer eller kraftledningar lider av viktiga brister:

- I vissa studier har avståndet till fältkällan, varit grunden för hur starkt fältet är. Man har alltså inte tagit hänsyn till reflektionerna från marken och hur området ser ut rent geografiskt.
- Studierna har endast tagit hänsyn till antalet cancerfall och exponeringsdata för hela populationen i ett visst område. Individens sysselsättningar borde spela en roll i undersökningarna. T ex om individerna var hemma hela tiden eller om de var ute och jobbade och i så fall, vad de jobbade med. Om de använde mobiltelefoner och i vilken utsträckning, framgår inte av studierna.
- Studierna har analyserat cancerrisken i samband med området man bodde i vid den tid cancer har upptäckts. Man borde dessutom kolla var patienterna hade bott, flera år innan, och vilka strålningsmängder de hade fått innan de flyttade till det aktuella området. Det är anledningen till att många forskare är skeptiska till resultat från sådana studier. (NRPB 5.247)

2.5 Gränsvärden för elektromagnetiska fält och rekommendationer

2.5.1 Gränsvärden i Sverige

Lågfrekventa fält

Byggnadsstyrelsen i Sverige rekommenderar att man ska eftersträva max $B = 0.2 \mu\text{T}$ för 50 Hz magnetiska fält där man vistas en längre tid.

Motsvarande maximum värde för elektriska fält är 10 V/m i frekvensområdet 5-2000 Hz, 0.8 meter över golvet på arbetsplatsen. Det finns misstankar om att de skadliga effekterna på levande celler kan förekomma om fältet blir större än dessa gränsvärden.

Högfrekventa fält

För högfrekventa fält är det mest termisk verkan man vill skydda sig mot. Denna nivå, för industri, ligger ungefär på 100 V/m respektive ca 1 μ T.

Gränsvärden för allmänhetens exponering i bostäder är 2-5 gånger lägre än de yrkesmässiga. Speciellt i platser som skolor och dagis ska värdena kontrolleras noga. Barn är nämligen mera känsliga mot strålningar. (A.L.I)

Gränsvärden räknat i SAR

För mätningar i laborationer är det vanligare med att uttrycka fältet i SAR-värde. Gränsvärdet blir SAR = 2 W/kg (enligt ICNIRP) som anses vara obetydlig för uppvärmning av kroppens vävnader.

2.5.2 Gränser för RF-fält enligt National Radiological Protection Board, England)

NRPB är det organ som bestämde gränsvärden för magnetiska och elektriska fält i Storbritanien 1993. Tabell 2.9 visar gränsvärden för elektriska fält E[V/m] och magnetiska fältstyrkan H[A/m] i olika frekvensområde. (6.23 NRPB)

Frequency (MHz)	Electric field strength (V/m)	Magnetic field strength (A/m)	Power density (W/m ²)
400 – 800	100	0.26	26
800 – 1550	125 <i>f</i>	0.33 <i>f</i>	41 <i>f</i> ²
1550 – 3000	194	0.52	100

Tabell 2.9 Gränsvärden i SAR , observera att *f* är frekvens i GHz. För att räkna B i Tesla kan vi multiplicera H med $\mu = 4\pi * 10^{-7}$ (NRPB)

International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP) införde strängare gränsvärden år 1998. Deras utgångspunkt var att ändringar i beteende hos djur, när de blev exponerade, började redan vid 1°C ökning av kroppstemperaturen. För en sådan temperaturökning, enligt ICNIRP, krävs ett SAR-värde = 1-4 W/ kg eller högre för att orsaka dessa förändringar. (4 W/kg under normala förhållanden och 1 W under ofördelaktiga förhållanden som hög temperatur, låg luftfuktighet och / eller dålig luftkonditionering).

Frequency (MHz)	Electric field strength (V/m)	Magnetic field strength (A/m)	Power density (W/m ²)
400 – 800	100	0.26	26
800 – 1550	125 <i>f</i>	0.33 <i>f</i>	41 <i>f</i> ²
1550 – 3000	194	0.52	100

f is the frequency in GHz.

Tabell 2.10 Gränsvärden elektriska och magnetiska fält enligt ICNIRP, *f* är frekvensen i GHz

Ex för frekvensen 900 MHz blir gränsvärden enligt ICNIRP för elektriska fältet:
 $E = 125 f = 125 \cdot 0.9 = 1.125 \text{ V/m}$ och gränsvärde för magnetiska fält blir:
 $H = 0.33 f = 0.33 \cdot 0.9 = 0.297 \text{ A/m}$ som ger $B = 0.297 \cdot 2\pi \cdot 0.2 = 0.373 \text{ } \mu\text{T}$.

2.5.3 Rekommendationer

NRPB rekommenderar att de nya gränsvärdena enligt ICNIRP (alltså strängare gränsvärden) ska gälla i Storbritanien.

- När det gäller platser där barn vistas en längre tid som skolor eller dagis, ska man använda lägre gränsvärden än de som gäller för vuxna. Barn absorberar nämligen mer energi från externa elektromagnetiska fält per kroppsvikt jämfört med vuxna. Det finns bevis som visar att ett ettårigt barn absorberar dubbel så mycket och ett femårigt barn ca 60% mer elektromagnetiska energi än vuxna människor.

Med tanke på den oro som finns bland folk som bor eller jobbar i närheten av antennmaster eller kraftledningar, det rekommenderas att vid planering av tele basstationer eller kraftledningar samt transformatorstationer ska stillräckligt med avstånd finnas så att fältet hålls under rekommenderade gränsvärden. När det gäller antennmaster, kan samarbete mellan teleoperatörer göra att mindre antal master behöver installeras.

Kapitel 3: Projekt ombyggnad av Centralstation

3.1 Inledning

Inför ombyggnad av Centralstationen i Malmö ställs vissa frågor angående magnetiska fält runt transformatorer, ledningar och strömskenor, ifall de orsakar för höga magnetiska fält i centralhallen där folk vistas.

I dagsläget finns inga fastställda gränsvärden vad det avser de biologiska effekterna på människor. Det finns endast rekommendationer som i dagligt tal kallas för försiktighetsprincipen. Det innebär att om åtgärder som generellt minskar exponeringen kan utföras till rimliga kostnader och konsekvenser i övrigt, bör man sträva efter att reducera fält som avviker starkt från vad som kan anses normalt i den aktuella miljön.

I samband med nybyggnationer innebär detta att man bör sträva efter att välja, utforma och placera utrustningen så att exponeringen för magnetfält begränsas.

Enligt försiktighetsprincipen ska folk inte utsättas för större dygnsmedelvärde magnetfält än $0.2 \mu\text{T}$. Det kan praktiskt innebära att, ytor med högre magnetfält, disponeras så att folk bara vistas där under kort tid. Ytorna kan utgöras t ex av kapprum, toaletter, korridorer, cykelställ, uppställningsplatser för varuvagnar och liknande.

Med enkla beräkningar ska magnetfältet i centralstation uppskattas och se om gällande rekommendationerna är uppfyllda.

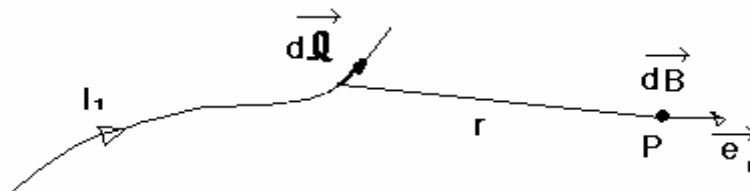
Viktigt att ha i minnet är att elmiljö och EMC inte är något som kan lösas med en kokbokrecept. Varje problem har en unik lösning varför bara metodiken och tänkbara åtgärder redovisas här. Även rekommendationer från Kapitel 1 och 2 kan vara användbara i detta projekt.

3.2 Teorigenomgång

3.2.1 Magnetfält från en rak ledare (härledning)

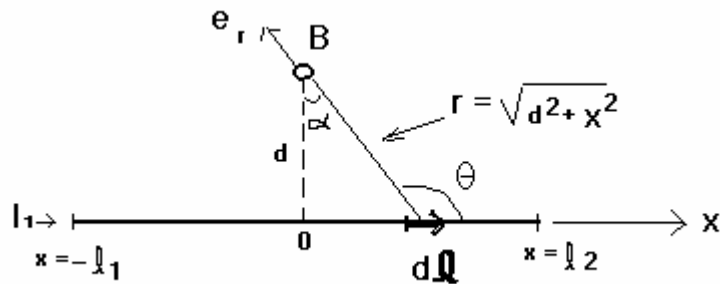
Enligt Biosavars lag kan magnetfältet i vakuum från en godtycklig strömbana enligt **Figur 3-1** skrivas som:

$$B_p = \int_{L_1} (\mu_0 I_1 / 4\pi)(d\ell \times \mathbf{e}_r / r^2) \quad (3-1)$$



Figur 3-1 Magnetfält från en godtycklig strömbana

Där B är magnetiska flödestätheten i punkten P orsakad av strömmen I_1 . ℓ och \mathbf{e}_r är vektorer och \times innebär kryssprodukt, mellan vektorerna. För att beräkna fältet från en rak ledare med längden $\ell_1 + \ell_2$ (Se **Figur 3-2**) kan **Ekvation 3-1** användas:



Figur 3-2

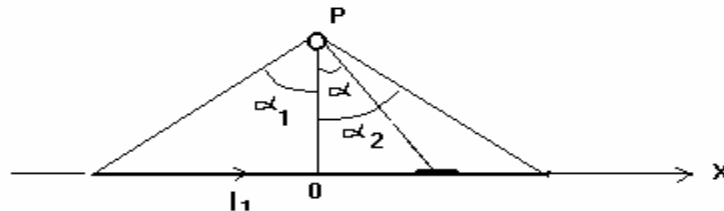
$$\sin \theta = d / r$$

$$|dB| = (\mu_0 I_1 / 4\pi) * (d / r^3) dx$$

$$= (\mu_0 I_1 / 4\pi) * (d / (d^2 + x^2)^{3/2}) dx$$

$$B = \int_{-l_1}^{l_2} dB = \int_{-l_1}^{l_2} (\mu_0 I_1 / 4\pi) * (d / (d^2 + x^2)^{3/2}) dx$$

och efter variabelbyte enligt **Figur 3-3** =>



Figur 3-3

$$dB = (\mu_0 I_1 / 4\pi) * (d / (d / \cos \alpha)^3) * d * (1 / \cos^2 \alpha) d\alpha$$

$$= (\mu_0 I_1 / 4\pi) * (\cos \alpha / d) d\alpha \Rightarrow \dots \Rightarrow$$

$$B_p = (\mu_0 I_1 / 4 \pi d) (\sin \alpha_2 + \sin \alpha_1) \quad (3-2)$$

Ekvation 3-2 kan användas för att beräkna magnetfältet runt en ledare av godtycklig längd. Men när ledaren är oändlig lång eller avståndet $d \ll$ längden av banan, då blir $\alpha_1 \approx \alpha_2 \approx 90^\circ$. Eftersom $\sin \alpha_1 = \sin \alpha_2 = 1$, förenklas ekvation 3-2 till ekvation 3-3 nedan:

$$B_p = \mu_0 I_1 / 2 \pi d \quad (3-3)$$

Det viktiga sambandet mellan fält från lång ledare och kort ledare blir då ekvation 3-4:

$$B_{p\text{-kort}} = B_{p\text{-lång}} (\sin \alpha_2 + \sin \alpha_1) / 2 \quad (3-4)$$

3.2.2 Härledning av magnetfält runt trefasiga strömskenor

Ekvationerna 3-2, 3-3, 3-4 kan användas för beräkning av magnetfält runt en strömförande skena. För att härleda en formel för trefassystem ska man komma ihåg att det finns 120° fasskillnad mellan de tre fasströmmarna.

- För att förenkla det hela, antas systemet vara i balans d v s strömmen i neutralledaren antas vara noll.

Se Figur 3-4. Tre parallella skenor ligger i ett horisontellt plan. Högerhand regeln ger att B-fält från skenorna ligger i ett och samma plan, vertikalt mot skenorna. 120° fasskillnad mellan de tre fasströmmarna gör att, B-fält från tre faser, har också 120° fasskillnad.

$$|B_{L1}| = (\mu_0 * |I_{L1}|) / (2\pi (r + d)) \quad (3-5)$$

$$|B_{L2}| = (\mu_0 * |I_{L2}|) / (2\pi r) \quad (3-6)$$

$$|B_{L3}| = (\mu_0 * |I_{L3}|) / (2\pi (r - d)) \quad (3-7)$$

$$|B_{x-led}| = (|B_{L1}|) - (|B_{L2}| * \sin 30^\circ) - (|B_{L3}| * \sin 30^\circ) = |B_{L1}| - \frac{1}{2} |B_{L2}| - \frac{1}{2} |B_{L3}| \quad (3-8)$$

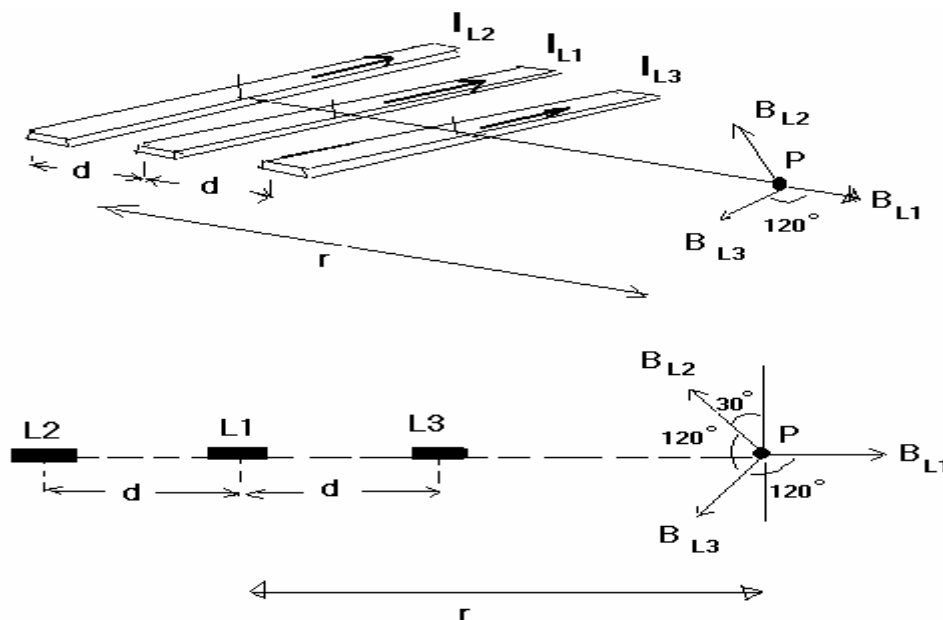
$$|B_{y-led}| = |B_{L2}| * \cos 30^\circ - |B_{L3}| * \cos 30^\circ = \sqrt{\frac{3}{2}} |B_{L2}| - \sqrt{\frac{3}{2}} |B_{L3}| \quad (3-9)$$

Magnetfält i punkten P, blir då vektorsumman av komponenterna i x-led och y-led enligt Pitagoras sats.

$$B_{P-läng} = \sqrt{B_{x-led}^2 + B_{y-led}^2} \quad (3-10)$$

och om termen $\mu_0 / 2\pi$ bryts ut :

$$B_{P-läng} = \frac{\mu_0}{2\pi} \sqrt{\left(\frac{I}{r}\right)_{x-led}^2 + \left(\frac{I}{r}\right)_{y-led}^2} \quad (3-11)$$



Figur 3-4 Magnetfält från trefasskenor

Observera att :

- Det förutsätts att systemet är i balans så $|I_{L1}| = |I_{L2}| = |I_{L3}|$. Ekvationerna 3-5, 3-6, 3-7 visar att den enda faktorn som gör att $|B_{L1}|$ och $|B_{L2}|$ och $|B_{L3}|$ får olika värde är storleken på avståndet d , mellan faserna.

- Om $d = 0$ (vilket är praktiskt omöjligt) $\Rightarrow |B_{L1}| = |B_{L2}| = |B_{L3}|$ och från ekvationer 3-8 och 3-9 $\Rightarrow |B_{x\text{-led}}| = |B_{y\text{-led}}| = 0$ och slutligen $B_p = 0$.
- Beräkningar i ekvationerna 3-5 till 3-11 förutsätter att skenorna är oändlig långa (eller avstånd \ll längden av strömbanan).
- **Fält från korta trefasskenor**, kan approximativt beräknas liknande ekvation 3-4, om α_1 och α_2 antas vara samma för alla tre faser. (Anledningen är att termen $(\sin \alpha_2 + \sin \alpha_1) / 2$, multipliceras till alla termer i ekvationerna 3-5 till 3-9 och sedan kan brytas ut i ekvation 3-11.)

$$(B_{p\text{-kort}})_{3\text{-fas}} = (B_{p\text{-lång}})_{3\text{-fas}} * (\sin \alpha_2 + \sin \alpha_1) / 2 \quad (3-12)$$

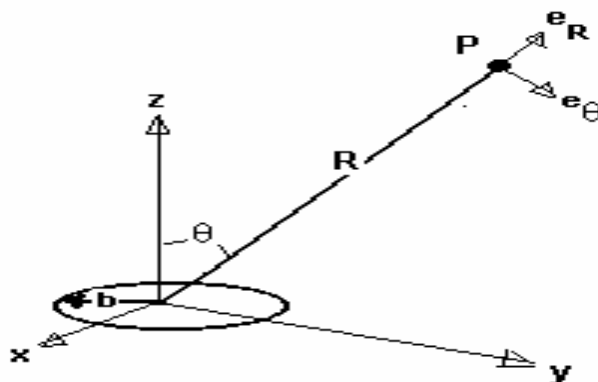
Ekvation 3-12 är viktig och kommer att användas senare i fältberäkningar för skenor.

3.2.3 Magnetfält från en transformator

En transformator är gjord av många strömslingor därför kan fält från transformatorer ”approximativt” liknas strömförande slingor. Se **Figur 3-5**. För beräkning av magnetfält från en strömslinga blir enligt ekvation 3-13 om R (avståndet till punkten P), är mycket större än slingans radie b .

$$B = ((\mu_0 I b^2) / 4 \pi R^3) * (2 \cos\theta \mathbf{e}_R + \sin\theta \mathbf{e}_\theta) \quad \text{om } R \gg b \quad (3-13)$$

I är strömmen i slingan och \mathbf{e}_R och \mathbf{e}_θ är enhetsvektorer i de sfäriska koordinater. (För härledning av formeln se: Field and wave electromagnetics David K.Cheng, kapitel 6:)



Figur 3-5 Fält från en magnetisk slinga

Formel 3-13 visar att B -fältet minskar proportionellt med kuben av avstånd till slingan om $R \gg b$. Experiment visar att exponenten 3 ska minskas för kortare avstånd än 10 meter till en transformator.

3.3 Åtgärder för fältreduktion

3.3.1 Strömmen

Teori delen visade att reduktion av strömmen resulterar i reduktion av magnetfältet d v s mindre strömförbrukning ger mindre magnetfält. Dessutom varierar strömmen kraftigt under dygnets olika tider.

Vid fältberäkningar i projekt ombyggnad av Centralstation, används den maximala värdet för strömförbrukningen under dygnet (enligt Tabell 3-2). Eftersom strömstyrkan på lågspänningssidan av den aktuella transformatorn under centralhallen är cirka 25 gånger mer än högspänningssidan (11/ 0.4 kV) kan fältberäkningar koncentreras helt och hållet på lågspänningssidan.

3.3.2 Avstånd till transformatorstationen

En mycket effektiv åtgärd för att minska magnetfältet, där folk arbetar eller bor, är att placera transformatorstationen så långt bort som möjligt redan vid planeringsstadiet av ett projekt. Att flytta en färdigbyggd station eller bygga en ny station är naturligtvis en kostsam åtgärd. (ca 500000 kronor 1990, Fransson & Hamnerius).

I projekt Centralstation, är det planerat att transformatorstationen ska ligga under centralhallen i teknikutrymmen.

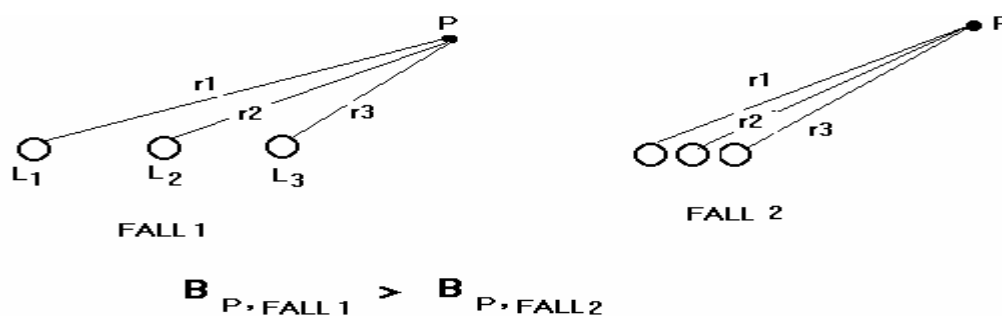
3.3.3 Avstånd till skenförband och kabelförband

Ökade avstånd till fältkällan ger mindre magnetfält enligt teori delen därför skenförband och kabelförband i transformatorstationen ska placeras så lågt som möjligt i teknikutrymmet. Skenförband alstrar stora magnetfält på de stora strömmarna på lågspänningssidan och det oundvikliga avståndet mellan faserna.

Det finns isolerat skenförband som kan förläggas under golvytan i transformatorstationen. På det sättet ökar avståndet till ovanvåningen och fältet minskar men inte så drastiskt. se beräkningarna i Avsnitt 3-7.

3.3.4 Avståndsskillnad mellan fältpunkter och de tre faserna

Med rätt placering av de tre faserna i ett trefassystem, kan magnetiska fält reduceras avsevärt. Se Figur 3-6. Avståndsskillnaden från punkt P till faserna L_1 , L_2 , L_3 d v s skillnaden mellan r_1 , r_2 och r_3) är större i fall 1 och därmed blir fältet i punkten P större i fall 1. Se Avsnitt 3.2.2



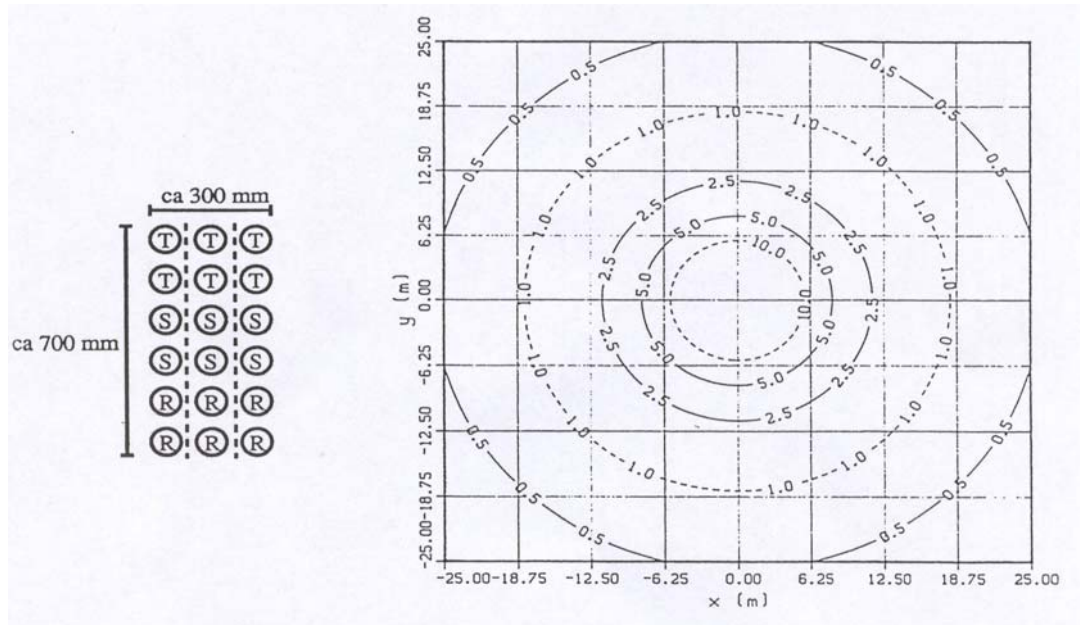
Figur 3-6

Vikten av fasernas rätta placering

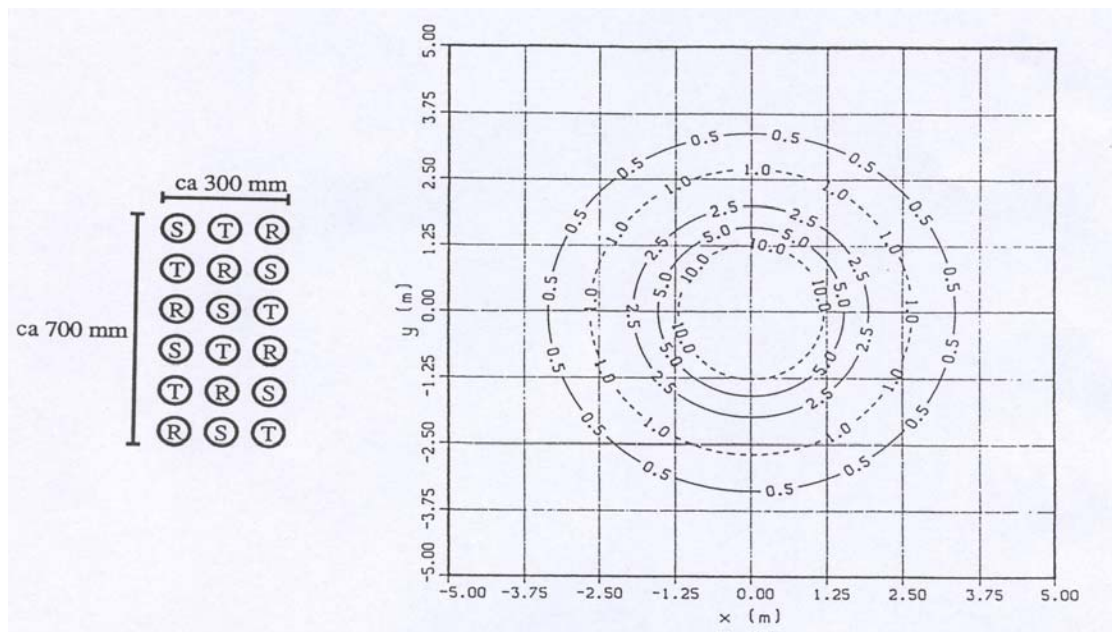
Mätningar och datasimuleringar av fält runt ett kabelförband som gjordes av Fransson & Hamnerius vid Chalmers Universitet, visar vikten av placering av faserna. Se Figur 3-7. Observera att kablarna är vinkelräta mot mitten på bilden.

På grund av den stora strömförbrukningen har varje fas (R, S, T) delats på 6 kablar. Med placering enligt Figur 3-7, på 6 m avstånd t ex, finns det B-fält upp till $10\mu T$.

Med ändrad fasföljd enligt **Figur 3-8** minskas fältet runt kablarna avsevärt. Orsaken är att medelpunkten för varje fas flyttas närmare varandra och ger mindre avståndsskillnad mellan fältpunkter och de tre faserna (d i ekvation 3-5 till 3-7 minskar). Observera att om kablarna ligger nära varandra, minskar magnetfält, men då blir kylningen sämre och grövre dimensionering krävs. Strömkorrigerings ska utföras enligt starkströmsföreskrifterna.



Figur 3-7 Resultat av beräkning av flödestätheten (μT) kring kabelförband innan ändra fasföljd. Samtliga ledare har fasströmmen 760 A. (Fransson & Hamnerius-Chalmers Universitet)

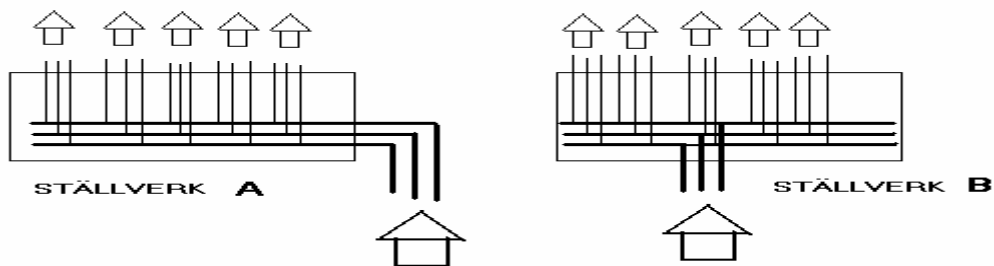


Figur 3-8 Resultat av beräkning av flödestätheten (μT) efter ändrad fasföljd på ledarna. Samtliga ledare har fasströmmen 760A. (Fransson & Hamnerius-Chalmers Universitet)

3.3.5 Längden av strömbanan

Det påpekades innan att fältet runt en lång och rak ledare avtar långsammare än en kortare ledare (Se **Ekvation 3-12**). Det innebär att ur magnetfältssynpunkt ska skenförband mellan transformatorn och ställverket och skenor inne i ställverket vara så korta som möjligt.

- Det finns kompakta transformatorstationer d v s transformator, lågspänning- och högspänningsställverk i samma paket. Kompakta stationer strålar mindre magnetfält och kan tänkas som alternativ. Prisskillnaden är inte så stor.
- Även vissa enkla designändringar kan minska fältet. Se **Figur 3-9**. Istället för att mata ställverket från sidan (ställverk A i figuren) kan matningen göras på mitten (ställverk B). På detta sätt minskas den totala längden på strömbanorna och därmed minskas magnetfältet.



Figur 3-9 Magnetfältet från ställverk A blir starkare än ställverk B

3.3.6 Rätt materialval

Ett sätt att minska magnetiska fält är att vid planering använda sig av material som avger mindre fält.

Ett exempel på detta är moderna lysrör med högfrekvent don (HF-don). De använder frekvensbandet 12-400 kHz och har lågt flimmer och magnetiska fält. Men elektriska fältet är lite högre kan enkelt skärmas. De har filter som hindrar att störningarna matas tillbaka till nätet. (Fagerhult katalog 1999 sida 376)

3.3.7 Skärmning av magnetiska och elektriska fält

Ett sätt att reducera magnetiska eller elektriska fält är skärmningen av fältkällan. Följande avsnitt är en genomgång av skärmningens teori. Observera att:

- I Kapitel 1, användes kretsteori för analysen av jordning av tunna skärmar utan att ta hänsyn till skärmens material och tjocklek. För att kunna se effekten av skärmens avstånd till källan, dess tjocklek och material, används fältteori i detta avsnitt.
- Detta avsnitt tar upp även elektriska fält för att ge en bättre översikt om skärmningens teori.

3.4 Skärmningens teori

I detta avsnitt presenteras en kortfattad version av skärmningens teori. För mera fördjupning se t ex Störningsfri Elektronik, Sten Benda eller Noise Reduction Techniques In Electronic Systems, Henry W.Ott.

3.4.1 Viktiga konstanter och ordförklaringar

- Permeabilitet i vakuum: $\mu_0 = 4\pi * 10^{-7} \text{ H/m}$
- Dielektrisk konstant i vakuum: $\epsilon_0 = 8.85 * 10^{-12} \text{ F/m}$
- Konduktivitet för koppar: $\sigma_0 = 5.82 * 10^7 \text{ 1/\Omega m}$

Andra materials permeabilitet, dielektrisk konstant och konduktivitet kan uttryckas relativt dessa värden. Alltså $\mu = \mu_0 \mu_r$ och $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$ och $\sigma = \sigma_0 \sigma_r$. **Se Tabell 3-1.**

Material	Relative conductivity σ_r	Relative permeability μ_r
Silver	1.05	1
Copper—annealed	1.00	1
Gold	0.7	1
Chromium	0.664	1
Aluminum (soft)	0.61	1
Aluminum (tempered)	0.4	1
Zinc	0.32	1
Beryllium	0.28	1
Brass	0.26	1
Cadmium	0.23	1
Nickel	0.20	100
Bronze	0.18	1
Platinum	0.18	1
Tin	0.15	1
Steel (SAE 1045)	0.10	1000
Lead	0.08	1
Monel	0.04	1
Conetic (1 kHz)	0.03	25,000
Mumetal (1 kHz)	0.03	20,000
Stainless steel (430)	0.02	500

Tabell 3-1 Relativa konduktivitet och permeabilitet för olika material.

Skärm: En metallisk vägg mellan två olika område för att förhindra spridningen av magnetiska och elektriska fält från ett område till det andra.

Närfält och fjärrfält: Karakteristiken av fält i en punkt kan bestämmas av fältets källa, media som omger fältkällan och avstånd mellan källan och fältpunkten.

- I en punkt nära fältkällan (närfält området) beror fältkaraktären mest på källans karaktär.
- Långt ifrån källan (fjärrfält område) beror fältets karaktär i en fältpunkt, mest på det medium i vilket fält sprider sig.

- Avstånd från källan som är större än $\lambda / 2\pi$ (λ är våglängden) räknas som fjärrfält och avstånd som är mindre är närfält.

För fält med frekvens $f = 50 \text{ Hz}$ blir $\lambda = v / f = 3 * 10^8 / 50 = 6 * 10^6 \text{ m}$ så för lågfrekventa fält kan alltid närfält antas. (v är ljusets hastighet i m/s).

Vågens impedans: Förhållandet E / H mellan E (elektriskt) och H (magnetiskt) fält, kallas för vågens impedans.

Karakteristiska impedans: Karakteristiska impedansen av ett medium definieras enligt sambandet nedan:

$$Z_0 = \sqrt{j\omega\mu / (\sigma + j\omega\epsilon)} \quad (3-14)$$

För vakuum blir $Z_0 = 377 \Omega$.

För elektriskt ledande material $\sigma \gg j\omega\epsilon$ och **ekvation 3-14** förenklas till:

$$|Z_0| = \sqrt{\omega\mu / \sigma} \quad (3-15)$$

och efter insättning av konstanterna i ekvation 3-15, kan för elektrisk ledande material skrivas:

$$|Z_0| = 3.68 * 10^{-7} * \sqrt{\frac{\mu_r}{\sigma_r}} \sqrt{f} \quad (3-16)$$

För ledande material, kallas Z_0 även skärmens impedans. Observera att f är frekvensen i Hz, μ_r är relativa permeabiliteten och σ_r är relativa konduktiviteten för skärm materialet.

Skärmens effektivitet S: Reducering av fält när det passerar en skärm kallas för skärmens effektivitet och brukar uttryckas i dB. För magnetiska fält skärmens effektivitet definieras som:

$$S = 20 \log H_0 / H_1 \quad [\text{dB}] \quad (3-17)$$

H_0 är det infallande fältet och H_1 är fält som passerar skärmen. och motsvarande formel för elektriska fältet blir :

$$S = 20 \log E_0 / E_1 \quad [\text{dB}] \quad (3-18)$$

Här antas en platt skärm med fält som faller rätvinkligt mot skärmen.

Reducering av fält mot en metallisk skärm beror på två olika mekanismer:

- Absorption
- Reflektion

Den totala effektiviteten av skärmen kan skrivas då som summan av reducereing p g a reflektion R , absorption A och en korrektionsfaktor B för multipel reflektion i tunna skärmar.

$$S = A + R + B \quad [\text{dB}] \quad (3-19)$$

- Alla termer i ekvation 3-19 ska uttryckas i dB.

- Termen B i ekvation 3-19 kan försummas när A är större än 9 dB.

- I praktiken kan B även försummas för elektriska fält.

3.4.2 Skärmningseffekt p g a absorption, A

När elektromagnetiska fält passerar en skärm kommer fältet att avta exponentiellt. Det här grundar sig i att fältet inducerar strömmar i skärmen som orsakar värme och förluster.

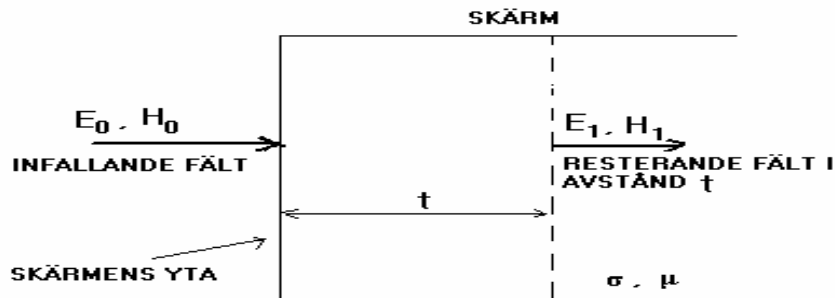
Det går att skriva för elektriska fält:

$$E_1 = E_0 e^{-t/\delta} \quad (3-20)$$

och för magnetiska fält:

$$H_1 = H_0 e^{-t/\delta} \quad (3-21)$$

E_1 och H_1 är fältets styrka inne i skärmen med ett avstånd, t från skärmens yta. Se **Figur 3-10**



Figur 3-10

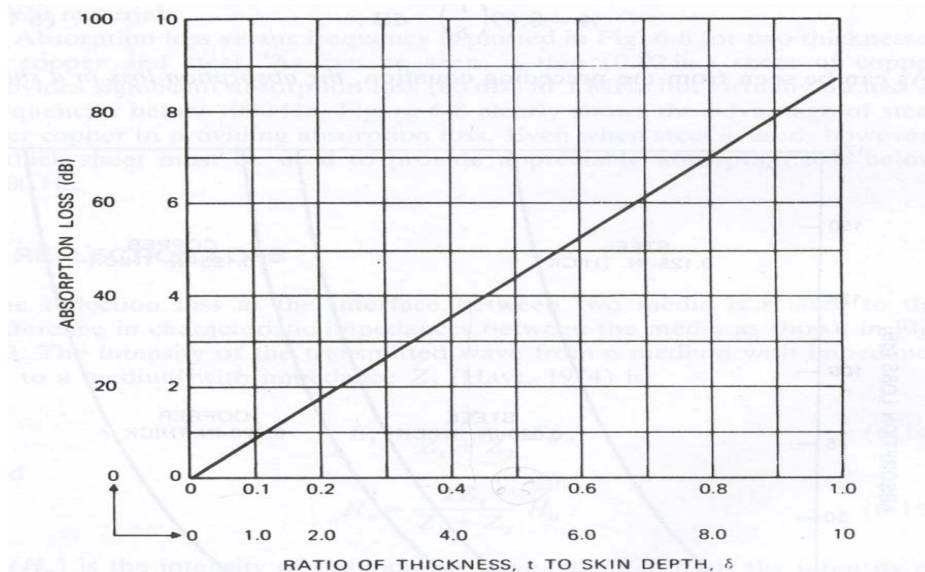
Inträngnings djup

Det avstånd som behövs för att fältet ska reduceras till $0.37 = 1/e$ av dess ursprungliga värde kallas för inträngningsdjup δ och kan skrivas som:

$$\delta = \sqrt{2/\omega\mu\sigma} \quad (3-22)$$

δ uttrycks i [meter], ω är fältets vinkelfrekvens ($\omega = 2\pi f$), μ är skärmens permeabilitet ($\mu = \mu_0 \mu_r$) och σ är skärmens konduktivitet ($\sigma = \sigma_0 \sigma_r$).

Inträngningsdjup δ är en viktig faktor vid skärmning. Fältabsorption hos en skärm är direkt proportionell mot skärmens tjocklek, t , och omvänt proportionell mot δ . Om t / δ är känd kan skärmens absorption avläses direkt från **Figur 3-11** (NRT: Henry W. Ott)



Figur 3-11 Avläsning av absorption A , om t / δ är känd. (NRT: Henry W. Ott)

För att beräkna skärmens absorption kan även ekvation 3-23 användas:

$$A = 0.085 * t * \sqrt{(f * \mu_r * \sigma_r)} \quad (3-23)$$

Numeriskt exempel 1

För en skärm av aluminium i frekvensen 50 Hz, ska inträngningsdjup, δ , beräknas.

Lösning: Ekvation 3-22 används. Insättning av $\mu_r = 1$ och $\sigma_r = 0.61$ (från **Tabell 3-1**) ger:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{(2\pi \cdot 50 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 1 \cdot 0.61 \cdot 5.7 \cdot 10^7)}} = 0.01207 \text{ m} = 12.07 \text{ mm}$$

Fältreduktion p g a absorption (A i ekvation 3-19) för en aluminiumskärm som är ca 5 mm tjock kan avläsas direkt från diagrammen i **Figur 3-11**:

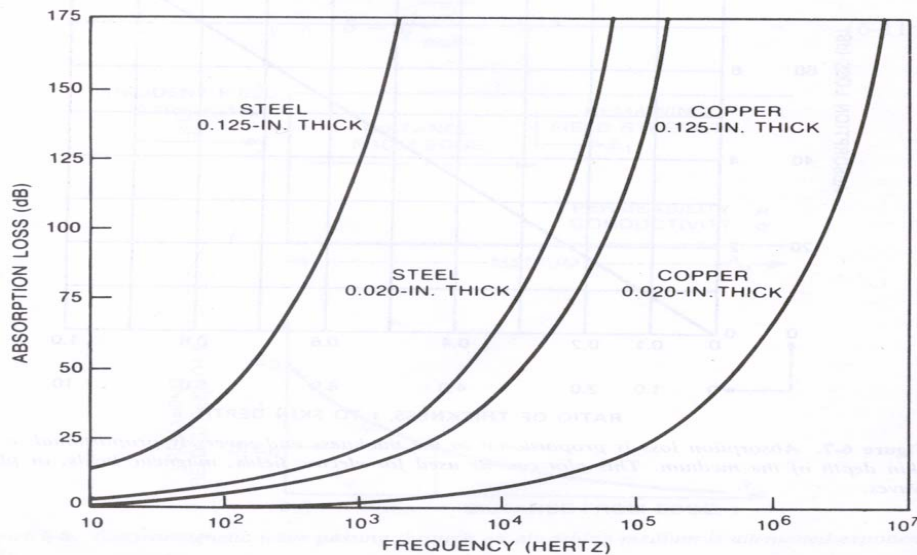
$$t / \delta = 5 / 12 = 0.42 \Rightarrow A = 4 \text{ dB}$$

Absorption uttryckt i gånger, blir för magnetiska fält:

$$A = 20 \log H_0 / H_1 = 4 \text{ dB} \Rightarrow H_1 = 1.58 * H_0$$

och på samma sätt för elektriska fältet: $E_0 = 1.58 * E_1$.

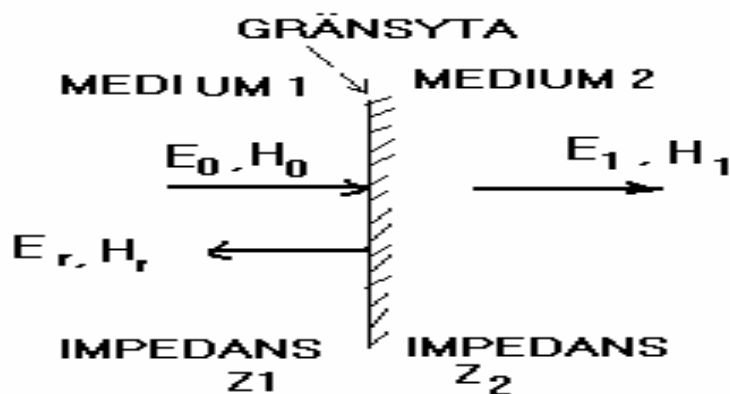
Figur 3-12 nedan visar jämförelse mellan järn och koppar i olika tjocklekar (i tum) och frekvenser.



Figur 3-12 Skärmens absorption blir mer med ökad frekvens och ökad tjocklek. Järn absorberar bättre än koppar med samma tjocklek. (NRT: Henry W. Ott)

3.4.3 Skärmningseffekt p g a reflektion, R

Ett elektriskt fält E_0 eller magnetiskt fält H_0 sprider sig i ett medium med impedansen Z_1 och faller mot gränssytan av en skärm som har impedansen Z_2 . En del av infallande fältet reflekteras mot gränssytan (E_r , H_r) och resterande fält passerar genom (E_1 och H_1). Se **Figur 3-13**.



Figur 3-13 Reflektion av elektriska och magnetiska fält mot en gränsyta

Det elektriska fältet som passerar gränsytan E_1 , kan skrivas enligt:

$$E_1 = ((2Z_2) / (Z_1 + Z_2)) E_0 \quad (3-24)$$

och magnetiska fält som passerar H_1 blir:

$$H_1 = ((2Z_1) / (Z_1 + Z_2)) H_0 \quad (3-25)$$

- Om fältet går från ett medium som luft (med stor impedans Z_1) till ett medium som metall (med liten impedans Z_2), visar **ekvation 3-24** att om $Z_1 \gg Z_2 \Rightarrow 2Z_2 \ll Z_1 + Z_2 \Rightarrow \underline{E_1 \ll E_0}$

Med andra ord: elektriska fält E_1 som passerar gränsytan, är mycket mindre än infallande fältet, en stor del av elektriska fältet reflekteras redan vid gränsytan 1 (se **Figur 3-14** nedan).

- Det här är anledningen att vid skärmning av elektriska fält är tjockleken på skärmen inte så viktig eftersom reflektion mot ytan är största orsaken till skärmningseffektiviteten för elektriska fält.

För magnetiska fält är situationen annorlunda. Se **ekvation 3-25**. Medium 1 är fortfarande luft och medium 2 är metall, det innebär att $Z_1 \gg Z_2 \Rightarrow 2Z_1 \approx 2(Z_1 + Z_2) \Rightarrow H_1 \approx 2H_0$

- Det vill säga magnetfältet som passerar gränsyta 1 och går in i skärmen blir nästan dubbel så stor som den infallande fältet. Alltså fältet blir starkare inne i skärmen. För magnetiska fält görs reflektion på gränsyta 2 (se **Figur 3-14**), när fält går från metall till luft.

Reflektion av elektriska fält mot metalliska skärm

För att beräkna reflektionen av elektriska fält R_e mot en skärm som ligger r meter längre bort, kan följande ekvation användas:

$$R_e = 322 + 10 \log (\sigma_r / (\mu_r * f^3 * r^2)) \quad [\text{dB}] \quad (3-26)$$

σ_r och μ_r är materialkonstant för skärmen och f är frekvensen. Observera att om frekvensen eller avstånd ökar blir R_e mindre.

Reflektion av magnetiska fält mot metalliska skärm

Motsvarande relation för magnetiska fält är:

$$R_m = 14.6 + 10 \log ((f * r^2 * \sigma_r) / \mu_r) \quad [\text{dB}] \quad (3-27)$$

Observera att R_m ökar om frekvens eller avstånd ökar.

Numeriskt exempel 2:

En aluminium skärm ligger 3m ifrån fältkällan. Tjockleken på skärmen är 5 mm. Fältet antas falla rätvinkligt mot skärmen. Beräkna reduktionen av elektriska och magnetiska fälten som orsakas av reflektion mot aluminium skärmen.

Lösning: För aluminium är $\mu_r = 1$, $\sigma_r = 0.61$ (från **Tabell 3-1**), $f = 50$ Hz och $r = 3$ m insättning i ekvation 3-26 ger :

$$R_e = 322 + 10 \log (0.61 / (1 * 50^3 * 3^2)) \approx 259 \text{ [dB]}$$

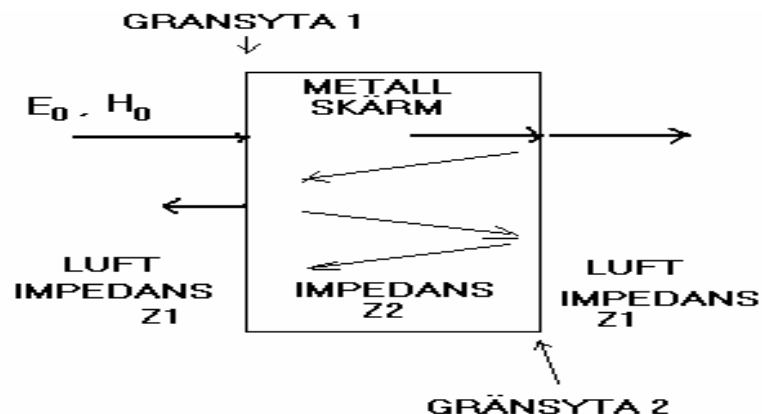
och för magnetiska fält:

$$R_m = 14.6 + 10 \log ((50 * 3^2 * 0.61) / 1) \approx 39 \text{ [dB]}.$$

Observera att om magnetisk material, t ex stål i Tabell 3-1 användas som skärm i exemplet, ($\sigma_r = 0.1$ och $\mu_r = 1000$) blir reflektionen bara $R_m = 14.6 - 13.5 = 1.1$ [dB]

3.4.4 Multipel reflektion i skärmen, B

Fält kan reflekteras fram och tillbaka mellan gränssyta 1 och 2 (se **Figur 3-14**) i tunna skärmar.
 - I tjocka skärmar kan multipel reflektion försummas eftersom absorptionen är stor.
 - Multipel reflektionen kan även försummas för elektriska fält (enligt **Avsnitt 3.4.3** ovan) eftersom reflektionen är stor redan vid gränssyta 1. ($Z_1 \gg Z_2$)



Figur 3-14 Multipel reflektion

- För magnetiska fält kan multipel reduktion inte försummas. Korrektionsfaktor B, för tunna skärmar kan skrivas som:

$$B = 20 \log (1 - e^{-2t/\delta}) \quad [\text{dB}] \quad (3-28)$$

Där t är tjockleken av skärmen och δ är inträngningsdjupet. Observera att B är alltid negativ.

Numeriskt exempel 3

Vad blir skärmningseffekt p g a multipel reflektion B för en aluminiumskärm med tjocklek $t = 5\text{ mm}$ i frekvensen 50 Hz ?

Lösning: Inträngningsdjupet räknades innan $\delta \approx 12\text{ mm}$. B blir då från ekvation 3-28:

$$B = 20 \log (1 - e^{-2 * 0.005 / 0.012}) = -4.9 \text{ [dB]}$$

3.4.5 Sammanfattning och slutsatser

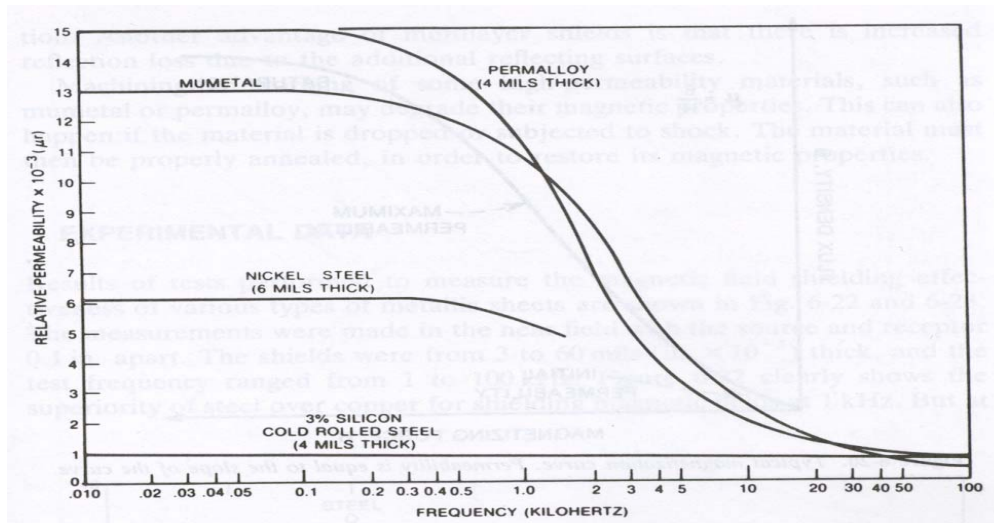
Skärmning med magnetiska material

Användning av magnetiska material vid skärmning innebär att permeabiliteten μ ökar och konduktiviteten σ minskar men för de flesta magnetiska material är ökningen av μ större än minskningen av σ .

- För skärm med magnetiska material ökar absorptionen (**ekvation 3-23**), däremot minskar reflektionen (se ekvationer 3-26, 3-27).
- För lågfrekventa magnetiska fält är skärmens reflektion liten (ekvation 3-27) och viktigaste mekanismen vid skärmning är absorption. Därför är det fördelaktigt att använda magnetiska material vid skärmningen.
- För lågfrekventa elektriska fält är det reflektion som är huvudmekanismen. Användning av magnetiska material inte är fördelaktig, eftersom reflektionen minskar

Relativa permeabilitet μ_r

Relativa permeabilitet μ_r är inte konstant och minskar med frekvens. **Figuren 3-15** visar frekvensberoendet av permeabilitet för tre olika magnetiska material.



Figur 3-15 Variationer av permeabilitet i olika frekvenser (NRT: Henry W. Ott)

- **Beräkning av skärmningseffektivitet för elektriska fält**

Skärmnings effektivitet för elektriska fält kan skrivas $S = A + R$ [dB] (Alltså B i ekvation 3.19 kan försummas). A beräkna från ekvation 3-23 och R från ekvation 3-26.

- **Beräkning av skärmningseffektivitet för magnetiska fält**

Skärmnings effektivitet för magnetiska fält är $S = A + R + B$ [dB]. Om $A \geq 9\text{ dB}$ kan termen B försummas annars ska B tas med i beräkningarna. A beräknas från ekvation 3-23 och R från ekvation 3-27. Om $A < 9\text{ dB}$ ska B beräknas från ekvation 3-28.

Numeriskt exempel 4

Vad är den totala skärmningseffektiviteten för en aluminiumskärm, vid 50 Hz magnetiskt fält på 3m avstånd.

Lösning:

$$S \approx 4 + 39 - 4.9 = 38.1 \text{ [dB]}$$

$$S = 20 \log H_0 / H_1 = 38.1 \Rightarrow \underline{S \approx 80 \text{ gånger}}$$

3.4.6 Läckage vid skärmning

I praktiken, vid skärmning av en transformatorstation t ex, kan skärmningen inte vara heltäckande. Det finns alltså luftgap som dörrar, hål för ventilation i väggar och andra mekaniska delar som är monterade på väggar och tak. Allt det här gör att en hel del av skärmningens effektivitet går förlorad. ($S \ll 80$ dB i exempel 4 ovan!)

Observera att:

- Läckage problem är värre när det gäller magnetiska skärmningen jämfört med elektriska.
- Magnetfältets läckage beror på :
 - 1) Maximala linjära dimensionen av öppningen (inte aren utan diametern). Flera små hål i skärmen ger betydligt mindre läckage än ett stort hål med samma area.
 - 2) Frekvens
 - 3) Vågens impedans

För öppningar i skärmen som har en mindre dimension än halva våglängden kan skärmens effektivitet S , beräknas enligt ekvationen nedan:

$$S = 20 \log (\lambda / 2\ell) \tag{3-29}$$

där λ är våglängden och ℓ är öppningens maximala diameter.

Observera att:

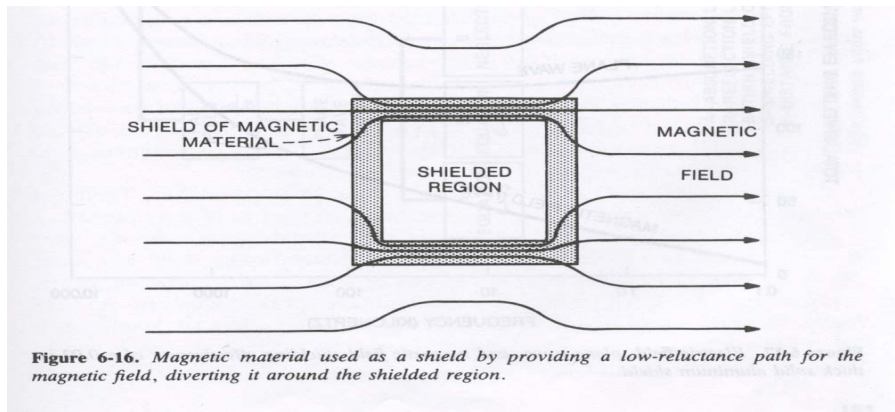
- Om storleken på öppningen halveras, då ökar S med 6 dB.
- Om öppningen är lika stor som halva våglängden då blir $S = 0$. (Viktig för högre frekvenser där våglängden är liten)

Kort förklaringar med hjälp av kretsteori

Skärmningens effektivitet kan även förklaras genom kretsteori. Fält skapar strömmar i metallen (så kallade virvelströmmar) som motverkar det ursprungliga fältet och resulterar i minskning av fältet.

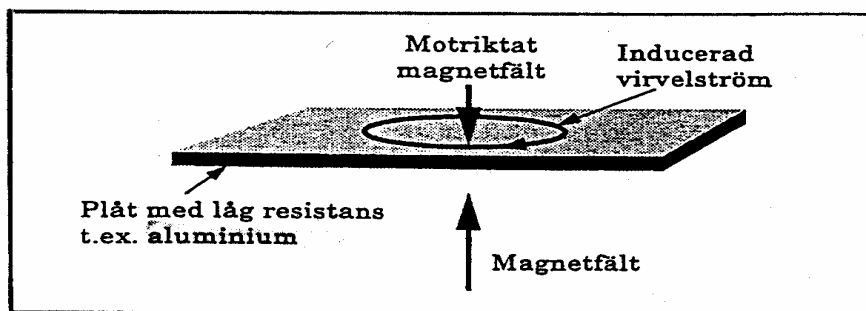
Öppningarna i skärmen gör att virvelströmmarna kan inte flyta fritt eller ska ändra väg och därför minskar effektiviteten av skärmen.

Om mjukjärn eller transformatorplåt befinner sig i magnetiskt fält, leder de fältet i den riktning där metallen finns. **Se Figur 3.16.** Anledningen är att järn fungerar som en ledare för fältet som har mycket mindre reluktans (magnetisk resistans) än luft. Därför strömmar fältet genom plåten. I magnetiska material har virvelströmmar bara en liten verkan i skärmningsprocessen, därför blir de mindre känsliga mot skärmens öppningar



Figur 3-16

När icke-magnetiska metaller med låg resistivitet som aluminium eller koppar används vid skärmning, har virvelströmmarna huvudrollen i skärmningen. Det gör att skärmningen blir känsligare mot öppningar. Det här är anledningen att skärmning med aluminium t.ex., kräver svetsning i skarvarna. Nitning eller överlappning duger inte. Figur 3-17.

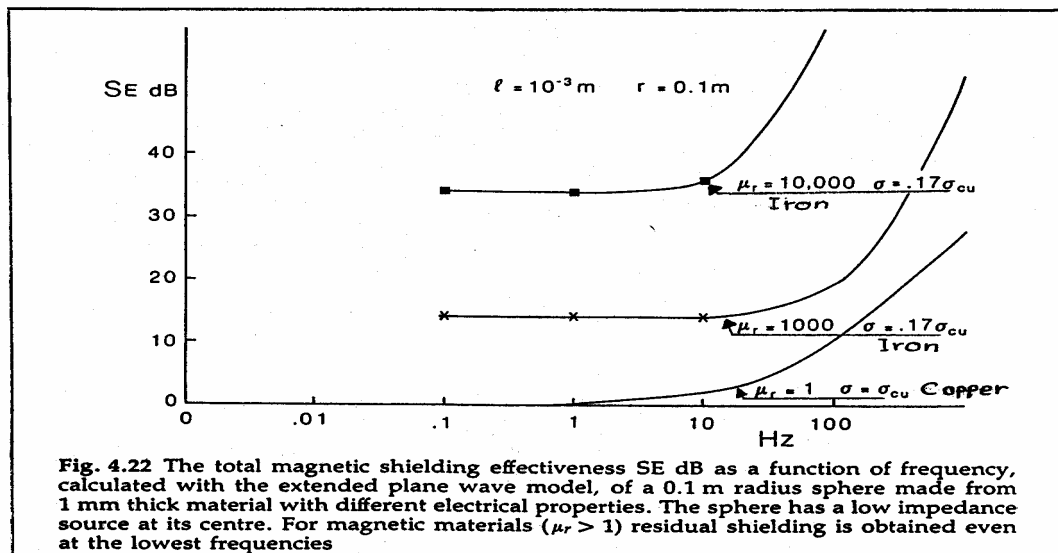


Figur 3-17 Virvelströmmar motverkar magnetfältet (Arbetsmiljöinstitut)

Järnplåt av handelskvalitet 3-5 mm tjock eller transformatorplåt 2 mm tjock ger bra resultat. Svetsning ger bästa resultatet men nitning eller överlappning duger.

Figur 3-18 visar jämförelsen av skärmningseffekten S i [dB], mellan järn (med $\mu_r = 1000$ och med $\mu_r = 10000$) och koppar vid låga frekvenser. Observera att:

- Skärmningseffektivitet ökar med ökad frekvens för både koppar och järn.
- När permeabiliteten μ_r ökar, då ökar skärmningseffektivitet även för mycket låga frekvenser, under 1 Hz.
- Koppars skärmningseffektivitet är noll för frekvenser under 1 Hz.



Figur 3-18 Jämförelse mellan järn och koppar avseende skärmning av magnetiska fält (Electromagnetic Theory, John D Kraus)

3.4.7 Praktisk skärmning

3.4.7.1 Skärmning av hela transformatorstationen

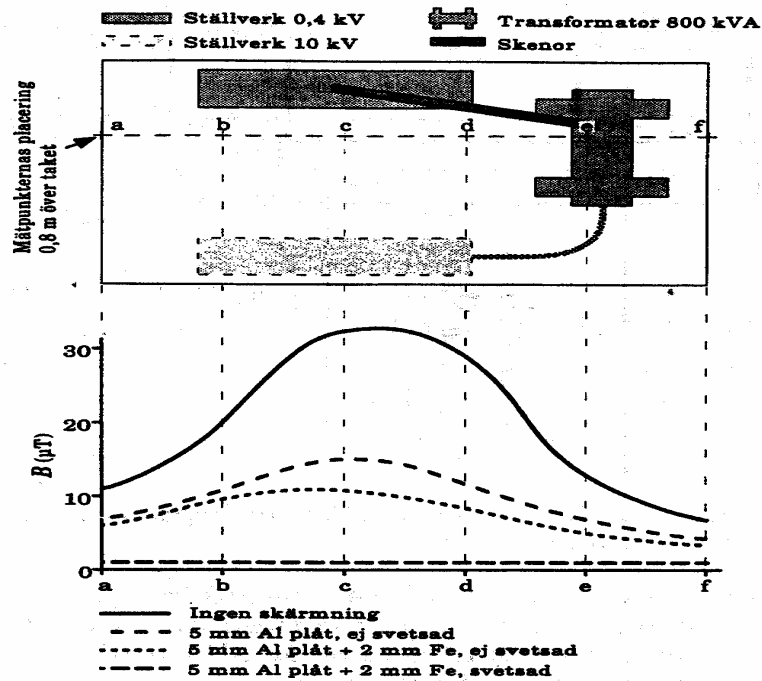
Skärmning blir effektiv om hela transformatorstationen kläs in med aluminium (kvalitet SS-4007-14 till exempel), med en tjocklek på 5 mm. Aluminiumplåtarna ska vikas i håll och svetsas och förenas med varandra för att ge bästa resultatet, annars läckaget blir högt och skärmningen tappar effektivitet. Stora håll ska undvikas om möjligt.

Som komplement, kan även golvet i centralhallen ovanför stationen, förses med 5 mm svetsad aluminiumplåt. Erfarenhet visar att ytan ska vara minst 2 m större än stationen åt alla håll för att minska läckaget och få en effektivare skärmning.

För att få ännu bättre effekt kan aluminiumplåtar kombineras med 2 mm tjocka järnplåtar, som är också svetsade.

Figur 3.19 visar påverkan av skärmning runt en transformatorstation i ett annat projekt liknande centralstationen. Figuren visar att:

- Skärmning är mest effektiv, när en kombination av svetsade aluminium och järnplåtar används.
- Det största magnetfältet kommer från lågspänningsställverket och skenorna.

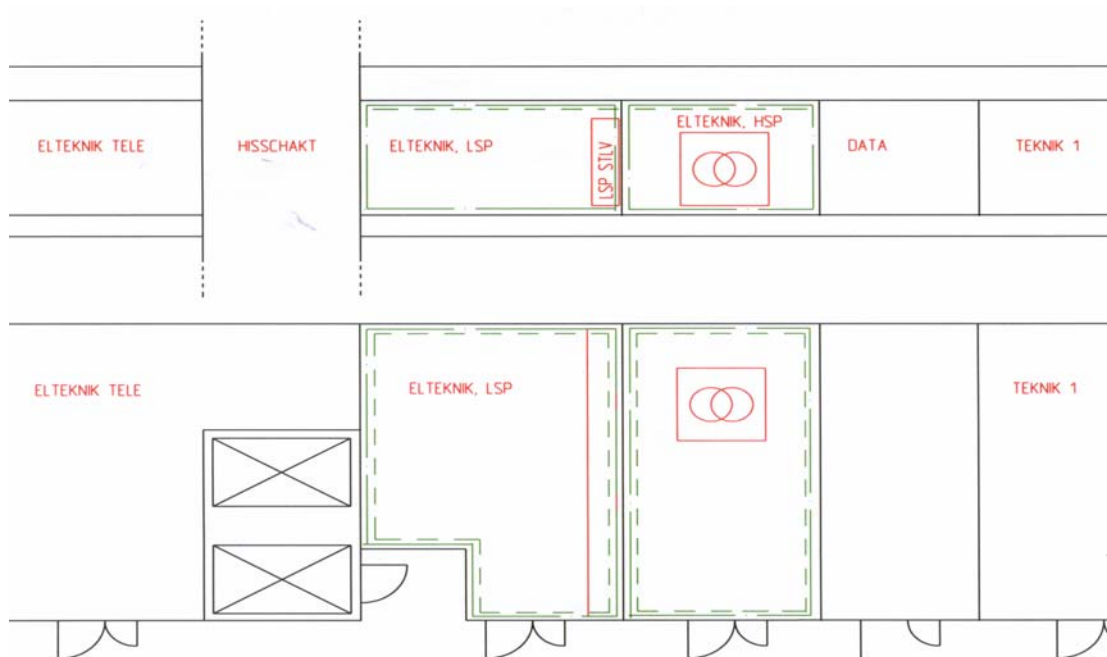


Figur 3-19 Påverkan av skärmning på magnetfält från en transformatorstation (Arbetsmiljöinstitut)

Praktiska aspekter om skärmning i befintliga transformatorstationer

Nedan beskrivs det praktiska tillvägagångssättet av totalskärmning i en transformatorstation.

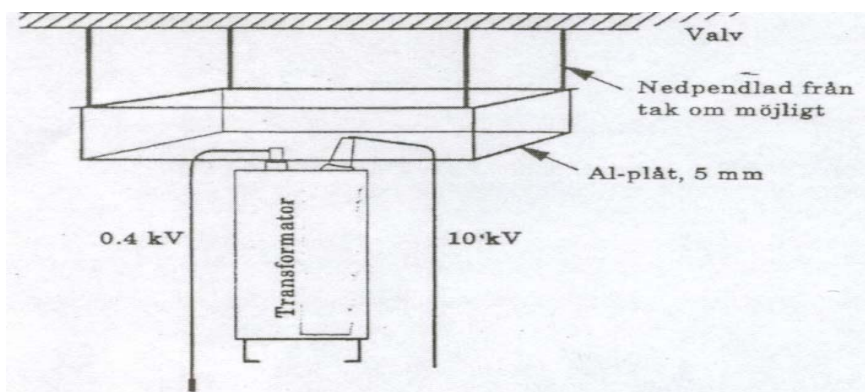
- Befintliga installationer i tak demonteras, trereglar fästs i tak som fästpunkter för aluminiumplåt. När plåten är fastsatt så återmonteras demonterade installationen, helst på träreglarna.
- Yta i tak och väggar ska täckas med 5 mm tjock aluminiumplåt. Kombinationen av Al-plåt med 2mm tjock järnplåt ger ännu bättre resultat. Plåtarna viks in i håll (ventilationskanaler t ex) i väggar och tak i en längd av 200 mm t ex.
- Samtliga skarvar mellan plåtar ska svetsas över hela sin längd.
- Plåtarna ska förses med anordning för skyddsjordning. Varje svetsade plåts skyddsledare kopplas till ställverksjord och kontrolleras att jordresistansen är inte för hög enligt föreskrifterna.
- Väggen bakom ställverket täcks med plåt så långt det går. Ställverk behöver normalt inte flyttas. Värmeutvecklingen från ställverk ska inte försämrats.
- Stativ som bär skenbryggor och kabelstegar kan konstrueras om, förlängas och monteras på väggar eller tak och ska jordas. Se **Figur 3-20**



Figur 3-20 Yta i tak och vägg som täcks med Aluminium-plåt

3.4.7.2 Upprätta en lokal anordning

Det går även att ordna en lokal anordning enligt **Figur 3-21** för att sänka magnetfältet i våningen ovan. En huv av 5 mm aluminiumplåt ska placeras ovanför och runt om transformatorn. Huvu förses med tillräcklig ventilation.

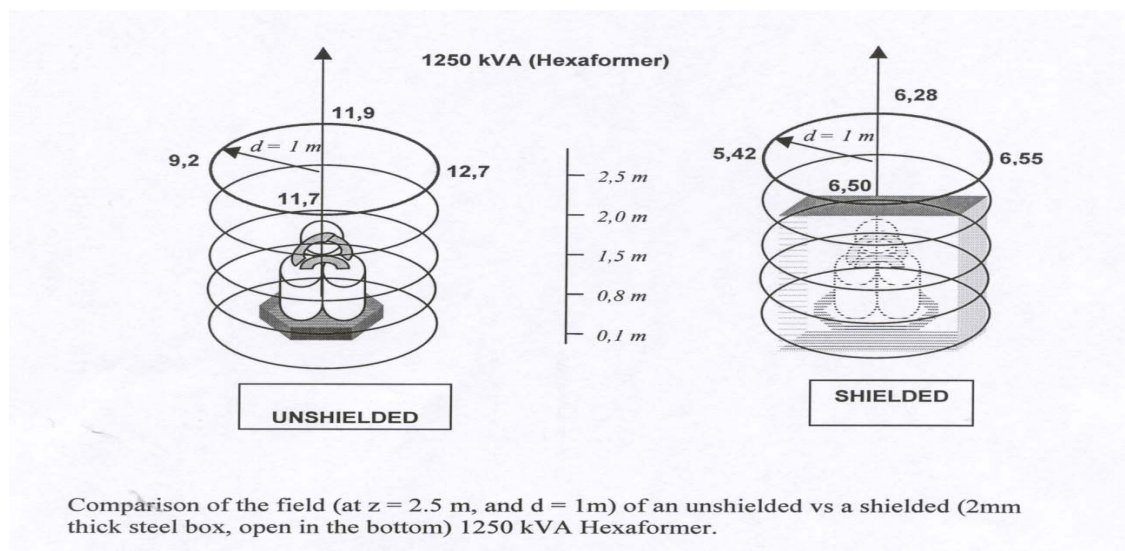


Figur 3-21 Lokal anordning för att dämpa höga magnetfält ovanför transformatorn (Figur: Arbetsmiljöinstitut)

Även järnplåt av handelskvalitet kan användas för skärmning i en önskvärd riktning. Järnplåtarna ska vara 3-5 mm tjocka och kanterna ska ha god elektrisk kontakt. Överlappning och nitning ger bra resultat men svetsning är naturligtvis bäst.

3.4.7.3 Skärmade transformatorer

Ett annat alternativ är att använda skärmade transformatorer som har lägre strålningsnivå. **Figur 3-22** visar resultatet av mätningar av magnetiska fältet runt en 1250 kVA Hexaformer transformator (Nordtrafo-Sverige). Fältet blir ca 50 % mindre p g a skärmning med 2mm tjock järnplåt. Priset på transformatorn är dock 25- 30 % dyrare jämfört med vanliga transformatorer.



Figur 3-22 Skärmade transformatorer ger mindre strålning av magnetiska fält.
(Mätningar från Nordtrafo transformortillverkare)

3.5 Beräkning av magnetfält ovanför transformatorstationen under centralhallen

En av de tre transformatorstationerna som används i projektet ligger under centralhallen som av miljösynpunkt är intressant eftersom människor kan vistas där under en längre tid. Tre stora källor till magnetfält runt transformatorstationen ska urskiljas:

- Transformatorn
- Lågspänningsställverket
- Skenor och ledningar mellan transformatorn och lågspänningsställverket.

Med enkla beräkningar ska magnetfältet från de tre källorna uppskattas. Observera att exakta beräkningar är svåra att utföra och inte direkt motiverade heller. Till exempel är den exakta effektförbrukningen inte känd och dessutom varierar under dygnet. Här uppskattas bara ett maximivärde för magnetfältet.

3.5.1 Uppskattning av magnetfält ovanför transformatorn

- Metoden är baserad på att mätningar görs på en gjutharts transformator med den fysiska formen som visas i **Figur 3-23**. Värdena används sedan, för att uppskatta fältet runt andra ”ungefär liknande” transformatorer.

- Om en oljeisolerad transformator användas, ska värdet från Figur 3-23, sänkas med en faktor mellan 2 och 3. Anledningen är att oljetanken är gjord av metall och fungerar som en skärm runt transformatorns lindningar.

Figur 3-23 visar magnetfält från en 630 kVA, gjutharts (cast - resin) transformator, vid märkström. Denna transformator har $U_k = \%6$.

[U_k = kortslutningsspänningen: Man kortsluter sekundärsidan och drar upp spänningen på primärsidan tills märkström går i sekundär lindningen och sedan läser man av spänningen i primärsidan. Denna spänning delat på den nominella spänningen, U_n i procent blir U_k .]

Observera att magnetfält på tre meter höjd är $B_3 = 5 \mu\text{T}$ för transformator i figuren som senare ska användas i beräkningarna.

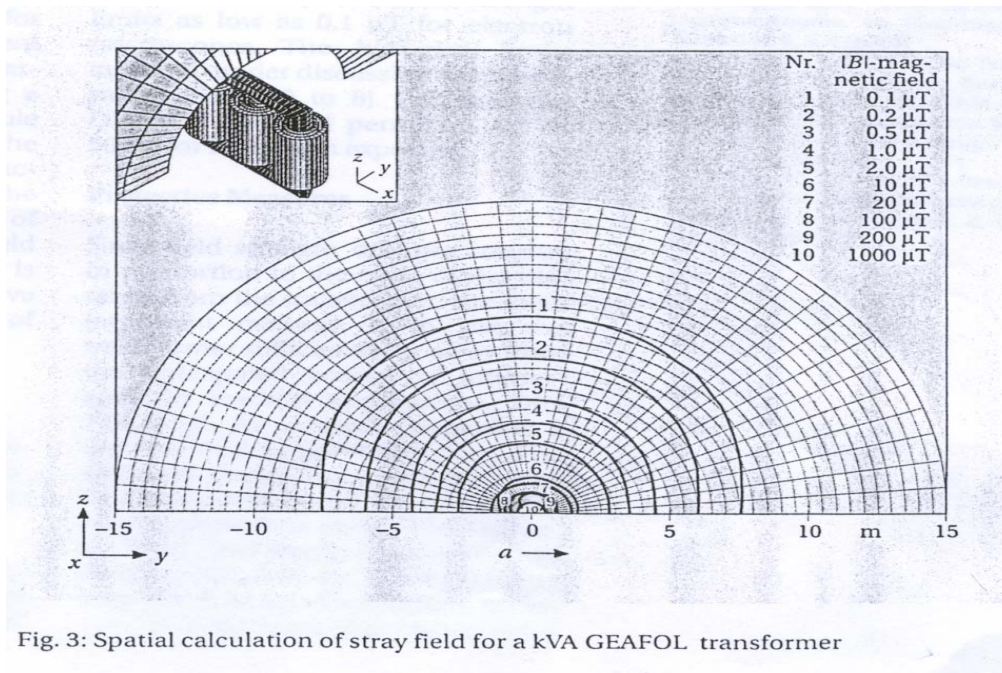


Fig. 3: Spatial calculation of stray field for a kVA GEAFOL transformer

Figur 3-23 Magnetfält från en 630 kVA gjutharts transformator (Figur från Distribution transformers and EMC, Friedrich Alber, Trafo-Unions information)

Fält från en transformatorn är beroende av följande:

- transformators U_k ,
- transformators nominella effekt S_n
- förhållandet mellan strömförbrukning och märkströmmen I / I_n
- avstånd till transformator.

Det går alltså att skriva :

$$B \approx B_0 * U_k * \sqrt{S_n} * [a_0 / a]^x * I / I_n \quad (3-30)$$

$$B = B_0 * (U_z / U_{z0}) * (\sqrt{(S_n / S_{n0})}) * [a_0 / a]^x * (I / I_n) \quad (3-31)$$

Index "0" i ekvation 3-31, syftar på de uppmätta värdena för transformatorn i **Figur 3-23**. B_0 är fältet från transformator i avståndet a_0 .

- Värdet på exponenten x , är beroende av avstånd och ligger mellan 2 och 3 för avstånd över 1 meter från transformator.
- S_n är märkeffekten och kan skrivas enligt:

$$S_n = (\sqrt{3}) * U_n * I_n \quad (3-32)$$

där U_n är märkspänningen och I_n är märkströmmen. Den allmänna sambandet för effekten för trefassystem i kW är:

$$P = (\sqrt{3}) * U * I * \cos \varphi \text{ eller} \quad (3-33)$$

$$P = S * \cos \varphi \quad (3-34)$$

Insättning av mätvärden från 630 kVA transformatorn på 3m avstånd i ekvationen 3-31 ger:

$$B = 5 \mu\text{T} (U_z / 6\%) (\sqrt{(S_n / 630 \text{ kVA})}) * [3\text{m} / a]^2 \text{ till } 3 * I / I_n \quad (3-35)$$

Val av transformator

Effektförbrukning i Centralstationen uppskattas till 855 kW enligt **Tabell 3-2**.

Belastning	Effekt i kW
Pumpar vent och VVS	530
Ljus, värme och kraft	15
Banverket	15
Hissar och rulltrappor	255
UPS	40
Summa	855

Tabell 3-2 Effektuppskattning för Centralstationen

Med en uppskattad $\cos \varphi = 0.8$ och enligt ekvation 3.34 =>

$$S = P / \cos \varphi = 855 / 0.8 = 1068 \text{ kVA}$$

Distributionstransformatorn i centralstationsprojektet väljes då till $S_n = 1250 \text{ kVA}$. Dessutom antas att transformatorn är oljeisolerad med $U_k = 5.4 \%$. (Se **Appendix 4**)

Insättning i **ekvation 3-34 och 3-32** ger:

$$I = 855 / ((\sqrt{3}) * 400 * 0.8) = 1543 \text{ A per fas.}$$

$$I_n = 1250 / ((\sqrt{3}) * 400) = 1804 \text{ A märkström}$$

$$I / I_n = 1543 / 1804 = 0.86$$

Fältet i punkten P, rakt ovanför transformator, 0.8m ovanför golvet i centralstationen ska beräknas. Det innebär att avståndet $a = 0.8 + 3.2 = 4 \text{ m}$.

Exponenten x

En transformator räknas som en punktkälla för magnetiska fält när fältpunkten är tillräcklig lång ifrån transformatorn ($a > 10 \text{ m}$). För närmare avstånd ($1\text{m} < a < 10 \text{ m}$) minskar inte fältet lika snabbt. Experiment visar att:

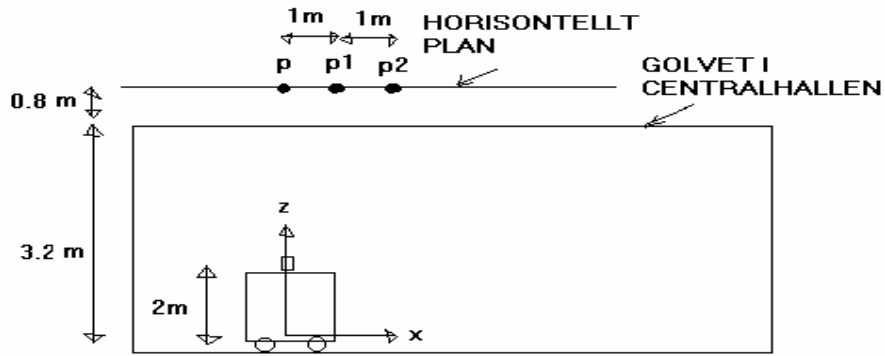
- För avstånd över 10 m från transformator blir exponenten $x = 3$.

- För avstånd mellan $a = 1\text{m}$ till $a = 10 \text{ m}$ brukar $x = 2.8$ användas. Insättning i **ekvation 3-28** ger:

$$B_P = B_{4\text{-meter}} = 5 * (5.4 / 6) * (\sqrt{(1250 / 630)}) * (3 / 4)^{2.8} * 0.86 \\ = 5 * 0.9 * 1.41 * 0.447 * 0.86 = 2.44 \mu\text{T}$$

Värdet $2.44 \mu\text{T}$ är för gjutharts transformator. För oljeisolerad transformator, ska enligt författaren, (Friedrich Alber, Trafo-Unions information) minskas detta värde med en faktor som ligger mellan 2 och 3. För att vara på den säkra sidan används faktor 2:

$$B_{P \text{ oljeisolerad}} = 2.44 / 2 = 1.22 \mu\text{T}$$



Figur 3-24 Fält från Transformatorn räknas i punkterna P, P₁, P₂,... i ett horisontellt plan 0.8 m ovanför golvet i centralhallen.

Se **Figur 3-24**. Med hjälp av värdet B_P oljeisolerad = 1.22 μT kan fältet i andra punkter som P₁, P₂, ... beräknas, eftersom det är bara avståndet som ökas för de andra punkterna.

$$B_{p1} = 1.22 * (4 / \sqrt{(4^2 + 1^2)})^{2.8} = 1.12 \mu\text{T}$$

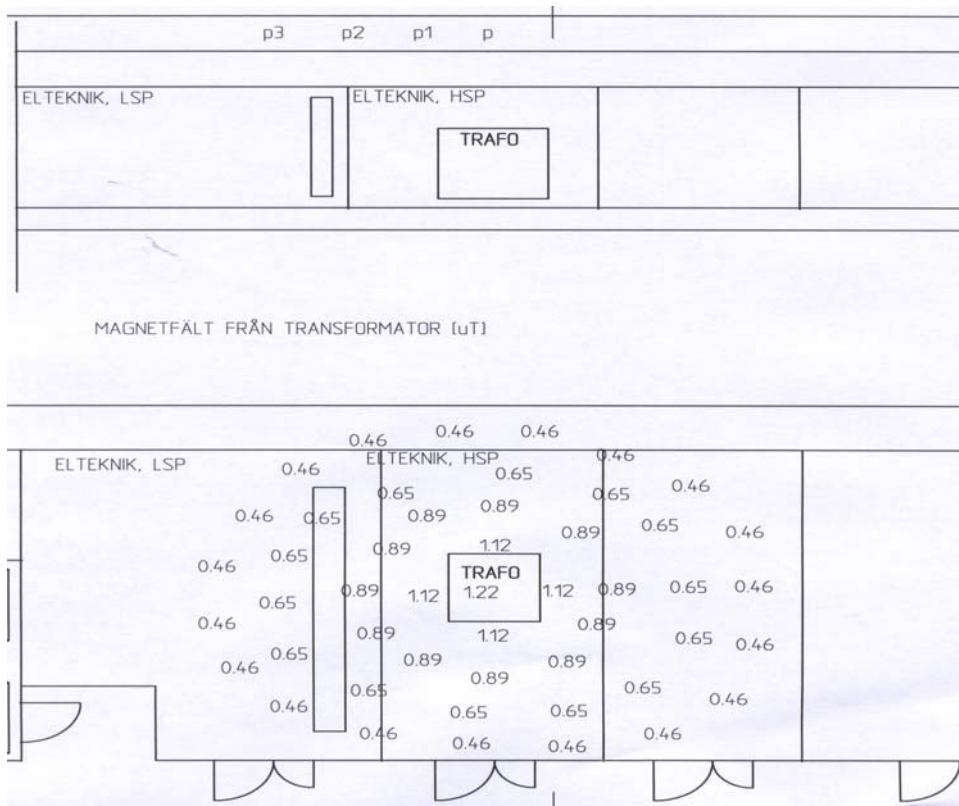
$$B_{p2} = 1.22 * (4 / \sqrt{(4^2 + 2^2)})^{2.8} = 0.89 \mu\text{T}$$

$$B_{p3} = 1.22 * (4 / \sqrt{(4^2 + 3^2)})^{2.8} = 0.65 \mu\text{T}$$

$$B_{p4} = 1.22 * (4 / \sqrt{(4^2 + 4^2)})^{2.8} = 0.46 \mu\text{T}$$

$$B_{p5} = 1.22 * (4 / \sqrt{(4^2 + 5^2)})^{2.8} = 0.33 \mu\text{T}$$

$$B_{p6} = 1.22 * (4 / \sqrt{(4^2 + 6^2)})^{2.8} = 0.23 \mu\text{T}$$



Figur 3-25 Uppskattat magnetfält [μT] från transformatorn under centralhallen.

3.5.2 Beräkning av fält ovanför lågspänningsställverket

Strömskenorna är normalt största källan till magnetiska fält eftersom faserna separeras mycket, plus att strömmen är väldigt hög och skenorna är långa (Se teori delen).

Med uppskattad full belastning enligt **Tabell 3.1** kan strömmen i varje fas beräknas:

$$(855 * 1000) / (400 * \sqrt{3} * 0.8) = 1543A$$

Observera att symmetrisk strömförbrukning antas för att förenkla beräkningarna d v s $I_{L1} = I_{L2} = I_{L3}$ och strömmen i neutralledare antas vara noll.

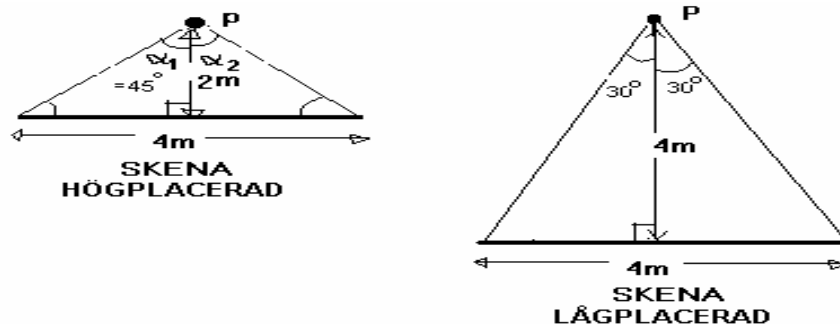
Beräkningens förfarande

Beräkningar görs enligt Ekvation 3-12 det vill säga:

$$(B_{p\text{-kort}})_{3\text{-fas}} = (B_{p\text{-lång}})_{3\text{-fas}} * (\sin \alpha_2 + \sin \alpha_1) / 2$$

Anledningen att formel för korta strömbanor används är att:

Om längden på skenorna antas vara cirka 4m, för att beräkna magnetfältet i en punkt som har till exempel 2m till 4m avstånd från skenorna, kan termen $(\sin \alpha_2 + \sin \alpha_1) / 2$ i ekvation 3-12 inte approximeras bort. Se **Figur 3-26**. Vinklarna α_1 och α_2 ska alltså beräknas och används i beräkningarna.



Figur 3-26 Vinklarna α_1 och α_2 för punkten P om skenan är hög- eller lågplacerad.

3.5.2.1 Fält från skenor i ställverket, högmonterade

När skenor är högplacerade, blir då avståndet från fasen L_1 till golvet i centralhallen ungefär 1.2 m. Avstånd från fasen L_1 till 0.8 m ovanför golvet blir då: $r_{L1} = 1.2 + 0.8 = 2$ m.

Avståndet mellan skenorna antas vara $\Delta = 0.1$ m.

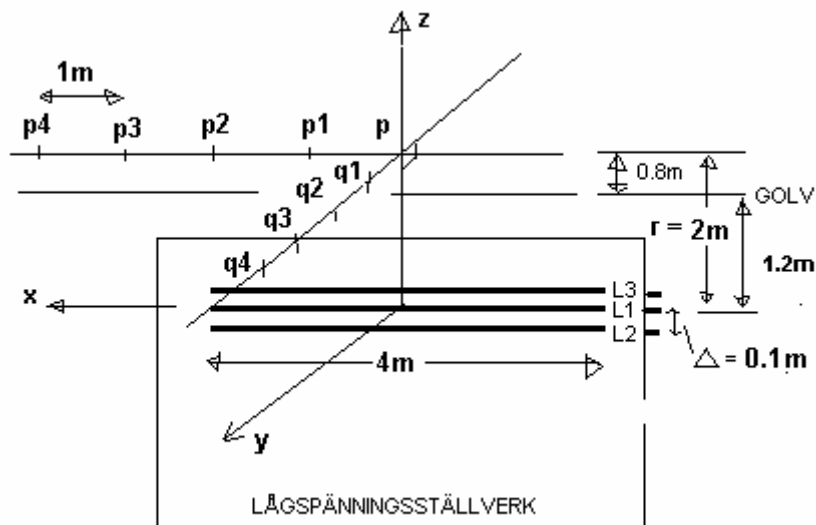
Dessa värden kommer att användas för att beräkna fältet ovanför skenorna i både x-led (parallellt med skenorna) och y-led (rätvinkligt mot skenorna). Se **Figur 3-27**. Detta innebär att beräkningar görs en gång för punkterna P, P1, P2, P3, P4... och en gång för punkterna q1, q2, q3, q4...

1) Beräkning för punkterna P, P1, P2, P3, P4...

Avståndet mellan skenorna antas $\Delta = 0.1$ m då blir: $r_{L2} = 1.9$ m och $r_{L3} = 2.1$ m. För att förenkla beräkningarna, beräknas först den totala I / r och sedan multipliceras till $(\mu_0 / 2 \pi) * F$ där $F = (\sin \alpha_2 + \sin \alpha_1) / 2$.

Strömmen i varje fas antas $I_{L1} = I_{L2} = I_{L3} = 1543A$ som är den högsta tänkbara förbrukningsströmmen.

Observera att det här är en approximation eftersom en strömskena i ställverk inte kan ha samma ström genom hela sin längd på grund av de förgreningar som finns. Det verkliga värdet blir alltså mindre än detta.



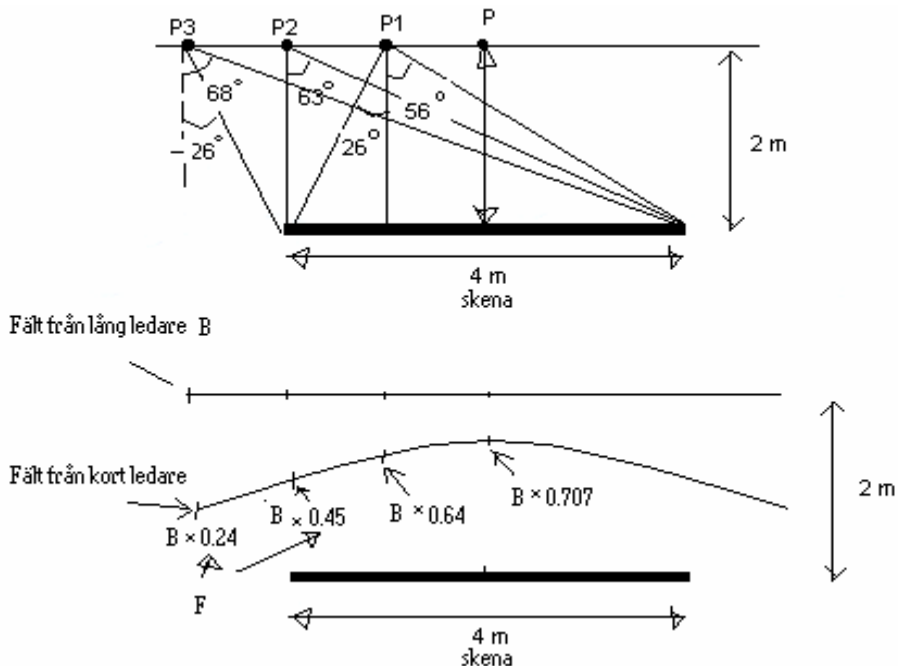
Figur 3-27 Skenor höglacerade i ställverket

Vinklarna α_1 och α_2 och faktorn $F = (\sin \alpha_1 + \sin \alpha_2) / 2$ för punkterna P1, P2, P3 visas i **Figur 3-28**, för en 4 m lång skena i en punkt på 2 m avstånd. Till exempel i punkten P beräknas F_p enligt:

$$F_p = (\sin 45^\circ + \sin 45^\circ) / 2 = 0.707$$

$$F_{p1} = (\sin 26^\circ + \sin 56^\circ) / 2 = 0.63 \text{ och på samma sätt:}$$

$$F_{p2} = 0.44, F_{p3} = 0.24, F_{p4} = 0.038, F_{p5} = 0.12$$



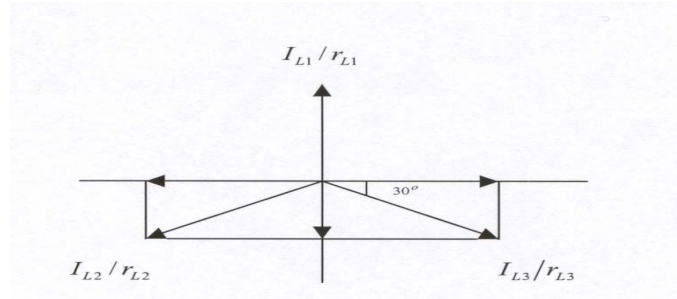
Figur 3-28 Korrektionsfaktor F, för punkterna P, P1, P2...

Fält för de tre faserna räknas enligt (Se **Figur 3-29**):

$$B_{\text{fas L1}} = (\mu_0 / 2 \pi) * F * (I_{L1} / r_{L1} = 1543 / 2) = (\mu_0 / 2 \pi) * F * (771.5 \text{ A/m} \angle 0^\circ)$$

$$B_{\text{fas } L2} = (\mu_0/2\pi) * F * (I_{L2}/r_{L2} = 1543 / 2.1) = (\mu_0/2\pi) * F * (734 \text{ A/m } \angle 120^\circ)$$

$$B_{\text{fas } L3} = (\mu_0/2\pi) * F * (I_{L3}/r_{L3} = 1543 / 1.9) = (\mu_0/2\pi) * F * (812 \text{ A/m } \angle 240^\circ)$$



Figur 3-29 Vektorerna I_1/r_1 , I_2/r_2 , I_3/r_3 har 120° fasskillnad

$$I_{L1}/r_{L1} = (771.5 \text{ A/m } \angle 0^\circ)$$

Eftersom $I_{L2}/r_{L2} = 734 \text{ A/m}$ blir då komponenterna:
komponenten i x-led $(734 * (\sqrt{3})/2) = 636 \text{ A/m}$ och
komponenten i y-led $(734 * 1/2) = 367 \text{ A/m}$

Eftersom $I_{L3}/r_{L3} = 812 \text{ A/m}$ blir då komponenterna:
komponenten i x-led $(812 * (\sqrt{3})/2) = 703$ och
komponenten i y-led $(812 * 1/2) = 406 \text{ A/m}$

De totala komponenterna för B blir då:

$$B_{x\text{-led}} = (\mu_0/2\pi) * F * (703 - 636) = (\mu_0/2\pi) * F * (67) \text{ [Tesla]}$$

$$B_{y\text{-led}} = (\mu_0/2\pi) * F * (771.5 - 406 - 367) = (\mu_0/2\pi) * F * (-1.5) \text{ [Tesla]}$$

och:

$$\mu_0/2\pi = 4\pi * 10^{-7} / 2\pi = 0.2 * 10^{-6}$$

Observera att om $\mu_0/2\pi = 0.2$ så erhålls fältet i $[\mu\text{ T}]$.

För punkten P blir $\alpha_1 = 45^\circ$ och $\alpha_2 = 45^\circ$ enligt **Figur 3-26**.

$$F_P = (\sin \alpha_2 + \sin \alpha_1) / 2 = (0.707 + 0.707) / 2 = 0.707$$

$$B_{y\text{-led}} \text{ för punkt P} = 0.2 * -1.5 * 0.707 = \underline{-0.21 \mu\text{T}}$$

$$B_{x\text{-led}} \text{ för punkt P} = 0.2 * 67 * 0.707 = \underline{9.47 \mu\text{T}}$$

Den totala $B_P = \sqrt{9.47^2 + (-0.21)^2} \approx 9.47 \mu\text{T}$ som ligger långt över det rekommenderade gränsvärdet $0.2 \mu\text{T}$. Placering av skenorna enligt fall 1 är därför inte speciellt bra ur magnetfält synpunkt.

På samma sätt kan B-fält för punkterna $P_1, P_2, P_3, P_4, \dots$ beräknas.

$$B_{P1} = 8.5 \mu\text{T}, B_{P2} = 5.9 \mu\text{T}, B_{P3} = 3.2 \mu\text{T}, B_{P4} = 1.6 \mu\text{T}$$

2) Beräkning av fält för punkter $q_1, q_2, q_3, q_4, \dots$

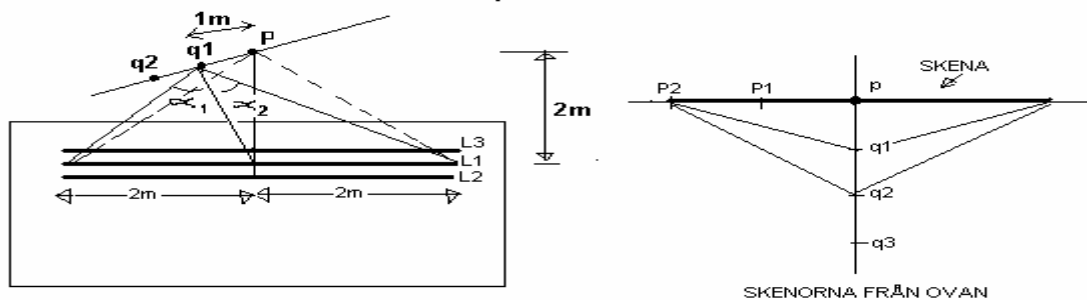
Se **Figur 3-30**. Korrektionsfaktor $F = (\sin \alpha_2 + \sin \alpha_1) / 2$ för punkterna $q_1, q_2, q_3, q_4, \dots$, blir inte samma som p_1, p_2, p_3, \dots

För punkten q_1 beräknas korrektionsfaktorn F_{q1} enligt nedan:

$$\sin \alpha_1 = \sin (\tan^{-1}(2 / \sqrt{1^2 + 2^2})) = 0.67$$

$$\sin \alpha_2 = \sin (\tan^{-1}(2 / \sqrt{1^2 + 2^2})) = 0.67$$

$$\Rightarrow F_{q1} = (0.67 + 0.67)/2 = 0.67 \text{ och på samma sätt: } F_{q2} = 0.58, F_{q3} = 0.48, F_{q4} = 0.4$$



Figur 3-30

Observera att avstånd från punkt q1 till de tre faserna blir:

$$r_{L1} = \sqrt{1^2 + 2^2} = 2.24 \text{ m}$$

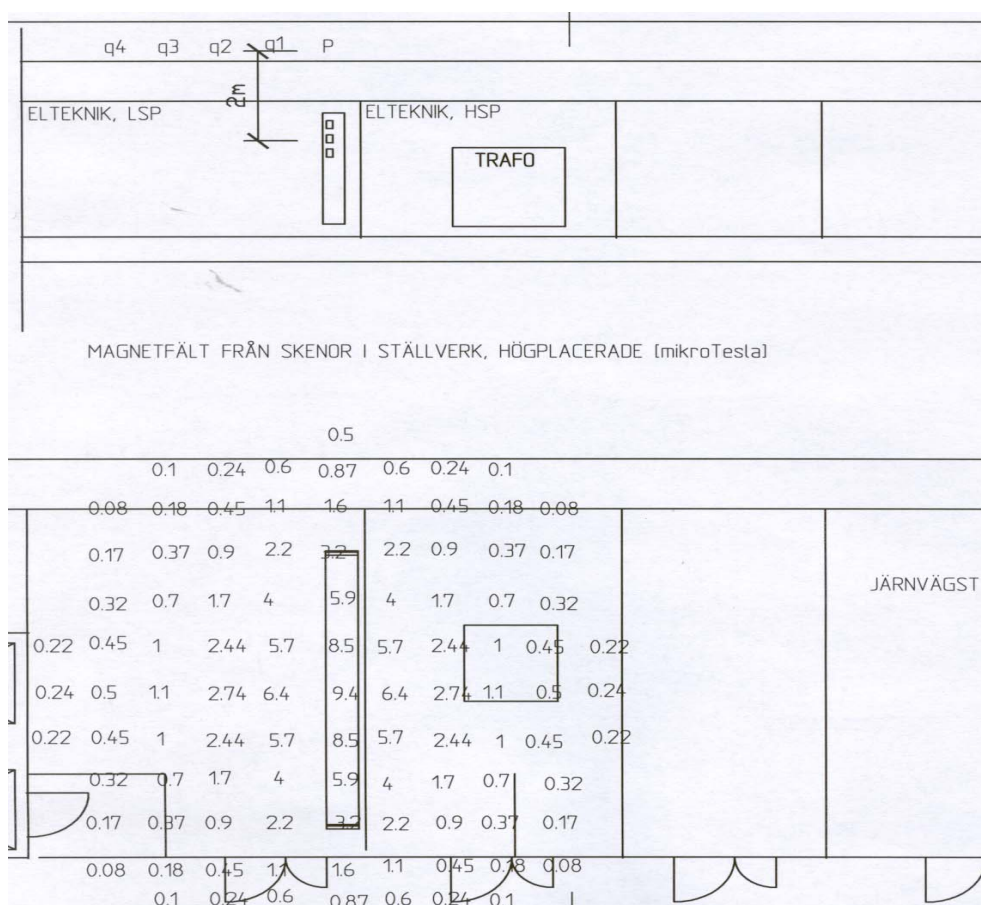
$$r_{L2} = \sqrt{1^2 + (2.1)^2} = 2.33 \text{ m}$$

$$r_{L3} = \sqrt{1^2 + (1.9)^2} = 2.15 \text{ m}$$

Först beräknas den totala vektorn I/r och sedan multipliceras resultatet till $(\mu_0/2\pi) * F$ för varje punkt, precis som tidigare. Fältet för punkten q1, q2, q3,... efter beräkningar blir då:

$$B_{q1} = 6.42 \mu\text{T}, B_{q2} = 2.74 \mu\text{T}, B_{q3} = 1.1 \mu\text{T}, B_{q4} = 0.5 \mu\text{T}, B_{q5} = 0.24 \mu\text{T}.$$

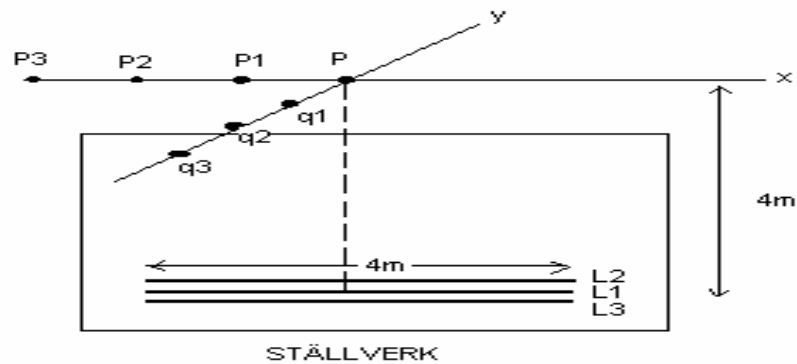
Magnetfältet från skenorna i ställverket, högplacerade enligt **Figur 3-30**, kommer att bli ungefär som **Figur 3-31**:



Figur 3-31 Uppskattat magnetfält från skenor som är högmonterade i ställverket [μT]

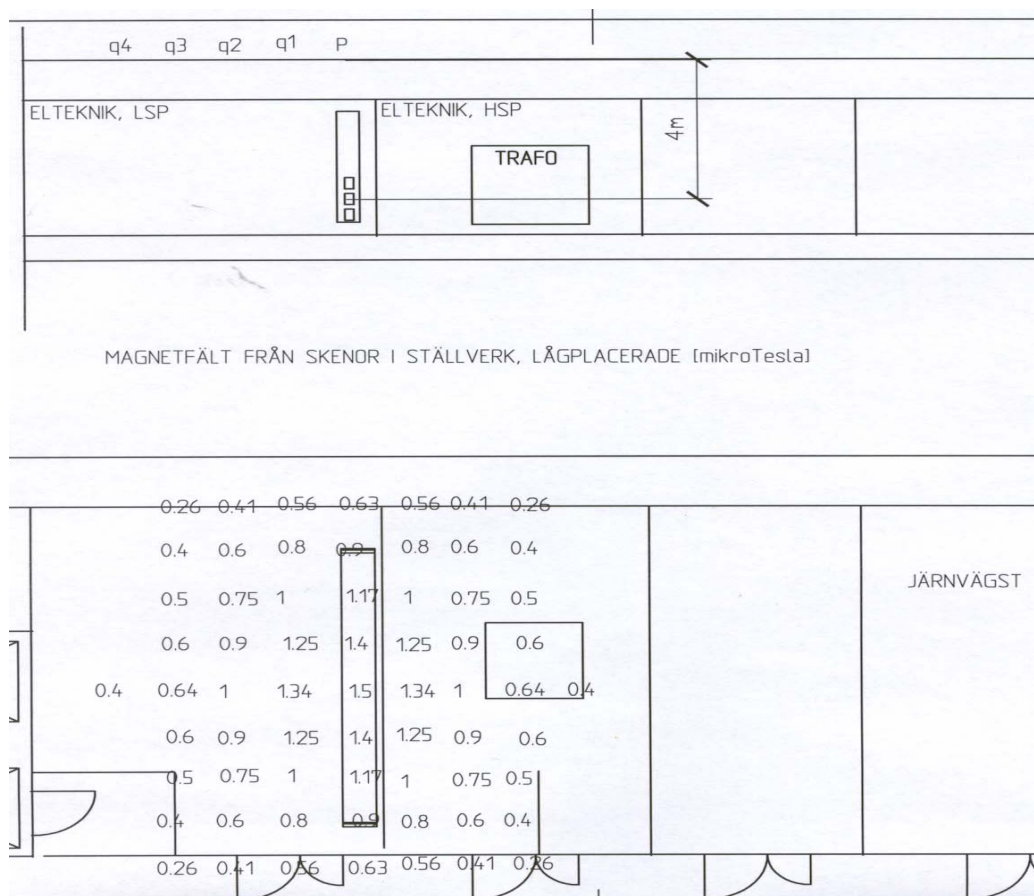
3.5.2.2 Fält från lågmonterade skenor i ställverket

Om skenorna i ställverket monteras lågt, blir det större avstånd mellan skenor och taket. Det gör att magnetfält i ovanvåningen reduceras jämfört med förra fallet. Avstånd mellan skenorna antas fortfarande vara $\Delta = 0.1\text{m}$. Se **Figur 3-32**.



Figur 3-32 Skenor lågmonterade i ställverket

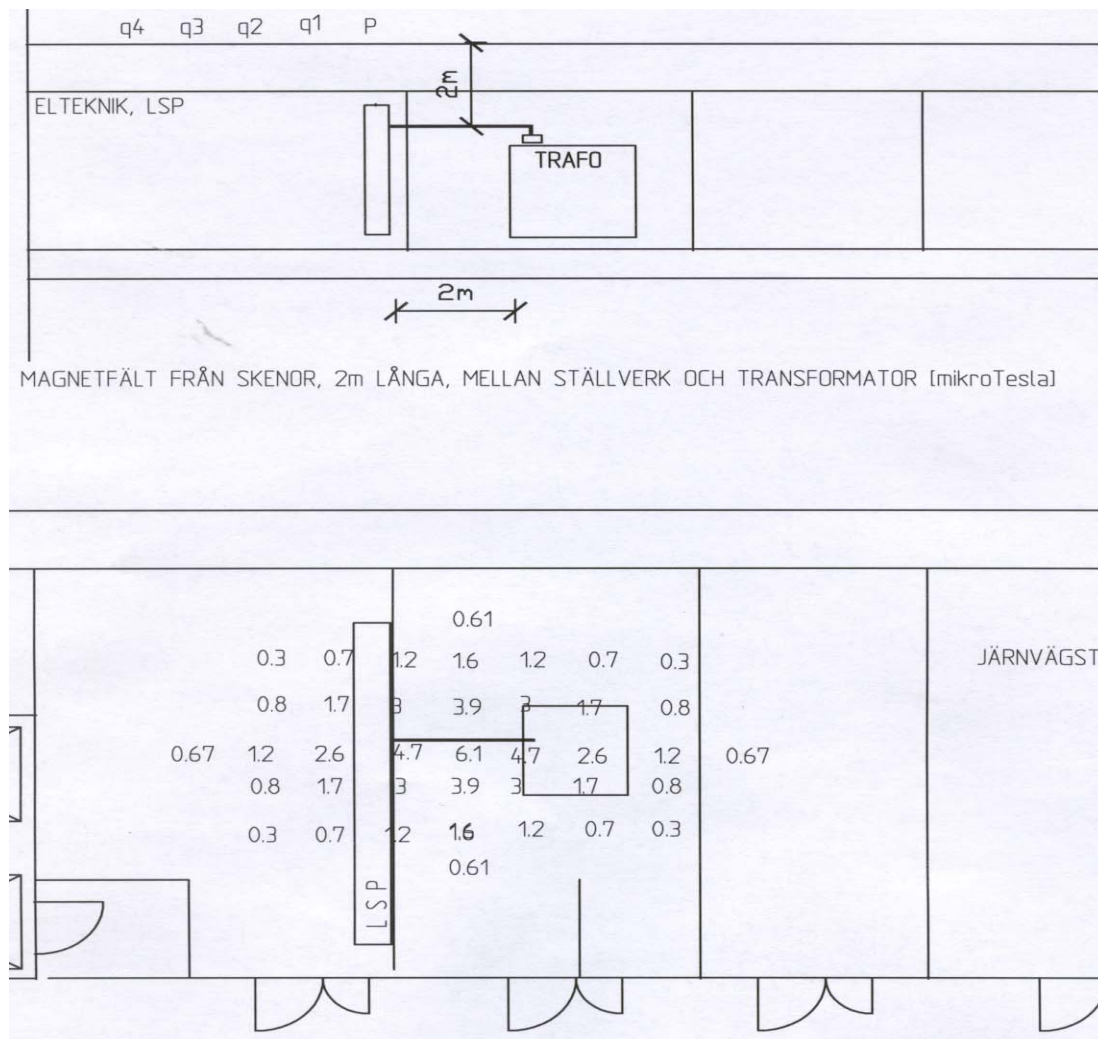
Avstånd från fas L_1 till punkten P antas vara $r = 4\text{ m}$ och avstånd mellan skenor $\Delta = 0.1\text{ m}$. Beräkning för punkten P görs på samma sätt som tidigare. **Figur 3-33** visar det beräknade magnetfältet från lågmonterade skenor.



Figur 3-33 Magnetfält från skenor lågmonterade i ställverket [μT]

3.5.3 Beräkning av fält från skenor mellan transformatorn och lågspänningsställverket

Skenor mellan ställverk och transformator antas vara högplacerade och 2m långa. Avstånd mellan skenor 0.1 m precis som tidigare. Se **Figur 3-34**.



Figur 3-34 Magnetfältet från skenor mellan ställverk och transformator [μT]

3.5.4 Magnetfält från kabelförband

Magnetfält från de kablar som leder mest ström d v s kablar som går från ställverket till pumpar och rulltrappor ska uppskattas. Se **Tabell 3.1**.

Kablar till pumpar

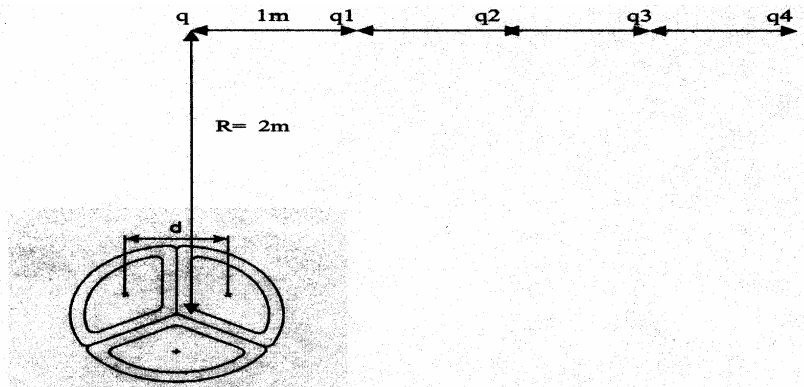
Effektförbrukningen för pumpar och VVS uppskattas till ca 530 kW. Belastningen antas symmetrisk (strömmen i nollledare = 0) och $\cos \varphi = 0.8$. Då blir strömmen :

$(530 * 1000) / (400 * 0.8 * \sqrt{3}) \approx 956 \text{ A}$ per fas. 5 stycken trefaskablar till exempel 4 x 240/72 SE-N1XE-AS ska användas.

Magnetfältet från en trefaskabel kan approximativt beräknas enligt (STF-kursverksamheten, magnetiska och elektriska fält):

$$B = \frac{\mu_0 d I \sqrt{6}}{4\pi R^2} \quad (3-36)$$

där μ_0 är permeabiliteten i luft = $4\pi \times 10^{-7}$, d = avstånd mellan faserna i kabeln, I är strömmen per fas, R är avstånd från kabelns centrum till punkten q där fältet ska beräknas. För kabeln ovan är $d \approx 0.014$ m. Belastningen för varje fas $I = 956/5 \approx 191$ [A/fas] och R antas vara 2 m. **Se Figur 3-35.**



Figur 3-35 Kablarnas placering

Först beräknas magnetfält från en kabel i punkten q :

$$B_q \text{ för en kabel} = (4\pi \times 10^{-7} \times 0.014 \times 191 \times 2.45) / (4\pi \times 2^2) = 0.164 \mu\text{T}.$$

För att beräkna fältet från alla 5 kablar, antas att fält från kablarna sammanlagras d v s fält från en kabel multipliceras till 5.

$$B_q = 5 \times 0.164 = 0.82 \mu\text{T}$$

Fältet från kabel minskar med kvadraten av avstånd enligt Ekvation 3-36. Fältet i $q_1, q_2, q_3 \dots$ kan då beräknas enligt:

$$B_{q1} = 0.82 \times (2)^2 / (\sqrt{2^2 + 1^2})^2 = 0.66 \mu\text{T}$$

$$B_{q2} = 0.82 \times (2)^2 / (\sqrt{2^2 + 2^2})^2 = 0.41 \mu\text{T}$$

$$B_{q3} = 0.82 \times (2)^2 / (\sqrt{2^2 + 3^2})^2 = 0.25 \mu\text{T}$$

$$B_{q4} = 0.82 \times (2)^2 / (\sqrt{2^2 + 4^2})^2 = 0.164 \mu\text{T} \text{ som ligger under den rekommenderade gränsen } 0.2 \mu\text{T}.$$

Ovanför kabelförbandet kan magnetfält överskrida gränsen om maximal belastning i kablar antas. Det bör därför finnas någon form av skärmning för kablarna, om kablarna förläggas högt på kabelsteg.

Kablar till rulltrappor och hissar

På samma sätt kan magnetfält från kablar till rulltrapporna beräknas. Effektförbrukningen uppskattas till 255 kW och $\cos \varphi = 0.8$. Strömmen blir då:

$$(255 \times 1000) / (400 \times 0.8 \times \sqrt{3}) = 460 \text{ A/fas}.$$

Fält från olika källor kan i värsta fall sammanlagras och ge ett fält som är summan av de beräknadefälten. De här värdena visar sig vara långt över de rekommenderade värden enligt försiktighetsprincipen ($0.2 \mu\text{T}$ dygnsmedelvärde).

Utan någon åtgärd och med dålig placering av utrustning, kan magnetfältet i centralhallen rakt ovanför transformatorstationen gå upp till $20\mu\text{T}$ under vissa tider av dygnet. Observera att det finns andra magnetfältskällor som inte tagits in i beräkningarna.

Det bör påpekas att i beräkningar användes maximal tänkbar ström, men även med halva belastningen blir fältet fortfarande över de rekommenderade gränsvärden.

Rekommendation

- En effektiv form av skärmning i väggar och tak för transformatorstationen rekommenderas. Det skärmningssätt som beskrivits i **Avsnitt 3.4.7.1** bör användas.
- Teoretiskt sett vid en perfekt skärmning, utan någon läckage, borde 5mm tjock Aluminiumplåt räcka till eftersom den ger ca 80 ggr minskning av magnetiska fältet (se **Avsnitt 3.4.5** numerisk exempel 4). Men läckage finns och för att nå bättre resultat kan aluminiumplåtar kombineras med 2mm tjock järnplåt.
- De åtgärder som vidtas, för att reducera magnetiska fältet under planeringsstadiet och byggnadstiden, är mycket viktiga eftersom när projektet är färdigställt blir kompletterande åtgärder båda kostsamma och komplicerade.
- I övrigt bör vid planering ordnas så att ytan straks ovanför transformatorstationen inte används som väntrum eller restaurang där folk kan vistas under en längre tid.

Appendix 1: Systembeteckningar (Starkströmsföreskrifterna)

sida1(2)

Första bokstaven anger hur fördelningssystemet är jordat

T = direkt förbindelse till jord

I = isolerat från jord

Andra bokstaven anger hur de utsatta delarna är kopplade till jord

T = utsatt del direkt kopplad till jord

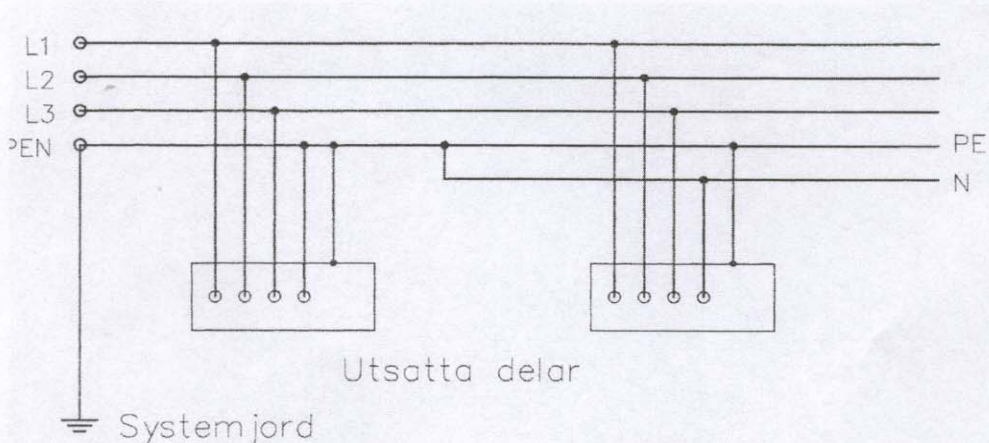
N = utsatt del direkt kopplad till fördelningssystemets jordförbundna punkt

Eventuellt tredje bokstav anger hur skyddsledare och neutralledare är framdragna

S = skyddsledare(PE) och neutralledare (N) är olika ledare

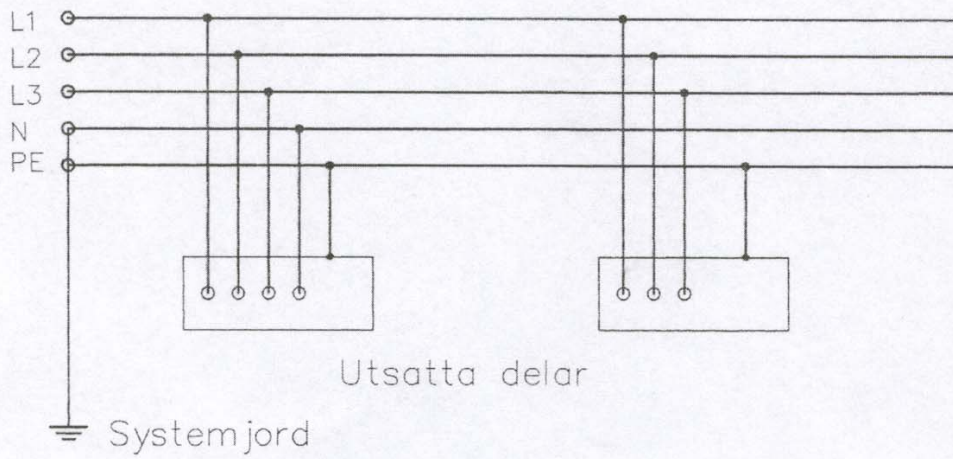
C = skyddsledare(PE) och neutralledare (N) är kombinerade i en ledare (PEN)

Exempel 1 TN-C-S SYSTEM



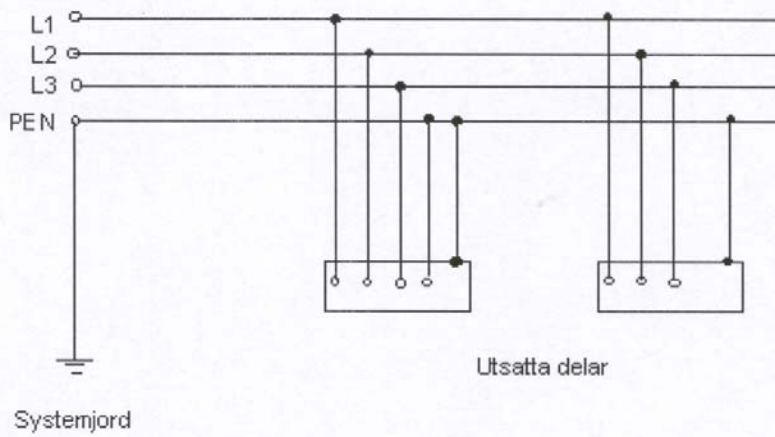
Neutral- och skyddsledarefunktionerna är kombinerade i en enda ledare i en del av systemet

Exempel 2 TN-S SYSTEM



Separata neutral- och skyddsledare

Exempel 3 TN-C SYSTEM



Neutral och skyddsledare är kombinerade

Appendix 2 Beräkning av förväntad beröringsspänning ΔU (SEK-hanbok 413) sida1(3)

Kontroll av förväntad beröringsspänning

Om det inträffar ett jordfel i en elektrisk utrustning, kommer utsatta delar på denna utrustning att spänningssättas intill dess att kortslutningsskyddet fränkopplat kretsen. Beröringsspänningar kan då uppträda mellan de utsatta delarna och samtidigt berörbara främmande ledande delar eller utsatta delar på annan utrustning.

Nedan visas hur man kan beräkna förväntad beröringsspänning mellan utsatt del och en främmande ledande del. I exemplet är den främmande ledande delen en vattenledning, som är ansluten till huvudpotentialutjämnningen.

Beröringsspänningen bestäms av det spänningsfall (ΔU) som jordfelsströmmen (I_K) förorsakar i skyddsledaren fram till den punkt där alla ledande delar i anläggningen är anslutna till huvudpotentialutjämnningen, dvs huvudjordningsskenan. Vi bortser här från att en viss felström kan gå i potentialutjämningsledarna från huvudcentralen via huvudjordningsskenan och vidare ut genom vattenledningen. Denna ström medför ett litet spänningsfall i dessa potentialutjämningsledare, vilket kommer att ändra beröringsspänningen ΔU marginellt.

I figur 13 förekommer följande beteckningar:

R_{PE1} = skyddsledarens resistans mellan huvud- och undercentralen

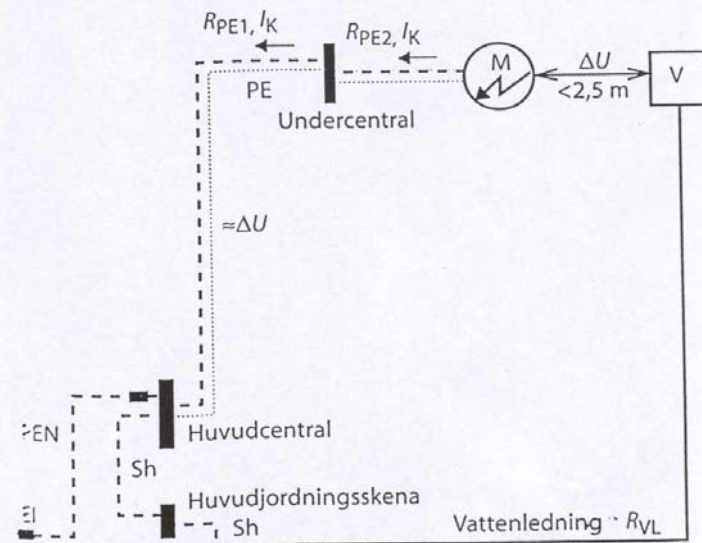
R_{PE2} = skyddsledarens resistans mellan undercentralen och motorn M

R_{VL} = vattenledningens resistans mellan huvudjordningsskenan och den punkt där ledningen och M kan beröras samtidigt

I_K = kortslutningsströmmen vid jordslutning i motorn M

Då reaktansen i installationsledningar vanligen är försumbar i förhållande till resistansen, räknar vi här enbart med resistansen.

I vattenledningen mellan V och huvudjordningsskenan uppstår inget spänningsfall eftersom det inte flyter någon ström i vattenledningen och beröringsspänningen ΔU blir därför i det närmaste beroende enbart av spänningsfallet i skyddsledarna mellan M och huvudcentralen. ΔU kan därför beräknas som produkten av jordfelsströmmen I_K



Figur 13
Förväntad beröringsspänning ΔU mellan M och V vid jordfel i M

och resistansen R_{PE} i skyddsledarna mellan M och huvudcentralens skena.

Som framgår av figuren är totala resistansen i skyddsledarkretsen i installationen:

$$R_{PE} = R_{PE1} + R_{PE2}$$

Spänningsfallet kan då beräknas som:

$$\Delta U = I_K \times R_{PE}$$

Resistansen per meter hos skyddsledare och fasledare för olika areor kan erhållas ur kabeltillverkarnas tabeller. För kopparledare kan alternativt resistansen beräknas som:

$$R = \frac{0,0182}{S} l$$

där S är ledarens area i mm^2 , R är ledarens resistans i Ω/m och l är ledarens längd i m.

För att bestämma kortslutningsströmmen vid jordslutning i motorn M måste man först beräkna impedansen i hela felkretsen, den så kallade slingimpedansen. Slingimpedansen (Z_s) utgörs av yttre nätets impedans $Z_{\text{nät}} = R_{\text{nät}} + jX_{\text{nät}}$ (förimpedansen) samt resistansen i fasledare från huvudcentralen till M ($R_{\text{fas}} = R_{\text{fas1}} + R_{\text{fas2}}$) och i skyddsledare från M till huvudcentralen (R_{PE}).

Fasspänningen U_0 dividerad med slingimpedansen ger värdet på I_K , dvs

$$I_K = \frac{U_0}{Z_{\text{nät}} + R_{\text{fas}} + R_{PE}}$$

EXEMPEL

Nätägaren uppger att kortslutningsströmmen vid anslutningspunkten (huvudcentralen) är 3000 A vid enfasig kortslutning. Motsvarande nätimpedans blir då vid spänningen 230 V:

$$Z_{\text{nät}} = 230 / 3000 = 0,077 \Omega$$

Fasledaren mellan huvud- och undercentralen har arean 6 mm^2 och längden 25 m. Mellan undercentralen och motorn M är arean $2,5 \text{ mm}^2$ och längden 30 m. Skyddsledaren förutsätts ha samma area och samma längd och liksom fasledaren vara av koppar.

Ur en tabell eller ur formeln ovan får vi veta att en kopparledare med arean 6 mm^2 har resistansen $3,03 \text{ m}\Omega/\text{m}$, och med arean $2,5 \text{ mm}^2$ $7,28 \text{ m}\Omega/\text{m}$.

Av detta får vi:

$$R_{\text{fas}} = R_{\text{fas1}} + R_{\text{fas2}} = 25 \times 0,00303 + 30 \times 0,00728 \approx 0,294 \Omega$$

$$R_{\text{PE}} = R_{\text{PE1}} + R_{\text{PE2}} = 25 \times 0,00303 + 30 \times 0,00728 \approx 0,294 \Omega$$

$$Z_{\text{nät}} = 0,077 \Omega \text{ (kan med tillräcklig noggrannhet betraktas som rent resistiv, dvs } Z_{\text{nät}} = R_{\text{nät}})$$

Slingimpedansen blir då summan av delresistanserna:

$$Z_s = 0,077 + 0,294 + 0,294 = 0,665 \Omega$$

Vi ser i detta exempel att det yttre nätets impedans (förimpedansen) bara är en liten del av den totala slingresistansen.

Kortslutningsströmmen I_k blir:

$$I_k = \frac{230}{0,665} = 346 \text{ A}$$

Vi kan nu beräkna beröringsspänningen ΔU mellan M och vattenledningen:

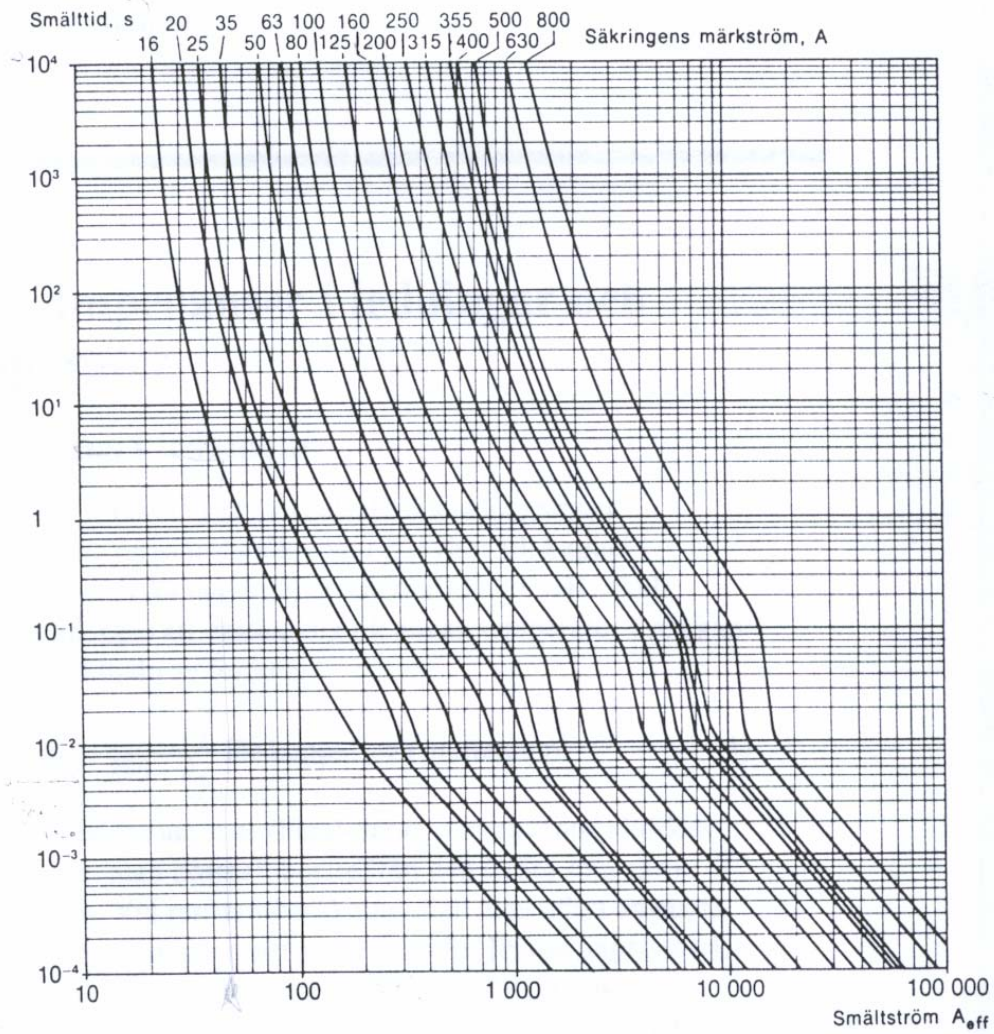
$$\Delta U = I_k \times R_{\text{PE}} = 346 \times 0,294 \approx 102 \text{ V}$$

Beröringsspänningen är således större än 50 V . Eftersom motorn M är en stationär utrustning måste felet enligt grundregeln frångöras inom 5 s . I de allra flesta fall är detta inget problem – i detta fall skall t ex en 32 A säkring lösa ut inom ca $0,4 \text{ s}$.

Om man i undantagsfall inte kan säkerställa att skyddet klarar tiden 5 s , kan man utföra en kompletterande potentialutjämning mellan utsatt del (i detta fall på motorn M) och samtidigt berörbara andra utsatta delar och främmande ledande delar. Alternativt kan man avkorta frångöringstiden, t ex med hjälp av ett känsligare överströmsskydd eller med en jordfelsbrytare, som i detta fall lämpligen kan ha en märkutlösningström på 300 mA .

Även om det inte finns krav på kompletterande potentialutjämning kan det ändå vara en lämplig åtgärd när det finns stor risk för samtidig beröring av föremål där det kan uppstå betydande beröringsspänning. Ett sådant exempel är spis och diskbänk som står nära varandra. I nya bostäder finns emellertid krav på jordfelsbrytare som minimerar även den risken.

Appendix 3: Utlösningstider för knivsäkringar (Elkrafts handboken)



Appendix 4: Teknisk data för distributionstransformatörer (ABB) sida 1(2)

Effekt (kVA)	Uppsida (kV)	Nedsida (V)	Kopplingsgrupp	UK (%)	P ₀ (W)	P _k (W)	Totalvikt (kg)	Oljevikt (kg)	Längd L (mm)	Bredd W (mm)	Höjd H (mm)	Hjulbas D (mm)	Konstruktion
315	11	420	Dyn 11	4,6	550	3250	1180	230	1090	850	1200	670	♦
315	11	420	Dyn 11	4,6	700	4200	1350	260	1200	800	1500	670	♦
500	11	420	Dyn 11	4,3	795	3900	1630	260	1120	850	1420	670	♦
500	11	420	Dyn 11	4,3	860	6400	1670	335	1300	900	1500	670	♦
800	11	420	Dyn 11	5,3	940	6800	2050	315	1520	930	1515	670	♦
800	11	420	Dyn 11	5,3	1120	9600	2100	450	1650	1100	1550	670	♦
1000	11	420	Dyn 11	5,4	1040	8000	2550	410	1590	960	1660	820	♦
1000	11	420	Dyn 11	5,4	1280	10800	2600	485	1800	1200	1700	820	♦
1250	11	420	Dyn 11	5,4	1200	12000	3450	685	1800	1050	1800	820	♦
1250	11	420	Dyn 11	5,4	1420	12800	3200	660	1800	1100	1800	820	♦
1600	11	420	Dyn 11	5,5	1320	14800	3800	790	2050	1100	1900	820	♦
1600	11	420	Dyn 11	5,5	2010	15000	3600	810	2000	1200	2000	820	♦
2000	11	420	Dyn 11	6,1	1650	17300	4700	900	2150	1200	2100	820	♦
2000	11	420	Dyn 11	6,1	2130	19500	4350	900	2200	1400	2100	820	♦
315	22	420	Dyn 11	4,6	550	3250	1300	275	1140	850	1375	670	♦
315	22	420	Dyn 11	4,6	710	4100	1200	295	1150	800	1400	670	♦
500	22	420	Dyn 11	4,3	795	3900	1750	310	1240	850	1505	670	♦
500	22	420	Dyn 11	4,3	1010	6100	1550	415	1100	900	1650	670	♦
800	22	420	Dyn 11	5,3	940	6800	2290	405	1580	920	1580	670	♦
800	22	420	Dyn 11	5,3	1280	7700	2100	495	1500	1000	1700	670	♦
1000	22	420	Dyn 11	5,4	1040	8000	2770	475	1570	870	1680	820	♦
1000	22	420	Dyn 11	5,4	1490	10100	2550	540	1700	1100	1700	820	♦
1250	22	420	Dyn 11	5,4	1200	12000	2800	685	1800	1050	1750	820	♦
1250	22	420	Dyn 11	5,4	1680	11800	2650	640	1800	1100	1800	820	♦
1600	22	420	Dyn 11	5,5	1320	14800	3750	790	1900	1100	1900	820	♦
1600	22	420	Dyn 11	5,5	2050	15000	3600	810	1900	1200	2100	820	♦
2000	22	420	Dyn 11	6,1	1650	17300	4100	925	1900	1200	2100	820	♦
2000	22	420	Dyn 11	6,1	2100	19100	4000	925	1980	1250	2200	820	♦

Konstruktion : 3-fas oljeisolerad Distributionstransformator
 Frekvens : 50 Hz
 Normer : IEC 60076
 Förluster och Uk angivet med toleranser enligt IEC 60076

Isolationsklass : Systemspänning 7,2 kV : 60 – 20 kV
 12 kV : 75 – 28 kV
 17,5 kV : 95 – 38 kV
 24 kV : 125 – 50 kV

Dimensioner och vikter : Approximativa värde angivna

Ytbehandling : Målat utförande (RAL 7033) min 80µm
 Temperaturstegring : 60/65 K (olja / lindning)
 Lindningsmaterial : LSP : Koppar HSP : Koppar

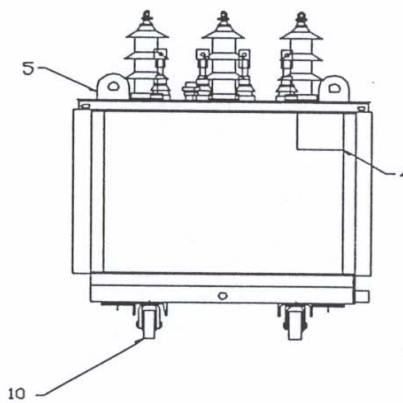
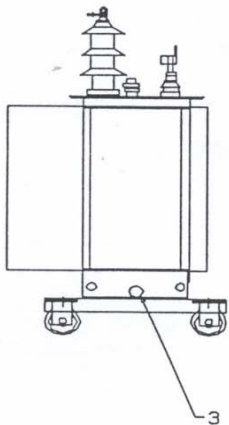
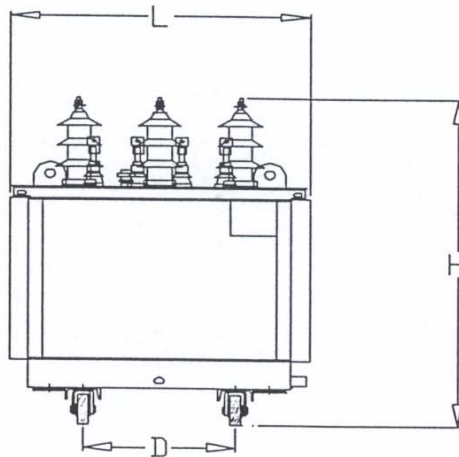
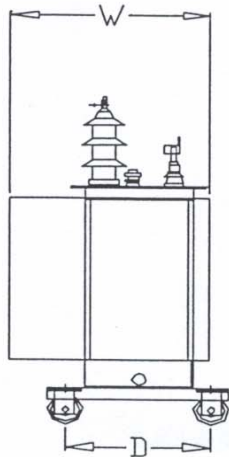
Utrustning som standard : Omsättningskopplare (+-2x2,5%)
 Hög- och lågspänningsgenomföringar enligt DIN 42531 och DIN 42530
 Lyftöglor
 Jordningskruv
 Avtappningskran
 Termometerficka (315 kVA)
 Dubbla termometerfickor (500-2000 kVA)
 Signaltermometer
 Plana hjul (500-2000 kVA)
 Oljenivåindikering
 Nynäs Nytro 10X med inhibitor

Övrig utrustning som tillval : Maximaltermometer AKM 44611 (eller liknande)
 Tryckvakt med 2 kontakter AKM 47500 (eller liknande)
 Övertrycksventil
 Plana omställbara hjul (315 kVA)

♦ Hermetiskt slutet utförande

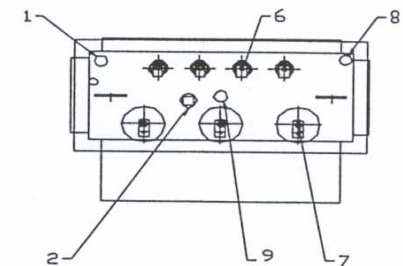


Måttskiss och Tekniska data



- 1) Termometerficka
- 2) Omsättningskopplare
- 3) Avtappningskran
- 4) Märkskylt
- 5) Lyftöglor
- 6) Genomföringar LSP
- 7) Genomföringar HSP
- 8) Fäyllningsrör
- 9) Tryckvakt (optional)
- 10) Plana hjul (optional)

Denna måttskiss är ett exempel på hur transformatorn kan se ut och kan variera mot standardutförande.



Appendix 5:

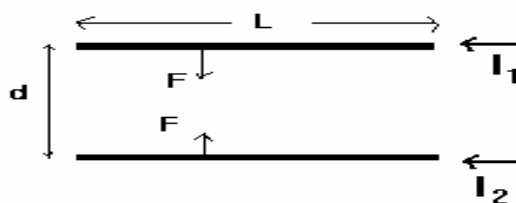
Appendix 5.1 Kraftverkan mellan två ledare

Det finns mekaniska krav på ledningsdragning t ex vid utförandet av åskskydd. Anledningen är att det blir en kraftverkan mellan två långa parallella strömförande ledare enligt ekvation 1-18. Se **Figur 1-20**. Avstånd mellan ledarna anses vara liten jämfört med längden av ledarna. B-fält från ledare 1, som för strömmen I_1 , på avstånd d blir då:

$$B = \mu_0 I_1 / 2 \pi \tilde{d}$$

och kraft verkan mellan ledarna blir:

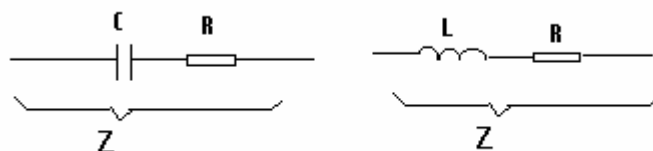
$$F = ((\mu_0 I_1 I_2) / (2 \pi \tilde{d})) * L$$



Figur 1-20 Kraftverkan mellan två parallella ledare

Appendix 5.2 Induktans och frekvens

Vid blixtskydd och andra högfrekventa tillämpningar, talas om impedansen av en ledare och inte bara resistansen. Se Ekvation 1-7. Termen dI/dt blir så stor att RI är nästan försumbar. Sambandet mellan impedans Z , induktans L , resistans R och frekvens f blir är:



$$Z_{total} = \sqrt{(2\pi fL)^2 + R^2}$$

Jordningssystemet ska konstrueras så att jordströmmar ledas till jord med minsta möjliga spänningsfall med andra ord ska impedansen minimeras. För att minska impedansen Z_{total} kan L , R eller frekvensen minskas enligt e

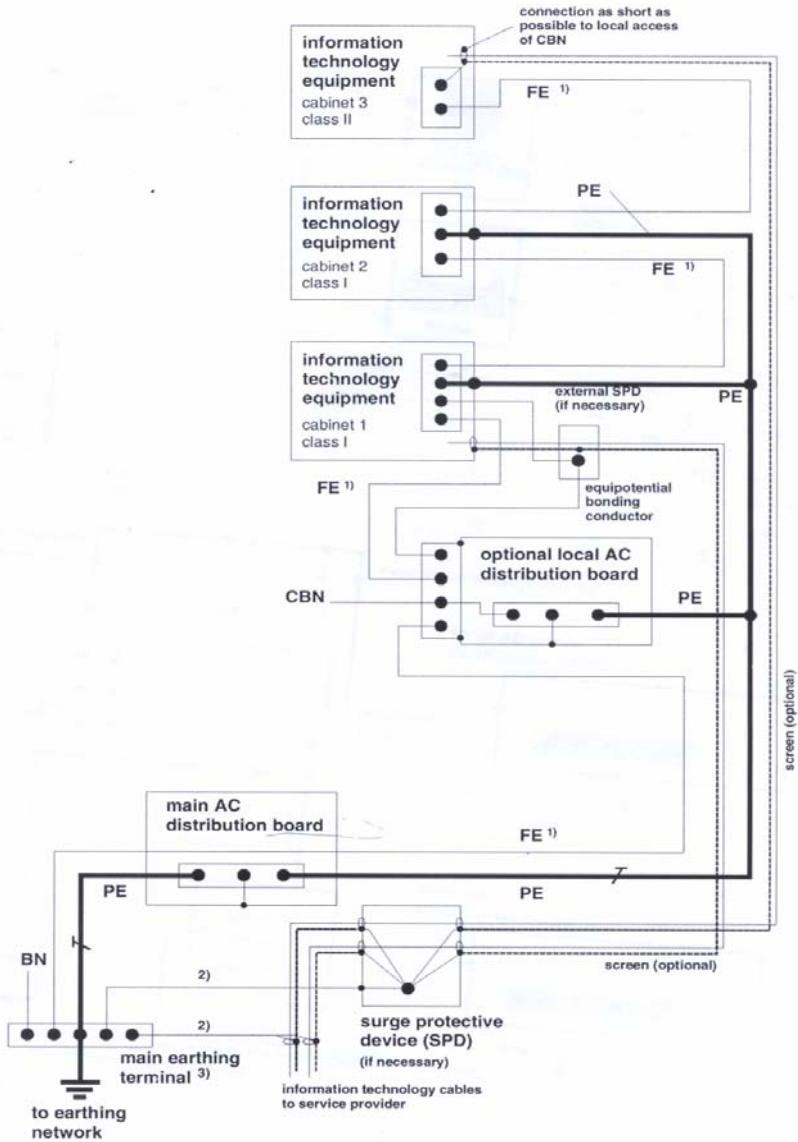
Appendix 5.3 Kapacitans och frekvens

En kondensators impedans är också frekvensberoende enligt:

$$Z_{total} = \sqrt{\frac{1}{(2\pi fC)^2} + R^2}$$

Vid ökad frekvens f eller ökad kapacitans C , blir totala impedansen Z_{total} mindre.

Appendix 6:1 Exempel på potentialutjämningsystem i byggnader (enligt europeisk Standard EN 50310:2000)



- 1) Optional for equipment using earth return signalling.
- 2) Low impedance path; keep as short as possible (see 5.2).
- 3) The main earthing terminal (MET) may be located in the main AC distribution board.

Figure 2 - Example of a common bonding network (CBN) configuration for an information technology installation inside a building

Appendix 6:2 Exempel på potentialutjämningsystem i byggnader (enligt Europeisk Standard EN 50310:2000)

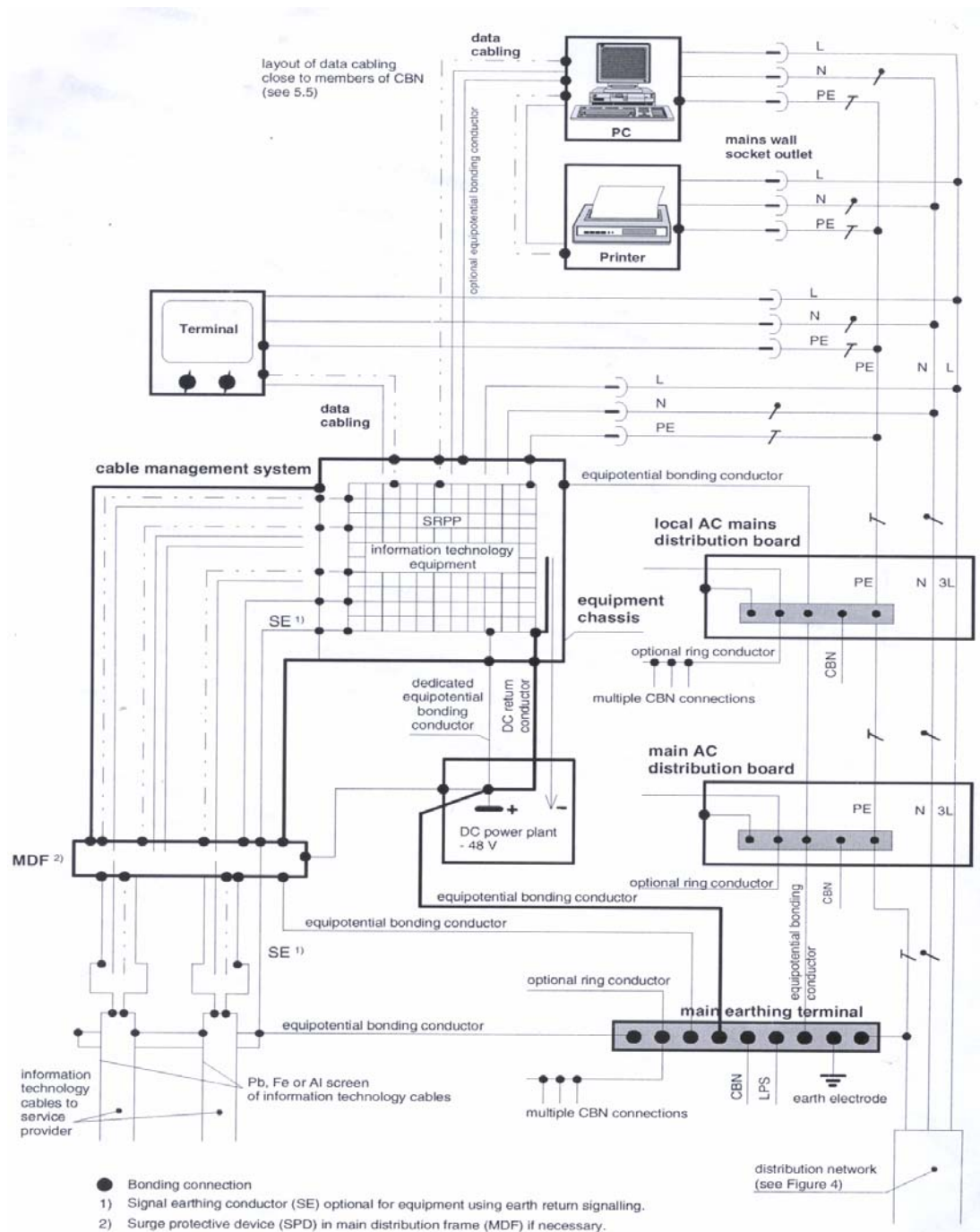


Figure 3 - Example of an improved bonding network (CBN/MESH-BN) installation inside a building

Appendix 6:3 Exempel på potentialutjämningsystem i byggnader (enligt Europeisk Standard EN 50310:2000)

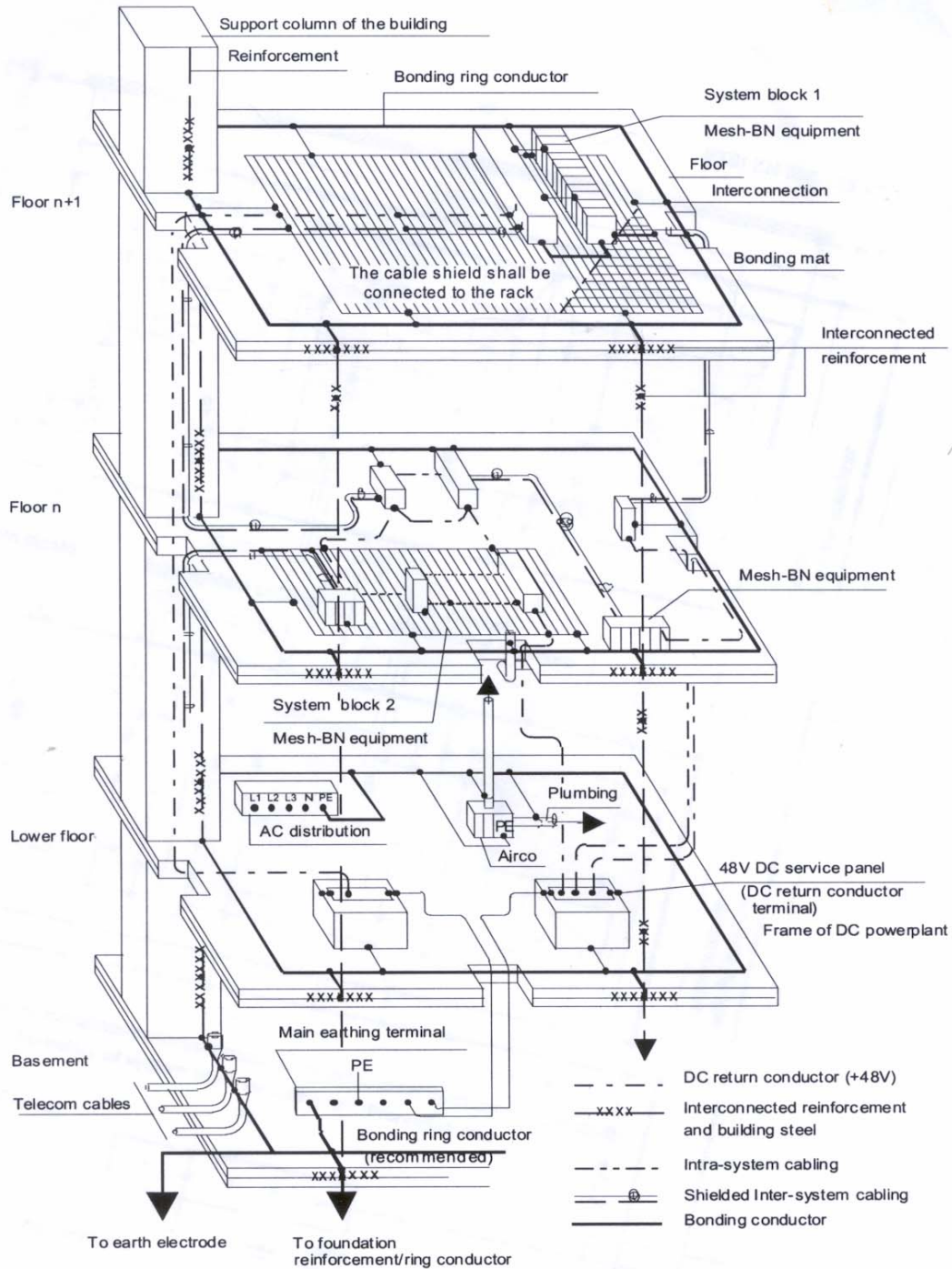


Figure 1: Example of a CBN/MESH-BN installation inside a telecommunication building

Appendix 7 : Impedans för transmissionsledningar

(Föreläsning anteckningar, Malmöhögskolan)

Impedansen för en dataledning kan skrivas som: $Z_0 = \sqrt{(\ell/c)}$ där ℓ är induktans per meter och c är kapacitans per meter för kabeln.

Om källan är sinusformad, fås sinusformade vågor som reflekteras fram (f) och tillbaka (R) i kabeln. Detta kan skrivas som en våg åt höger och en våg åt vänster. Totala spänningen är summan av dessa enligt:

$$U = U_{mf} \cos(\omega(t - x/v) + \alpha_F) + U_{mR} \cos(\omega(t - x/v) + \alpha_R) \quad (1)$$

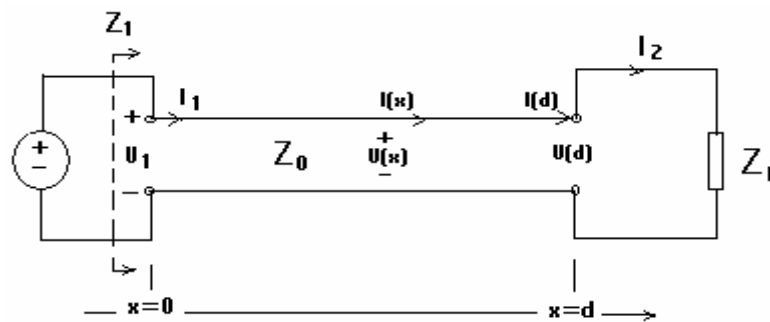
där ω är vinkelfrekvensen för signalen, t är tiden, x är avståndet enligt figuren, v är vågens hastighet och α är fasen.

Om $\beta = \text{faskonstanten} = \omega/v$ då kan ekvation (1) skrivas om:

$$U = U_{mf} \cos(\omega t - \beta x + \alpha_F) + U_{mR} \cos(\omega t + \beta x + \alpha_R) \quad (2)$$

För varje tidpunkt t ex $t = 0$, fås en sinusfunktion fast den är beroende på x . Ekvation (2) visar att βx ändrar sig 2π för en våglängd och upprepas igen. Alltså: $\beta \lambda = 2\pi$

$$\Leftrightarrow \lambda = 2\pi / \beta = 2\pi / (\omega / v) = 2\pi / (2\pi f / v) = v / f$$



Se figuren. Impedansen $Z_1 = U_1 / I_1$ är intressant. Z_1 kan räknas med hjälp av formeln: (för härledning se t ex)

$$Z_1 = Z_0 * ((Z_L + j Z_0 \tan \beta d) / (Z_0 + j Z_L \tan \beta d)) \quad (3)$$

- Om $Z_L = Z_0$ ger insättning i ekvation (3) $\Rightarrow Z_1 = Z_0 = Z_{\text{anpassning}}$. För att förhindra vågen att studsas fram och tillbaks i kabeln ska anpassning ordnas.

- Om $Z_L = 0$ det vill säga kortslutning vid lasten. Insättning i ekvation (3) ger \Rightarrow

$$Z_1 = Z_k = j Z_0 \tan \beta d = j Z_0 \tan (2\pi d / \lambda)$$

$$Z_1 = Z_k = 0 \text{ Det vill säga inga förluster när } d = n (\lambda / 2) \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots$$

$$Z_1 = Z_k = \pm j\infty \text{ när } d = (\lambda / 4) + n (2\lambda / 4) \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots$$

Vid signaljordning är ju ledningarna kortslutna i ena ändan och när längden på jordanslutningar är udda multiplar av kvartsvåglängden, kan impedansen för ledningen Z_1 bli jätte stor enligt ovan.

Referenser

1. Svenska Elektrotekniska Normer, Svensk Standard
2. Starkströmsföreskrifterna Elsäkerhetsverket 1999:5
3. Svenska Elektriska Kommissionen, SEK, www.elsak.se
4. Starkströmshandboken 1999:5
5. Magnetfält i kontorsmiljö, Fransson & Hamnerius
6. Boverket, Förbättrad elmiljö, åtgärder för minska elektriska och magnetiska fält, 1998
7. Boverket, elmiljö från början, 1998,
8. Novum potentialutjämningsguiden, www.abnovum.se
9. Yngve Hamnerius AB
10. Arbetsmiljöinstitutet, Reduktion av lågfrekventa magnetiska fält
11. Elrond komponent AB, www.elrond.se
12. ABB control-skolan, www.sifu.se
13. Kraftledningar, hälsa och miljö, forskning och kunskapsläge, 1994
14. Elektriska och magnetiska fält, AB Ångpanneföreningens informationssamling
15. ABB handbok, industri, 1992
16. Elektriska och magnetiska fält, Elinstallatören 12/92, 1/93, 2/93
17. Byggnadsstyrelsens informationer, 1992
18. STF kursverksamheten
19. Svenska Elverksförening, Råd och anvisningar för att reducera magnetiska fält i befintliga nätstationer
20. Byggnadsstyrelsens informationer, Magnetiska och elektriska fält i kontorsmiljö, 1992
21. Elkraft Handboken, 1997
22. Några tankar kring elöverkänslighet och bildskärmskada, Karolinska Institutet, 1991
23. Uppsala Universitet, www.hvi.uu.se
24. Kursboken Elanläggningsteknik, Malmö Högskola
25. J&W Systems, intern utbildning
26. ArbetsLivsInstitutets hemsida (A.L.I.)
27. National Radiological Protection Board (NRPB England)
28. International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP)
29. Noise Reduction Techniques In Electronic systems, Henry W. Ott
30. An Introduction to Applied Electromagnetism, Christos Christopoulos
31. Field and Wave Electromagnetics David K.Cheng
32. Electromagnetic Theory, John D Kraus, Fourth Edition
33. Combinovas field detector, användarmanual
34. www.ieee.org
35. www.ssi.se
36. www.niehs.nih.gov
37. www.enviromento.se
38. www.elmagn.chalmers.se
39. www.ev.siemens.de
40. www.abb.se
41. www.boverket.se
42. www.corrosion-dectors.org