

Jan Carlsson

# Kartläggning av EM-spektrat i frekvensområdet 1-20 GHz

## Abstract

# Survey of the EM-spectra in the frequency range 1 - 20 GHz

This report gives an overview of electric field strengths at public places in the microwave range 1 - 20 GHz both existing and expected in the future. The field strengths are calculated from output power of microwave transmitting systems in Sweden. In order to show the necessity of radiated susceptibility tests also for microwaves the effects of high frequency disturbances on electronics is discussed.

As a result of the ever increasing use of electronic systems, radiated susceptibility tests are becoming more and more important. Computers and other electronic devices are used to control many different functions in the industry and other parts of our society. Some of these control systems work without supervision and malfunctions due to electromagnetic disturbances could be disastrous.

A number of standards, national as well as international, describe general methods for testing and set limit values applicable when evaluating electronics under the influence of electromagnetic disturbances. The civilian standards, however, only deal with radiated electromagnetic disturbances in the frequency range up to 500 MHz [1]. Extension of the frequency range up to 1 GHz is discussed and a proposal for testing at 2.45 GHz (microwave ovens) was recently presented. The military standards on the other hand, describe test methods [2] and give limit values [3] all the way up to 40 GHz. The limit values given in the military standard MIL-STD-461 are chosen from the expected levels within a system. The limit values will therefore not represent the field strengths for a whole system due to external sources.

Key words : Electromagnetic compatibility, EMC, Electromagnetic disturbances, Electromagnetic environment, EME, Electromagnetic interference, EMI, Electromagnetic radiation, EMR, Radio frequency interference, RFI.

SP  
SP RAPPORT 1991:15  
ISBN 91-7848-270-4  
ISSN 0284-5172  
Borås 1991

Swedish National Testing and  
Research Institute  
SP REPORT 1991:15

Postal address:  
Box 857, S-501 15 BORÅS,  
Sweden  
Telephone + 46 33 16 50 00  
Telex 36252 Testing S  
Telefax + 46 33 13 55 02

# Innehållsförteckning

	<b>Abstract</b>	<b>2</b>
	<b>Innehållsförteckning</b>	<b>3</b>
	<b>Förord</b>	<b>4</b>
	<b>Sammanfattning</b>	<b>5</b>
<b>1</b>	<b>Inledning</b>	<b>7</b>
1.1	Bakgrund	7
1.2	Elmiljö	7
1.3	Stränghetsnivåer	7
<b>2</b>	<b>Effekter på elektronik</b>	<b>9</b>
2.1	Inträngning	9
2.2	Direkt respons	9
2.3	Likriktning - Demodulering	9
2.4	Uppvärmning	10
<b>3</b>	<b>Störkällor i mikrovågsområdet</b>	<b>11</b>
3.1	Användningsområde, förekomst	11
3.2	Modulation	12
3.3	Antenner	13
3.4	Mikrovågskällor	16
3.5	Frekvenser och effektnivåer	18
<b>4</b>	<b>Fältstyrkor i omgivningen</b>	<b>21</b>
4.1	Beräkningar	21
4.2	Beräkningsmodeller för fjärfält	21
4.3	Beräknade fältstyrkor i fjärfältet	21
4.4	Beräkningsmodeller för närfält	28
4.4.1	Närfält från rektangulär aperturantenn	28
4.4.2	Närfält från cirkulär aperturantenn	30
4.5	Beräknade fältstyrkor i närfältet	32
<b>5</b>	<b>Stränghetsnivåer för olika system</b>	<b>36</b>
<b>6</b>	<b>Slutsatser - Rekommendationer</b>	<b>39</b>
<b>7</b>	<b>Referenser</b>	<b>40</b>

## Förord

Provning av tålighet mot elektromagnetiska störningar blir, på grund av den ökande användningen av elektronik, alltmer viktig. Datorer och annan elektronisk utrustning används för att styra många olika funktioner i industrin och övriga samhället. En del av dessa styrsystem arbetar utan mänsklig övervakning vilket gör att funktionsstörningar exempelvis orsakade av elektromagnetiska störningar kan få katastrofala följder.

Ett antal olika normer och standarder, både nationella och internationella, beskriver generella provningsmetoder och anger stränghetsnivåer för att kunna utvärdera att en utrustning fungerar tillfredsställande under påverkan av elektromagnetiska störningar. De civila normer som behandlar tålighetsprovning med elektromagnetiska fält avser för närvarande endast frekvenser upptill 500 MHz [1]. En utökning av frekvensområdet upptill 1 GHz diskuteras, dessutom finns ett förslag på standard för provning vid frekvensen 2.45 GHz (mikrovågsugnar). Militära standarder däremot beskriver metoder [2] och anger stränghetsnivåer [3] för frekvenser ända upptill 40 GHz. De stränghetsnivåer som anges i den militära standarden MIL-STD-461 är dock valda med utgångspunkt från förväntade fältstyrkor inom ett system. Stränghetsnivåerna beskriver alltså inte på ett bra sätt de fältstyrkor som systemet kan bli utsatt för orsakade av externa störcällor.

## Sammanfattning

Rapporten ger en översikt av fältstyrkenivåer på allmänna platser i mikrovågsområdet 1 - 20 GHz som existerar eller förväntas existera i framtiden. Fältstyrkan som funktion av avståndet från mikrovågskällan har beräknats för både närfälts och fjärrfälts förhållanden. Dessa beräkningar har gjorts med utgångspunkt i en sammanställning av de olika mikrovågssystem som används eller kommer att användas i en framtid. Sammanställningen omfattar både civila och militära system som används eller kommer att användas i Sverige.

De beräknade fältstyrkenivåerna används sedan som underlag för en bestämning av lämpliga stränghetsnivåer för olika elektroniska system. Stränghetsnivåerna har bestämts genom att de elektroniska systemen indelas i olika kategorier utgående från deras användningsområden. De olika kategoriernas minsta avstånd till de behandlade mikrovågskällorna har sedan bedömts för att kunna göra en bestämning av den maximala fältstyrkan. Den kategoriindelning och de minsta avstånd som anges i denna rapport bygger inte på några säkerhetsbedömningar. Därför skall indelningen endast ses som ett exempel för att belysa principen.

För att skapa förståelse för varför det är viktigt att beakta elektromagnetiska störningar även för mikrovågsfrekvenser diskuteras dessutom hur högfrekventa signaler kan påverka elektronik.



# 1 Inledning

## 1.1 Bakgrund

Användningen av datorer och annan elektronisk utrustning har under senare år ökat drastiskt. Automatisering av styrsystem och olika typer av säkerhetssystem blir allt vanligare. Samtidigt som de datoriserade systemen växer i antal blir deras uppgifter alltmer komplexa. I fler och fler applikationer lämnas de elektroniska systemen helt eller delvis utan mänsklig övervakning. Detta medför att allt större krav ställs på utrustningarnas förmåga att fungera normalt även under olika typer av påfrestningar. Med påfrestningar menas i detta sammanhang olika typer av miljöpåkänningar, mekaniska, termiska och elektriska, som en utrustning kan komma att utsättas för under sin livstid. Fortsättningsvis kommer i denna rapport endast den elektriska miljöpåkänningen i form av strålade elektromagnetiska fält i frekvensområdet 1 - 20 GHz att behandlas. Anledningen till det begränsade frekvensområdet 1 - 20 GHz är att det finns många utrustningar som avger höga effekter i detta frekvensområde. Dessutom finns det, än så länge, få utrustningar som arbetar med frekvenser över 20 GHz. Ytterligare en anledning är avsaknaden av normer med relevanta stränghetsnivåer för provning av hela system för det aktuella frekvensområdet.

## 1.2 Elmiljö

Ett ofta använt begrepp då man talar om elektrisk miljö är Electromagnetic Compatibility, EMC. Den svenska översättningen skulle ungefär bli Elektromagnetisk Förenlighet. EMC definieras av IEC (International Electrical Commission) som : " en utrustnings förmåga att fungera tillfredsställande i sin elektromagnetiska miljö utan att introducera icke tolererbara störningar till miljön eller annan utrustning ".

För att visa en utrustnings förmåga att fungera i den avsedda elektromagnetiska miljön, dvs visa egenskapen EMC, genomförs normalt fyra olika typer av provningar. Dessa provningar omfattar ledningsbundna och strålade störningar med avseende på såväl avgivna störningar som tålighet mot utifrån kommande störningar.

Ett annat vanligt begrepp är Electromagnetic Interference, EMI. Definitionen är : " prestationssänkning, felaktig funktion eller driftavbrott i elektrisk utrustning orsakad av en elektromagnetisk störning ". EMI definierar ett tillstånd hos den provade utrustningen och alltså inte, vilket ofta felaktigt antas, den störande signalen.

## 1.3 Stränghetsnivåer

Vid provning för att visa egenskapen EMC hos en utrustning utförs bland annat tålighetsprovning med strålat elektromagnetiskt fält. Vid sådan provning är det viktigt att provningssträngheten, dvs fältstyrkan, svarar mot ett förväntat verkligt fall. Provar man med för låga nivåer ger resultatet inget svar på om utrustningen kommer att fungera tillfredsställande i den slutliga installationen. Om man å andra sidan provar med för höga nivåer innebär de eventuella skyddsåtgärder (filter l.d.) som måste vidtas på provningsobjektet att konstruktionen inte blir optimal, utrustningen blir med andra ord för bra (och dyr). Givetvis gäller som vid all annan provning att stränghetsnivån skall vara "väl tilltagen" så att en viss säkerhetsmarginal tillgodoses.

För att kunna välja rätt stränghetsnivå för en viss utrustning måste man alltså ha kännedom om den verkliga miljön den kommer att utsättas för. Det naturligaste, men samtidigt det mest tidsödande, sättet att bestämma elmiljön är att genomföra mätningar. För att resultatet skall bli generellt måste mätningarna utföras på många olika platser under en längre tid på varje plats, detta för att man med viss säkerhet skall kunna detektera de högsta nivåerna. Om man dessutom skall täcka in hela frekvensområdet 1 - 20 GHz inses att det blir en hel del data att bearbeta.

Ett annat och betydligt mer lätt framkomligt sätt att bestämma elmiljön i omgivningen är att titta på vilka typer av utrustningar som avger signaler i det aktuella frekvensområdet och sedan utgående från dessa räkna ut nivåerna. Antalet utrustningar som avger signaler med frekvenser 1 - 20 GHz är begränsat och de data som behövs för en uträkning av fältstyrkan är i allmänhet tillgänglig från tillverkaren eller användaren.

Förutom att beräkningar av fältstyrkor i omgivningen är den mest lätt framkomliga vägen erbjuder metoden också möjligheten att räkna på planerade framtida system. Beroende på dessa båda fakta är innehållet i denna rapport uppbyggt kring metoden att beräkna fältstyrkorna i omgivningen.



## 2 Effekter på elektronik

Trots att elektronik normalt inte arbetar med frekvenser i mikrovågsområdet kan funktionen påverkas av störningar i detta frekvensområde. De högfrekventa signalerna letar sig genom även små hål och slitsar in till elektroniken där ett par olika fenomen gör att funktionen kan påverkas.

### 2.1 Inträngning

Som en mycket grov förenkling kan dämpningen genom en apertur i en metallvägg anses vara nära noll då aperturens största dimension uppgår till halva våglängden. Dämpningen kan sedan anses vara direkt proportionell mot våglängden varför en ökning av våglängden, dvs en minskning av frekvensen, ger en ökande dämpning. Det aktuella frekvensområdet, 1 - 20 GHz, motsvarar våglängderna 1.5 - 30 cm vilket tillsammans med ovanstående resonemang gör att även metalliska elektronikboxar med relativt små aperturer ger ett dåligt skydd mot högfrekventa elektromagnetiska fält. Innebörden är alltså att elektronik som kan anses vara väl avskärmd mot elektromagnetiska fält med låga frekvenser ger ett dåligt eller till och med obefintligt skydd mot störningar i mikrovågsområdet. I olyckliga fall kan en metallisk låda med en apertur fungera som en resonanskavitet som exciteras av ett yttre elektromagnetiskt fält genom aperturen. I ett sådant fall kan det till och med vara bättre utan lådan. Normalt hjälper dock en metalllåda hur dåligt utförd den än är.

### 2.2 Direkt respons

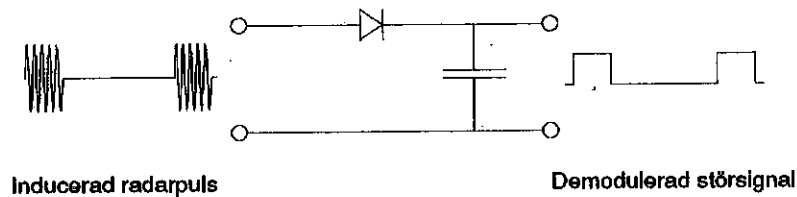
Med direkt respons avses att den störande signalen ligger i samma frekvensområde som nyttosignalen. Detta gör att störsignalen kan uppfattas som en riktig signal med felfunktion som följd. Konventionell elektronik arbetar inte, åtminstone inte ännu, med frekvenser i gigahertz-området. Detta innebär att systemen oftast är relativt okänsliga för direkt påverkan av signaler i detta frekvensområde. Strävan efter allt snabbare elektronik gör dock att även den direkta påverkan på lite längre sikt kan bli intressant. Elektroniska system som arbetar med frekvenser i mikrovågsområdet, t.ex. kommunikationsutrustningar, är givetvis känsliga för störande signaler som ligger i samma frekvensområde som den använda nyttosignalen. Inkopplingsvägen är för sådana system oftast via antennen.

### 2.3 Likriktning - demodulering

Alla elektronikutrustningar innehåller någon form av olinjära komponenter, dioder, transistorer, olika former av olinjära transientskydd osv. Utrustningar som inte har några olinjära komponenter på kretsschemat kan ändå innehålla omedvetna olinjära komponenter i form av parasitdioder. Sådana parasitiska dioder uppstår bland annat i oxidskikt. Olinjära komponenter åstadkommer en likriktning av den högfrekventa störsignalen som tillsammans med parasitiska kapacitanser ger en likspänningsoffset. Denna offsetspänning kan påverka elektroniken genom att komponenter blir förspända, i extrema fall kan offsetspänningen bli så stor att komponenter till och med förstörs.

Om den högfrekventa signalen är modulerad kan de olinjära komponenterna åstadkomma en demodulering av signalen vilket ger, för fallet pulsmodulation (figur 1), en störsignal i form av ett pulståg. Pulståget kan av elektronikretsar uppfattas som en klocksignal med

felfunktion som följd. Detta är troligen den vanligaste orsaken till felfunktion hos elektronik orsakad av högfrekventa elektromagnetiska fält.



Figur 1. Exempel på demodulering av inducerad radarpuls.

## 2.4 Uppvärmning

Då en elektronikkomponent bestrålas med mikrovågor kommer den att uppvärmas på grund av dielektriska och resistiva effektförluster. Värmehöjningen i komponenten gör att karakteristiken ändras vilket kan få till följd att elektroniksystemets funktion påverkas. I extrema fall kan till och med uppvärmningen bli så stor att komponenter förstörs. För att detta fenomen skall kunna påverka normal elektronik krävs att effekttätheten, och därmed fältstyrkan, är hög i det pålagda elektromagnetiska fältet. Effektförlusten i ett icke magnetiskt material kan skrivas [5] :

$$P_d = \int \int \int (\sigma + \omega \epsilon'') |E|^2 dV \quad (1)$$

Där :  
 $P_d$  = effektförlust, [W]  
 $\sigma$  = elektrisk ledningsförmåga, [ohm/m]  
 $\omega$  = vinkelfrekvens =  $2\pi f$ , [rad/s]  
 $\epsilon''$  = dielektrisk förlustfaktor, [F/m]  
 $E$  = elektrisk fältstyrka inuti materialet, [V/m]

Observera att  $E$ :et i formeln representerar det elektriska fältet inuti den aktuella kroppen, detta värden skiljer sig normalt från det infallande fältet. Av formeln kan man se att förlusterna ökar med frekvensen förutsatt att  $\epsilon''$  inte minskar lika fort som frekvensen ökar (i vissa material ökar till och med  $\epsilon''$  med frekvensen). Även om  $\epsilon''$  är liten, vilket den normalt är, kommer vid höga frekvenser effektförlusten inte att vara försumbar, dvs vi får en temperaturhöjning.

### 3 Störkällor i mikrovågsområdet

De olika typer av utrustningar som arbetar med frekvenser över 1 GHz är radaranläggningar, mikrovågslänkar för dataöverföring, vissa typer av kommunikations- och mätutrustningar. Nedan diskuteras dessa utrustningars förekomst och på vilket sätt de eventuellt kan utgöra ett störningshot mot elektronik.

#### 3.1 Användningsområde, förekomst

Flygplatser utgör en av de mest "radar-intensiva" platserna. Där förekommer radarsystem i form av väderradar och olika typer av övervakningsradar. Övervakningsradar finns dels för övervakning av flygplan i luften och dels för övervakning av flygplan och fordon på marken. Detta innebär att exempelvis markfordon utsättes för direkt strålning av högfrekventa signaler från de så kallade markradaranläggningarna. Väderradarn och övervakningsradarn för flygplan i luften riktas däremot inte mot marken. En viss del av effekten strålar dock även i de så kallade sidloberna, vars strålningsriktning är mot bland annat marken. Även i detta fall kommer alltså markfordon att utsättas för högfrekventa signaler. Eftersom väder- och luftövervakningsradar normalt har en betydligt högre sändeffekt än markradarn kan effekttätheten på marknivå bli i samma storleksordning för de båda fallen. Ofta är luftövervaknings- och väder- radarn placerade ett flertal kilometer från själva flygplatsen.

Fartygsradar kan även utgöra ett hot för utrustningar i land, förutom att den givetvis utgör ett hot mot elektronik ombord på fartyget. Radarn är nämligen ofta i drift då fartyget kör under broar, lägger till vid kaj eller liknande situationer i närheten av landbaserade utrustningar.

Ett framtida hot utgörs av de radarsystem som nu provas för bilar. Dessa system sitter monterade i fronten på fordonen och är till för att varna för "krocksituationer" och liknande.

Polisens radarsystem som används vid hastighetsövervakning kan trots sin låga uteffekt (mW) utgöra ett hot mot annan elektronik beroende på att avståndet till radarn i vissa fall kan vara litet.

Mikrovågslänkar för telefon och dataöverföring används där det inte är praktiskt eller ekonomiskt försvarbart att dra ledningar. Normalt innebär detta att mikrovågslänkar används i otillgänglig terräng, över vattendrag eller liknande. Om man dessutom beaktar att sändeffekten är relativt låg samt att elektronisk utrustning som kan tänkas bli störd endast förekommer i sidloberna, inses att mikrovågslänkar normalt inte utgör något hot mot elektronik.

Larm och övervakningsutrustningar av olika slag utgör inte något potentiellt hot mot elektronik eftersom uteffekten är låg. Samma resonemang gäller också för dörröppnare som exempelvis återfinns i varuhus.

Mikrovågsgunnar arbetar vid frekvensen 2.45 GHz men läckfälten från dessa är låga varför inte heller de normalt utgör något hot mot elektronik.

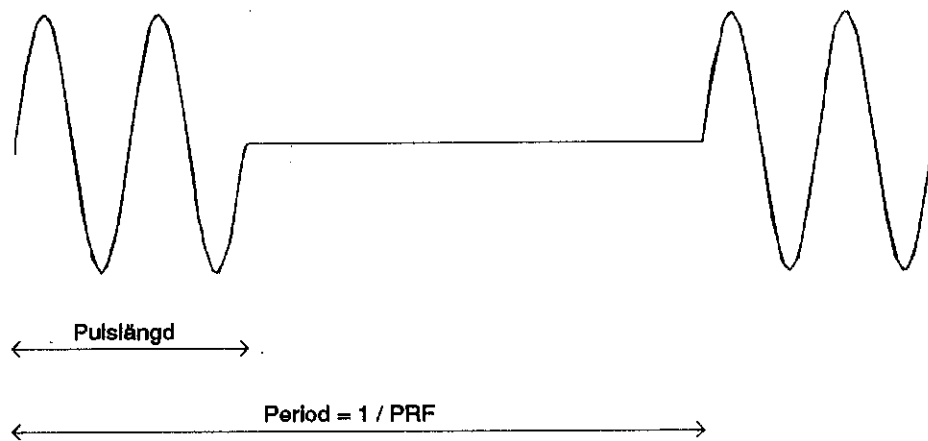
Framtida trådlösa telefoner kommer också att arbeta i frekvensområdet över 1 GHz, DECT (Digital European Cordless Telecommunication) 1.88 - 1.90 GHz enligt kommande standard från 1992 [4]. Uteffekten från både själva telefonen och

basstationerna kommer att bli låg. Risken utgörs dock av att elektronikutrustningar kan komma att befinna sig väldigt nära (någon meter) den sändande antennen.

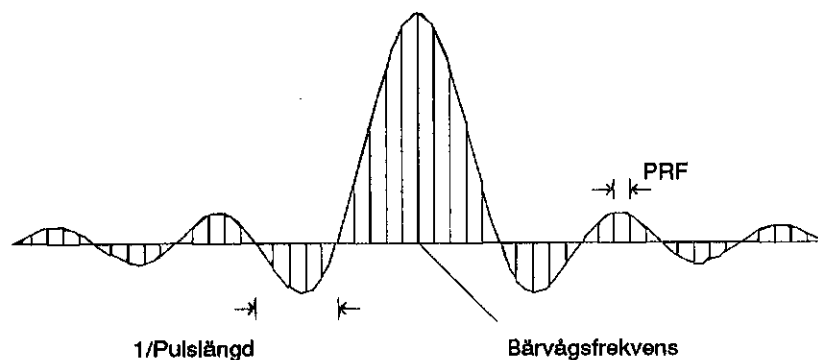
Satellitkommunikation utförs också med signaler i mikrovågsområdet men antalet markstationer som skulle kunna tänkas utgöra ett hot för annan elektronik är litet. Dessutom är strålningen väl riktad mot satelliten och sändeffekten är relativt liten, åtminstone i jämförelse med radarstationer. Sammantaget kan alltså satellitkommunikationsutrustning anses vara ofarlig för normal elektronik.

## 3.2 Modulation

De flesta system som diskuteras i föregående avsnitt avger en högfrekvent signal som är modulerad på ett eller annat sätt. Vanligen är modulationssättet så kallad pulsmodulation. Med detta avses att bärvågen, som utgörs av en högfrekvent sinussignal, "sätts på" och "stängs av" under korta tidintervall, se figur 2. Om man tittar på signalen i frekvensplanet medför moduleringen att spektrat blir breddat kring bärvågsfrekvensen, se figur 3.



Figur 2. Pulsmodulering av sinussignal, i tidplanet.



Figur 3. Pulsmodulering av sinussignal, i frekvensplanet.

Om pulslängden är liten och pulsrepetitionsfrekvensen, PRF:en, är låg kan toppeffekten under själva pulsningen vara hög trots att medeleffekten under en hel period är ganska

låg. Man kan alltså uppnå höga toppeffektstätheter, och därmed höga toppfältstyrkor, med relativt lågenergikrävande sändare. Detta innebär samtidigt att räckvidden blir lång.

Den vanligaste typen av modulation i moderna radarsystem utgörs av pulsmodulation, det förekommer dock i enklare radarsystem att man använder sig av en kontinuerlig omodulerad signal, s.k. CW-radar. Dessa radarsystem är enkla och billiga samt erbjuder en måttlig uteffekt. En annan modulationstyp som också förekommer i radarsystem är frekvensmodulation, FM. Denna modulationstyp används främst i små lätta system med en måttlig uteffekt.

MIKROVÅGSSYSTEM	MODULATIONSTYP
Civila radarsystem	Puls (FM, CW)
Militära radarsystem	Puls
Polisens radar	FM
Larm, övervakningssystem	CW, FM
Mikrovågslänkar	Puls, FM
DECT	Puls (olika pulstid för handmodul och basstation)
Satellitkommunikation	Puls, FM

Tabell 1. Exempel på modulationstyp för olika mikrovågssystem.

### 3.3 Antenner

Antenner som används i radarsystem är parabolantennar, hornantennar och slitsvågledarantennar. Samtliga dessa antenner tillhör familjen aperturantennar. En av deras viktigaste egenskaper är förmågan att fokusera strålningen i en viss riktning.

I mikrovågslänkar används så gott som uteslutande parabolantennar, främst beroende på deras goda förmåga att fokusera strålningen.

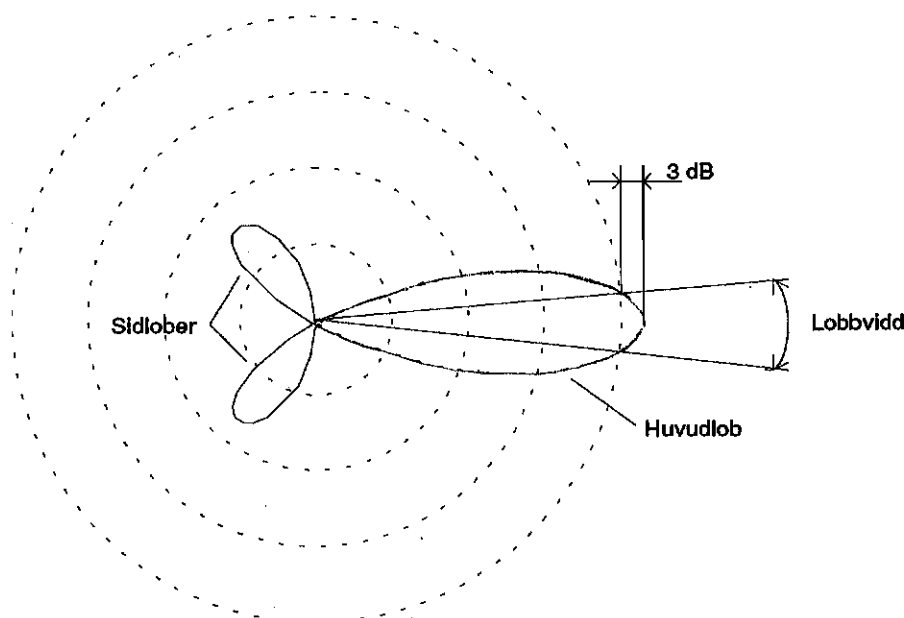
För de framtida telefonsystemen kommer olika typer av rundstrålande antenntyper att användas, för de handhållna telefonerna kommer någon form av dipolantenn troligen att användas.

Antennens uppgift är att på ett så effektivt sätt som möjligt överföra effekten från sändaren till det omgivande mediet (luften). Den parameter som beskriver denna egenskap är antennvinsten, ofta används även ordet antennförstärkning. Antennvinsten definieras för en given riktning som förhållandet mellan den effekt som behövs för en rundstrålande (isotrop) antenn och den effekt som behövs för den aktuella antennen, under förutsättningen samma effekttäthet i den aktuella riktningen. Antennvinsten anges ofta i decibel, dBi, där indexet "i" betecknar jämförelsen med en idealiskt rundstrålande, isotrop, antenn. Sambandet mellan den numeriska antennvinsten och antennvinsten uttryckt i decibel är :  $G_{\text{dBi}} = 10\text{Log}(G_{\text{numerisk}})$ . Antennvinsten är riktningberoende och presenteras ofta i ett så kallat antenndiagram, figur 4. Diagrammet representerar ett snitt av den tredimensionella effektfördelningen, vanligen i fjärrfältet. De olika delarna av effektfördelningen i antenndiagrammet kallas lobber och brukar indelas i huvudlob och sidlobber, även backlobber kan förekomma. Lobvidden definieras som den vinkel vid vilken effekttätheten sjunkit till hälften (3 dB), vanligen refereras lobvidden till huvudloben. Sidlobundertryckning definieras som förhållandet mellan maximala effekttätheten i huvudloben och i den aktuella sidloben.

För många praktiska antenner gäller följande enkla approximativa samband mellan antennvinsten och lobvidderna [6].

$$G \approx \frac{30000}{\Theta_{3B} \Theta_{3H}}, \quad \Theta_3 \approx \frac{70\lambda}{D} \quad (2)$$

Där :  
 $G$  = antennvinst, [ggr]  
 $\Theta_{3B}, \Theta_{3H}$  = 3 dB lobvidd i bredd respektive höjd, [grader]  
 $\lambda$  = våglängden, [m]  
 $D$  = antennens dimension (bredd resp. höjd), [m]

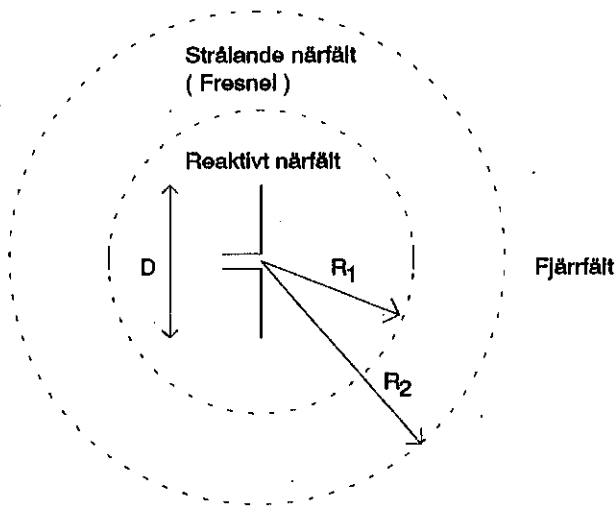


Figur 4. Exempel på antenndiagram för en enkel antenn. De streckade cirklarna representerar lika effektnivåer.

Området kring en antenn brukar indelas i tre regioner beroende på fältstrukturen i respektive område. Regionerna är : reaktiva närfältet, strålande närfältet (Fresnel) och fjärrfältet (Fraunhofer), figur 5.

De olika regionerna karakteriseras av :

- Reaktiva närfältet :** Området närmast antennen där de reaktiva fältkomponenterna dominerar.
- Strålande närfältet :** Området mellan reaktiva närfältet och fjärrfältet där de strålande fältkomponenterna dominerar och de radiella fältkomponenterna är betydande. Om antennens dimensioner är mycket mindre än våglängden existerar inte detta område.
- Fjärrfältet :** I detta område är fältkomponenterna vinkelräta mot varandra och mot utbredningsriktningen. Det elektriska och magnetiska fältet ligger i fas. Kvoten mellan det elektriska och magnetiska fältet är 377 ohm.



Figur 5. Fältregioner kring en antenn [6].  $R_1 = 0.62\sqrt{D^3/\lambda}$  ,  $R_2 = 2D^2/\lambda$  .

De fältregioner som anges i figur 5 gäller under förutsättningen att antennens största dimension är större än våglängden,  $D > \lambda$ . Fjärrfältsgrensens baseras på att vägskillnaden mellan två punkter på antennen och observationspunkten får vara maximalt  $\lambda/16$ , vilket är det samma som att det maximala fasfelet får vara  $\pi/8$ .

Om antennens dimensioner inte är större än våglängden, dvs. villkoret  $D > \lambda$  inte är uppfyllt, gäller inte de ovan angivna formlerna för fjärrfältsavståndet. För sådana antenner, t.ex. halvvågsdipol, brukar fjärrfältsavståndet definieras som  $3\lambda$  [10]. Detta förhållande gäller exempelvis för den antenntyp som kommer att användas för framtida trådlösa telefoner, DECT. Gränsen  $3\lambda$  bygger på att vågimpedansen, förhållandet mellan det elektriska och magnetiska fältet, skall ligga nära fjärrfältsvärdet 377 ohm. I litteraturen används ofta  $\lambda/2\pi$  som fjärrfältsgrens. Vid detta avstånd börjar de fälftermer som är direkt omvänt proportionella mot avståndet att dominera över högre ordningens termer. Vågimpedansen är då långt ifrån 377 ohm varför ett mer realistiskt avstånd för antenner som är små i förhållande till våglängden är  $3\lambda$ .

MIKROVÅGSSYSTEM	ANTENNTYP
Civila radarsystem	Parabol, slitsvågledare, horn
Militära radarsystem	Parabol, slitsvågledare (även fasstyrda)
Polisens radar	Horn
Mikrovågslänkar	Parabol
Larm, övervakningssystem	Horn
DECT	Trådentenn (monopol)
Satellitkommunikation	Parabol, helix

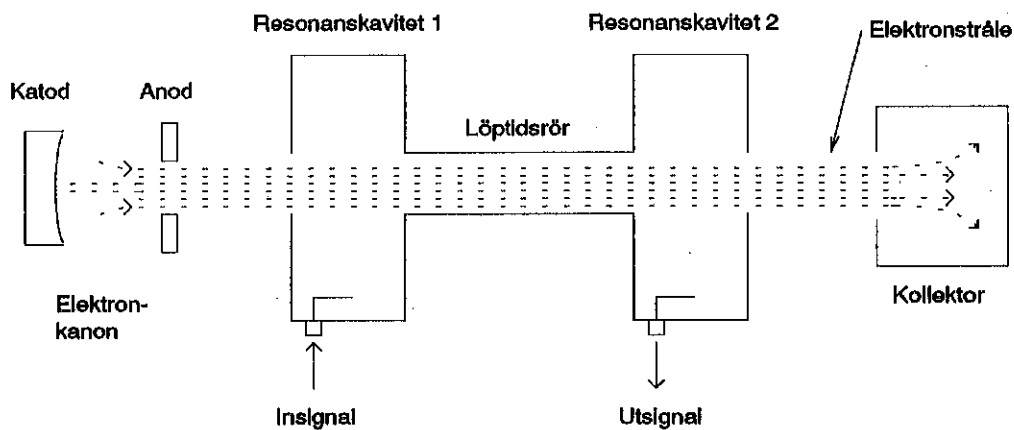
Tabell 2. Vanligt förekommande antenntyper i olika mikrovågssystem.

### 3.4 Mikrovågskällor

I kommersiella radarsystem förekommer fyra olika typer av mikrovågskällor : magnetronen, klystronen, TWT förstärkaren och halvledarförstärkaren.

Magnetronen är en oscillator uppbyggd kring ett antal kopplade resonanskaviteter. Frekvensen bestäms av de fysiska måtten på kaviteterna. Diverse olika tekniker att ändra resonansfrekvensen har utvecklats och på så vis kan en frekvensändring av 6 till 8 procent av grundfrekvensen uppnås. Fördelarna med magnetronen är att den är billig, liten, kan generera höga toppeffekter (flera megawatt) samt att eftersom den är en oscillator inte kräver någon yttre mikrovågskälla. Nackdelarna är att den kräver en högspänningsförsörjning (flera tiotal kilovolt) samt att den är ganska frekvensinstabil. Verkningsgraden ligger normalt under 50 procent varför magnetroner för höga effekter kräver en effektiv kylning. Arbetsfaktorn som definieras som kvoten mellan medeleffekten och toppeffekten är i allmänhet maximalt 0.1 procent.

Klystronen är den äldsta typen av mikrovågsförstärkare. Principen för en två-kavitets klystron framgår av figur 6.



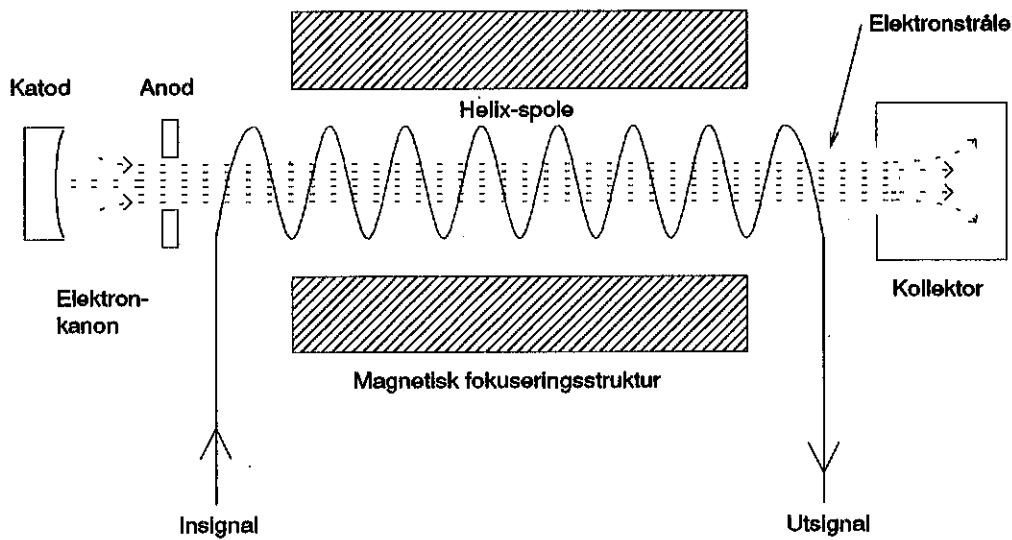
Figur 6. Två-kavitets klystron

Funktionen bygger på att elektronstrålen som utgår från katoden blir hastighetsmodulerad av mikrovågorna i den första resonanskaviteten. Med andra ord kommer vissa elektroner att få en högre hastighet än andra. Detta innebär att de snabbare elektronerna kommer att hinna ikapp de långsammare i löptidsröret, vi får en varierande koncentration av elektroner. Den andra resonanskaviteten placeras där koncentrationsvariationerna är som störst. Variationerna gör att den andra resonanskaviteten exciteras och resultatet blir en förstärkning av den ursprungliga mikrovågssignalen. Klystronen kan även konstrueras som en oscillator genom att den andra resonanskaviteten återkopplas till den första, normalt används dock klystronen som en förstärkare. För att uppnå en hög förstärkning används ofta ett flertal resonanskaviteter efter varandra. Typiska värden på förstärkningen är 40 - 60 dB och toppeffekten är mycket hög, tiotal megawatt. Bandbredden är en funktion av förstärkningen men är normalt ett fåtal procent av mittfrekvensen. Klystronen kan arbeta vid högre arbetsfaktorer än magnetronen.

TWT (Travelling Wave Tube) bygger också på principen interaktion mellan mikrovågssignal och en elektronstråle, figur 7. Ofta används en helix-spole som kopplingsstruktur mellan mikrovågorna och elektronstrålen. Helix-spolens uppgift är att



mikrovågsenergin skall utbreda sig med ungefär samma hastighet som elektronstrålen för att energiutbytet skall bli så effektivt som möjligt. Precis som i klystronen blir elektronstrålen hastighetsmodulerad av mikrovågssignalen och de uppkomna elektronkoncentrationerna resulterar i en förstärkning. I jämförelse med klystronen är förstärkningen och toppeffekten något lägre i TWT-förstärkaren. Den största fördelen med TWT:n är den stora bandbredden, normalt 10 - 20 procent av mittfrekvensen.



Figur 7. TWT-förstärkare.

Halvledarförstärkaren är den modernaste av de fyra förstärkartyperna och samtidigt den som har den lägsta uteffekten. Halvledarförstärkaren är uppbyggd av mikrovågstransistorer, både bipolära och fälteffekttransistorer (FET) förekommer. Den låga effekten kompenseras ofta genom att en förstärkare används till vart och ett av elementen i en gruppantenn. En fördel med ett sådant arrangemang är att antennloben kan göras elektroniskt riktningsbar genom att fasen till de olika förstärkarna justeras. Beroende på halvledarförstärkarens ringa storlek och höga tillförlitlighet används den också i mikrovågslänkar och bärbara telefoniutrustningar.

Mikrovågs-källa	Toppeffekt [MW]	Förstärkning [dB]	Frekvensområde [GHz]
Magnetron	5 - 10	Oscillator	0.5 - 20
Klystron	50 - 100	40 - 60	1 - 20
TWT	0.2 - 0.5	30 - 50	1 - 40
Halvledare	Tiotal Watt	20	DC - 40

Tabell 3. Typiska värden för mikrovågskällor.

Anm. Toppeffekten för halvledarförstärkaren är starkt avtagande med ökad frekvens.

### 3.5 Frekvenser och effektnivåer

I Sverige är det Televerket som har hand om tillståndsgivning och fördelning (allokering) av frekvensutrymme för olika radiotjänster [4]. Det finns dock inga generella regler för hur stor effekt en sändare får ha. Tillstånd ges efter ansökan hos Televerket för, i princip, hur effektstarka sändare som helst. De föreskrifter som utges av arbetarskyddsstyrelsen gällande högfrekventa elektromagnetiska fält [7] ger tillåtna exponeringsvärden i form av effektivvärden. Eftersom det intressanta ur elmiljösynpunkt är toppvärden ger inte heller dessa föreskrifter någon information som är användbar. Beroende på dessa faktum är man hänvisad till användare och tillverkare av sändare inom det intressanta frekvensområdet, för att få en uppfattning om vilka effektnivåer som används. Nedan presenteras tabeller på frekvenser, sändeffekter och antennvinst för sändare som används inom olika områden. Effektnivåerna är typiska inom respektive användningsområde, förutom i vissa fall då värdena kan anses representera ett ur elmiljösynpunkt värsta fall.

I de fall då sändarens frekvens är hemlig, eller av annan anledning ej är känd, anges endast frekvensband enligt följande :

L-Band	1 - 2 GHz
S-Band	2 - 4 GHz
C-Band	4 - 8 GHz
X-Band	8 - 12.4 GHz
Ku-Band	12.4 - 18 GHz
K-Band	18 - 26.5 GHz

	Bärvågsfrekvens [MHz]	Toppeffekt [kW]	Antennvinst [dBi]	Antennens dimensioner [m]
Sekundärradar	1030	50	27	8 x 1 rektangulär
Primärradar	1300	2500	36	13 x 2.5 rektangulär
" - "	2800	1500	39	4 x 4 rektangulär
Väderradar	5600	250	45	4.2 cirkulär
Markradar	9400	20	35 - 45	
" - "	15700 - 17700	3	44	5 x 1 rektangulär

Tabell 4. Civil flygplats.

Anm. Sekundärradarn används för att aktivera en sändare som sitter monterad i flygplanet. Sändaren i flygplanet svarar sedan med uppgifter om flygplanets identitet, position, hastighet osv.

	Bärvågsfrekvens [MHz]	Toppeffekt [kW]	Antennvinst [dBi]	Antennens dimensioner [m]
Fraktfartyg	3040-3060	30	26	3.7 x 0.2 rektangulär
" - "	9380-9440	25	31	2.7 x 0.1 rektangulär
Fritidsbåtar	" - "	10	26	1.2 x 0.1 rektangulär

Tabell 5. Civila fartyg.

	Bärvågsfrekvens [MHz]	Toppeffekt [kW]	Antennvinst [dBi]	Antennens dimensioner [m]
Väderradar	5600	250	45	4.2 cirkulär

Tabell 6. Civila väderradar anläggningar.

	Bärvågsfrekvens [MHz]	Toppeffekt [kW]	Antennvinst [dBi]	Antennens dimensioner [m]
Super Giraffe	C-Band	60	29	ca 2.5 x 0.8 elliptisk
Hard	X-Band	0.08	35 - 45	ca 1.5 x 0.8 rekt.

Tabell 7. Militära mobila anläggningar.

	Bärvågsfrekvens [MHz]	Toppeffekt [kW]	Antennvinst [dBi]	Antennens dimensioner [m]
Viggen	X-Band		30 - 40	ca 1 cirkulär
JAS	X-Band	1	30 - 40	ca 0.7 cirkulär
ERIEYE	S-Band		30 - 40	ca 8 x 0.8 rekt.

Tabell 8. Militära flygande anläggningar.

	Bärvågsfrekvens [MHz]	Toppeffekt [kW]	Antennvinst [dBi]	Antennens dimensioner [m]
Sea Giraffe	C-Band	60	30 - 40	elliptisk
Sea Giraffe	C-Band	15	30 - 40	elliptisk

Tabell 9. Militära fartyg.

	Bärvågsfrekvens [MHz]	Toppeffekt [kW]	Antennvinst [dBi]	Antennens dimensioner [m]
Kust radar typ Giraffe	C-Band	15	37	elliptisk

Tabell 10. Militära fasta anläggningar.

	Bärvågsfrekvens [MHz]	Toppeffekt [W]	Antennvinst [dBi]	Antennens dimensioner [m]
Handmodul	1880 - 1900	0.25	6	trådantenn
Basstation	" - "	" - "	22	trådantenn

Tabell 11. DECT (Digital European Cordless Telecommunication).

	Bärvågsfrekvens [MHz]	Toppeffekt [W]	Antennvinst [dBi]	Antennens dimensioner [m]
Satellitmarkst.	C, X, Ku, K-Band			cirkulär
Mikrovågslänk	X, Ku, K-Band	0.05	30 - 40	ca 0.6 cirkulär

Tabell 12. Civila kommunikationssystem.

	Bärvågsfrekvens [MHz]	Toppeffekt [W]	Antennvinst [dBi]	Antennens dimensioner [m]
Polisradar	10500	0.05	20	0.1 cirkulär
Övervakn.utr.	X-Band	0.05	20 4	0.1 cirkulär 0.023 x 0.010 rekt.

Tabell 13. Övriga mikrovågsutrustningar.

## 4 Fältstyrkor i omgivningen

### 4.1 Beräkningar

Då sändarens data i form av utsänd effekt och antennvinst är kända är det lätt att räkna ut den elektriska fältstyrkan på olika avstånd från sändaren. Noggrannheten i en sådan beräkning kommer att bestämmas av i första hand hur väl man känner de erforderliga parametrarna. Den största felkällan ligger dock i att det är svårt att ta hänsyn till de dämpande effekterna i omgivningen (hus, berg, skog etc.). I de beräkningsmodeller som används i denna rapport tas ingen hänsyn till dämpande effekter i omgivningen. Resultatet som redovisas är därför att betrakta som ett värsta fall ur miljösynpunkt, dvs. fältstyrkenivåerna utgör maximienvelopen till de verkliga värdena.

Beroende på att det elektromagnetiska fältet har olika karaktär i när- respektive fjärrfältet, se kapitel 3.3, är det nödvändigt att använda olika beräkningsmodeller för de båda fallen. Kapitel 4.2 och 4.3 beskriver modeller och ger resultat som gäller under fjärrfältets förhållanden. Kapitel 4.4 och 4.5 beskriver modeller och ger resultat som gäller i närfältet.

### 4.2 Beräkningsmodeller för fjärrfält

När man befinner sig i fjärrfältet, dvs. då avståndet till antennen är större än  $2D^2/\lambda$  ( $D$  = antennens största utsträckning ;  $\lambda$  = våglängden) , gäller följande samband mellan effekttätheten och sändarens effekt.

$$P = \frac{P_s G}{4\pi r^2} \quad (3)$$

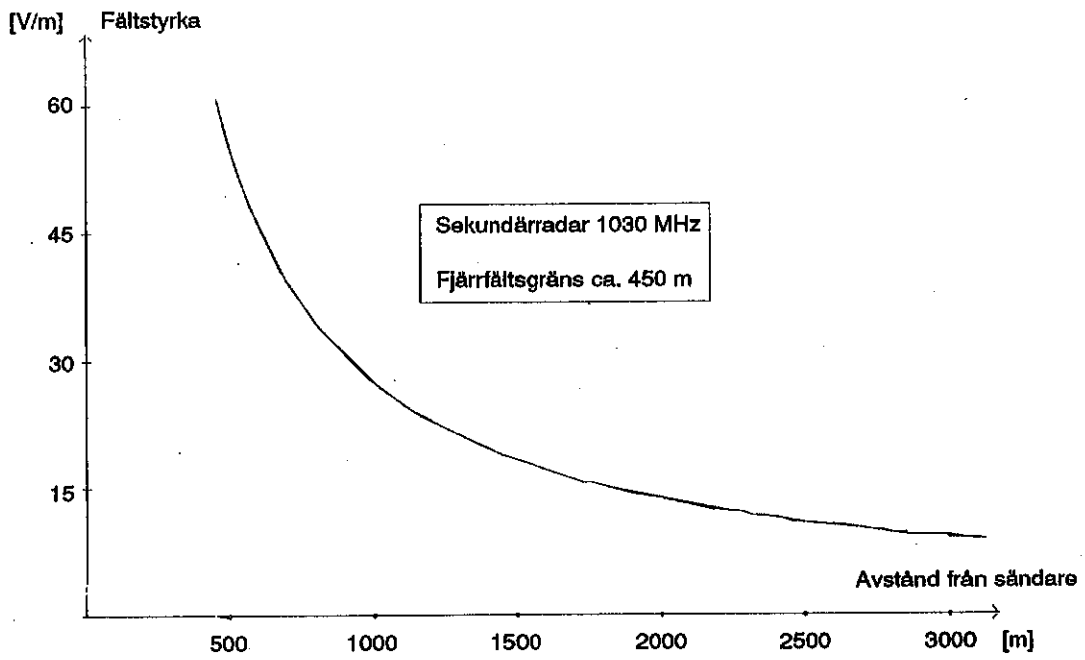
Där :  $P$  = effekttäthet, [W/m<sup>2</sup>]  
 $P_s$  = utsänd effekt, [W]  
 $G$  = antennvinst (numerisk), [ggr] ; ( $G_{\text{dBi}} = 10\text{Log}(G_{\text{numerisk}})$ )  
 $r$  = avstånd mellan observationspunkt och antenn, [m]

I fjärrfältet (definierat enligt ovan) är det lätt att utgående från effekttätheten räkna ut fältstyrkan. Vågimpedansen för en plan våg i fjärrfältet är 377 ohm ( $120\pi$ ), varför sambandet mellan fältstyrkan och effekttätheten blir :

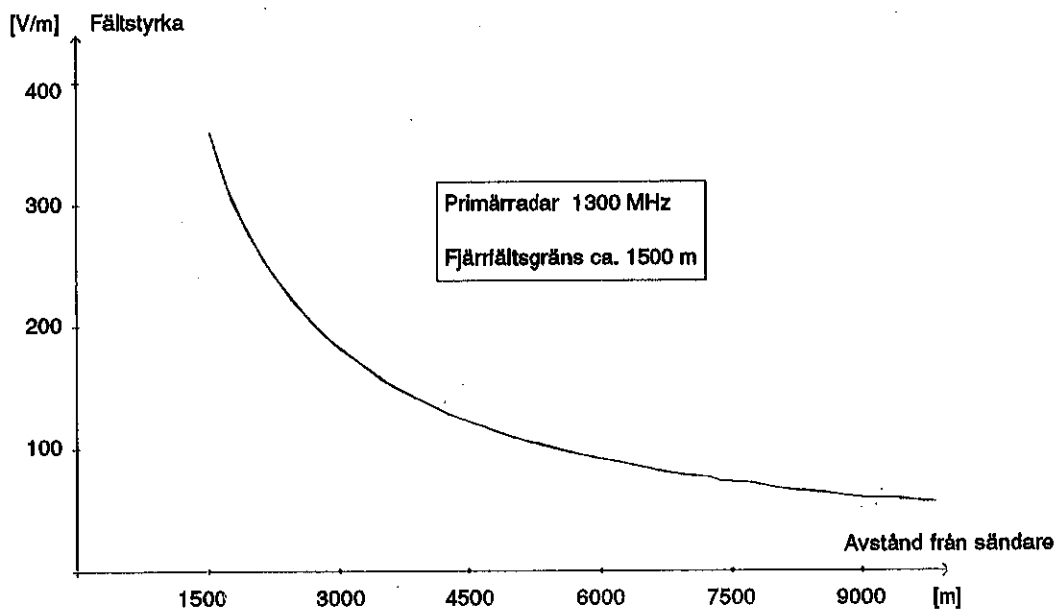
$$E = \sqrt{377P} = \frac{1}{r} \sqrt{30P_s G} \text{ , [V/m]} \quad (4)$$

### 4.3 Beräknade fältstyrkor i fjärrfältet

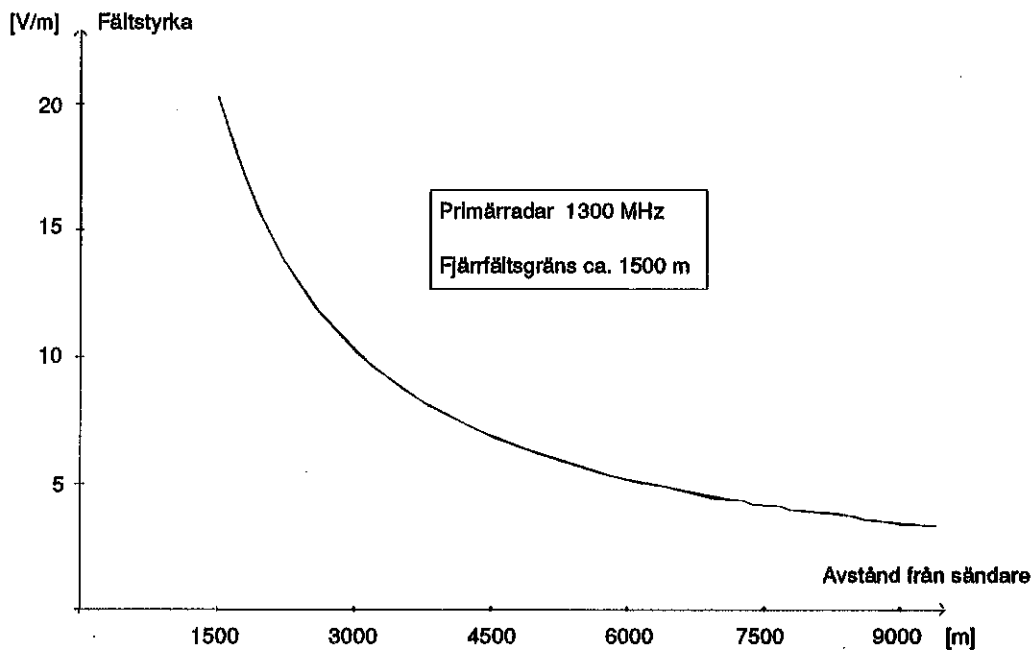
Utgående från effekter och antennvinster enligt kapitel 3.5 och beräkningsmodell enligt kapitel 4.2 presenteras här fältstyrkor i fjärrfältet på olika avstånd från olika typer av sändare.



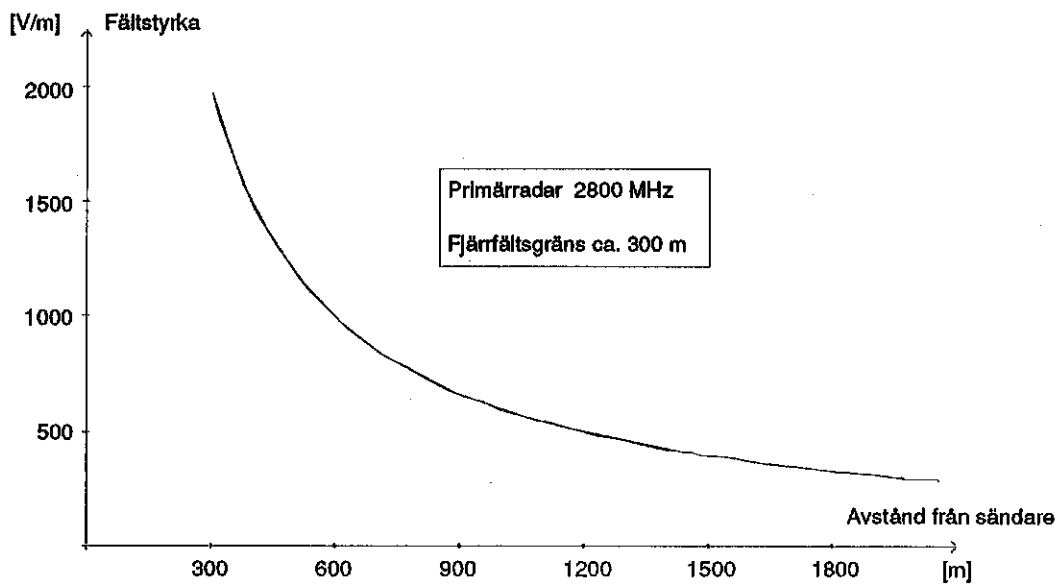
Figur 8. Sekundärradar för civil flygplats.



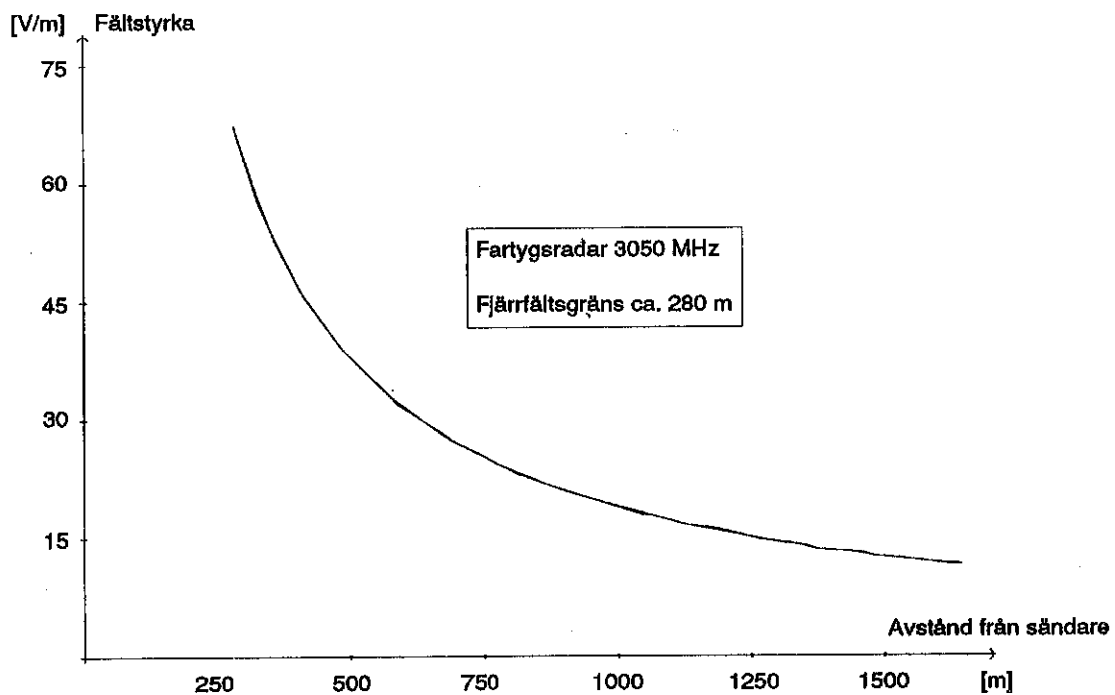
Figur 9. Primärradar för civil flygplats, huvudlob.



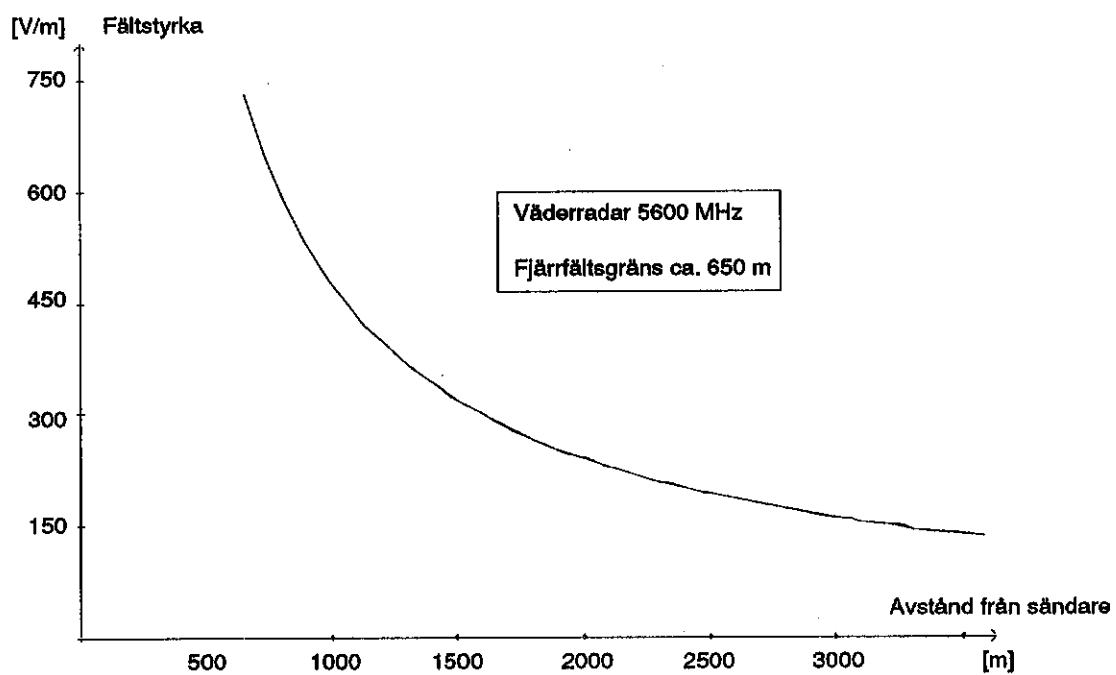
Figur 10. Primärradar för civil flygplats, sidlob.



Figur 11. Primärradar för civil flygplats.

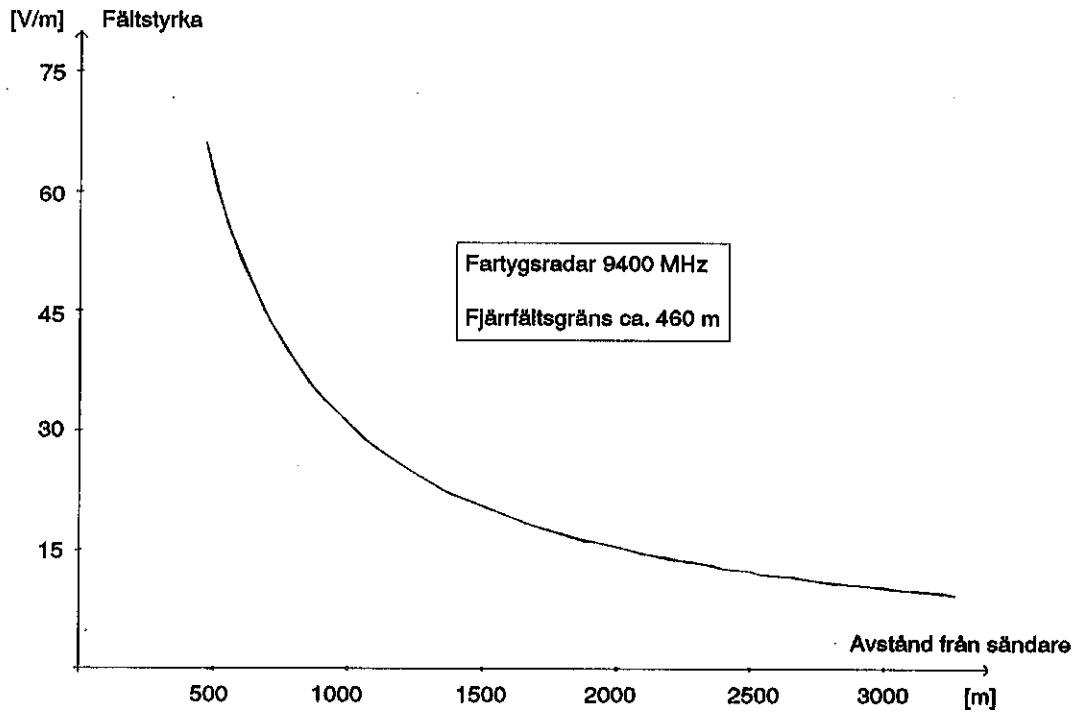


Figur 12. Fartygsradar, S-band.

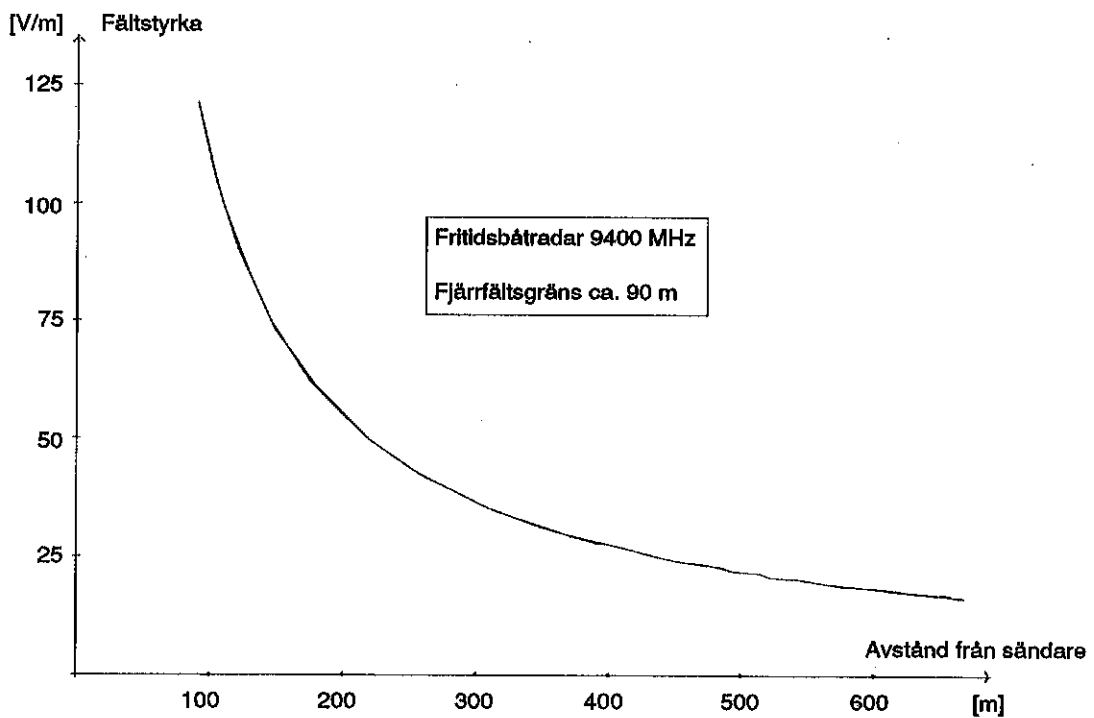


Figur 13. Väderradar.

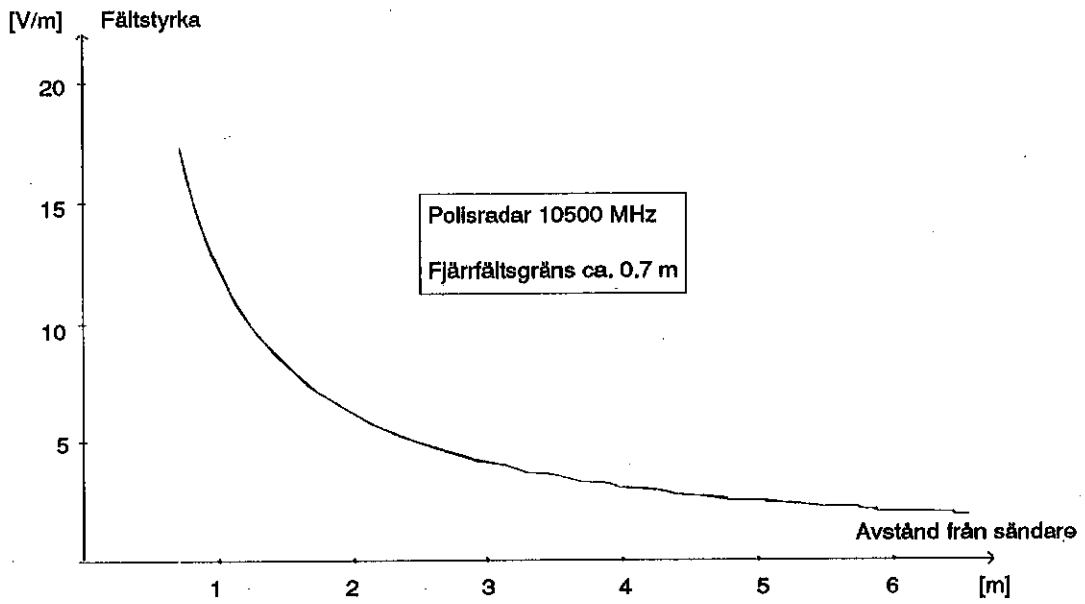




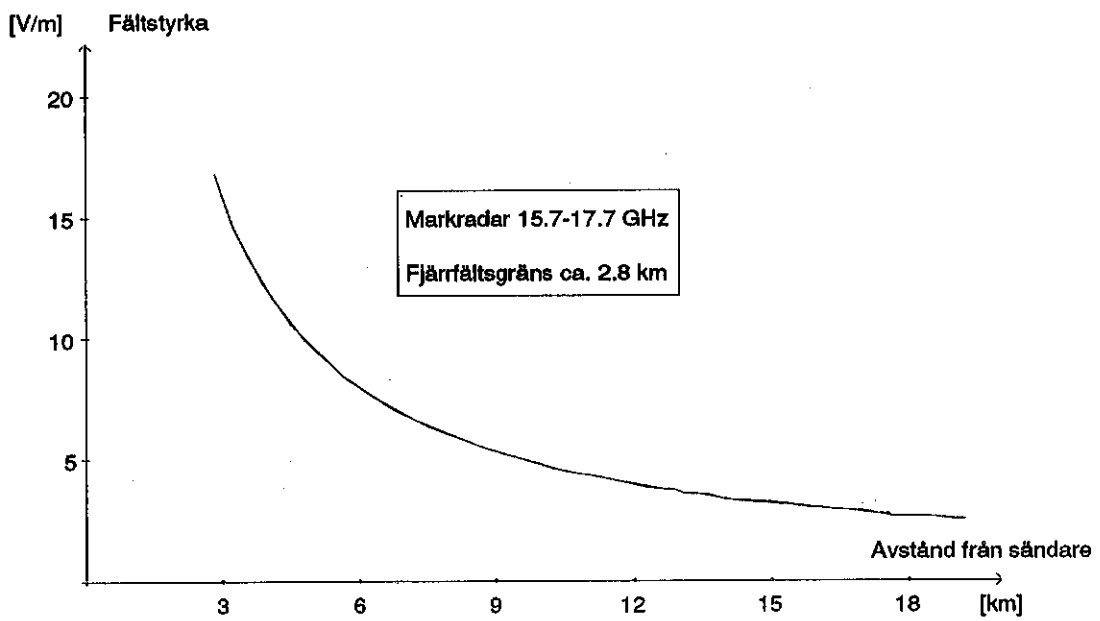
Figur 14. Fartygsradar, X-band.



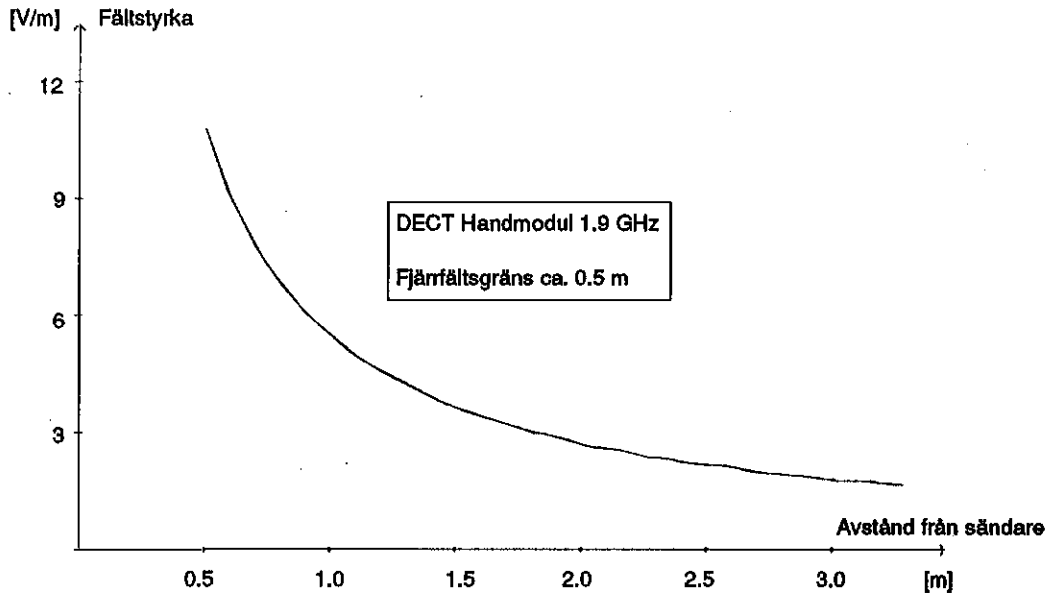
Figur 15. Fritidsbåtradar, X-band



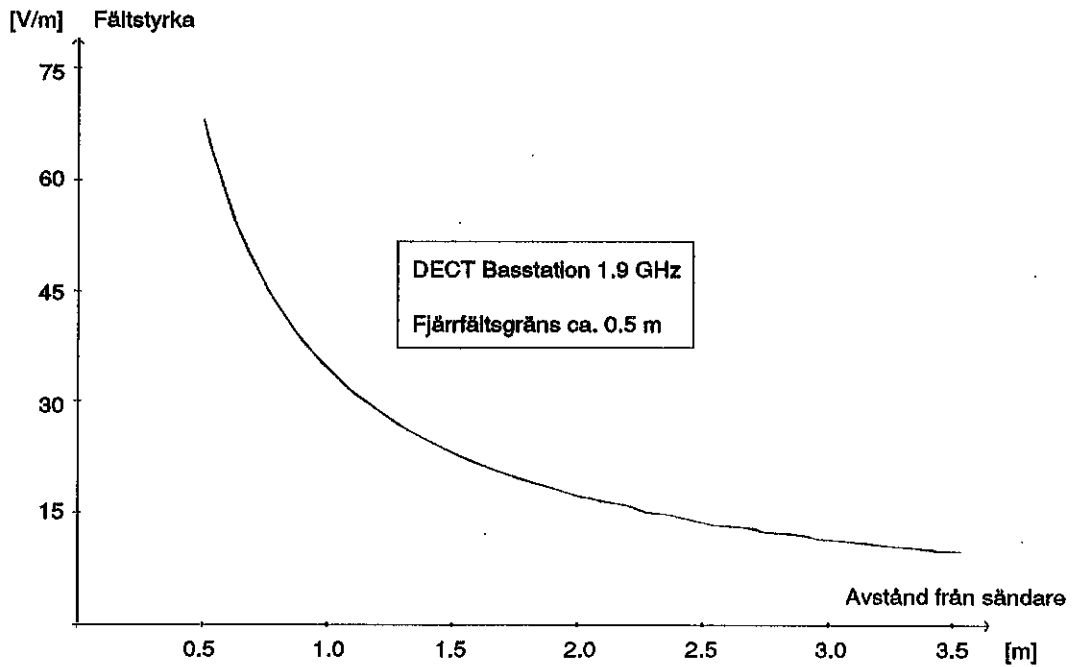
Figur 16. Polisradar.



Figur 17. Markradar för civil flygplats.



Figur 18. Digital trådlös telefon, handmodul.



Figur 19. Digital trådlös telefon, basstation.

## 4.4 Beräkningsmodeller för närfält

För beräkning av fältstyrkan i närfältet, dvs. då avståndet till antennen är mindre än  $2D^2/\lambda$  ( $D$  = antennens största utsträckning ;  $\lambda$  = våglängden) , gäller olika förhållanden beroende på antenntyp. Nedan anges formler för beräkning av fältstyrkan i närfältet från de antenntyper som är vanligast i mikrovågssammanhang, rektangulära och cirkulära aperturantenner. Formulerna är hämtade ur referens [11].

### 4.4.1 Närfält från rektangulär aperturantenn

Genom att införa en korrektionsfaktor,  $\vartheta$ , kan effekttätheten i närfältet beräknas med samma ekvation som används för fjärrfältet, ekvation (3). Konvertering till fältstyrka kan sedan göras med ekvation (4), vilket ger följande uttryck för fältstyrkan i närfältet.

$$E = \frac{1}{r} \sqrt{30P_s G \vartheta} \text{ , [V/m]} \quad (5)$$

Där :  $P_s$  = utsänd effekt, [W]  
 $G$  = antennvinst (numerisk), [ggr] ; ( $G_{\text{dB}} = 10\text{Log}(G_{\text{numerisk}})$ )  
 $r$  = avstånd mellan observationspunkt och antenn, [m]  
 $\vartheta$  = korrektionsfaktor för närfält, [ggr] ; (definieras nedan)

För bestämning av korrektionsfaktorn,  $\vartheta$ , måste två korrektionsfaktorer bestämmas, en för varje polarisation. Dessa båda korrektionsfaktorer summeras sedan , i dB, för att ge den totala korrektionsfaktorn,  $\vartheta$ . Metoden är som följer.

- Normalisera det valda avståndet mellan antenn och observationspunkt,  $r$

$$\Delta_i = \frac{r\lambda}{D_i^2} \quad (6)$$

Där :  $r$  = avstånd mellan antenn och observationspunkt, [m]  
 $\lambda$  = våglängd, [m]  
 $D$  = antennens utsträckning, [m]  
 $i$  = index som betecknar bredd respektive höjd,  $b$  eller  $h$

- Bestäm med hjälp av tabell 14 eller figur 20 de båda korrektionsfaktorerna  $\vartheta_b$  och  $\vartheta_h$

- Beräkna den totala korrektionsfaktorn  $\vartheta$  med följande formel

$$\vartheta = 10^{-[(\vartheta_b + \vartheta_h)/10]} \quad (7)$$

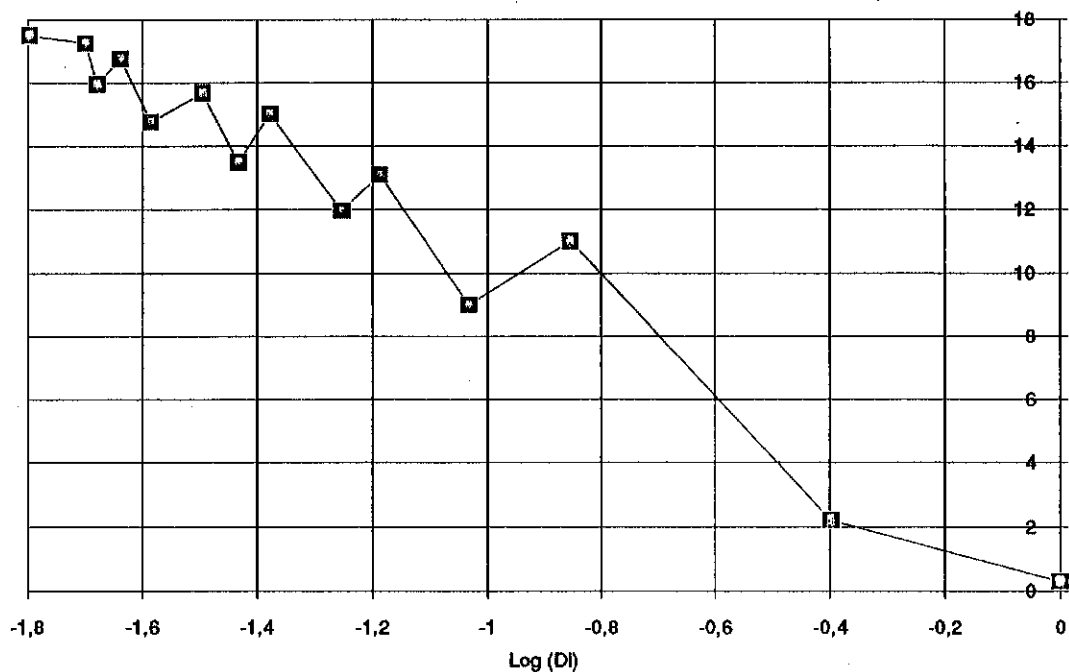
Anm.  $\vartheta$  är angiven i gånger medan  $\vartheta_b$  och  $\vartheta_h$  är angivna i dB. ( $\vartheta \leq 1$ ).

Korrektionsfaktorn,  $\vartheta_i$ , varierar något beroende på hur antennen exciteras, de angivna värdena i tabell 14 och figur 20 förutsätter att antennen exciteras likformigt över aperturen.

$\Delta_i$	$\vartheta_i$ [dB]
0.016	17.50
0.020	17.25
0.021	15.95
0.023	16.75
0.026	14.75
0.032	15.65
0.037	13.50
0.042	15.00
0.056	11.95
0.065	13.10
0.093	9.0
0.14	11.0
0.4	2.2
1.0	0.3

Tabell 14. Korrektionsfaktor för närfält från rektangulär aperturantenn.

Anm. Om värdena på  $\Delta_i$  är mellan de angivna i tabellen får värdet på  $\vartheta_i$  interpoleras fram.



Figur 20. Korrektionsfaktor för närfält från rektangulär aperturantenn.

I de fall antennen är ellipsformad kan de ovan angivna korrektionsfaktorerna användas om en "ekvivalent" rektangel definieras. Sidorna i den "ekvivalenta" rektangeln skall ha längder som lill- respektive stor- axeln i ellipsen.

#### 4.4.2 Närfält från cirkulär aperturantenn

Vid beräkning av fältstyrkan i närfältet från en cirkulär aperturantenn utgår man från effekttätheten vid fjärrfältsgrensens. Multiplikation med en korrektionsfaktor, som bestäms av avståndet från antennen till observationspunkten, ger effekttätheten i närfältet. Fältstyrkan kan sedan bestämmas med ekvation (4). Metoden är som följer.

- Beräkna effekttätheten vid fjärrfältsgrensens,  $2D^2/\lambda$

$$P_{\text{ref}} = \frac{P_s G \lambda^2}{16\pi D^4} \quad (8)$$

- Där :
- $P_{\text{ref}}$  = effekttäthet vid fjärrfältsgrensens, [W/m<sup>2</sup>]
  - $P_s$  = utsänd effekt, [W]
  - $G$  = antennvinst (numerisk), [ggr] ; ( $G_{\text{dBi}} = 10\text{Log}(G_{\text{numerisk}})$ )
  - $\lambda$  = våglängd, [m]
  - $D$  = antennens utsträckning (diameter), [m]

- Normalisera det valda avståndet mellan antenn och observationspunkt,  $r$

$$\Delta = \frac{r\lambda}{2D^2} \quad (9)$$

- Bestäm med hjälp av tabell 15 eller figur 21 korrektionsfaktorn  $\xi$

- Beräkna den korrigerade effekttätheten med följande formel

$$P_{\text{kor}} = \xi P_{\text{ref}} \quad (10)$$

- Konvertera till fältstyrka med fjärrfältformeln

$$E = \sqrt{377P_{\text{kor}}} \text{ , [V/m]} \quad (11)$$

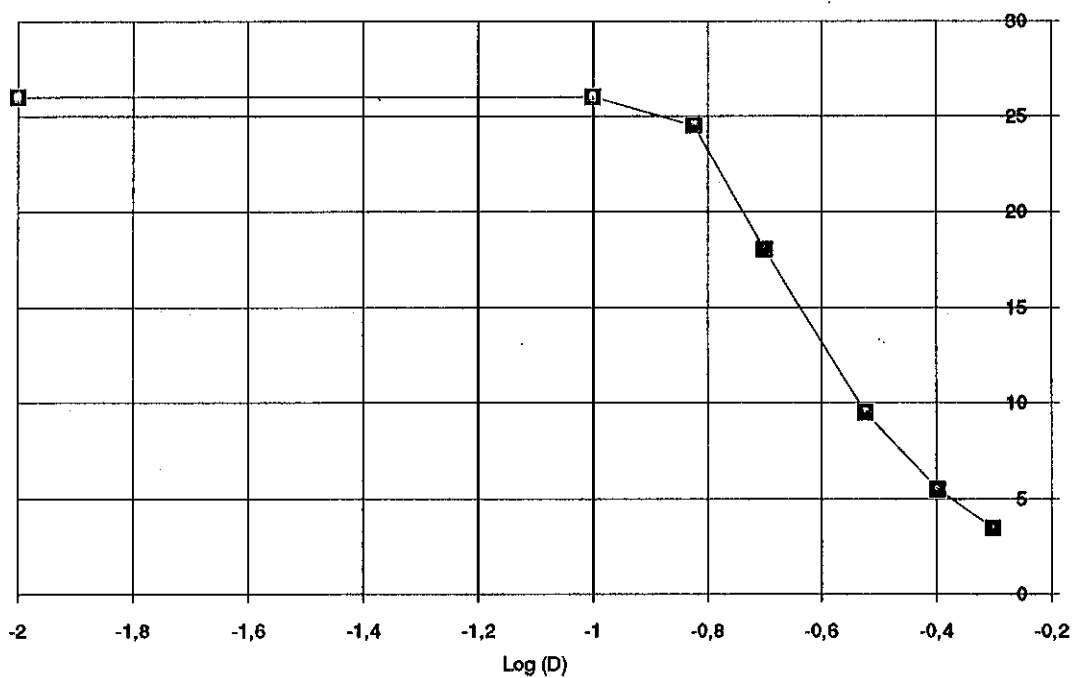
Precis som för fallet rektangulär antenn varierar korrektionsfaktorn beroende på hur antennen exciteras, de angivna värdena i tabell 15 och figur 21 förutsätter att antennen exciteras likformigt över aperturen.

$\Delta$	$\xi$ [ggr]
0.01 – 0.1	26.0
0.15	24.5
0.2	18.0
0.3	9.5
0.4	5.5
0.5	3.5

Tabell 15. Korrektionsfaktor för närfält från cirkulär aperturantenn.

Anm. 1. Om värdena på  $\Delta$  är mellan de angivna i tabellen får värdet på  $\xi$  interpoleras fram.

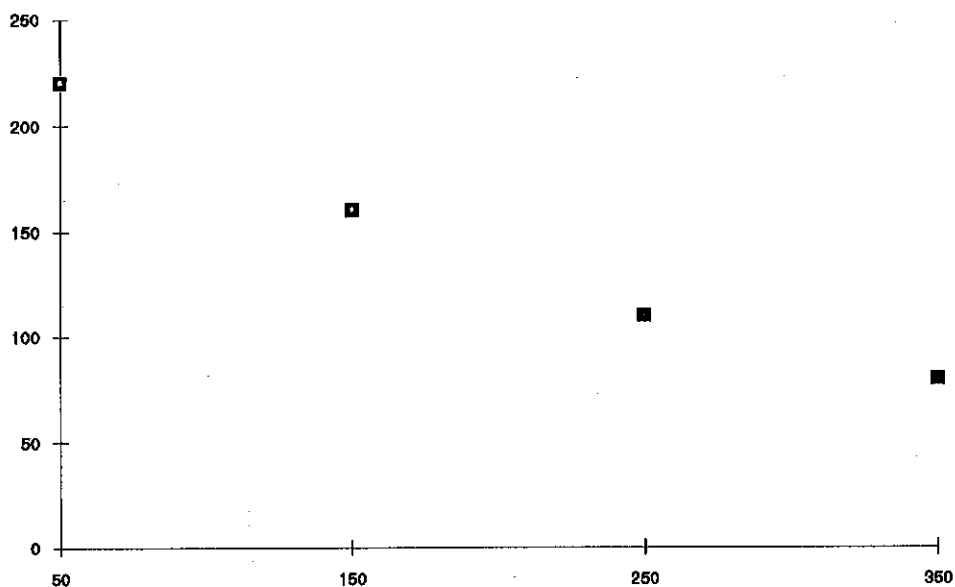
Anm. 2. För  $\Delta > 0.5$  skall fjärrfältformeln, ekvation (4), användas.



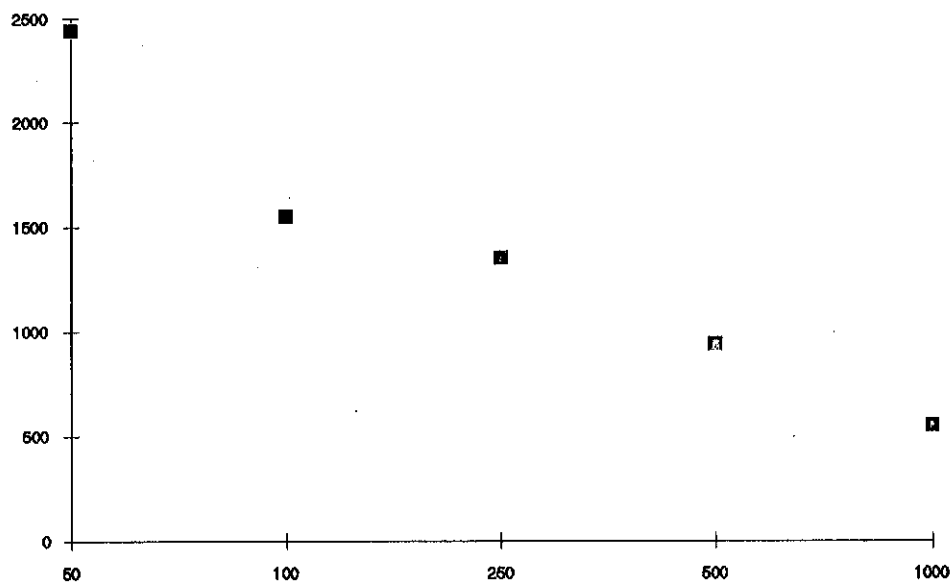
Figur 21. Korrektionsfaktor för närfält från cirkulär aperturantenn.

## 4.5 Beräknade fältstyrkor i närfältet

Utgående från effekter och antennvinster enligt kapitel 3.5 och beräkningsmodeller enligt kapitel 4.4 presenteras här fältstyrkor i närfältet på olika avstånd från olika typer av sändare.

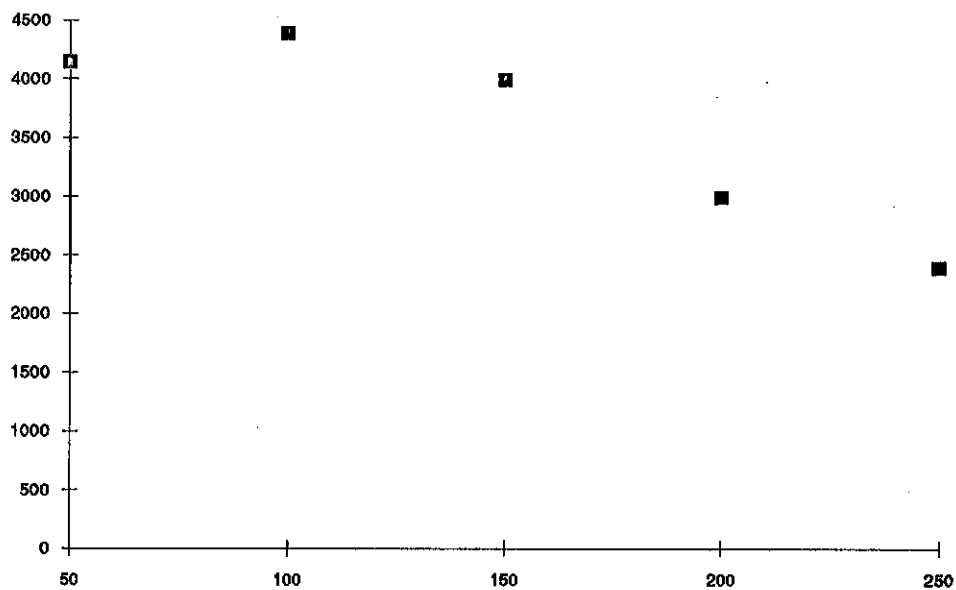


Figur 22. Närfält från sekundärradar för civil flygplats, 1030 MHz. Fjärrfältsgrens 450 m.

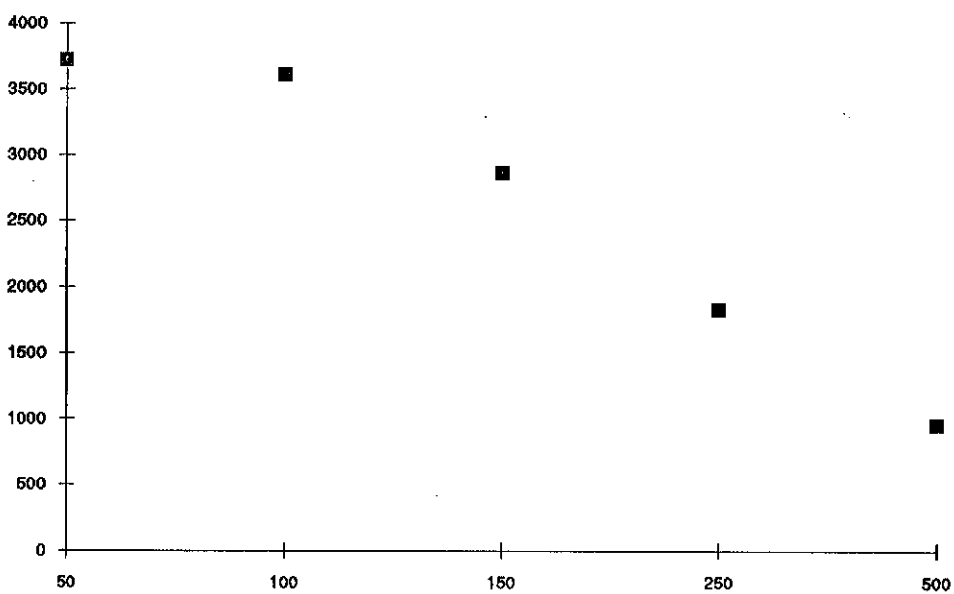


Figur 23. Närfält från primärradar för civil flygplats, 1300 MHz. Fjärrfältsgrens 1500 m.

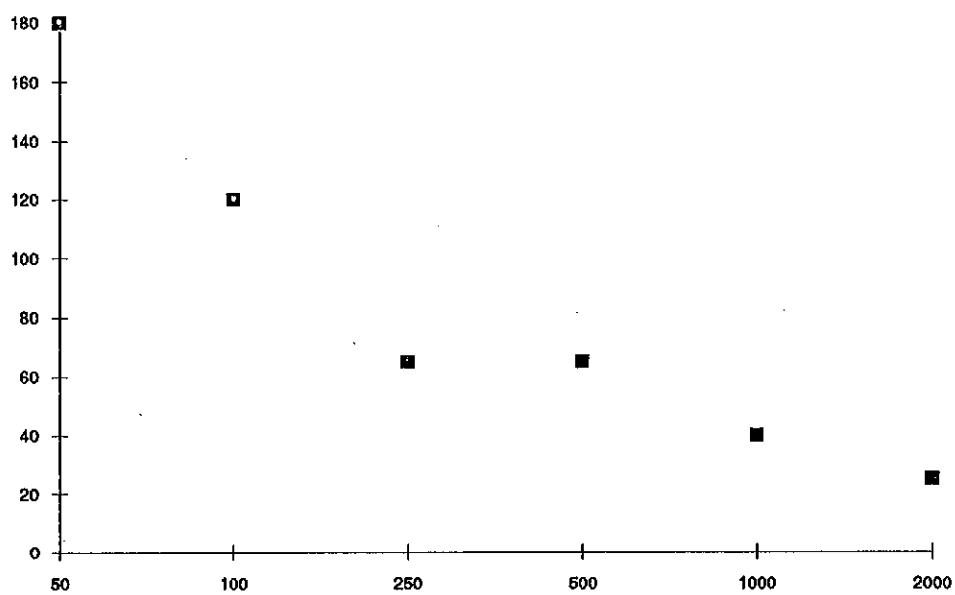




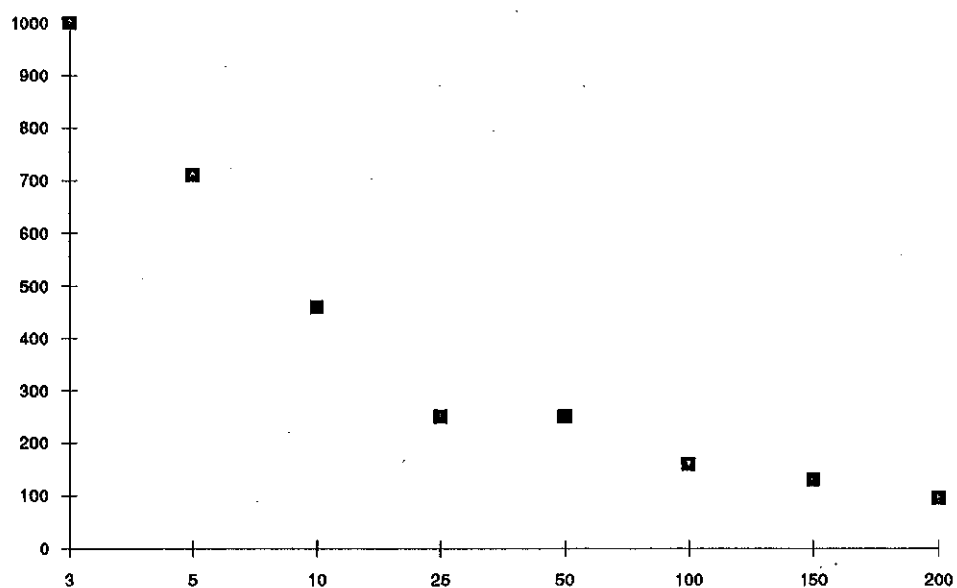
Figur 24. Närfält från primärradar för civil flygplats, 2800 MHz. Fjärrfältsgrens 300 m.



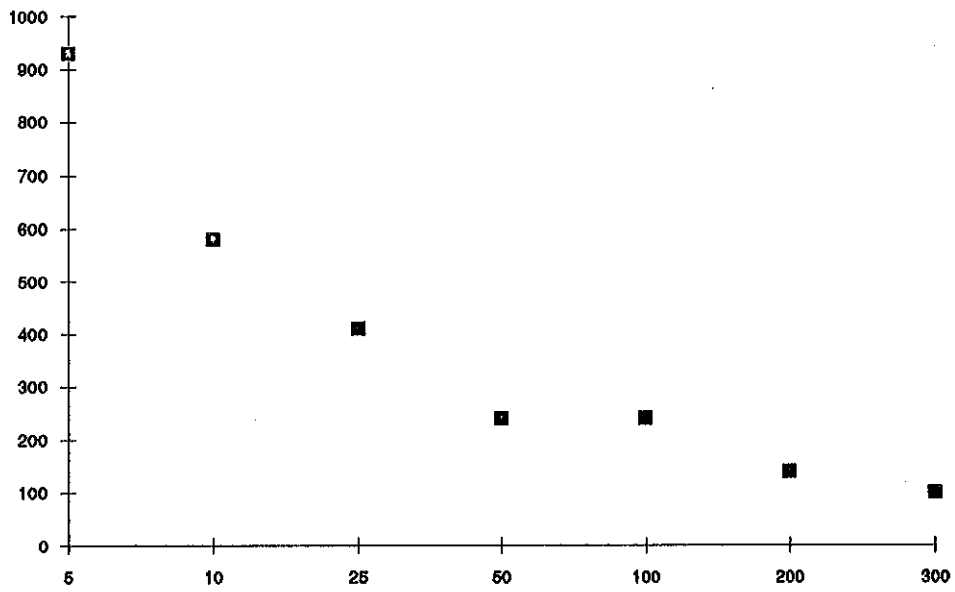
Figur 25. Närfält från väderradar, 5600 MHz. Fjärrfältsgrens 650 m.



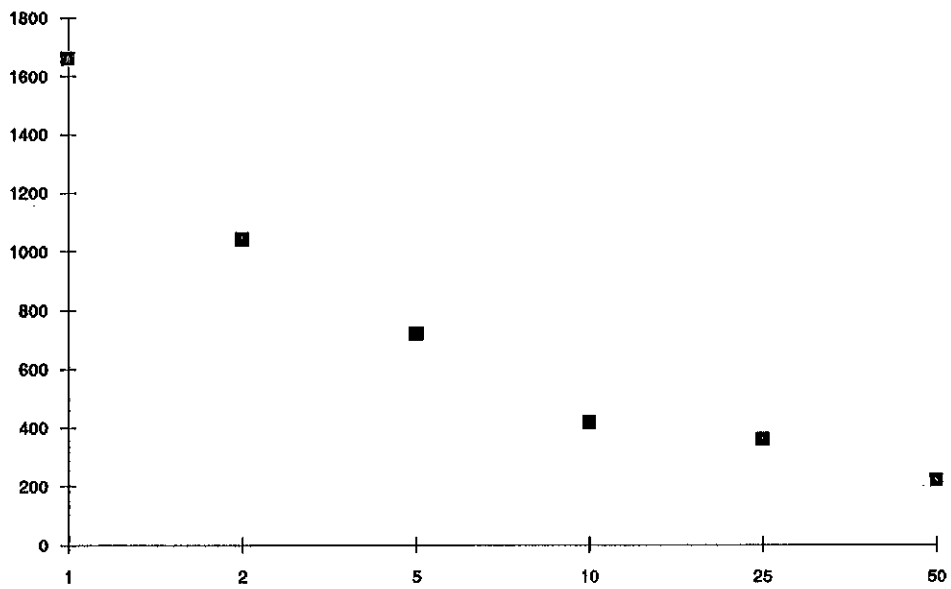
Figur 26. Närfält från markradar för civil flygplats, 17 GHz. Fjärrfältsgrens 2800 m.



Figur 27. Närfält från fartygsradar, 3050 MHz. Fjärrfältsgrens 280 m.



Figur 28. Närfält från fartygsradar, 9400 MHz. Fjärrfältsgrens 460 m.



Figur 29. Närfält från fritidsbåtradar, 9400 MHz. Fjärrfältsgrens 90 m.

## 5 Stränghetsnivåer för olika system

Utgående från de beräknade fältstyrkenivåerna i föregående kapitel kan för olika typer av elektroniska system stränghetsnivåer bestämmas. För att kunna göra en sådan bestämning måste de olika systemens avstånd till störkällorna bedömas.

De olika elektroniska systemen som stränghetsnivåerna önskas bestämmas för indelas i olika kategorier enligt följande :

Kategori A : Landmobila system (bilar, bussar etc.)

Kategori B : Fartygsbaserade system

Kategori C : Luftburna system (flygplan, helikoptrar etc.)

Kategori D : Fasta installationer (kontorsutrustningar i byggnader etc.)

För att ta hänsyn till att olika system inom varje kategori är mer eller mindre viktiga ur säkerhetssynpunkt kan en indelning av varje kategori i ett antal underkategorier ofta vara nödvändigt. Ett exempel kan vara jämförelsen mellan elektriska fönsterhissar och låsningsfria bromsar i ett fordon. I ett sådant fall kan det vara lämpligt att kräva en högre stränghetsnivå för de låsningsfria bromsarna för att garantera funktionen även i extrema (och mer osannolika) fall.

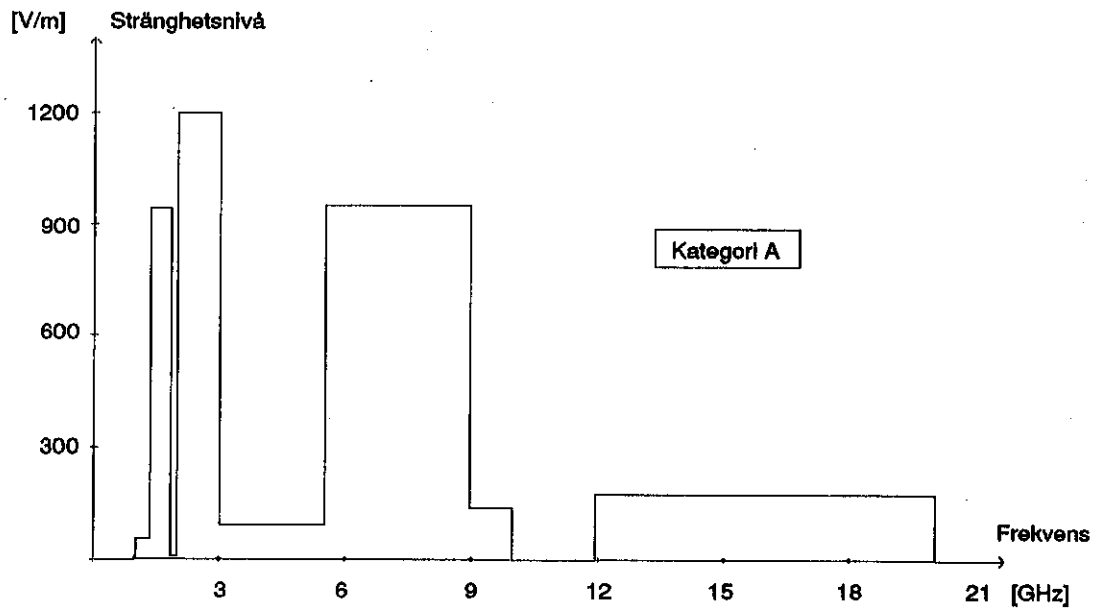
I den tabell som presenteras nedan har inga säkerhetsmässiga bedömningar gjorts. Tabellen får sålunda betraktas som ett tillämpningsexempel.

För de olika kategorierna antas följande minsta avstånd till de olika störkällorna som behandlas i föregående kapitel. I de fall då elektronik tillhörande en viss kategori endast förekommer i sidloben från en mikrovågskälla har detta tagits hänsyn till genom att avståndet har ökat. Normalt är sidlobundertryckningen 20 - 30 dB varför en ökning av avståndet i huvudloben med 100 - 1000 ggr ger samma resultat (för fjärrfält).

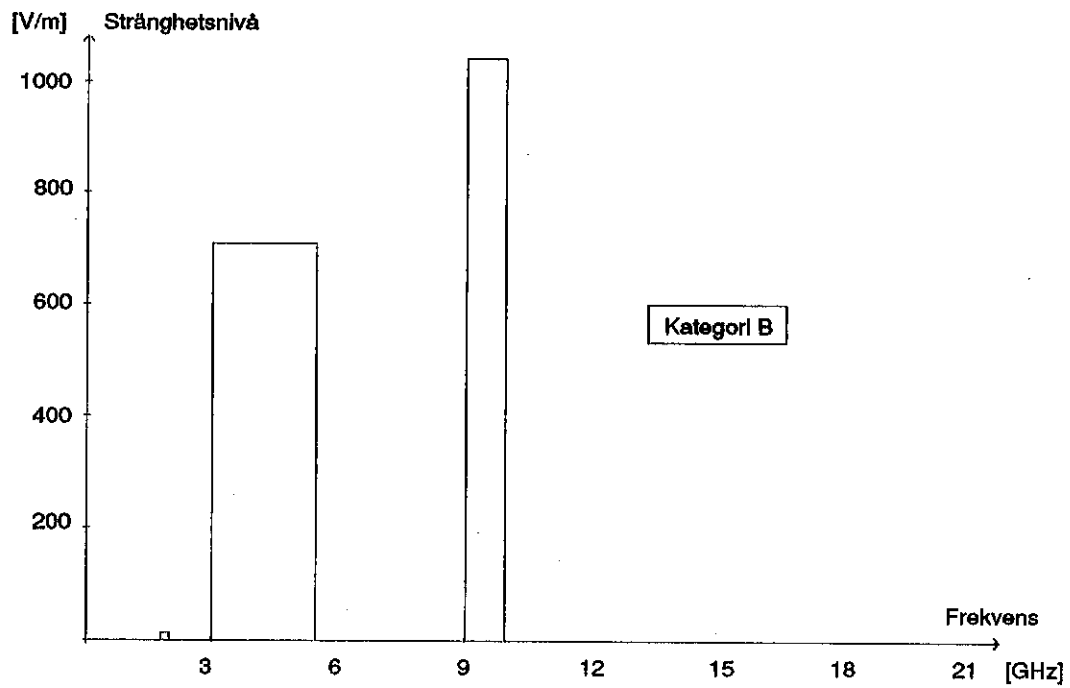
STÖRKÄLLA	Kategori A	Kategori B	Kategori C	Kategori D
Sekundärradar 1030 MHz, flygplats	500	-	100	1000
Primärradar 1300 MHz, flygplats	500	-	100	1000
DECT 1900 MHz, handmodul	0.5	0.5	0.5	0.5
Primärradar 2800 MHz, flygplats	500	-	100	1000
Fartygsradar 3050 MHz	200	5	-	200
Väderradar 5600 MHz	500	-	250	1000
Fartygsradar 9400 MHz	200	5	-	200
Fritidsbåtradar 9400 MHz	100	2	-	200
Markradar 9400 MHz, flygplats	50	-	50	200
Polisradar 10500 MHz	10	-	-	200
Markradar 17000 MHz, flygplats	50	-	50	250

Tabell 16. Minsta avstånd i meter mellan störkälla och störoffer.

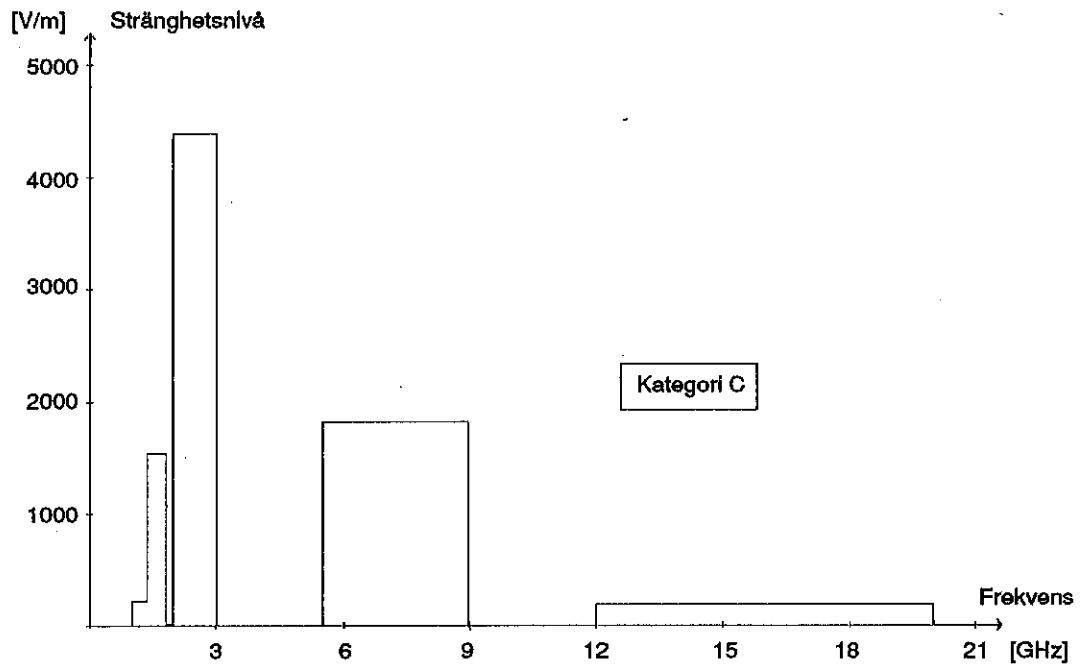
Utgående från avstånd givna i tabell 16 och beräknade fältstyrkor i kapitel 4.3 och 4.5 fås följande kurvor på enveloppen till stränghetsnivåerna för de olika kategorierna.



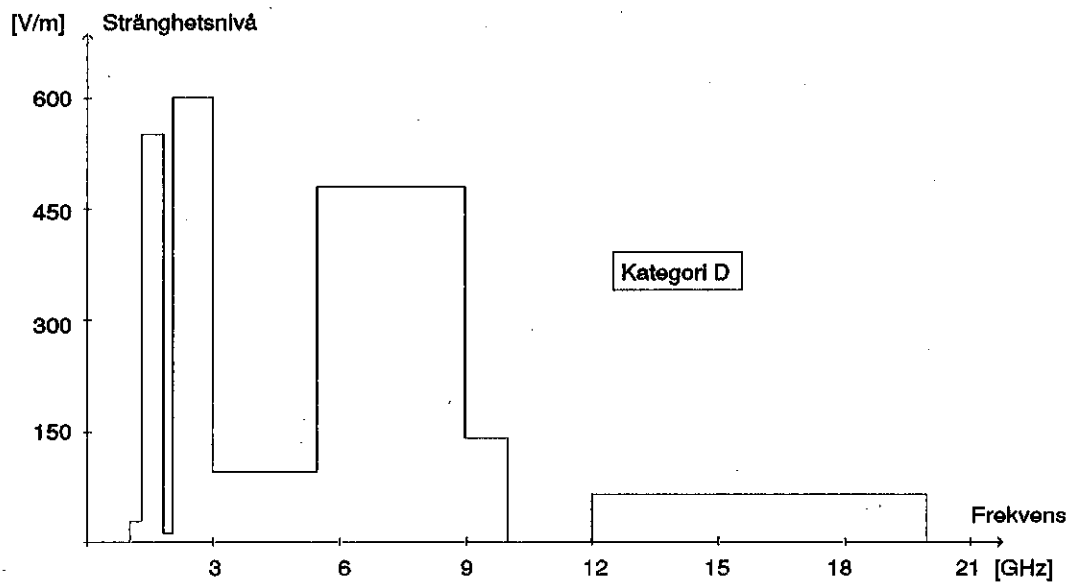
Figur 30. Stränghetsnivå för kategori A.



Figur 31. Stränghetsnivå för kategori B.



Figur 32. Stränghetsnivå för kategori C.



Figur 33. Stränghetsnivå för kategori D.

## 6 Slutsatser - Rekommendationer

I rapporten har visats att konventionell elektronik kan utsättas för elektromagnetiska fält med fältstyrkor i storleksordningen kilovolt per meter. De högsta fältstyrkorna åstadkommer radarsystem, varför de elektromagnetiska fälten är pulsmodulerade. Pulsrepetitionsfrekvensen varierar för olika system men ligger oftast i intervallet 100 Hz - 10 kHz. Pulslängderna varierar också men ligger oftast i storleksordningen mikrosekunder.

Beroende på att frekvensen är hög (över 1 GHz) kan den störande signalen leta sig in genom små hål och slitsar i apparathöljen. Detta innebär att kretskort i elektroniken direkt kan utsättas för kraftiga elektromagnetiska fält. Som diskuteras i kapitel 2 kan en demodulering av den högfrekventa modulerade signalen ske, vilket gör att elektroniken kan påverkas av lågfrekventa pulsstörningar.

Avsaknaden av civila normer för tålighetsprovning av konventionell elektronik med elektromagnetiska fält i det behandlade frekvensområdet gör att provning sällan utförs. Undantagna är vissa typer av utrustningar som till exempel säkerhetskritiska system i flygplan. De militära standarderna MIL-STD-461 och 462 anger stränghetsnivåer och provmetoder för tålighetsprovning i frekvensområdet 14 kHz - 40 GHz. De stränghetsnivåer som anges i MIL-STD-461 är anpassade till förväntade fältstyrkor inom ett system. Detta innebär att de angivna stränghetsnivåerna, uppgår maximalt till 200 V/m, inte beskriver den förväntade miljön för ett system. Dessutom är de provmetoder som finns beskrivna i MIL-STD-462 anpassade för apparater och inte direkt tillämpbara för hela system.

Eftersom säkerhetskritiska system förekommer inte bara i flygplan utan exempelvis också i vanliga fordon, rekommenderas att tålighetsprovning av kritiska system utförs även för mikrovågsfrekvenser. Stränghetsnivåerna bör baseras på en bedömning av sådant slag som presenteras i denna rapport. Viktigt är också att det elektromagnetiska fältet är modulerat, för att eventuella demodulerings fenomen skall kunna upptäckas.

## 7 Referenser

- [1] IEC Publication 801-3
- [2] MIL-STD-462
- [3] MIL-STD-461
- [4] Televerkets författningssamling TVTFS 1990:101
- [5] Harrington R.F. "Time-harmonic electromagnetic fields"
- [6] Balanis C.A. "Antenna theory analysis and design"
- [7] Arbetarskyddsstyrelsens författningssamling; AFS 1987:2
- [8] Thomas S. Laverghetta "Modern microwawe measurements and techniques"
- [9] Paul A. Lynn "Radar systems"
- [10] Clayton R. Paul, Syed A. Nasar "Introduction to electromagnetic fields"
- [11] Alexander Gross, US Department of Defense "Guidelines for developing maximum peak and average field strength envelope graphs for aircraft"