

Rapport

i forbindelse med

FYSISKE UNDERVISNINGSFORSØG
KOMPETENCEKURSUS

af Steen Eiler Jørgensen

10. december 2001

Emne: Elektromagnetiske bølger, herunder 3 cm-bølger

Indhold

Forord	3
Teori	4
Sikkerhed	10
433 MHz	11
Apparatur	11
Opstilling	11
Forsøgets udførelse	12
Resultater	14
Fejlkilder	18
9,44 GHz	19
Apparatur	19
Opstilling	19
Forsøgets udførelse	19
Resultater	21
Fejlkilder	25
Konklusion	26
Litteraturliste	27

Forord

Elektromagnetiske bølger er et meget bredt emne, hvor en fuld gennemgang bør inkludere radio- og mikrobølger, optik, atomfysik, røntgenstråler og kernefysik. Da den fulde titel på det valgte emne er "Elektromagnetiske bølger, herunder 3 cm-bølger" har jeg valgt at fokusere på radiobølgerne, dvs. 433 MHz (70 cm) og 9,44 GHz (3,18 cm). Det har været mit ønske, at såvel forsøgene beskrevet i denne rapport som demonstrationsforedraget i højere grad skulle fokusere på den anvendelsesorienterede side af emnet end den mere teoretiske. De fundne resultater er naturligvis i fuldstændig overensstemmelse med de grundlæggende fysiske love, og principperne og metoderne bag er selvfølgelig gyldige over hele det elektromagnetiske spektrum, og ikke kun i radio- og mikrobølgeområdet. Jeg har blot valgt at fokusere på radiobølgers tekniske anvendelse. Det er ikke desto mindre nyttigt hele tiden at huske på, at de her beskrevne fænomener som hastighed, frekvens, bølgelængde, felter og polarisation ikke blot gælder for radio- og mikrobølger, men også for infrarøde, lys-, røntgen- og gammastråler.

Da der stort set er tale om to forskellige forsøgsrækker med forskelligt udstyr, har jeg valgt at beskrive forsøgene enkeltvis, så de hænger sammen i rapporten. Således kommer afsnittene om apparatur, opstilling, forsøgets udførelse, resultater og fejlkilder i forbindelse med forsøgene med 433 MHz-senderen *først*, derefter følger de samme afsnit for mikrobølgeforsøgenes vedkommende.

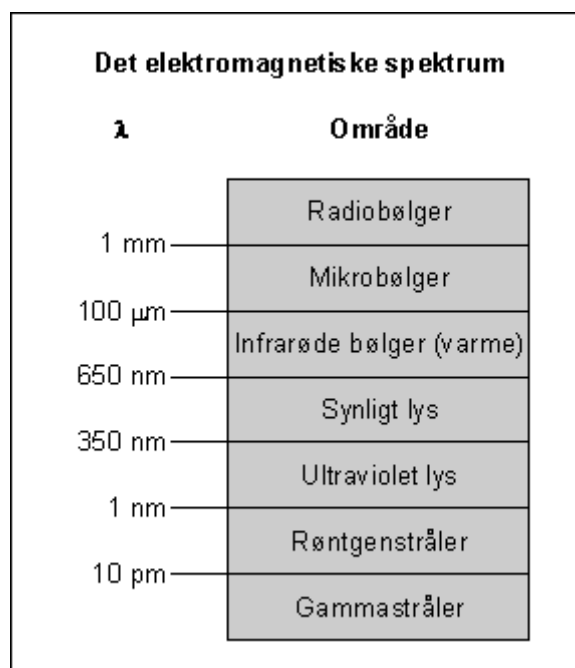
Teori

Det elektromagnetiske spektrum

For alle former for bølger gælder, at produktet af bølgelængden og frekvensen giver udbredelseshastigheden, og dette gælder også for elektromagnetiske bølger:

$$\lambda \cdot \nu = c$$

hvor λ er bølgelængden, målt i meter, ν er frekvensen, målt i Hertz, og c er de elektromagnetiske bølgers hastighed, dvs. lysets hastighed ($3 \cdot 10^8$ m/s). Elektromagnetiske bølger kan have alle mulige forskellige frekvenser og bølgelængder, og de forskellige bølgelængdeområder har meget forskellige kilder, egenskaber og anvendelser. Derfor kalder man det frekvensområde, over hvilket de elektromagnetiske bølger fordeler sig, for *det elektromagnetiske spektrum*. Groft set ser det elektromagnetiske spektrum således ud:



Figur 1: Det elektromagnetiske spektrum groft skitseret

Det ses, at radiobølger er de mest langbølgede og lavfrekvente elektromagnetiske bølger, og at gammastråler er de mest kortbølgede og højfrekvente. Diagrammet ovenfor snyder lidt, idet de forskellige områder her ser ud som om de fylder lige meget. I realiteten er det område, hvor synligt lys befinder sig uhyre lille sammenlignet med de fleste andre bølgelængdeområder.

Spændvidden i det elektromagnetiske spektrum er fænomenal: de korteste bølgelængder er mindre end en atomkerne – de længste kan være adskillige kilometer.

I fysikken anser man typisk området "radiobølger" for et enkelt område. I radioteknikken har man imidlertid yderligere inddelt dette område, da der selv

indenfor dette område er mange forskellige egenskaber knyttet til de forskellige bølgelængder. Radiospektret, som er *vedtaget*, i modsætning til det elektromagnetiske spektrum, som er *naturgivet*, ser således ud:

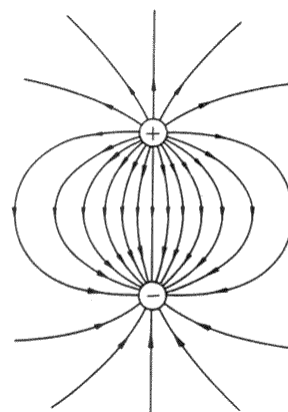
Radiospektret		
ν	Område	λ
3 kHz	VLF	100 km
30 kHz	LF	10 km
300 kHz	MF	1 km
3 MHz	HF	100 m
30 MHz	VHF	10 m
300 MHz	UHF	1 m
3 GHz	SHF	10 cm
30 GHz	EHF	1 cm
300 GHz		1 mm

Figur 2: Inddelingen af radiospektret i Very Low, Low, Medium, High, Very High, Ultra High, Super High og Extremely High Frequency

De forsøg, der beskrives i denne rapport, foregår dels på 433 MHz, dvs. i UHF-området, dels på 9,44 GHz, dvs. i SHF-området.

Antenner

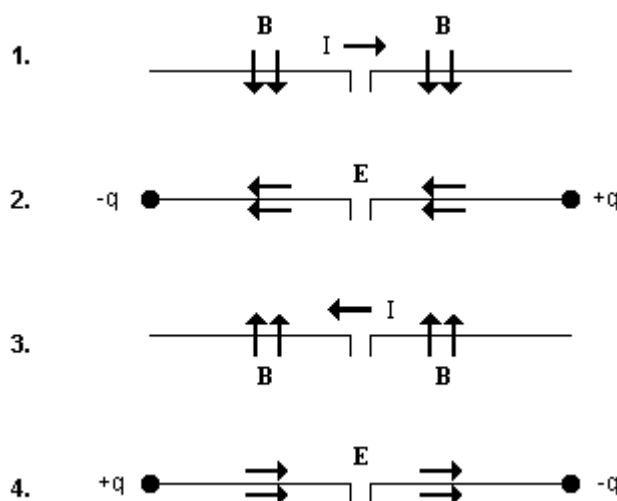
Rundt omkring en elektrisk ladning, f.eks. en elektron, er der et elektrisk felt. Da elektronen er negativt ladet, er det elektriske felt rettet *indad* mod elektronen. Det vil sige, at andre elektroner, som har deres elektriske felt rettet indad vil blive frastødt af elektronen, mens f.eks. en proton, som er positivt ladet, og har sit elektriske felt rettet udad vil blive tiltrukket af elektronen. Hvis vi kan fastholde en elektron og en proton tæt på hinanden, så de ikke støder sammen, vil deres kombinerede elektriske felt være et såkaldt *dipolfelt* (se figur 3).



Figur 3: Feltlinjerne i det elektriske felt fra to modsatte ladninger kaldes et dipolfelt

I elektriske kredsløb kan man frembringe elektriske vekselstrømme med frekvenser helt op til flere hundrede gigahertz. Vi betragter nu en vandret dipolantenne fra stor afstand (følg med på figur 4). Ledes en vekselstrøm ud i denne antenne, sker der følgende:

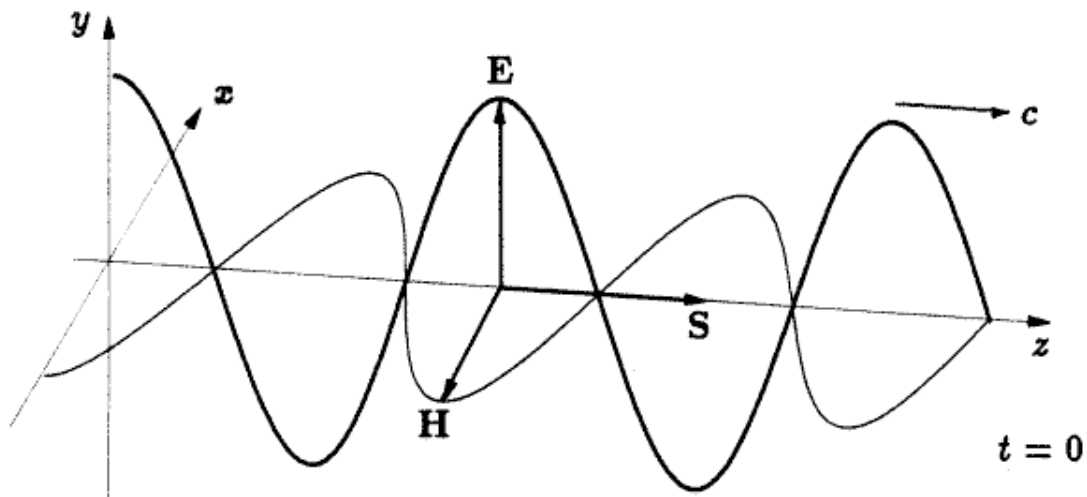
1. Strømmen, I , løber den ene vej (mod højre), og transporterer således ladning fra den venstre ende af dipolantennen til den højre. Da der løber en strøm mod højre, opstår der derfor et magnetfelt (\mathbf{B} -felt) rundt om antennen (jævnfør gribereglen¹), som set fra vores position er rettet nedad.
2. Når strømmen standser, er den højre ende af antennen positivt elektrisk ladet ($+q$) og den venstre negativt ($-q$). Vi ser derfor et elektrisk felt (\mathbf{E} -felt), der er rettet mod venstre.
3. Nu løber strømmen den anden vej, fra højre mod venstre, og vi ser derfor et magnetfelt, som er rettet opad.
4. Idet strømmen standser, er der opbygget positiv ladning i venstre ende af antennen og negativ i højre. Dette medfører et elektrisk felt, der er rettet mod højre.



Figur 4: Strømme og ladninger giver skiftevis anledning til magnetiske og elektriske felter i og omkring en dipolantenne

Fra vores synspunkt, langt væk fra antennen, vil vi altså se et tidsvarierende elektrisk felt, som svinger harmonisk i det vandrette plan, og et tidsvarierende magnetisk felt, der svinger vinkelret på det elektriske, altså lodret. Situationen er skitseret på figur 5, bortset fra at figuren fremstiller det elektriske felt lodret og det magnetiske vandret, svarende til at antennen vender lodret.

¹ Grib om en ledning med højre hånd, så tommelfingeren peger i strømmens retning. Magnetfeltet vil da gå i fingrenes retning rundt om ledningen.



Figur 5: Det magnetiske felt er vinkelret på det elektriske

Den ovennævnte antenne bliver *drevet* af en strøm, der sendes ud i den, og fungerer således som *senderantenne*, og stråler altså elektrisk og magnetisk energi ud i rummet omkring den. Nu tager vi en antenne, der er magen til senderantennen, og anbringer den et sted i rummet, så den er vandret, og så dens længdeakse er parallel med senderantennens. Så vil det elektriske felt, der rammer antennen, flytte ladningerne i vores antenne, således at den strøm, der opstår i vores antenne varierer på nøjagtig samme måde som i senderantennen. Nu har vi altså en *modtagerantenne*.

Dipolantenner er som regel en halv bølgelængde lange. Det vil sige, at på 433 MHz, hvor bølgelængden er 69 cm, vil en dipolantenne være 34,6 cm lang, og på 9,44 GHz, hvor bølgelængden er 3,18 cm, vil en dipolantenne være 1,59 cm lang. Dette gælder imidlertid for en *ideel* antenne som er uendelig tynd. Meget tynde antenneelementer er upraktiske at have med at gøre, så i praksis er dipolantenner altid ca. 5% kortere end den ideelle antenne.

Da dipolantenner skal være en halv bølgelængde lange, kan man se på figur 2, at meget lave frekvenser kan medføre meget store antenner!

Polarisation

Hvis vi vender senderantennen, så den står lodret, så vil det elektriske felt, den udsender, være lodret, og vores vandrette modtagerantenne vil ikke modtage noget signal. Svingningerne i det magnetiske felt kan ikke flytte ladninger på langs af en metalstang. Men hvis vi så også vender modtagerantennen lodret, modtager vi igen det fulde signal. En antennes *polarisation* angiver retningen af det elektriske felt, den udsender eller modtager. Man taler her om lodret eller vandret polarisation. Specielle spiralformede antenner kan frembringe *cirkulær polarisation*, som især anvendes i forbindelse med satellitter i rummet, hvor "vandret" og "lodret" ikke er veldefinerede begreber.

Afstandsafhængighed: nærfelt og fjernfelt

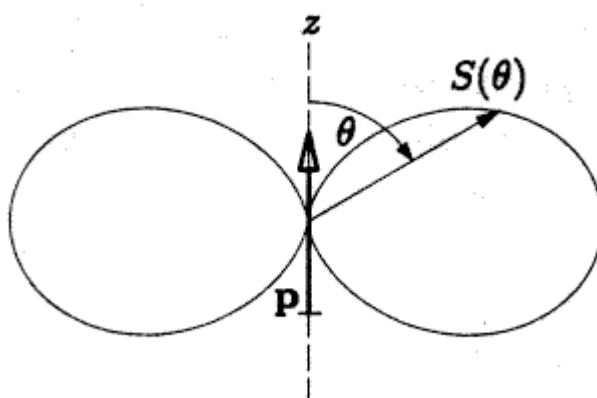
Præcis hvordan det elektromagnetiske felt udstrålet fra en dipolantenne ser ud, er en temmelig indviklet funktion, og det vil føre for vidt at udlede den her. Det interessante

i denne forbindelse er, at formlen for feltets størrelse indeholder nogle led, som aftager med kvadratet på afstanden, ligesom de stationære elektriske og magnetiske felter, og nogle led, som aftager med afstanden *i første potens!* Dette giver de elektromagnetiske bølger mulighed for at række meget langt, da disse led aftager meget langsommere med afstanden end de andre. Derfor er det ret kompliceret at beregne, hvordan feltet fra en antenne ser ud tæt på antennen, da man skal have alle led med, hvorimod man ved større afstande kan nøjes med "1/r"-leddene. Man taler derfor om antennens "nærfelt", hvor man ikke kan se bort fra højere ordens led, og dens "fjernfelt", hvor de simple formler gælder.

Under udførelsen af forsøgene i denne rapport er det mest hensigtsmæssigt at nøjes med at beskæftige sig med fjernfeltet. Som en hovedregel kan man antage, at man kan se bort fra nærfeltet i 10 bølgelængders afstand fra senderantennen, dvs. 7 m for 433 MHz-senderens vedkommende, og 30 cm for 9,44 GHz-senderens.

Yagi-antennen

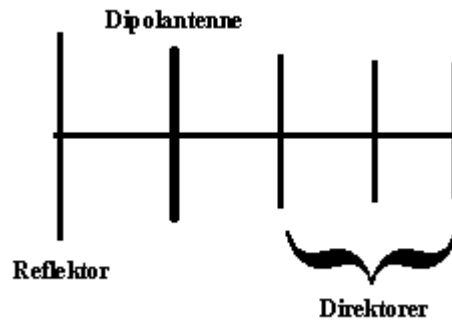
Dipol-antennen udstråler elektromagnetiske bølger hele vejen rundt om sin længdeakse (se figur 6.) De eneste to retninger, hvor der ikke udsendes stråling, er langs med antenneelementet. Ofte ønskes en bedre retningsvirkning, både mht. senderantennen, hvor det ønskes at koncentrere den udstrålede energi i en bestemt retning, og mht. modtagerantennen, hvor det ønskes at gøre antennen særligt følsom i en bestemt retning, og samtidig nedsætte følsomheden i alle andre retninger, for at holde uønsket støj ude.



Figur 6: Udstrålingsdiagram for dipolantenne

Den mest effektive måde at ændre udstrålingen af en dipolantenne, er ved at anvende *parasitiske elementer*. Det er passive metalstænger af forskellig længde, som anbringes parallelt med antenneelementet i forskellige afstande foran og bagved det aktive element. Som regel anbringes et enkelt element, som er lidt længere end bølgelængden foreskriver, i den retning, hvor signalet ønskes *dæmpet*. Dette element kaldes en *reflektor*, da elementet reflekterer signalet fra det aktive element. Dette medfører en forstærkning af signalet i den ene retning og en dæmpning i den anden.

Ligeledes kan der anbringes parasitiske elementer, som er lidt for korte i forhold til bølgelængden, *foran* dipolen. Disse hjælper med til at forstærke signalet i den ønskede retning, og kaldes *direktorer* (se figur 7).



Figur 7: Principskitse af Yagi-antenne

Principielt er der ikke nogen øvre grænse for, hvor mange direktorer en Yagi-antenne kan have, visse har over hundrede. Jo flere direktorer, desto mere retningsfølsom bliver antennen. På visse antenner udgøres reflektoren ikke af et enkelt element, men enten af flere elementer, monteret i V-form omkring dipolen, eller af et net eller gitter.

Forsøgene i denne rapport

Modtagerantennen i begge forsøg indeholder en diode, som ensretter den højfrekvente vekselspænding, så den kan detekteres med jævnstrømsapparat. Da en dipolantenne til 9,44 GHz kun skal være 1,6 cm lang, *består modtagerdipolantennen kun af dioden!*

Vær under forsøgene opmærksom på, at der er mange ting i omgivelserne, der kan forstyrre målingerne. Anbring så vidt muligt forsøgsapparatet langt væk fra mure, vægge, metalgenstande, elektriske og elektroniske apparater og personer. Professionelle antennemålinger foregår i såkaldt "radiodøde" rum, som er fuldstændigt afskærmet fra indstråling fra verden udenfor, og hvis vægge er beklædt med materiale, der absorberer radiobølger. Det næstbedste er at gå ud i det fri, men hvis man bare passer på ikke at have for mange forstyrrende ting i nærheden, kan det såmænd også godt lade sig gøre indendørs.

Sikkerhed

Både 433 MHz- og 3cm-senderen strømforsynes fra lysnettet, og man bør derfor iagttage de sædvanlige sikkerhedsforskrifter i den forbindelse.

433 MHz-senderen har en udstrålet effekt på ca. 1 W, mens 9,44 GHz-senderen har en udstrålet effekt på 10 mW. Til sammenligning har en GSM-mobiltelefon, som typisk sender på 900 og (visse også på) 1.800 MHz en udstrålet effekt på ½-1 W afhængig af afstanden til den nærmeste basestation. Det diskuteres, hvorvidt mobiltelefoner kan være årsag til kræft, men der foreligger endnu ingen klare undersøgelser. Der er imidlertid ingen tvivl om, at mobiltelefoner *ikke* kan forårsage akutte skader, som f.eks. forbrændinger.

I almindelige husholdningsmikrobølgeovne anvendes som regel frekvensen 2,45 GHz. Det skyldes for det første, at vandmolekylet har en resonans på denne frekvens, så den er særligt velegnet til at varme vand med. For det andet er der tale om et kompromis mellem de høje (og mere energirige) frekvenser og de lavere frekvenser, som har større indtrængningsdybder. Energihalveringsdybden i vand for elektromagnetiske bølger med en frekvens på 2,45 GHz er 25 mm, hvilket gør den velegnet til opvarmning af mindre retter mad. Mikrobølgeovne beregnet på opvarmning af større mængder anvender lavere frekvenser for bedre at kunne trænge ind i det materiale, der skal opvarmes.

Den anvendte 3 cm-sender har en frekvens på 9,44 GHz, hvor energihalveringsdybden i vand er 1 mm.

Forsøg med elektromagnetiske bølger bør kun foregå på frekvenser, hvor dette er tilladt, så man ikke forstyrrer vigtige radiotjenester. 433 MHz og 9,44 GHz er i Danmark tilladte frekvenser til undervisningsbrug indenfor visse effektmæssige begrænsninger.

433 MHz – 70 cm

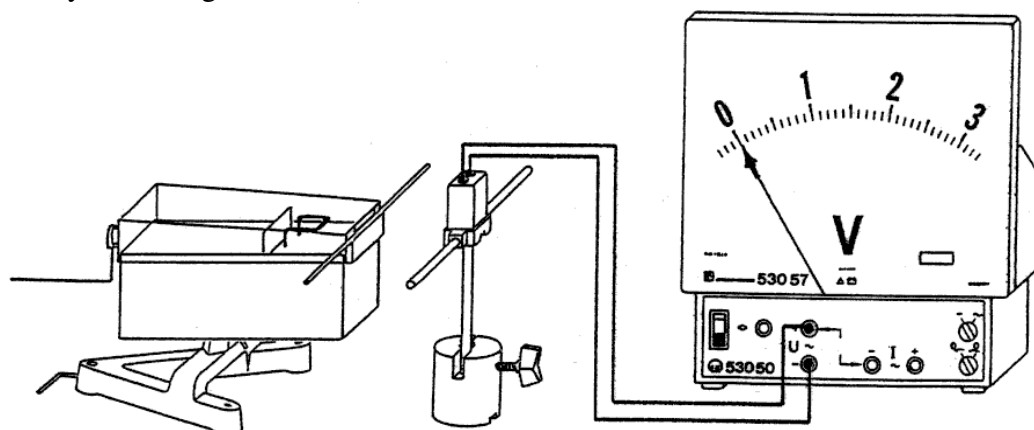
Apparatur

Til forsøgene med 433 MHz-senderen skal anvendes:

- Strømkabel
- Strømforsyning til sender
- 433 MHz-sender
- to stativfodder
- to antennestave
- modtagerdipol med glødelampe
- modtagerdipol med diode
- trækasser
- to lange (1,5-2 m) ledninger med bananstik, snoet sammen
- voltmeter, 10 V jævnstrøm
- amperemeter, 300 μ A jævnstrøm
- Yagi-antenne
- stav til montering af Yagi-antenne m. gradinddeling
- stav til montering af modtagerdipol
- wattmeter
- målebånd

Opstilling

Strømforsyningen tilsluttes lysnettet. Den øverste knap skal være slået til venstre, stilling "Aus". Når den nederste knap, "Netz", slås til, ("Ein"), er strømforsyningen tændt. Potentiometrenes stilling er underordnet. Strømforsyningen tilsluttes senderen med det sorte kabel, som ikke kan vendes forkert. På senderen anbringes antennestaven symmetrisk, således at begge ender rager 12,15 cm ud over senderen, der er skrues fast i en stativfod. Modtagerantennen (dipolantenne med diode) skrues fast til en anden stativfod. To lange ledninger snos sammen og forbindes fra modtagerantennen til jævnstrømvoltmeteret (10 V-). Vær opmærksom på, at senderen indeholder radiator, og derfor skal bruge et minuts tid på at varme op, før sendestyrken antager sin maksimale værdi.



Figur 8: Forsøgsopstilling til bestemmelse af feltets variation med afstand mellem sender- og modtagerantenne

Forsøgenes udførelse

Bestemmelse af feltets variation med afstand mellem sender- og modtagerantenne

Modtagerantennen anbringes så tæt på senderantennen som muligt, uden at de rører hinanden. Spændingen over modtagerantennen måles, og afstanden mellem antennerne og den aflæste spænding noteres. Dette gøres for en lang række forskellige afstande mellem sender- og modtagerantenne – det anbefales at øge afstanden med 2 cm ad gangen. Til sidst plottes antennespændingen som funktion af afstanden samt den reciprokke spænding som funktion af afstanden. Det sidste gøres for at påvise $1/r$ -afhængigheden.

Måling af udstrålingsdiagram for Yagi-antenne

Senderantennestaven fjernes fra senderen, og erstattes med den lille foldede modtagerdipol, der er monteret i en blå kasse, og som kan hægtes fast på senderen med en lille krog. Fra den blå kasse udgår et koaksialkabel, hvor der i den anden ende er anbragt et N-connector-stik, som tilsluttes "SOURCE"-indgangen på effektmeteret. Kablet fra Yagi-antennen tilsluttes "LOAD"-indgangen på effektmeteret, som indstilles på "POWER". Yagi-antennen fastspændes i vandret position på den roterende stav med gradinddeling, som spændes fast til bordpladen.

Modtagerdipolen med diode fastgøres vandret i den anden stav, som spændes fast til en bordplade et godt stykke fra Yagi-antennen, og modtagerdipolen rettes ind efter Yagi-antennen, således at den står vinkelret på retningen til Yagi-antennen. Principielt bør modtagerdipolen anbringes mindst 10 bølgelængder fra senderantennen for at undgå effekter fra nærfeltet, men den inducerede antennespænding bør naturligvis stadig være målbar, senderens begrænsede udstrålingseffekt taget i betragtning. I dette forsøg var sender- og modtagerantennen anbragt 4,61 m fra hinanden. Modtagerdipolen tilsluttes jævnstrømsamperemeteret² (300 μ A-).

Med senderen *slukket* justeres effektmeteret til nul med "ZERO"-skrueknappen, da antennen jo ikke udsender nogen effekt, når senderen er slukket. Yagi-antennen indstilles til at pege direkte imod modtagerantennen, og vinkelmåleren i bunden af staven nulstilles.

Nu registreres sammenhørende værdier for den udstrålede effekt, Yagi-antennens retning samt strømstyrken i modtagerantennen. Der måles i alt 36 gange; hver 10. grad hele vejen rundt.

Når målingerne er afsluttet, normeres de målte værdier til hinanden vha. de målte effekter. Genstande i nærheden, lokalets opbygning og lignende kan påvirke, hvor stor effekt antennen udsender. Udsender antennen mindre effekt i én situation end i en anden, vil modtagerantennestrømmen selvfølgelig være mindre, og skal derfor korrigeres. Det gøres ved at multiplicere alle de målte antennestrømme med forholdet mellem den maksimale udsendte effekt og den aktuelle:

² I dette forsøg anvendes et amperemeter til at måle antennestrømmen i stedet for et voltmeter til at måle spændingen over antennen. Grunden til dette er, at det er nemmere at måle små strømme end små spændinger. I dette forsøg målt antennestrømme helt ned til få mikroampere.

$$I_i^{\text{korrigeret}} = I_i^{\text{målt}} \cdot \frac{P_{\text{max}}}{P_i}$$

De fundne værdier kan plottes i et rektangulært plot, men ved udarbejdelse af udstrålingsdiagrammer plottes værdierne traditionelt polært.

Efter at have målt udstrålingsdiagrammet for antennen vandrette position vendes såvel Yagi-antennen som modtagerdipolen ”på højkant”, og der optages 36 målinger i denne konfiguration, som også plottes polært.

Bestemmelse af de parasitiske elementers indvirkning på forstærkningen

Strømstyrken i modtagerantennen måles for følgende kombinationer af parasitiske elementer monteret:

1. Ingen parasitiske elementer monteret
2. Første direktor monteret (tættest på dipolen)
3. Reflektor monteret
4. Reflektor og første direktor monteret
5. Alle parasitiske elementer monteret

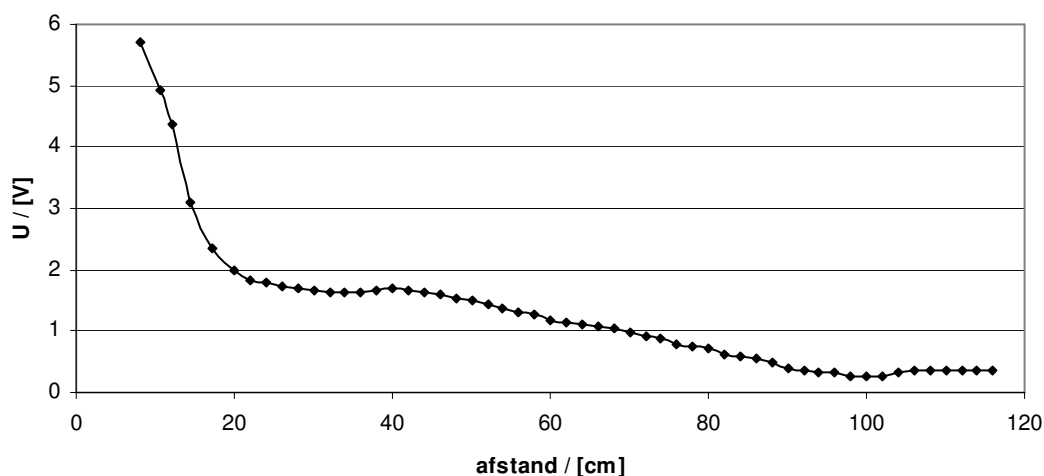
Resultaterne plottes i et søjlediagram.

Resultater

Bestemmelse af feltets variation med afstand mellem sender- og modtagerantenne

Antennespændingen målt for en række afstande mellem sender- og modtagerantenne, og de sammenhørende værdier er plottet på grafen herunder:

433 MHz: antennespænding vs. afstand

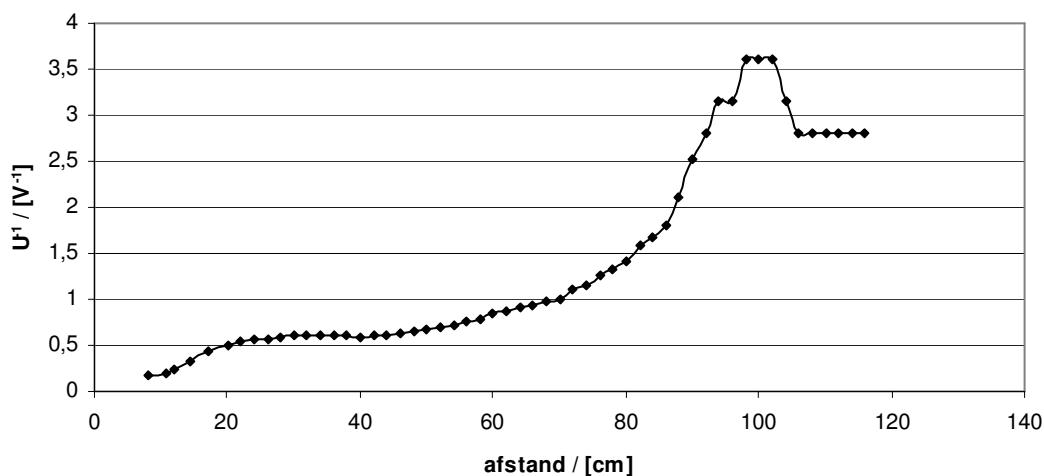


Det ses, at antennespændingen falder meget hurtigt i begyndelsen, hvorefter den nærmest stabiliserer sig på et niveau, hvorefter den igen begynder at falde, næsten lineært. Det første, hastigt aftagende, område er sandsynligvis der, hvor nærfeltet stadig gør sig gældende – de højere ordens led aftager som bekendt hurtigt. Den lille peak omkring 40 cm er svær at forklare, men det er vigtigt at lægge mærke til, at vi endnu ikke er en hel bølgelængde væk fra senderantennen! Principielt bør man bevæge sig mere end ti bølgelængder væk fra senderen, hvis man vil være helt fri for påvirkning fra nærfeltet, men som det fremgår af ovenstående graf, er spændingen faldet så meget, at der ikke længere kan registreres noget måleligt udslag på voltmeteret, allerede inden vi er to bølgelængder væk fra senderantennen.

Den mindste afstand der er målt er 8 cm. Ved kortere afstande *falder* den inducerede antennestrøm igen, da afstanden imellem sender- og modtagerantenne her bliver så lille, at de begynder at koble kapacitivt og induktivt til hinanden.

For at forsøge at påvise $1/r$ -afhængigheden plottes den reciproke antennespænding:

433 MHz: reciprok antennespænding vs. afstand

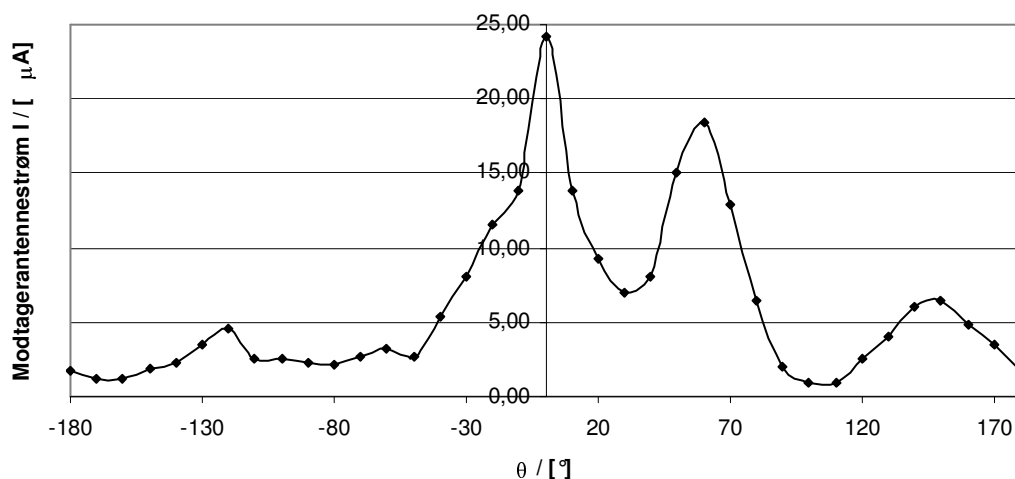


End ikke den yderste del af grafen kan sige at være bare nogenlunde lineær. Dette skyldes naturligvis dels, at vi sandsynligvis er så tæt på senderantennen, at nærfeltet stadig spiller en rolle; dels, at feltet bare 1 meter fra senderantennen er så svagt, at det er svært at aflæse et voltmeter med en skala på op til 10 V.

Måling af udstrålingsdiagram for Yagi-antenne

Forsøget udførtes som beskrevet ovenfor. Med antennen i vandret position målt følgende værdier:

433 MHz: udstrålingsdiagram for Yagi-antenne - vandret



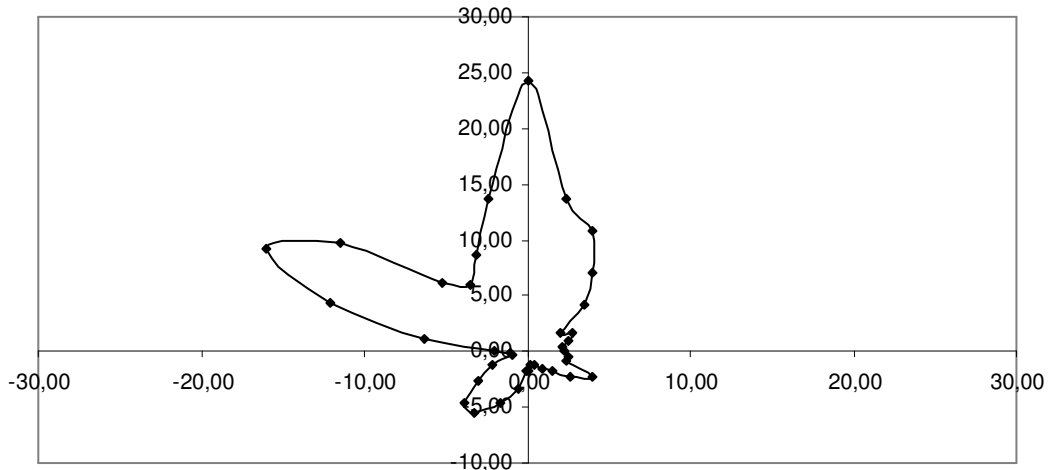
Plottes ovenstående værdier polært, fås nedenstående udstrålingsdiagram. Her er værdierne plottet i MS Excel, som ikke er i stand til at plote polært. Derfor er værdierne konverteret til x - og y -værdier således:

$$x = I \sin \theta$$

$$y = I \cos \theta$$

θ er den vinkel, som under forsøget er aflæst på drejeskiven på Yagi-antennen. Positiv omløbsretning regnes *med uret*. Det vil sige, at hvis antennen er drejet f.eks. $+30^\circ$, så er det retningen -30° i forhold til antennen, der måles. Derfor er nedenstående udstrålingsdiagram ”vendt om”, dvs. spejlvendt, således at diagrammet afspejler antennens opbygning.

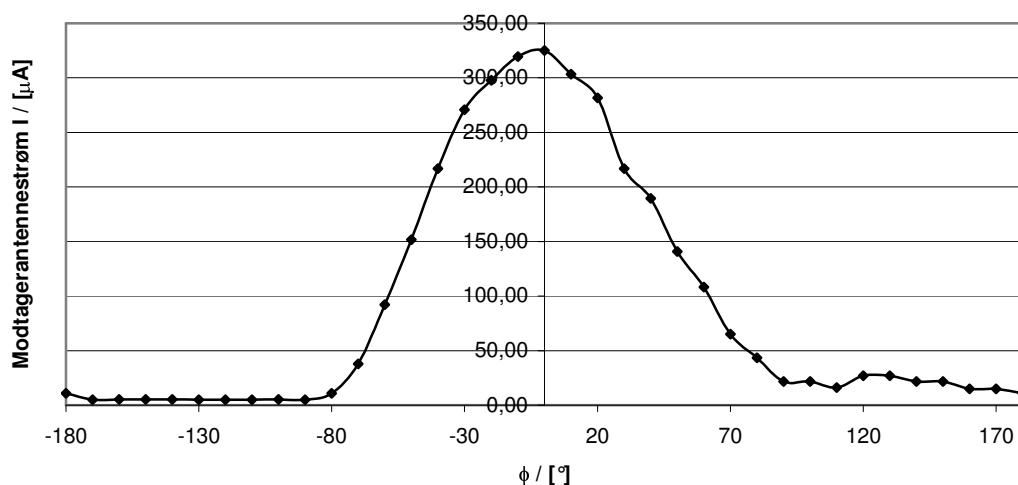
433 MHz: udstrålingsdiagram for Yagi-antenne - vandret



Det ses, at antennen har en tydelig sløjfe i hovedudstrålingsretningen. Derudover har den også en betydelig sløjfe ved 60° på venstre side, og en lille bagsløjfe ved 150° . Disse sløjfer er til stede i højre side, men voldsomt dæmpede. Der er ingen grund til at tro, at dette afspejler antennens faktiske egenskaber; denne voldsomme asymmetri stammer snarere fra det faktum, at antennemålingerne foregik i et lokale, der var decideret uegnet til antennemålinger, dvs. fyldt med metal, ledninger, udstyr, lamper og ikke mindst personer, der bevægede sig rundt i lokalet.

Med antennen i lodret position målt følgende værdier:

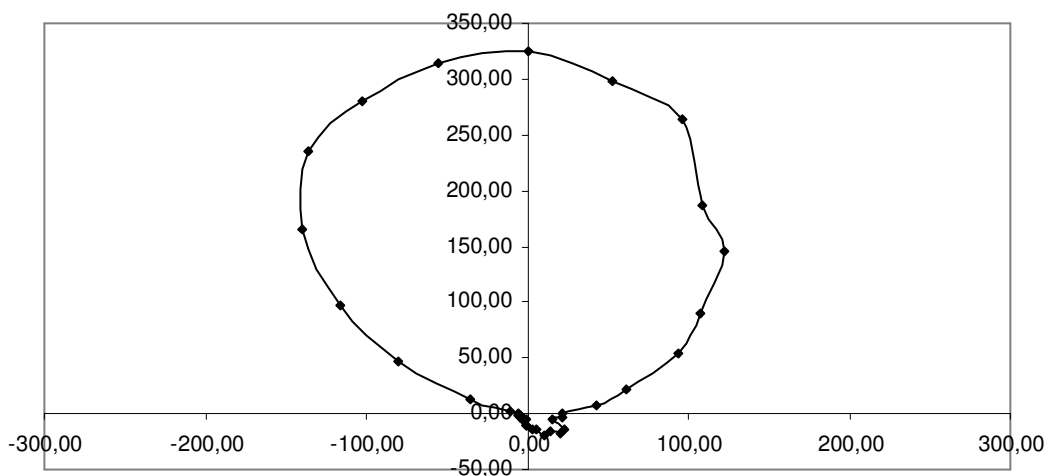
433 MHz: udstrålingsdiagram for Yagi-antenne - lodret



Her repræsenterer de positive værdier antennens ”overside” og de negative undersiden. (Antennens underside regnes som den, hvor koaksialkablet udgår fra.)

Disse målinger giver anledning til følgende udstrålingsdiagram:

433 MHz: udstrålingsdiagram for Yagi-antenne - lodret

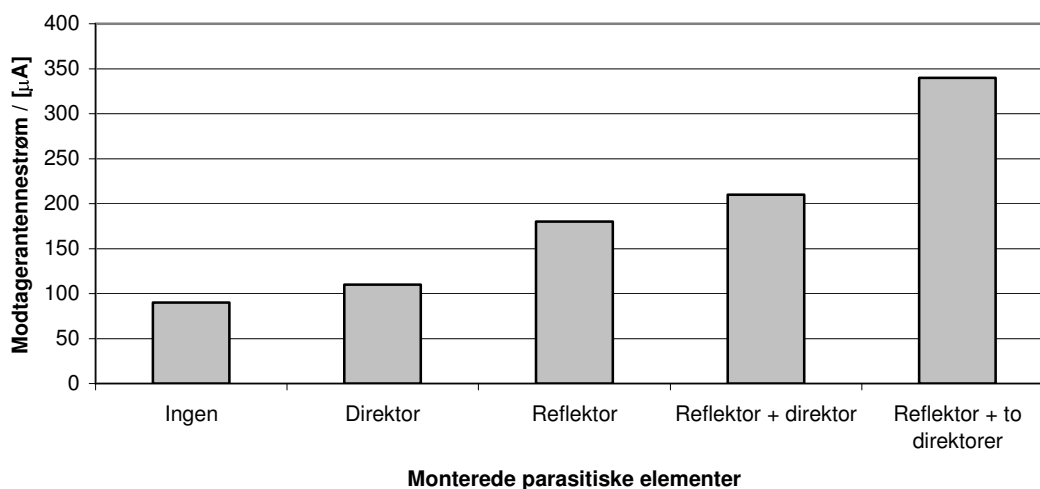


Det lodrette udstrålingsdiagram er ikke plaget af asymmetrier i nær så høj grad som det vandrette. Dette må skyldes, at påvirkningen fra omgivelserne er langt større ved vandret polarisation end ved lodret; i øvrigt uvist af hvilken årsag. Det er interessant i denne forbindelse at lægge mærke til, at den maksimale strømstyrke i modtagerantennen ved vandret polarisation er $24 \mu\text{A}$, hvor den maksimale strømstyrke ved lodret polarisation er $325 \mu\text{A}$. Principielt bør den inducerede modtagerantennestrøm selvfølgelig være den samme, ligegyldigt om antennerne står vandret eller lodret, så længe de har *samme* orientering!

Bestemmelse af de parasitiske elementers indvirkning på forstærkningen

Følgende værdier for modtagerantennestrømmen for forskellige kombinationer af parasitiske elementer noteredes:

Virkning af parasitiske elementer



Det er interessant at lægge mærke til, at en enkelt direktor kun giver en lille forstærkning, mens reflektoren øger forstærkningen med en faktor 2. Har man kun mulighed for eller plads eller råd til ét parasitisk element, bør man da klart vælge en reflektor

frem for en direktor. Monterer man da en direktor på sin eksisterende antenne+reflektor-kombination øger dette forstærkningen marginalt, hvorimod tilføjelse af endnu en direktor næsten fordobler forstærkningen igen. Med den samlede Yagi-antenne induceres altså næsten fire gange så stor strøm i modtagerantennen, som med den bare dipol.

Fejlkilder

Som det allerede er nævnt, er det problematisk at måle afstandsfunktionen med 433 MHz-senderen, da energien er faldet til det næppe målbare allerede inden man er to bølgelængder væk fra senderen. Ikke desto mindre kan man da påvise, at feltstyrken falder med afstanden.

Med hensyn til Yagi-antennen er det i hvert fald lykkedes at måle et fint udstrålingsdiagram med antennen i lodret position. Som allerede nævnt bør udstrålingsdiagrammet for den vandrette position naturligvis være præcis lige så symmetrisk, som antennens opbygning giver anledning til. Derudover er den venstre sidesløjfe sandsynligvis ikke nær så stor, som den er målt til. Det kunne være interessant en dag – hvis tiden og vejret tillader det! – at gentage disse målinger udendørs.

9,44 GHz – 3 cm

Apparatur

Til forsøgene med mikrobølger skal anvendes:

- mikrobølgesender m. hornantenne
- mikrobølgemodtager
- modtagerdiode
- Amperemeter, 10 mA vekselstrøm
- to ledninger med bananstik
- metalplade på stativfod
- målebånd
- vinkelmåler

Opstilling

Mikrobølgesender og -modtager tilsluttes lysnettet og tændes, og modtagerdioden, der er fastspændt på plexiglasstaven tilsluttes forstærkeren. Såvel sender som modtager skal lige bruge et minuts tid til at varme op. Når dioden modtager signaler fra senderen, genereres en tone i modtagerens højttaler. Der skrues helt ned for højttalerstyrken på modtageren. Over højttalerudgangen på modtageren tilsluttes et amperemeter (10 mA~) til modtageren *i serie* med en dekademodstand, som indstilles på 300 Ω . Modtagerdioden anbringes så tæt på hornantennen, som der ønskes at måle, og der skrues forsigtigt op for højttalerstyrken, indtil amperemeteret slår næsten maksimalt ud.

Forsøgenes udførelse

Påvisning af, at det elektriske felt i de elektromagnetiske bølger er transversale

Inde i senderens hornantenne er der monteret en lille antennestav, som er lodret. Det vil sige, at de udstrålede elektromagnetiske bølger har et lodret elektrisk felt og et vandret magnetisk felt.

Modtagerdioden stilles lodret, og højttalerstyrken på modtageren indstilles således, at amperemeteret viser maksimalt udslag. Nu vippe modtagerdioden i skridt på 10° ned i vandret stilling i et lodret plan, der er parallelt med bølgenes udbredelsesretning, således at dioden til sidst kommer til at pege i udbredelsesretningen. Diodens hældning måles med vinkelmåleren. For hver tiende grad noteres sammenhørende værdier for diodens hældning fra lodret og strømstyrken fra modtageren.

Påvisning af, at det elektriske felt er lodret polariseret

Modtagerdioden stilles atter lodret, og amperemeteret skulle gerne igen vise maksimalt udslag. Ellers må højttalerstyrken justeres. Nu vippe modtagerdioden i skridt på 10° ned i vandret stilling i et lodret plan, der er vinkelret på bølgenes udbredelsesretning, således at dioden til sidst kommer til at ligge vandret, på tværs af udbredel-

sesretningen. For hver tiende grad noteres sammenhørende værdier for diodens hældning fra lodret og strømstyrken fra modtageren.

Måling af de elektromagnetiske bølgers afstandsafhængighed

Modtagerdioden stilles lodret, og placeres så tæt ved senderantennen som muligt, uden at amperemeteret overskrider sit visningsområde. Der kan eventuelt justeres på højtalerstyrken. Ved hjælp af målebåndet måles afstanden mellem senderantennens forkant og modtagerdioden. Der måles fra forkanten af hornantennen, da det skønnes, at feltstyrken ikke er aftaget væsentligt på sin vej gennem antennen. Sammenhørende værdier for afstanden mellem antennerne og strømstyrken noteres og plottes.

Der laves også et plot af den reciprokke strømstyrke som funktion af afstanden, da $1/r$ -afhængigheden gerne skulle give udslag i en ret linje.

Måling af udstrålingsdiagram for hornantenne

I denne undersøgelse stilles dioden lodret, og flyttes *rundt om* hornantennen i det vandrette plan. Ved hjælp af vinkelmåleren måles vinklen imellem hornantennens udstrålingsretning og dioden. Der måles fra hornantennens forkant. Sammenhørende værdier for retningen til dioden fra hornantennens udgang og strømstyrken registreres. Værdierne plottes polært.

Bestemmelse af bølgelængde

For at bestemme bølgelængden af mikrobølgerne anbringes en metalplade ca. 80 cm fra senderantennen med front mod de indkommende bølger. Modtagerdioden anbringes imellem senderen og metalpladen – tættest på metalpladen. Dioden bevæges herefter lidt frem og tilbage i forskellige afstande fra metalpladen, til amperemeteret slår maksimalt ud. Herefter justeres amperemeteret til at vise maksimalt udslag.

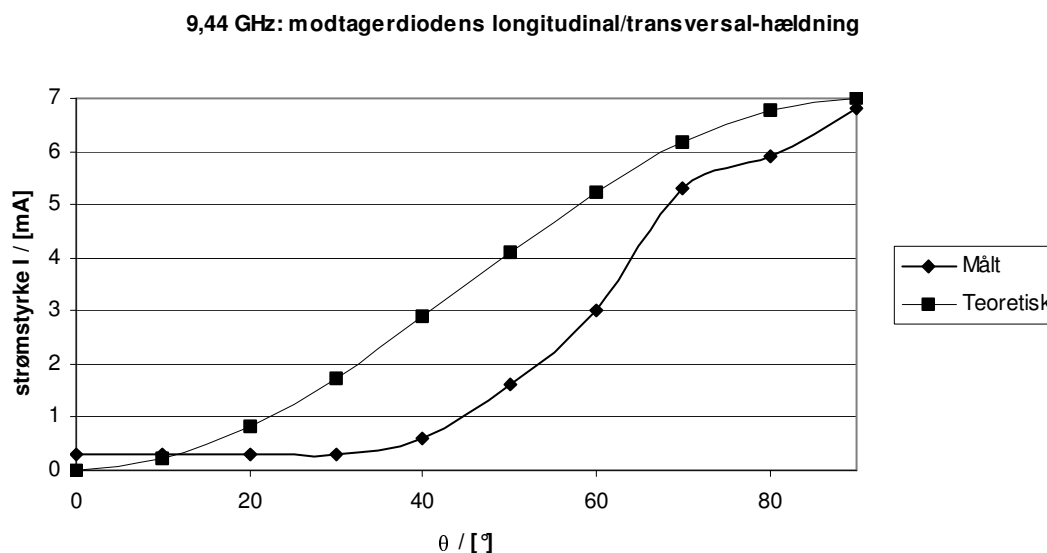
Modtagerdioden anbringes så tæt på metalpladen som muligt – uden at røre! – og flyttes langsomt og forsigtigt væk fra metalpladen, mens der holdes øje med amperemeteret. I en bestemt afstand opnås maksimalt udslag på amperemeteret, hvorefter det falder igen. Diodens afstand til metalpladen noteres, og kaldes a , til denne værdi knyttes $n = 0$. Herefter flyttes dioden langsomt videre; det næste maksimum springes over, men dioden standses igen ved det andet maksimum. Nu måles afstanden fra dioden til metalpladen, l , og afstanden fra det første maksimum til dette er da $x = l - a$. Til denne position hører værdien $n = 1$. Således fortsættes med at måle hver andet maksimum, op til $n = 10$.

De ti målinger af x plottes som funktion af $n = \{1...10\}$. Den bedste rette linje gennem punkterne tegnes, og hældningen bestemmes. Hældningen af linjen er en middelværdi for de målte afstande imellem de enkelte maksima, og dermed en bestemmelse af bølgelængden.

Resultater

Påvisning af, at det elektriske felt i de elektromagnetiske bølger er transversale

Der foretoges ni målinger, hvor modtagerdioden antog hældninger fra 0 til 90° i det plan, der var parallelt med udbredelsesretningen, og disse er plottet nedenfor:



Strømstyrken er ganske rigtigt størst, når modtagerdioden står lodret, og forsvindende, når den ligger i bølgenes udbredelsesretning. Der er således ingen tvivl om, at de elektromagnetiske svingninger er transversale. Sammen med de målte værdier er plottet kurve med de teoretiske værdier, med ligningen

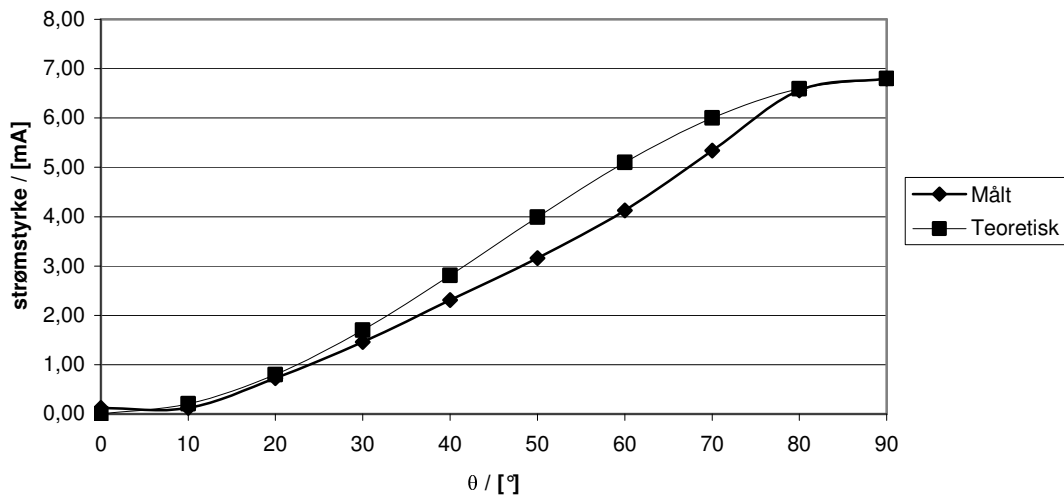
$$y = I_{max} \sin^2 \theta$$

Kurven er desværre ikke så pæn i forhold til de teoretiske værdier, og det skyldes sandsynligvis usikkerhed mht. måling af diodens hældning.

Påvisning af, at det elektriske felt er lodret polariseret

Der foretoges ni målinger, hvor modtagerdioden antog hældninger fra 0 til 90° i det plan, der var parallelt med udbredelsesretningen, og disse er plottet nedenfor:

9,44 GHZ: modtagerdiodens vandrette/lodrette hældning



Sammen med de målte værdier er også her plottet en kurve med de teoretiske værdier

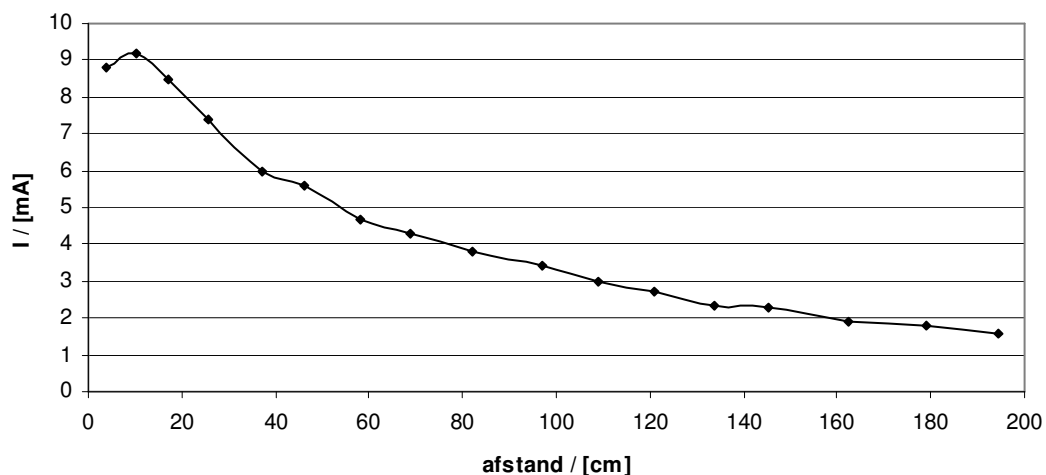
$$y = I_{max} \sin^2 \theta$$

Denne kurve er noget pænere end den foregående, og viser med al ønskelig tydelighed, at det elektriske felt, der udsendes fra senderen, er lodret orienteret, og at de elektromagnetiske bølger således er lodret polariserede.

Måling af de elektromagnetiske bølgers afstandsafhængighed

Nu anbragtes dioden så tæt på senderantennen som muligt, og for en lang række forskellige afstande målte afstanden mellem dioden og forkanten af antennen samt strømstyrken. Disse sammenhørende værdier er plottet nedenfor:

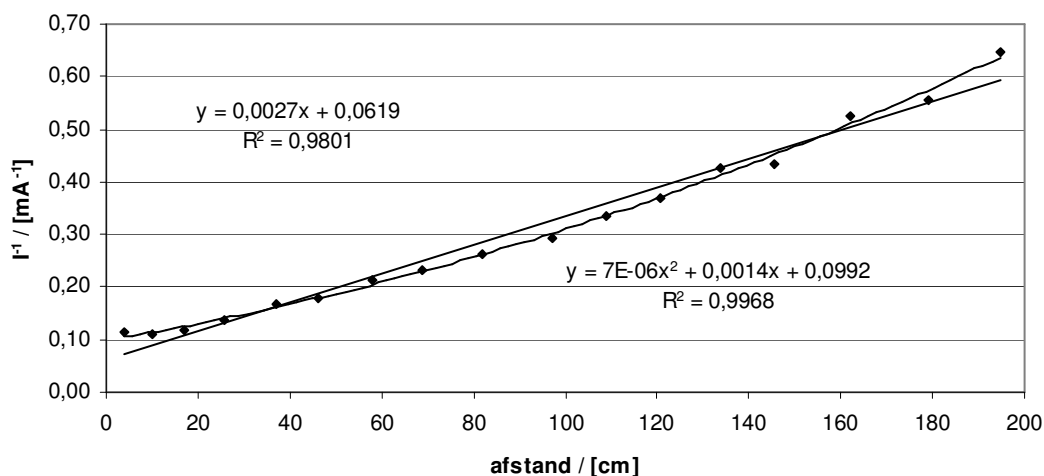
9,44 GHz: strømstyrke vs. afstand



Det ses, at strømstyrken ikke antager maksimal værdi i den første måling, selvom den er tættere på kilden end den anden måling. Dette kan skyldes geometriske forhold mellem dioden og hornantennens apertur. Derudover ses en fint aftagende kurve. For

at undersøge, hvor nøje målingerne stemmer overens med teorien, plottes også den reciproke strømstyrke som funktion af afstanden:

9,44 GHz: reciprok antennestrøm vs. afstand

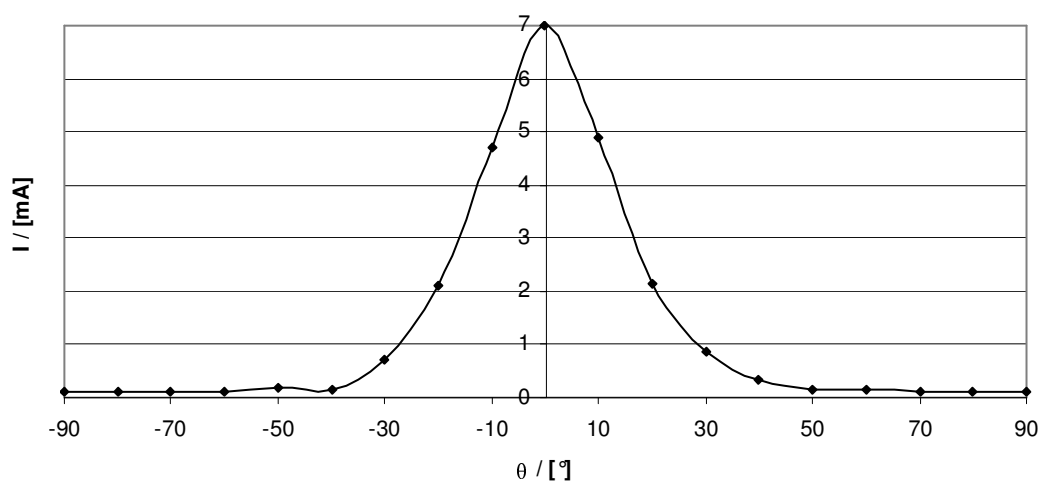


Målingerne ligger ikke *helt* på en linje, men det er dog muligt at tegne en bedste rette linje gennem punkterne med et R-kvadrat på 0,98. Det ses, at hældningen er svagt stigende, og der er også fittet med et andengradspolynomium. Dette giver et højere R-kvadrat, og dermed et bedre fit, men som det kan ses, antager koefficienten foran x^2 kun $7 \cdot 10^{-6}$, så i dette tilfælde må $1/r$ -afhængigheden siges at være påvist.

Måling af udstrålingsdiagram for hornantenne

Modtagerdioden placeredes *ved siden af* hornantennen, og ved at flytte den rundt om hornantennen i samme afstand fra denne, registreredes forskellige værdier af strømstyrken. Disse er vist herunder:

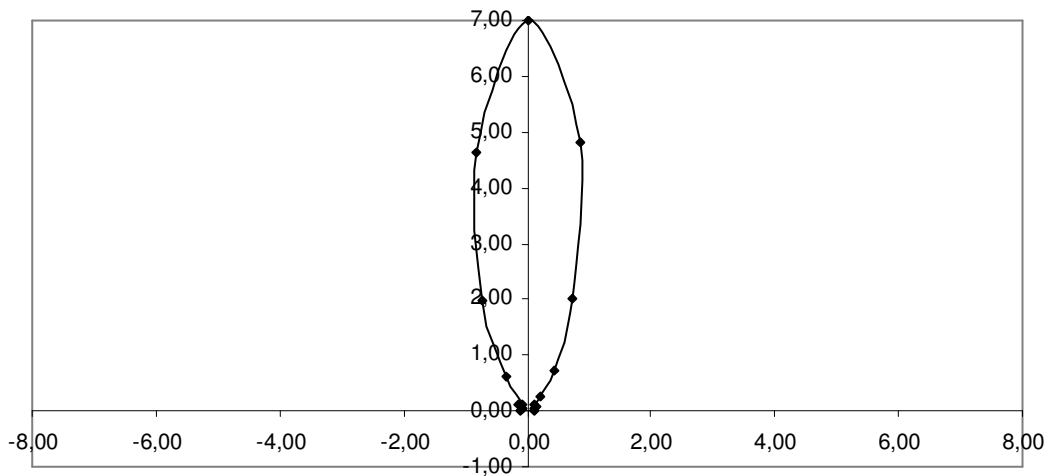
Udstrålingsdiagram for 3cm horn - rektangulært plot



Det ses, at hornantennen har en rigtig god retningsvirkning. Der målte kun fra -90° til $+90^\circ$, da det skønnedes, at den stråling, der blev sendt bagud, var minimal.

Plottes ovenstående værdier polært, fås følgende udstrålingsdiagram:

Udstrålingsdiagram for 3cm horn - polært plot

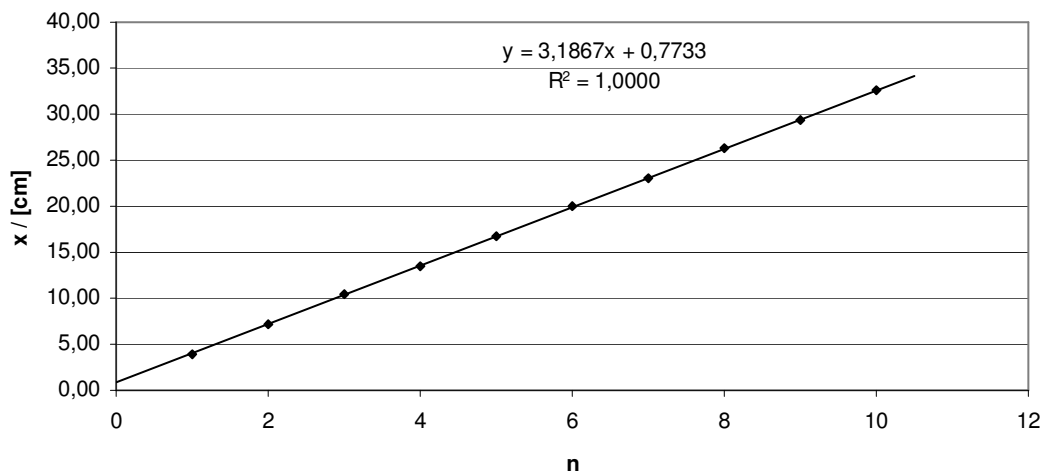


Som det ses er hornantennen uhyre retningsfølsom, og udviser slet ingen sidesøjfer, som Yagi-antennen gør det.

Bestemmelse af bølgelængde

Til bestemmelse af bølgelængden opstilledes apparaturet som beskrevet, og der foretoges ti målinger, som er plottet herunder:

Bølgelængde



Punkterne ligger nyderligt på en ret linje ($R^2 = 1$), og hældningskoefficienten, og dermed bølgelængden, er fundet til 3,1867 cm. På 3cm-senderen er anført frekvensen 9,44 GHz, og beregner man bølgelængden ud fra den formel, der er angivet først i teori afsnittet, fås

$$\lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{9,44 \cdot 10^9 \text{ Hz}} = 3,1758 \text{ cm}$$

Det vil sige, at den målte værdi er 3,4% for høj, hvilket så absolut må siges at være indenfor rimelighedens grænser. Udbredelseshastigheden er en smule mindre i luft

end i vakuum, så dette vil kunne ændre lidt på den forventede bølgelængde ud fra den opgivne frekvens. Men med den målte bølgelængde i hånden, kan man jo også beregne frekvensen, under antagelse af, at lysets hastighed i luft er den samme som i vakuum:

$$\nu = \frac{c}{\lambda} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{3,1867 \text{ cm}} = 9,4076 \text{ GHz}$$

Det vil sige en anelse mindre end den opgivne. Da lysets hastighed i luft jo er mindre end i vakuum, er dette altså en *øvre* grænse for frekvensen – i realiteten er den nok en anelse lavere. De 9,44 GHz, som står på senderen, er altså *mindst* 32 MHz for meget (forudsat, at målingerne er korrekte!)

Fejlkilder

Generelt må resultaterne fra 3cm-senderen siges at være en tand pænere end resultaterne fra 433 MHz-senderen. I forsøget med afstandsafhængighed er der jo to fordele ved 3cm-forsøget i forhold til 433 MHz-forsøget: dels at senderantennen har retningsvirkning, så man kan komme længere væk, og stadig måle noget, dels at man hurtigt kommer så langt væk, at man kan regne med, at man kun måler på fjernfeltet, og at der kan ses bort fra effekter fra nærfeltet.

Den mest problematiske måling blandt ovenstående resultater er nok påvisningen af, at feltet er transversalt. Umiddelbart ser grafen nærmest ud til at være forskubbet til højre, og en mangelfuld kalibrering af dioden mht. vinkelmåleren er sandsynligvis forklaringen.

Konklusion

Som nævnt i forordet bør en fuldstændig gennemgang af elektromagnetiske bølger inkludere meget andet end blot ovenstående målinger. Ikke desto mindre er det her lykkedes at klarlægge en lang række grundlæggende begreber indenfor emnet *elektromagnetiske bølger*, og forhåbentlig også at introducere nogle grundlæggende begreber mht. anvendelse af elektromagnetiske bølger i radioteknikken.

Litteratur

Adam, W.: *Versuche mit Dezimeterwellen* (Leybold-Heraeus, 1985)

Atwater, H.A.: *Introduction to Microwave Theory, International Student Edition*
(McGraw-Hill, 1962)

Bergmann, L. & Schaefer, Cl.: *Lehrbuch der Experimentalphysik, Band II -
Elektrizitätslehre* (Walther de Gruyter & Co., 1958)

Elbek, Bent: *Elektromagnetisme* (Niels Bohr Institutet, 1995)

Feynman, R. P., Leighton, R. B., & Sands, M.: *The Feynman Lectures on Physics*
(Addison-Wesley, 1965)

Helms, Arend: *Versuchseinheiten Physik: Mikrowellen* (PHYWE-Schriftenreihe,
Industrie-Druck, 1981)