

## Radiobølgeforplantning i ionosfæren

av Ove Bratteng

Atmosfæren er bygd opp av nitrogen og oksygen. Opp til 60-70 km er atmosfæren stort sett nøytral, alle atomer har like mye positiv som negativ ladning. Høyere oppe vil røntgenstråling og energirike partikler forårsake *ionisering*, dvs. en del atomer blir spaltet i positive ion og frie elektroner. Det er dette høydeområdet fra ca. 60-1000 km, med relativt stor tetthet av frie ladete partikler, som nå betegnes *ionosfære*. Historisk er ionosfæren lagdelt med D-lag i 80-90 km, E-lag i 100-120 km og F-lag i 140-300 km. Nå regnes F-laget helt opp til 1000 km høyde.

Ionosfæren reflekterer radiobølger, tilnærmet som et kuleformet speil, men refleksjonsmekanismen er komplisert. Hvordan en radiobølge påvirkes og reflekteres i ionosfæren, er i første rekke bestemt av hvordan tettheten av frie elektroner, *elektrontettheten*, varierer med høyden. Elektrontettheten er stort sett bestemt av intensiteten av den innfallende røntgenstråling (fra solen) og varierer følgelig over døgnet, med årstidene og med solflekkenes 11-årsperiode.

I forbindelse med sterke geomagnetiske forstyrrelser får vi ofte uvanlig høy elektrontetthet i høyder under 100 km. Dette resulterer som oftest i sterk demping av radiobølger og til tider fullstendig «black out» på kortbølgen. Elektrontettheten kan variere sterkt fra sted til sted, og ionosfæren kan da minne om et ruglet speil. Vi får diffus refleksjon og dårlige mottakerforhold. Slike *irregulariteter* i elektrontettheten vil også kunne forårsake store forstyrrelser for kommunikasjon gjennom ionosfæren.

Kort kan vi si at den rolige «pene» ionosfære gir en regelmessig avbøyning og refleksjon av radiobølgene, mens den forstyrrede «stygge» ionosfære forårsaker uregelmessig spredning av bølgeenergien.

For å utnytte ionosfæren som reflektor for radiobølger er det viktig å kunne forutsi de *ionosfæriske forhold*, spesielt elektrontettheten. For slik varsling eksisterer det nå et verdensomspennende nett med ca. 100 ionosonder verden over. Data om ionosfæren samles inn, bearbejdes og danner grunnlag for stadig bedre frekvensvarsling. Et frekvensvarsel angir den beste frekvens for radioforbindelse mellom to stasjoner på et gitt tidspunkt. (Om definisjon av *frekvens* se side 40). Det foreligger nå et stort erfaringsmateriale, og denne form for varsling er etter hvert blitt ganske pålitelig (se avsnitt om ionosonde side 89).

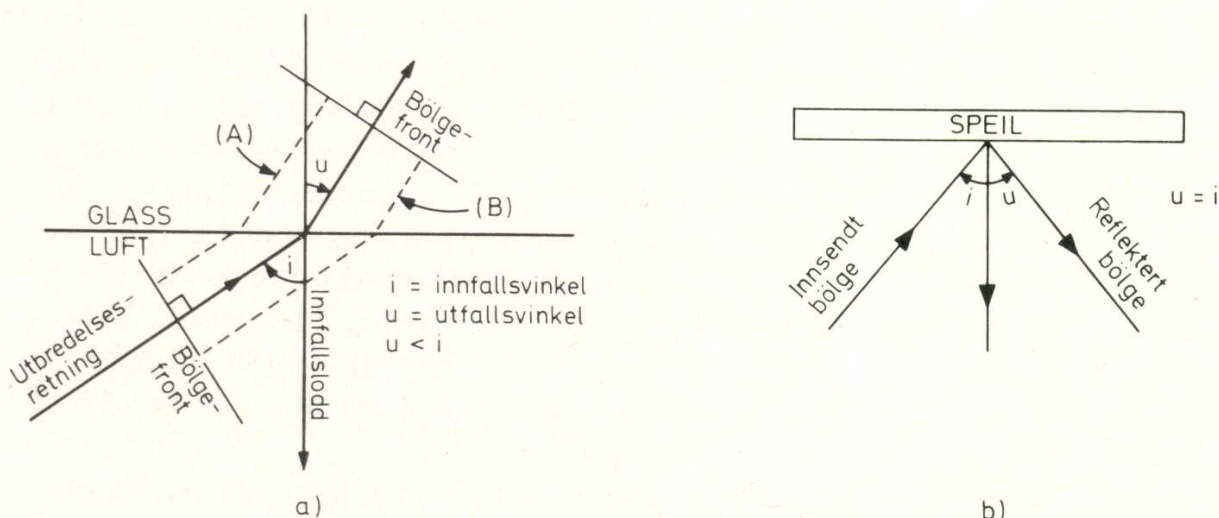


Fig. 1a

Illustrasjon av lysbrytning og speilrefleksjon. Når lys passerer fra luft til et tettere materiale (glass) blir hastigheten mindre og bølgefronten dreies. Vi får at utfallsvinkelen  $u$  er mindre enn innfallsvinkelen  $i$ .

Fig. 1b

Dersom bølgen ikke slipper inn i stoffet vil den bli reflektert som f.eks. fra et speil. Utfallsvinkelen vil da bli lik innfallsvinkel ( $u = i$ ).

For kommunikasjon gjennom ionosfæren er det ofte ønskelig å vite forekomsten av irregulariteter, og det er nå i gang program for såkalt *scintillasjonsvarsling*. Mens frekvensvarsling angår relativt langsomme tidsvariasjoner, vil et scintillasjonsvarsel være basert på mer kortsiktige fenomen, f.eks. utbrudd på solen.

I de følgende avsnitt vil vi beskrive noe mer detaljert hvilken innflytelse ionosfæren har på radiobølger av ulik frekvens, og hvordan refleksjon av radiobølger kan utnyttes for å skaffe radiokommunikasjon (via ionosfæren) over store avstander.

## Radiobølger, utbredelse, brytning og refleksjon

Radiobølger er i likhet med lys *elektronmagnetiske bølger*. Vi vet at lys utbrer seg langs rette linjer, og at lys brytes ved overgang fra luft til glass, og at det reflekteres fra et speil (se fig. 1). Disse erfaringene kan vi overføre mer eller mindre direkte radiobølger. I vakuum vil også radiobølger utbre seg rettlinjet og med samme hastighet som lyset. Utbredeshastigheten kan variere fra stoff til stoff. Dette gir oss brytning - ja, endog refleksjon - ved overgangen mellom to forskjellige stoff, og kan forklares ut fra bølgenes *elektromagnetiske natur*.

Elektromagnetiske bølger oppstår når ladete partikler utfører hurtige, svingende bevegelser. Vi får da dannet et såkalt elektromagnetisk felt som utbrer seg med stor hastighet. Dette feltet kan vi registrere selv langt borte ved at det der setter ladete partikler i svingende bevegelser. Nå kommer vi til et vanskelig, men viktig punkt: De ladete partiklene som vår opprinnelige bølge setter i bevegelse, vil selv gi opphav til en ny elektromagnetisk bølge, og til slutt får vi et bølgefelt som vil være summen av disse to bølgene. Det viktigste resultatet er at sluttbølgen får en utbredeshastighet som er forskjellig fra lysets hastighet i vakuum. Altså, når en elektromagnetisk bølge trenger inn i et stoff med frie ladete partikler, vil det skje en gjensidig påvirkning mellom bølgen og partiklene slik at bølgens utbredeshastighet forandres.

Figur 1 viser lysbrytning ved overgang fra luft til glass. Brytningen skyldes at utbredeshastigheten for lys er lavere i glass enn i luft. På samme måte vil radiobølger bli brutt når utbredeshastigheten varierer. Dersom bølgen treffer et stoff som ikke tillater bølgen å utbre seg videre, blir energien i bølgen kastet tilbake. Vi får refleksjon.

### *Ionosfæren som reflektor for radiobølger*

Det vakte stort oppstyr da Marconi i 1901 oppnådde radioforbindelse mellom Europa og Amerika. Slik er det ikke nå. Uten nærmere omtanke slår vi på radioen og velger ut en eller annen fjern radiostasjon. Hvordan kan radiobølger, som utbrer seg rettlinjet, være velegnet for kommunikasjon over store avstander - hvor synslinjen kan være begrenset av fjell - og rekke fram fra den ene til den andre siden av kloden? Svaret er illustrert i figur 2 og er ganske enkelt. Radiobølgene går via *ionosfæren* som virker som en ypperlig reflektor.

Fra radiosenderen stråler det ut energi i omtrent alle retninger. Bølgene treffer derfor ionosfæren under vidt forskjellige innfallsvinkler. På figur 2 har vi skissert 2 slike bølger, og vi har antydnet speilrefleksjon både mot ionosfæren og bakken. Fra sender til mottaker kan radiosignalet utbre seg via en, to eller flere «hopp». For hvert hopp mister bølgen ganske mye energi, og med referanse til figur 2 vil derfor den stiplede bølgen være vesentlig svakere enn den fullt opptrukne ved radiomottakeren.

Både ionosfæren og bakken er i virkeligheten noe ruglet slik at refleksjonen blir mer eller mindre diffus. Diffus refleksjon vil føre til uønsket spredning av radiobølgen. Denne effekten kan enkelte ganger forårsake store forstyrrelser på radiokommunikasjonen. I det følgende vil vi anta en rolig «pen» ionosfære og beskrive hvordan radiobølger av ulik frekvens vil oppføre seg når elektron-tettheten varierer med høyden.

Til enhver bølge kan vi tilordne en *bølgelengde*  $\lambda$ , en *frekvens*  $f$  og en *utbredeshastighet*  $c$ , der  $c = \lambda f$ . Bølgelengden angir avstanden mellom to

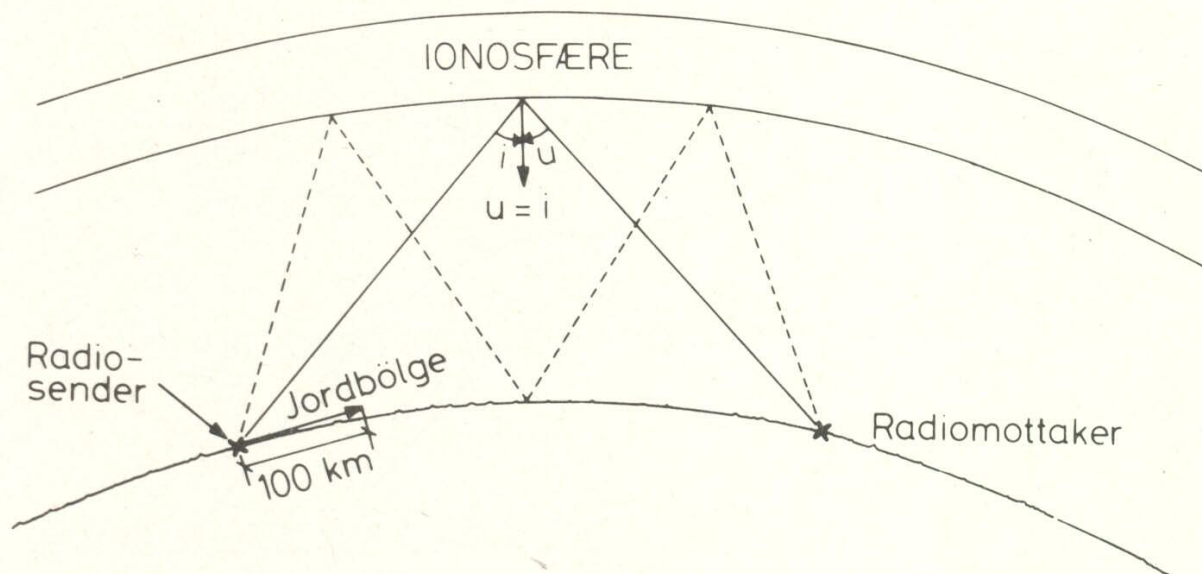


Fig. 2  
Radiobølger kan utbre seg over store avstander gjennom flere påfølgende refleksjoner mot ionosfæren og bakken.

påfølgende bølgetopper, mens frekvensen angir antall bølgetopper som passerer pr. sekund.

For radiobølger i vakuum får vi følgende sammenheng mellom bølgelengde og frekvens (1 MHz = 1 Megahertz = 1 000 000 svingninger per sekund):

$$\text{bølgelengde i meter} \times \text{frekvens i MHz} = 300.$$

Radiobølger deles gjerne inn i følgende grupper:

1. Langbølge	0.1 -	0.525	MHz (30000-570 meter)
2. Mellombølge	0.525 -	1.6	MHz (570-185 meter)
3. Kortbølge	1.6 -	30	MHz (185-10 meter)
4. VHF	30 -	300	MHz (meterbølger)
5. UHF	300 -	3000	MHz (decimeterbølger)
6. SHF	3000 -	30000	MHz (centimeterbølger)

(Her står HF for «high frequency» og V, U og S for henholdsvis «very», «ultra» og «super».)

For kommunikasjon via ionosfæren kan vi benytte frekvenser fra de tre første gruppene, mens frekvenser fra de tre siste gruppene kan benyttes for «line of sight» kommunikasjon, f.eks. fra fly til kontrolltårn og for kommunikasjon gjennom ionosfæren f.eks. fra månen til jorda, satellittnavigasjon og satellitt-Tv.

Bølgens frekvens er lik svingefrekvensen for de ladningene som skaper bølgen. Frie ladninger som befinner seg i bølgefeltet vil svinge med samme frekvens. Spesielt vil ledningselektronene i mottakerantennen svinge med denne frekvensen og derved påtrykke en vekselspanning med samme frekvens på inngangen av radiomottakeren.

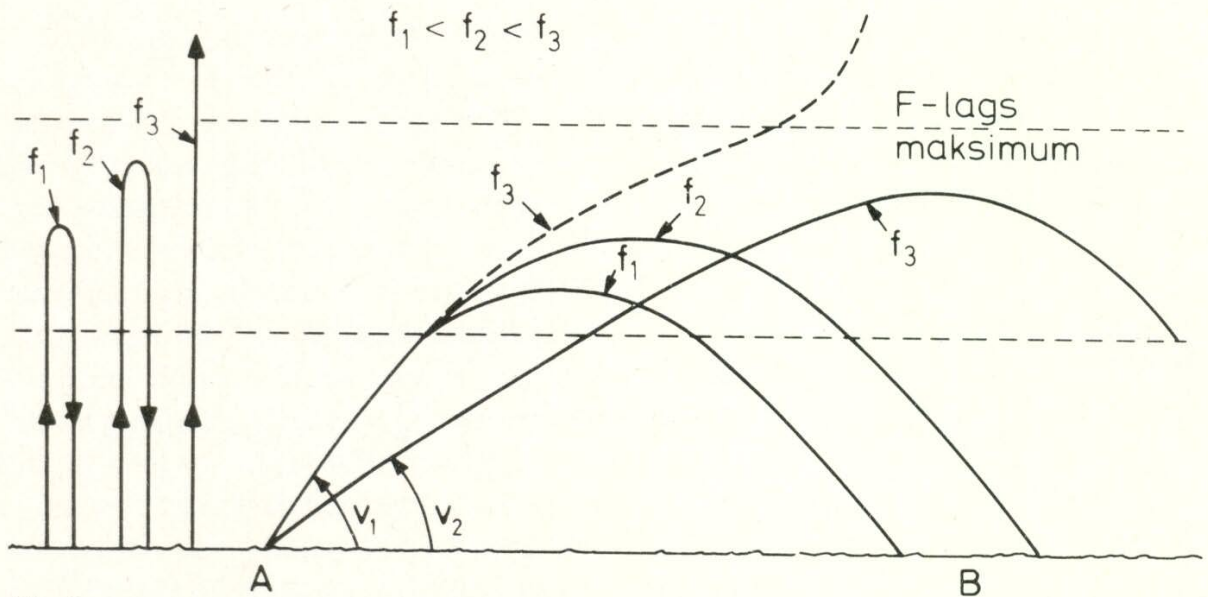


Fig. 3

Refleksjon og avbøyning av radiobølger av ulike frekvenser som treffer ionosfæren under forskjellige vinkler. Vi har at frekvensene  $f_1 < f_2 < f_3$ . Til venstre i figuren vises at frekvensene  $f_1$  og  $f_2$  reflekteres mens  $f_3$  slipper igjennom, da  $f_3$  er høyere enn en kritisk frekvens.

Midt i figuren sendes de samme bølger opp i en vinkel  $v_1$  med bakken. Det samme skjer:  $f_1$  og  $f_2$  blir reflektert, mens  $f_3$  forsvinner. Dersom vi lager vinkelen med bakken mindre - slik som  $v_2$  - vil vi også kunne få frekvens  $f_3$  reflektert.

Resultatet er at bølgen med frekvens  $f_3$  kun kan mottas av B dersom han er langt nok unna senderen A.

En radiobølge vil bli påvirket av ionosfæren. Denne påvirkningen vil øke med økende elektrontetthet, og avta med økende frekvens.

Elektrontettheten har sin største verdi ved F-lagsmaksimum som ligger i omtrent 300 km høyde. Her er det målt verdier opp til 5 000 000 elektroner per kubikkcentimeter. Høyere oppe og lavere nede er tettheten mindre. I figur 3 viser vi skjematisk hvordan radiobølger med ulik frekvens vil utbre seg i ionosfæren når elektrontettheten varierer med høyden.

Bølger som sendes loddrett opp mot ionosfæren kan bli reflektert (kastet tilbake) dersom frekvensen er lavere enn en bestemt frekvens. Dersom radiobølgen sendes opp mot ionosfæren i en skrå vinkel, kan høyere frekvenser reflekteres. Kommunikasjon ved hjelp av atmosfæren er derfor avhengig både av radiobølgens frekvens og vinkel for utsendelsen.

Ionosfærens egenskaper varierer hele tiden. Særlig er dette tilfelle i polområdene hvor partikler fra magnetosfæren dumpes ned i atmosfæren (kap. 2) og endrer de fysiske forhold - særlig elektrontettheten, som har stor betydning for radiokommunikasjon. Det er derfor viktig å overvåke forholdene i ionosfæren slik at en kan velge riktige frekvenser for kommunikasjon. Nordlysobservatoriet er engasjert i et program for å følge med i endringer i elektrontettheten. (Det såkalte ionosondeprogrammet som er beskrevet på side 89).