

# FYS 2150. ØVELSE 4

## RESONANSKRETSER

Fysisk institutt, UiO

### Mål

Etter å ha gjort denne øvelsen, skal du kunne forklare hvorfor vi kan kalle en  $LC$ -krets for en elektrisk svingekrets. Du skal også kunne forklare hva vi mener med resonans i en slik svingekrets, og du skal kjenne til hvordan serie- og parallell-svingekretser lages og hvordan resonansfrekvensen kan bestemmes. Du blir også kjent med et digitalt oscilloskop.

### Innledning

Denne gang skal vi diskutere resonanskretser, og det er da viktig at du kjenner til hvordan en kondensator og en spole oppfører seg i en vekselstrømskrets. Vi har derfor skrevet en forholdsvis lang innledning for at du skal få en viss bakgrunn i den viktigste teorien. Teksten bør absolutt leses grundig før du møter på labben, spesielt hvis du enda ikke har lært om kondesatorer og spoler i elektromagnetismekurset.

### Kondensator og spole: Definisjoner

En kondensator kan ideelt tenkes som et par plater adskilt av tomrom eller et isolerende materiale. En viktig egenskap til kondensatoren er at den kan "lagre" elektrisk energi i form av et elektrisk felt. For å danne det elektriske feltet, trengs det en forflytning av ladning fra den ene platen til den andre.

Ladningen  $Q$  på platene er proporsjonal med spenningen  $V$  mellom platene:

$$Q = C \cdot V \quad (1)$$

Proporsjonalitetskonstanten  $C$  kalles kondensatorens kapasitans og måles i Farad, F ( $F = \text{s}/\Omega = C/V$ ). Typiske verdier for kapasitansen til vanlig brukte kondensatorer varierer fra 10 pF til 0.1 F (pF = picoFarad =  $10^{-12}$  F, sjargong for pF er "pif"). En kondensator med  $C = 1 \mu\text{F}$  vil ha en ladning på  $10^{-6}$  Coulomb når spenningen over den er 1 V.

En spole er en metalltråd viklet til en kveil ("sløyfe"). Viklingene er isolert fra hverandre. En viktig egenskap til en spole er at den kan "lagre" elektrisk energi i form av et magnetfelt. For å danne magnetfeltet trengs det en elektrisk strøm gjennom spolen.

Dersom strømmen gjennom spolen endrer seg, vil det *induseres en spenning* over spolen. Kaller vi spenningen som spolen induserer for  $V$ , viser eksperimenter at denne er proporsjonal med *strømdringen*  $dI/dt$  i spolen i samme øyeblikk. Følgelig har vi:

$$V = -L \cdot \frac{dI}{dt} \quad (2)$$

Proporsjonalitetskonstanten  $L$  kalles induktansen for spolen og måles i Henry, H ( $H = \text{Os} = \text{Vs}/\text{A}$ ). Typiske verdier for  $L$  er i størrelsesområdet noen få  $\mu\text{H}$  til 100 H.

Minustegnet i likningen ovenfor brukes til å vise at spenningen som "induseres" i en spole forsøker å motsette seg strømdringene. Dersom induktansen er stor, vil strømmen endre seg mindre med tiden enn om induktansen var mindre.

For å øke induktansen  $L$  i en spole, kan en vikle spolen på en kjerne av jern eller ferritt (et svart, jernholdig, magnetiserbart materiale). Spoler brukes særlig i radiotekniske kretser, i transformatorer, i elektromagneter og elektriske motorer.

## Energien i en kondensator og spole

Kondensatoren lagrer den energien den tilføres som felt-energi (potensiell energi) i det *elektriske* feltet mellom platene. Energien som kondensatoren lagrer når den har en ladning  $Q$  og spenningen  $V$ , er gitt ved :

$$E = \frac{Q^2}{2C} = \frac{CV^2}{2} \quad (3)$$

En spole lagrer den energien den tilføres som felt-energi i det *magnetiske* feltet spolen setter opp. Når det går en strøm  $I$  gjennom spolen, er det lagret en energi:

$$E = \frac{LI^2}{2} \quad (4)$$

Energi kan ikke tilføres eller fjernes momentant fra et makroskopisk system. Likning 3 forteller da at spenningen over en kondensator kun kan endres gradvis (dersom du har gjort øvelse 3, husker du at vi benyttet denne egenskapen i  $RC$ -filtre). Strømmen ”gjennom” kondensatoren kan derimot endres momentant.

For spoler medfører likning 4 at det er umulig å endre *strømmen* gjennom en spole momentant. Spenningen over spolen kan derimot endres praktisk talt momentant.

Vi ser altså at en kondensator og en spole oppfører seg akkurat motsatt av hverandre når det gjelder hvordan strøm og spenning kan variere.

### Impedansmodulen til en kondensator og spole

Når en kondensator og en spole puttes inn i en vekselstrømskrets, vil deres vekselstrømsmotstand være gitt ved impedansmodulen. Kondensatorens impedansmodul  $|Z|$  er gitt ved:

$$|Z_C| = \frac{1}{2\pi f C} \quad (5)$$

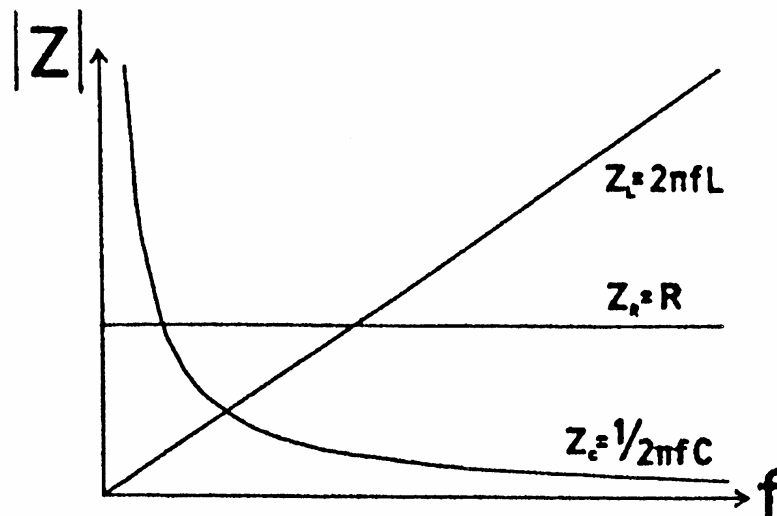
og spolens impedansmodul er gitt ved:

$$|Z_L| = 2\pi f L \quad (6)$$

Begge likningene viser at impedansmodulen endrer seg med frekvensen  $f$  til signalet en betrakter. Figur 1 viser grafisk hvor forskjellig vekselstrømsmotstanden (impedansmodulen) varierer med frekvensen for motstander, kondensatorer og spoler.

Vi ser at spolens impedans øker når frekvensen stiger, mens kondensatorens impedans avtar. Det kan allerede her nevnes at de resonansfenomenene vi skal omhandle nedenfor henger nøye sammen med at impedansen til spoler og kondensatorer ”krysser” hverandre ved en viss frekvens.

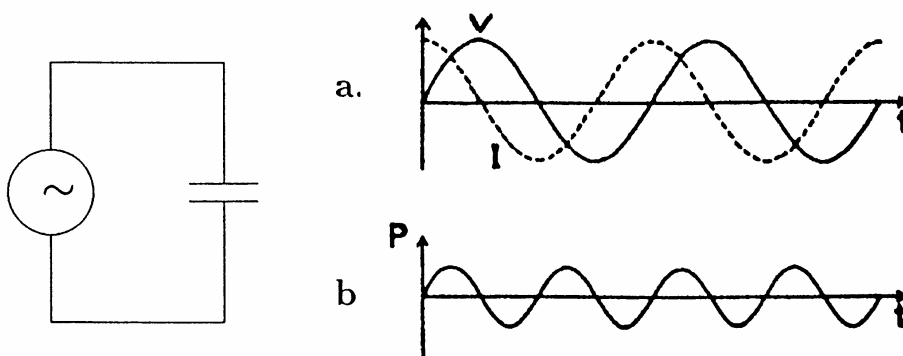
(For  $RC$  kretsen i øvelse 3 har vi på en måte et lignende tilfelle fordi f.eks. lavpassfilterets knekkpunkt i grove trekk er bestemt av frekvensen der impedansen til kondensatoren ”krysser” impedansen til motstanden).



Figur 1: Variasjonen i impedansmodulen  $|Z|$  med frekvensen  $f$  for en motstand (med resistans  $R$ ), en spole (med induktans  $L$ ) og en kondensator (med kapasitans  $C$ ).

### Faseskift til en kondensator og spole.

Som vi har sett i tidligere øvelser, er spenningen over en kondensator og strømmen ”gjennom” den ikke i fase. I selve kondensatoren er strømmen faseforskjøvet  $90^\circ$  foran spenningen. Dette kan en forstå når en husker på at kondensatoren må lades opp med en strøm før vi får ladning på den (og dermed spenning over den).

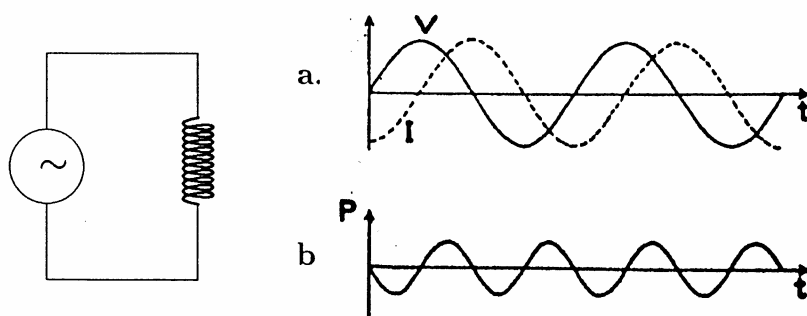


Figur 2: a) Tidsforløp av strøm og spenning for en kondensator, og b) effekten  $P = VI$  som tas opp i kondensatoren.

Med en sinusformet vekselspenning over en kondensator blir sammenhengen mellom spenning og strøm som vist i figur 2a. Når strøm og spenning er kjent, kan en også beregne effekten  $P = VI$  som kondensatoren tar opp (se figur 2b), og vi ser da at i løpet av

en hel periode  $T = 1/f$  vil kondensatoren levere fra seg akkurat like mye energi som den har tatt opp, dvs. en kondensator forbruker ikke energi.

Påtrykkes en *spole* en ytre spenning, svarer spolen med å indusere en spenning som forsøker å nøytralisere den ytre spenningen slik at det bare blir minimale strømendringer per tid. Vi kan altså endre spenningen raskere enn vi kan forandre strømmen. Dersom en sender vekselspenning inn på en spole, vil derfor strøm og spenning være faseforskjøvet i forhold til hverandre, og strømmen vil komme *etter* spenningen.



Figur 3: a) Tidsforløpet av strøm og spenning i en spole, og b) effekten  $P$  som tas opp i spolen.

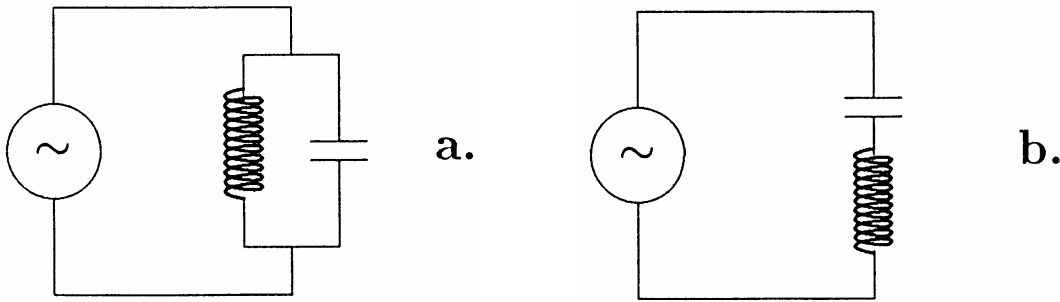
I en ideell spole uten indre resistans  $R_i$ , vil strømmen være faseforskjøvet  $90^\circ$  etter spenningen, men tar en hensyn til  $R_i$ , vil faseforskyvningen være mindre enn  $90^\circ$ . Figur 3a viser sammenhengen mellom strøm og spenning for en spole når den påtrykkes en sinusformet vekselspenning.

Effekten spolen tar opp er illustrert i figur 3b. Som for kondensatoren ser vi at spolen i løpet av en periode  $T$  vil levere like mye energi som den tar opp, det vil si at en spole ikke forbruker energi (forutsatt at  $R_i = 0$ ).

#### ♠ For de mest interesserte:

Med litt trening kan en lese ut svært mye av tidsutviklingene for spenning og strøm i figur 2 og 3. Anta at en kobler en kondensator og en spole i *parallell* som vist i figur 4a. Da vil det være samme spenning over kondensatoren og spolen. Fra figur 2 og 3 vil en se at strømmen da vil gå i motsatt retning i disse komponentene! Når impedansmodulen for kondensatoren er like stor som impedansmodulen for spolen, vil strømmen være like stor, bare altså motsatt rettet. Det vil si at det faktisk ikke går noe strøm i tilførselsledningene fra funksjonsgeneratoren til parallellkretsen, selv om spenningen over kretsen kan være betraktelig!

Betrakter en effektforløpet, vil en se at kondensatoren da til ethvert tidspunkt gir fra seg like mye energi som spolen tar opp, og vise versa. Energi vil altså "skvulpe" fram og tilbake mellom de to komponentene.



Figur 4: a) Parallellkobling av en kondensator og en spole. b) Seriekobling av de samme.

Dersom kondensatoren og spolen er koblet i *serie* som vist i figur 4b, vil strømmen gjennom de to komponentene være den samme. Sammenlikner vi figurene 2 og 3 (forskyver nullpunktet i tid på en av figurene slik at strømmen til enhver tid blir den samme), finner vi faktisk at spenningen over kondensatoren alltid vil ha motsatt polaritet av spenningen over spolen. Når impedansmodulen til kondensatoren er lik impedansmodulen til spolen, vil spenningene være like store, bare motsatt rettet. Det betyr at den totale spenningen over seriekoblingen blir lik null, selv om strømmen kan være betraktelig!

Betrakter en effektforløpet også for dette tilfellet, finner en at kondensatoren til enhver tid tar opp like mye effekt som spolen gir fra seg. Igjen vil energi "skvulpe" fram og tilbake mellom disse to komponentene.

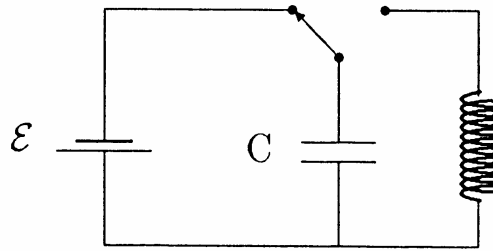
Betraktninger som dette kan hjelpe deg til å forstå de resultatene du vil komme fram til i denne øvelsen.

---

## LC-kretser

La oss nå koble en kondensator og en spole sammen. Vi bruker oppsettet vist i figur 5. Først lader vi opp kondensatoren til en spenning  $V$ . Vi lagrer da energi i kondensatoren (likning 3). Når vi slår over venderen vil det begynne å gå strøm i spolen. Strømmen vil først være liten på grunn av at strømmen gjennom spolen ikke kan endres momentant. Strømmen vil så gradvis stige, men da tapper en ladning fra kondensatoren, og etter en tid vil spenningen over kondensatoren ha sunket til null. Strømmen har da sin maksimale verdi. I dette øyeblikket er det ingen energi lagret i kondensatoren; all energi finnes nå lagret i spolens magnetfelt (likning 4).

Når spenningen over  $C$  er null, har vi mistet drivkraften til å holde strømmen gående gjennom spolen. Men strømmen kan ikke gå momentant til null på grunn av spolens motstand mot strømdringer. Strømmen vil derfor bare avta gradvis mot null.



Figur 5: Parallell svingekrets.

I mellomtiden har strømmen faktisk ladet opp kondensatoren igjen, men nå med motsatt polaritet av starttilstanden. Når strømmen har kommet ned til null, vil energien i spolen igjen være null (likning 4), og all energi vil kunne gjenfinnes i kondensatoren som elektrisk feltenergi (likning 3). Spenningen over  $C$  er da  $-V$ , og vi er i samme situasjon som startpunktet bare at polariteten er snudd.

Spenningen over  $C$  vil nå igjen føre til en strøm gjennom spolen (motsatt retning av tidligere) og hele hendelsesforløpet som skissert ovenfor vil gjentas inntil strømmen på ny blir null og spenningen over  $C$  er lik  $V$ . Prosessen vil så fortsette i det uendelige om det ikke var tap i systemet.

I en virkelig spole vil en i tillegg til induktansen  $L$  ha en indre resistans  $R_i$ , og denne vil føre til et effektuttap  $R_i I^2$  som vil gi en varmeutvikling i spolen. Er det derfor ingen ytre påtrykt spenning, vil oscillasjonene dø ut etter hvert (dempning).

Fra hendelsesforløpet vi skisserte ovenfor så vi at spenningen over  $LC$ -koblingen ville svinge fra  $+V$  til  $-V$  og tilbake igjen akkurat som vanlig vekselspenning. Det kan vises at spenningen faktisk vil følge en sinusfunksjon. Vi opplever derfor at denne enkle  $LC$ -kretsen kan *lage* vekselspenning etter at vi har tilført energi til systemet (i dette eksemplet ladet vi opp  $C$  med likestrøm). Vekselspenningens frekvens vil avhenge av spolens induktans  $L$  og kondensatorens kapasitans  $C$ . Dersom  $C$  øker, må mer ladning strømme gjennom spolen for hver halvperiode, altså vil utladningen ta lenger tid og frekvensen gå ned. Tilsvarende, dersom induktansen  $L$  øker, vil det ta lengre tid å endre strømstyrken, og igjen vil frekvensen bli lavere. Det kan vises at vekselspenningen vi får i vår  $LC$ -krets vil ha en frekvens:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (7)$$

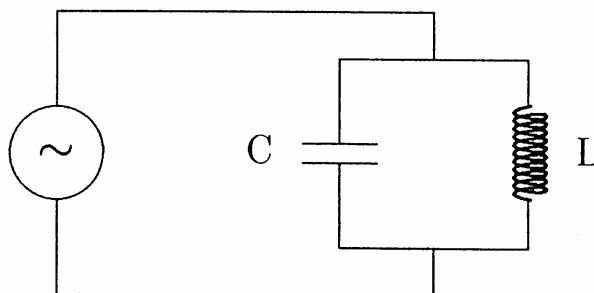
Ved denne frekvensen er impedansmodulene i spolen og kondensatoren like, det vil si:

$$\frac{1}{2\pi f_0 C} = 2\pi f_0 L \quad (8)$$

Som oppsummering på denne teoridelen kan en slå fast at en  $LC$ -krets er en svingekrets med en "naturlig" frekvens som er fastsatt av spolens induktans  $L$  og kondensatorens kapasitans  $C$  slik som gitt i likning 7.

## Resonans

Ovenfor så vi at en  $LC$ -krets har en naturlig svingefrekvens. La oss nå se hva som hender om en påtrykker en vekselspanning på kretsen slik som vist i figur 6. Den påtrykte spenningen har sin egen frekvens som generelt er forskjellig fra kretsens naturlige svingefrekvens (egenfrekvens). Dersom det påtrykte signalet har en frekvens nær egenfrekvensen til kretsen, vil spesielle forhold oppstå, og vi sier da at vi har *resonans*. Den frekvensen der dette skjer kalles av denne grunn for *resonansfrekvensen*. Mye av denne øvelsen går ut på å bestemme resonansfrekvenser og å karakterisere hva som skjer ved resonans. Vi vil la deg utforske en del av dette på egen hånd. Noen tilleggsopplysninger kan det likevel være fint å ha med seg før du går igang.



Figur 6: En svingekrets påtrykt en ytre vekselspanning.

La oss starte med en påtrykt vekselspanning over  $LC$ -kretsen, og la vekselspanningen ha en frekvens som er langt lavere enn resonansfrekvensen. Impedansmodulen i kondensatoren vil da være mye større enn impedansmodulen i spolen;  $|Z_C| \gg |Z_L|$  (se figur 6). Mesteparten av strømmen i kretsen vil gå gjennom spolen, og strømmen vil faseforskyves etter spenningen. For høye frekvenser ( $f \gg f_0$ ) vil impedansmodulen i spolen være mye større enn i kondensatoren;  $|Z_L| \gg |Z_C|$ . Mesteparten av strømmen i kretsen vil da "gå gjennom" kondensatoren, og strømmen i kretsen vil ligge foran spenningen.

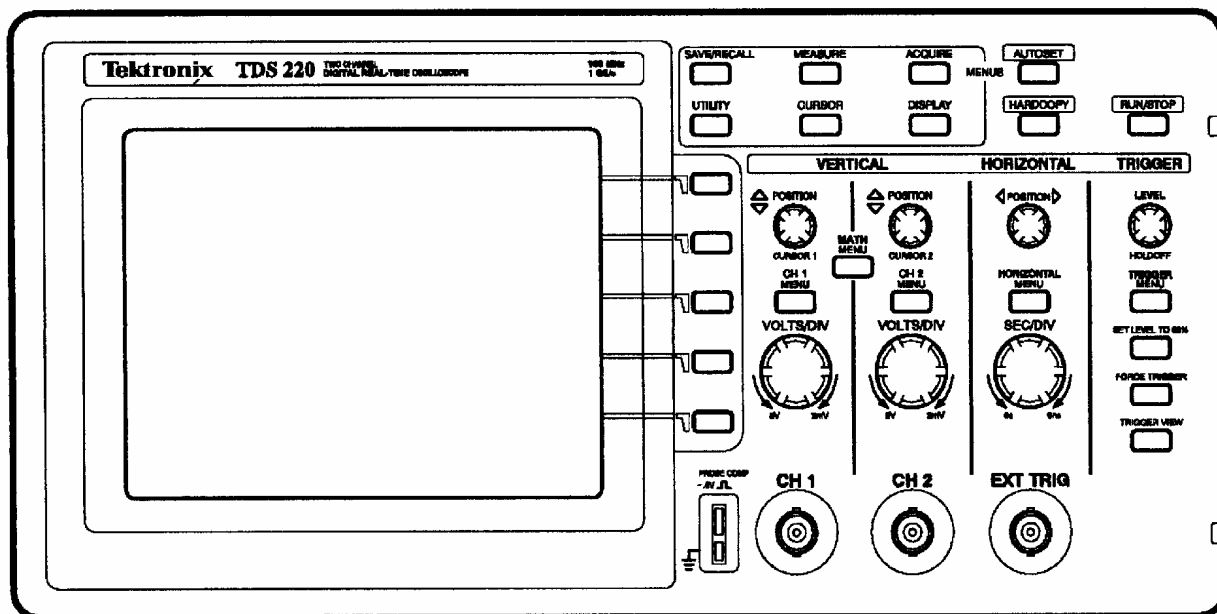


Ved resonans vil den totale strømmen som går i kretsen (i tilførselsledningene) være i fase med den påtrykte spenningen siden kondensatoren vil forsøke å faseforskyve strømmen like mye foran spenningen som spolen vil forskyve den etter. Teoretisk sett vil fasen gjennomløpe en diskontinuitet ved resonansfrekvensen, forutsatt at  $L$  og  $C$  var ideelle kretselement. For reelle kretselement vil fasen endre seg kontinuerlig, men endringen er ganske rask rundt resonansfrekvensen.

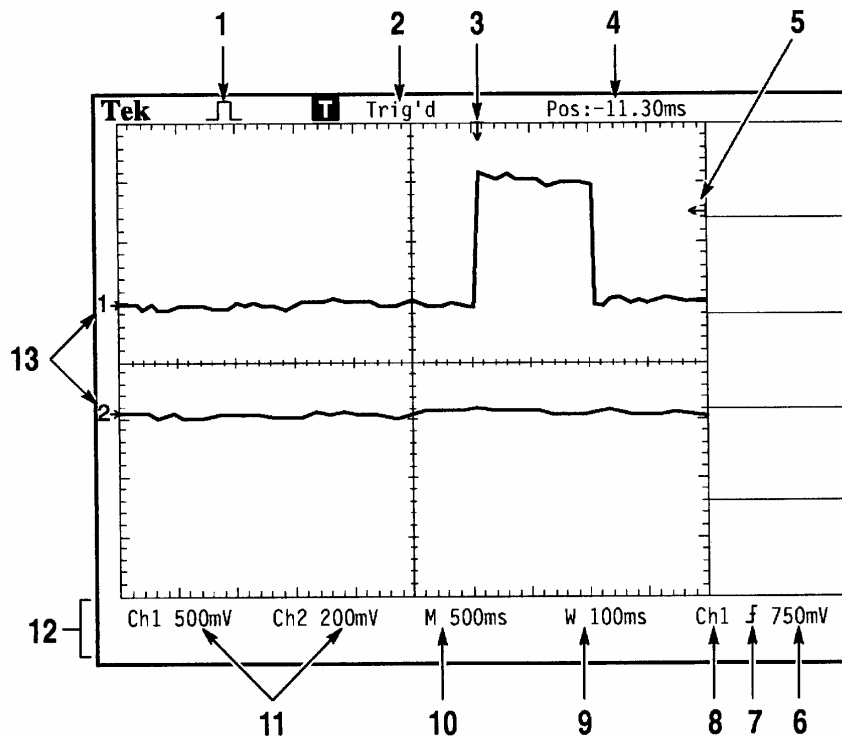
Det er også mulig å lage en resonanskrets ved å seriekoble  $L$  og  $C$  (som illustrert i figur 4). Resonansfrekvensen for den seriekoblede kretsen er den samme som i den parallellkoblede. Mens parallellkretsen har samme *spenning* over både spolen og kondensatoren, vil en ved seriekobling ha samme *strøm* gjennom spolen og kondensatoren.

## Digitalt Oscilloskop

I denne øvelsen skal vi bruke et digitalt skop av typen Tektronix TDS210. La oss først bli litt kjent med skopet. På frontpanelet vist i Figur 7 finner du igjen de samme funksjonsområdene som du kjenner til fra de analoge skopene. Det som kan virke forvirrende i begynnelsen er de mange menyknappene, og informasjonen rundt kantene på skjermen.






Figur 7: Frontpanelet til Tektronix TDS210



Figur 8: Informasjon langs kantene i skjermbildet

I tillegg til visning av bølgeformer på skjermen finner du følgende informasjon langs kanten på skjermen vist i Figur 8:

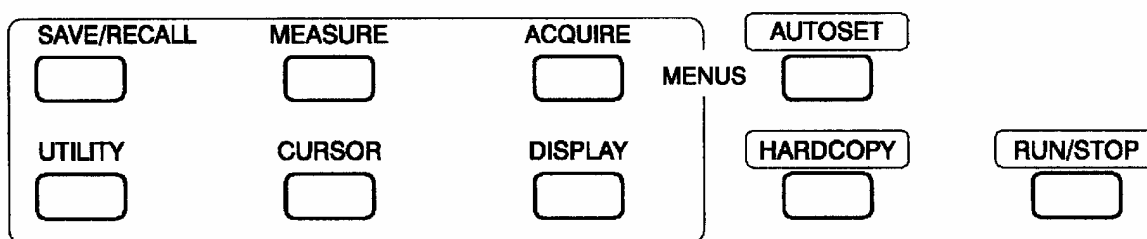
1. Ikon som viser hvilken datatakingsmode som benyttes.
  -  Sample mode
  -  Peak detect mode
  -  Average mode
2. Trigger status som viser om det er en adekvat triggerkilde eller om datatakingen er stoppet.
3. Markør som viser den horisontale triggerposisjonen.
4. Viser den horisontale avstanden (i tid) mellom senterkorset og triggerposisjonen.
5. Markør som viser triggernivå.
6. Viser numerisk verdi for triggernivå
7. Icon som viser valgt trigger, i dette tilfellet på stigende flanke.
8. Triggerkilde
9. Funksjon som ikke eksisterer på vårt skop.
10. Tidsbaseinnstilling (SEC/DIV)
11. Vertikal skalering av Kanal 1 og 2 (VOLT/DIV).
12. Visningsområde for "on-line" meldinger.

13. Markører som viser jord-referanse (null-punktet) for bølgeformen. Ingen markør betyr at det ikke er in-signal på kanalen.

I og med at det er mange muligheter med denne type digitale oscilloskop, og vi ikke har tid til å lære alle funksjonene, er det tryggest å starte målingene med å trykke "Autoset" knappen. Du får da en automatisk et brukbart bilde opp på skjermen. Med det som utgangspunkt kan du lettere gjøre ytterligere spesialtilpasninger etter dine behov.

Ved dobbeltrykk på *CH1* og *CH2* knappene kan du veksle mellom visning av hver kanal separat, og visning begge kanalene samtidig.

Du kan trykke *RUN/STOP* når du skal veksle mellom å fryse/ kontinuerlig oppdatering av bildet.



Figur 9: Kontrollknapper/Menyer øverst til høyre på skopet.

Koble på funksjonsgeneratoren og gjør deg litt kjent med skopet før du gyver løs på selve oppgaven. Still inn funksjonsgeneratoren f.eks. en 3 kHz sinusbølge, 4 Volt peak-to-peak og test ut de kontrollknappene/menyene du vil ha mest glede av i denne øvelsen: AUTOSET, DISPLAY, MEASURE, RUN/STOP (jf. Figure 9). Like til høyre for skjermbildet er det en kollonne med fem knapper (jf. Figur 7). Disse brukes til valg av undermenyer som fremvises på skjermen.

**AUTOSET** : Gir deg automatisk et brukbart bilde på skjermen.

**DISPLAY** : Gir deg menyen for valg av du skal vise på skjermen. Undermeny f.eks. *Type: Dots* (datapunkter) eller *Vector* (heltrukken linje), *Format* (*YT* eller *XY* mode), *CH1*, *CH2*, *GND* osv.

**MEASURE** : Gir deg menyen for automatiske mål (automatisk måling av frekvens, periode, peak-to-peak osv).

**RUN/STOP**: Gir deg muligheten til å starte og stoppe datatakingen (fryse bildet).

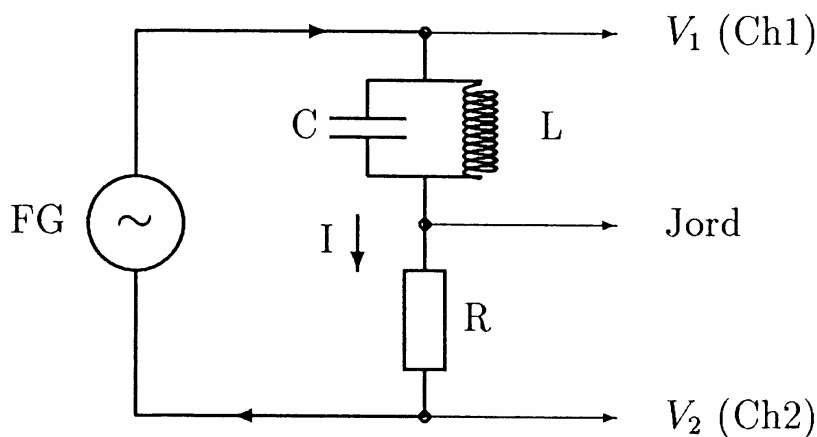
**HARDCOPY** : Merk at vi ikke har innebygd den muligheten for printing.

Spør gjerne veileder om hjelp hvis du synes det er vanskelig å komme igang.

## Oppgave 1: Parallell svingekrets

### a) Bestemmelse av resonansfrekvens ut fra faseforhold

Som diskutert ovenfor vil strømmen gjennom en parallell  $LC$ -krets generelt ikke være i fase med spenningen som påtrykkes kretsen. Ved resonansfrekvensen *er* de likevel i fase<sup>1</sup> og vi skal bruke dette for å bestemme resonansfrekvensen for en  $LC$ -krets eksperimentelt.



Figur 10: Koblingsskjema for måling av relativ fase for strøm/spenning i en parallell resonanskrets.

Koble opp en parallell resonanskrets slik figur 10 viser. Symbolet FG står for en funksjonsgenerator, og motstanden  $R$  kan være 1 k $\Omega$ . Bruk en kondensator på 10 nF og den framlagte spolen (spolen er laget av kobbertråd viklet på et tynt plastrør). Spolen har en selvinduktans  $L$  som kan varieres ved å skyve en ferrittstav inn og ut av spolen. Med ferrittstaven symmetrisk midt i spolen, er induktansen  $L$  lik verdien oppgitt på denne.

Beregn resonansfrekvensen  $f_0$  ut fra likning 7.

Betrakt  $V_1$  og  $V_2$  på oscilloskopet når du lar frekvensen fra funksjonsgeneratoren variere fra ca.  $0.5 \cdot f_0$  til  $2 \cdot f_0$  (amplituden på funksjonsgeneratoren settes til ca. 1/2 full). Beskriv *kort* og kun kvalitativt det du observerer. (**Tips:** Trykk "AUTOSET" for en "automatisk beste" innstilling av skopet. Trykk *CHI* for å sjekke at kanalen står i AC-mode, *Coupling AC*, og at probeinnstillingen står *Probe IX*. Gjør tilsvarende for kanal 2.)

<sup>1</sup> Teoretiske beregninger vil vise at dette ikke er *eksakt* riktig, men for praktiske formål er regelen helt OK. I teorien må spolens indre motstand inkluderes for å få en realistisk modell. Vi vil ikke komme inn på de finere detaljer om resonansfrekvenser i denne øvelsen.

Du skal nå bestemme resonansfrekvensen eksperimentelt ved å variere frekvensen på funksjonsgeneratoren inntil strøm og spenning er i fase over  $LC$  kretsen. Du har minst to forskjellige måter du kan gå fram på. Den letteste måten er å sammenlikne signalene på kanal 1 og 2 direkte i tidsbildet (husk den ”kunstige” faseforskyvningen på  $180^0$  siden punktet mellom  $R$  og  $Z$  er jordet). Den andre og mer elegante måten er å bruke  $XY$ -format (se nyttige tips nedenfor). Vi anbefaler den siste måten, men du velger selv den metoden du ønsker å bruke. For å sette skopet i  $XY$ -mode trykker du  $DISPLAY$  og deretter endre *Format* fra  $YT$  til  $XY$ -format.

Les av resonansfrekvensen fra skalaen på funksjonsgeneratoren, og sammenlign denne med den teoretiske verdien  $f_0 = 1/(2\pi\sqrt{LC})$ .

Legg en finger på kondensatoren. Beskriv de forandringer du ser på oscilloskopbildet. (Du må nå ha oscilloskopet i  $xy$ -mode.) Prøv å forklare hva som skjer.

© *Nyttige tips:*

---

**Dersom du er usikker på hvordan du skal gå frem, les dette:**

Som nevnt ovenfor er strøm og spenning i parallellkretsen i fase ved resonans. Slik en har koblet her viser kanal 1 spenningen over resonanskretsen, mens kanal 2 viser spenningen over en fast kjent motstand (1 k $\Omega$ ). Spenningen over denne motstanden er alltid proporsjonal med strømmen gjennom kretsen. Men fordi punktet midt mellom parallellkretsen og motstanden er koblet til jord på oscilloskopet, vil spenningen en måler over motstanden ha motsatt fortegn av spenningen og strømmen i parallellkretsen. En får derfor en ”kunstig” faseforskyvning på  $180^0$ . Strøm og spenning er derfor i fase når en ”topp” på spenningskurven (kanal 1) passerer en ”bunn” på strømkurven (kanal 2). Du kan korrigere for denne faseforskyvningen ved å sette Ch2 i INV innstilling (trykk  $MATH$  meny og velg  $CH2$  inverted).

Det er vanskelig å avgjøre nøyaktig når signalene på Ch1 og Ch2 er i fase dersom oscilloskopet brukes i vanlig  $YT$ -mode. Du kan med fordel bruke oscilloskopet i  $XY$ -funksjon for å få en bedre bestemmelse av  $f_0$ . Ved resonans er strøm og spenning i fase, og kurven du får skal bli en rett linje, men du kan lett bli lurt!

En rett linje som er horisontal eller vertikal på oscilloskopskjermen (i  $XY$ -mode) forteller ingen ting. Det betyr bare at du ikke har justert oscilloskopets Volt/div innstilling i en av de to retningene slik at det blir noe utslag i den retningen. Det er kun dersom du har en linje som går relativt diagonalt over skjermen at du kan si at signalene på kanal 1 og 2 er i fase.

I praksis får vi sjeldent en helt rett linje fordi signalene ofte er ulikt forvrengt i forhold til en ren sinus. Best resultat får vi da ved å minimalisere *arealet* av flaten som tegnes på skjermen under siste finjustering av frekvensen.

Variere frekvensen på funksjonsgeneratoren (bruk fininnstillingsknappen) til du oppnår resonans etter dette kriteriet. Du har da bestemt resonansfrekvensen. Gå så tilbake til tidsavbøyning etterpå.

---

## b) Hvordan impedansmodulen til parallell-resonanskretsen varierer med frekvensen

Resonanskretser har spesielle egenskaper ved resonansfrekvensen. I forrige oppgave så vi på fasen mellom strøm gjennom og spenning over  $LC$ -kretsen. I denne oppgaven skal du undersøke hvordan impedansmodulen varierer med frekvensen.

Du bestemte impedansmoduler i øvelse 2, men vi skal gjenta hovedpunktene her. Impedansmodulen til en komponent eller krets gir et mål for vekselstrømsmotstanden i denne. Jo større impedansmodul, desto vanskeligere er det å sende vekselstrøm gjennom kretsen. Impedansmodulen forteller imidlertid ikke noe om faseforskyvninger.

Impedansmodulen er frekvensavhengig, og som vi så i øvelse 2 sank impedansmodulen for en kondensator med økende frekvens, mens impedansmodulen for en spole økte med frekvensen. Hvordan går det da når vi kobler kondensatoren sammen med en spole i en  $LC$ -krets? Det er det du skal finne ut i denne oppgaven.

Impedansmodulen kan bestemmes ved å måle spenning over og strøm gjennom den komponenten eller kretsen vi undersøker. Dersom vi opererer med peak-to-peak målinger av vekselstrøm og -spenning, kan vi benytte oss av følgende likning:

$$|Z| = \frac{V_{pp}}{I_{pp}} \quad (9)$$

hvor  $|Z|$  er impedansmodulen,  $V_{pp}$  og  $I_{pp}$  er spenning over og strøm gjennom impedansen vi måler på.

Vi vil bruke samme oppstilling som i forrige oppgave (se figur 10). Da vil spenningen over  $LC$ -kretsen  $V_{pp}$  være den spenningen vi leser av på kanal 1 på oscilloskopet ( $V_{1,pp}$ ). Strømmen gjennom  $RC$ -kretsen  $I_{pp}$  måler vi, som forklart flere ganger før, ved å måle spenningen over resistansen  $R$ , og så benytte Ohms lov, dvs.:

$$I_{pp} = \frac{V_{2,pp}}{R} \quad (10)$$

Kombineres disse likningene, finner vi:

$$|Z| = \frac{V_{1,pp}}{V_{2,pp}} R \quad (11)$$

Mål samhørende verdier for  $V_{1,pp}$  og  $V_{2,pp}$  for en rekke frekvenser. Det kan være passe å variere frekvensen omtrent en faktor 2 over og under resonansfrekvensen. Dersom resonansfrekvensen er ca. 30 kHz, kan det *i tillegg til* selve resonansfrekvensen, f.eks. passe å bruke frekvensene:

- 15, 21, 25, 27.5, 29, 30, 31, 32.5, 35, 40, 50, og 60 kHz.

Når det gjelder signalstyrke, bør den største av spenningene du måler på være 1-5 V (peak-to-peak), for at signalet lett skal kunne avleses på oscilloskopskjermen (amplitudeinnsittillingen på funksjonsgeneratoren omtrent i midtstilling). Det er ikke nødvendig å endre amplituden fra funksjonsgeneratoren under måleserien. Med digitale skop kan du raskt og elegant lese av peak-to-peak ( $Pk-Pk$ ) verdier på bølgeformen. Trykk *MEASURE*-knappen, og med *Source* kan du veksle mellom CH1 og CH2 som kilder. Med *Type* kan du velge mellom *Freq*, *Period*, *Mean*, *Pk-Pk* og *Cyc RMS*.

**Merk:** Det er viktig at du foretar en måling mest mulig nøyaktig ved den frekvensen der impedansmodulen har sin ekstremalverdi (max eller min).

Noter måleresultatene i vedlagte skjema. Frekvensen leses direkte fra funksjonsgeneratoren. Fremstill  $|Z|$  grafisk som funksjon av frekvens. Bruk helst et enkeltlogaritmisk papir med  $|Z|$  langs en logaritmisk y-akse.

Det er fint om du tegner kurven før du demonterer oppkoblingen. Da kan du lett ta et par ekstra målepunkter dersom det er ønskelig for å få bestemt frekvenskarakteristikken tilfredsstillende.

Du vil forhåpentligvis finne at kurven for  $|Z|$  har en topp. Hvor ligger toppunktet relativt til resonansfrekvensen?

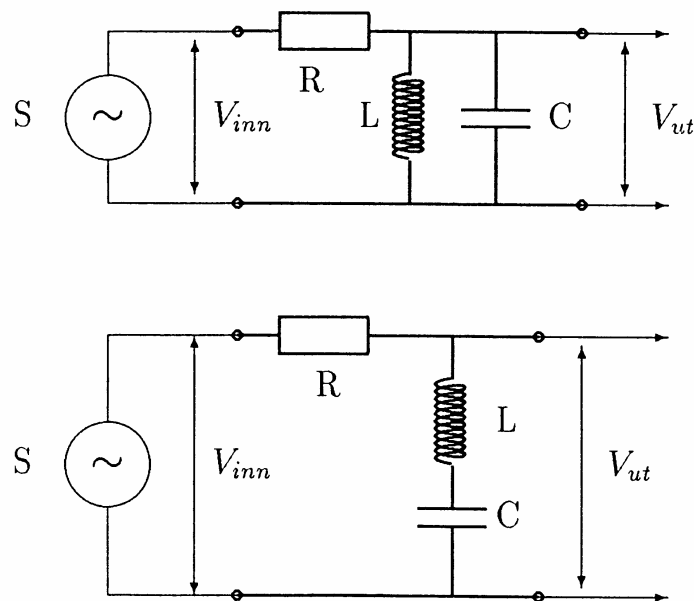
## Oppgave 2 : Serie Svingekrets

En seriekobling mellom  $L$  og  $C$  vil også utgjøre en svingekrets, men på mange måter vil seriekretsen adskille seg drastisk fra den tilsvarende parallellkoblingen. I denne oppgaven

skal du bestemme impedansmodulen til seriekoblingen, på samme måte som du fant impedansmodulen for parallellkoblingen i oppgave 1b.

Benytt samme oppkobling som i figur 10, men med spole og kondensator nå koblet i serie ("etter hverandre") i stedet for parallell ("ved siden av hverandre"). Mål  $V_{1,pp}$  og  $V_{2,pp}$  for omtrent de samme frekvenser som du brukte i oppgave 1b. Pass på å ta med et ekstra målepunkt mest mulig nøyaktig der spenningen over  $LC$ -kretsen ( $V_{1,pp}$ ) har et minimum. Sett måledataene opp i vedlagte skjema, og beregn impedansmodulen ved hjelp av likning 11 for alle frekvensene. Framstill  $|Z|$  grafisk. Bruk helst et enkeltlogaritmisk papir med  $|Z|$  langs en logaritmisk  $y$ -akse, og  $x$ -akse mest mulig lik den du valgte i oppgave 1.

Beskriv kurven som framkommer, og sammenhold det du observerer med resonansfrekvensen du fant i oppgave 1a for den parallell  $LC$ -kretsen. Er det noen forskjell på impedansmodulen for en parallell  $LC$ -krets ved resonansfrekvensen, og impedansmodulen for den tilsvarende serie  $LC$ -kretsen?



Figur 11: Koblingsskjema for to mulige "filtre".

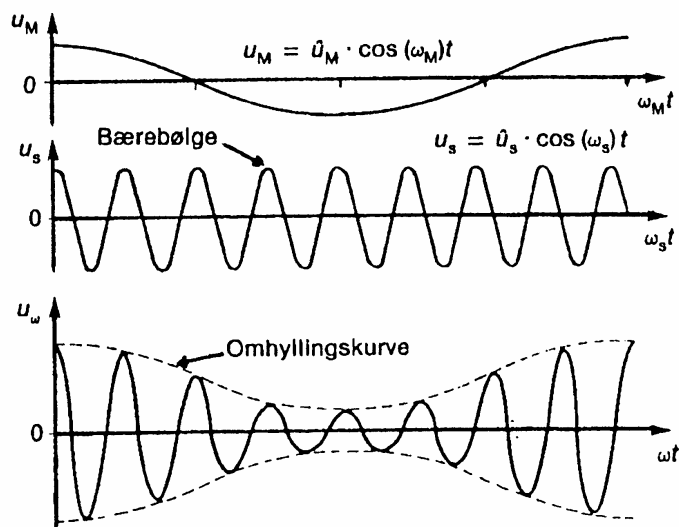
Du har nå oppnådd karakteristikkene fra en parallell og en serie  $LC$ -kobling.  $LC$ -kretser kobles ofte opp som "filtre", gjerne i kretser liknende de som er vist i figur 11. Kan du ut fra din kjennskap til hvordan impedansmodulen for  $LC$ -kretser varierer med frekvensen, finne ut hvilken kobling som er velegnet dersom en vil *fjerne* en spesiell frekvens fra et signal, og hvilken kobling som er mest egnet for å plukke fram ("forsterke") en spesiell



frekvens fra et signal? (referer til koblingene som øvre og nedre del av figur 11). Begrunn svaret.

### Oppgave 3 : Bruk av resonanskrets i en langbølgemottaker

Det er meget vanskelig å lage radiokretser som sender og mottar signaler ved talefrekvensene 50 Hz til 20 kHz. Derimot er det temmelig enkelt å lage radiosendere og mottakere som kan sende eller ta imot frekvenser i frekvensområdet 200 kHz til 200 MHz, men disse frekvensene kan vi ikke høre. Det *magiske* som da gjøres er at en sender signaler i det høye frekvensområdet, men en *modulerer* signalet slik at det også kan ta med seg informasjon om talefrekvensene. Mottakeren må da demodulere signalet for å få tilbake det opprinnelige lavfrekvente signal.

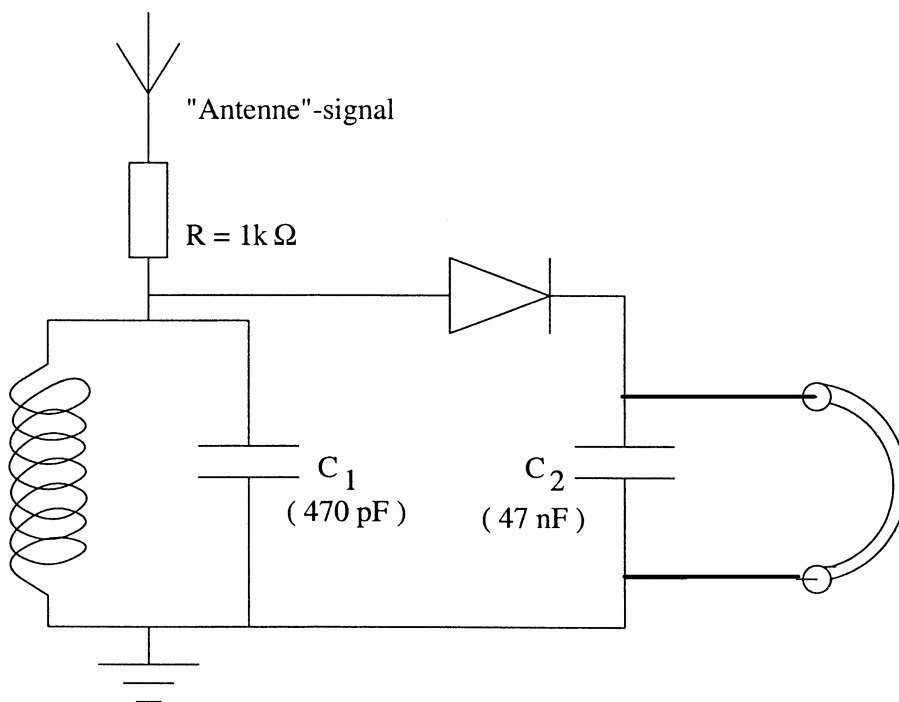


Figur 12: Amplitudemodulasjon av bærebølge. Øverst: lavfrekvenssignal, I midten: umodulert bærebølge, Nederst: amplitudemodulert bærebølge.

Det er flere måter å modulere et høyfrekvenssignal på. I radioens barndom var nesten bare *amplitudemodulasjon* (AM) benyttet, mens idag er *frekvensmodulasjon* (FM) mer populær. Du vil lære en god del både om AM og FM modulasjon i øvelse 9. Her vil vi nøye oss med å gi bare de aller viktigste prinsippene bak amplitudemodulasjon slik at du kan forstå hva som skjer i den radiomottakeren du skal bygge til slutt i denne øvelsen.

Figur 12 viser hva som skjer ved amplitude-modulasjon (AM). Det høyfrekvente signalet moduleres slik at amplitudene følger samme tidsutvikling som det lavfrekvente signalet. Ved demodulasjon sendes den modulerte bølgen inn på en diode i mottakeren. Dioden lar strømmen passere bare en vei og fjerner dermed halvparten av det modulerte signal ("klipper bort alt under null-linjen"). Tar du da effektivverdien (gjennomsnittsverdien) av signalet etter dioden, får du et signal som følger det lavfrekvente talesignalet igjen.

Du vil i en senere øvelse få studere mer i detalj hvordan strømmen i en diode endrer seg med spenningen over denne. Spør en veileder om å forklare deg hvordan den virker i denne kretsen dersom du er nysgjerrig.



Figur13: Kablingsskjema for en enkel LB-radiomottaker.

Du skal nå lage en meget enkel radiomottaker. Tidligere år brukte vi den til å ta inn NRKs sendinger fra langbølgesenderen på Kløfta utenfor Oslo. Denne senderen ble imidlertid nedlagt i januar 1995. Vi har derfor laget et opplegg der de amplitude-modulerte langbølge-signalene fra to radio stasjoner er generert og distribuert ut til de fire øvelses-oppsettene. Med vår enkle mottaker skal det være mulig å ta imot og demodulere de to signalene. Det bør videre være mulig å skille de to sendingene fra hverandre når de lyttes på i høretelefonene.

Kablingsskjema for mottakeren er vist i figur 13. Et av de viktigste elementene i mottakeren er svingekretsen (LC-kretsen). Denne skal brukes for å plukke ut riktig frekvens ("stasjon"). Resonansfrekvensen for en slik "krystallmottaker" kan reguleres

enten ved å variere kapasitansen i kretsen (varierte kondensatorplatenes areal eller innbyrdes avstand) eller variere induktansen i spolen ved f.eks. å forandre kjernens posisjon i spolen.

♠ *For de mest interesserte:*

---

Dioden i mottakeren må til for å få demodulert signalet slik at vi får ut talefrekvenser. Det lavfrekvente signalet (som er overlappet på en likespenning) kan da høres i de høyohmige høre-telefonene. Kondensatoren  $C_2$  er strengt tatt ikke nødvendig, men er satt inn for å forbedre signalet noe. Denne kondensatoren "kortslutter" nemlig høyfrekvenssignalet til jord. De langsomme talefrekvens-signalene slipper ikke gjennom kondensatoren, men blir det signalet som er ansvarlig for lyden i høre-telefonene.

I mer avanserte radioer setter en vanligvis inn en radiofrekvensforsterker (høyfrekvent) før detektoren (dioden) for å øke mottakerens følsomhet og selektivitet. En sender da også det lavfrekvente signalet gjennom en ekstra forsterker og videre til en høyttaler.

---

Vi setter da igang med å koble opp mottakeren slik figur 13 viser. Dioden er merket med en ring på den siden som tilsvarer spissen på pilen i symbolet. Kretsen jordes ved å koble den til jord på oscilloskopet. Pass på at jord på oscilloskopet kobles til motsatt ende av spolen relativt til antennen. Gjør du motsatt, vil antennesignalet jordes, og du og dine medstudenter vil sitte uten noe signal å måle på! Koble oscilloskopets kanal 1 over resonanskretsen (inngang på kanal 1 kobles til antennesiden av spolen). Kanal 2 kobles i parallell med høretelefonene (inngang på kanal 2 hentes fra koblingen mellom diode og høretelefon).

Forsøk å få inn våre to signaler enkeltvis ved å skyve ferrittstaven inn og ut av spolen til du får best mottaking.

Kan du ut fra det du lærte i oppgave 1 forklare hva som skjer når du skyver ferrittstaven inn eller ut av spolen for å få best mulig mottaking? Hva tror du det er som karakteriserer best mulig mottaking (nøkkelord: resonansfrekvens, senderens frekvens).

Finn frekvensen til bærebølgen til et av signalene. Her kommer digitalt oscilloskop til sin rett. Med `AQUIRE – AVERAGE` kan du midle 4, 16, 64, 128 samples. Høyfrekvente komponenter i signalet tas bort ved midling og du får et roligere og penere bilde. Prøv deg frem til hva som kan være passelig. Benytt `RUN/STOP` funksjonen for betrakte signalet. Du kan variere spennings og tidsbasesetting også for stillbildet. Skift til kanal 2 på oscilloskopet og observer talelyd (eller musikk) på skjermen. Forsøk å bestemme en omtrentlig frekvens for lydbølgene du ser. (Det kan være vanskelig å få frem et godt bilde på oscilloskopskjermen. Musikk gir gjerne bedre bilde enn tale. Prøv deg frem.)

## Utstyrliste:

Digitalt Oscilloskop  
 Funksjonsgenerator (TFG 8112) med ujordet støpsel  
 3 BNC - bananstikk overganger  
 1 koakskabel (kort)  
 Spole med ferritstav  
 Kondensatorer, 470 pF, 10 nF og 47 nF  
 Motstand 1 k $\Omega$   
 Diode (helst germaniumdiode)  
 Hodetelefoner  
 1 to (eller tre) dekadere enkeltlogaritmisk papir

## Utstyr for generering av AM langbølgesignaler:

*Dette utstyret står ferdig oppstilt, studentene kan se på det som en "svart boks".*

2 Philips FM tunere, innstilt på hhv ca 100.3MHz og 93.5MHz. (Antenne trengs ikke - sjekk innstilling med mottakerkretsen).  
 2 Philips forsterkere, volumkontroll i området 7-10 for begge.  
 2 ledningspar for høyttalersignal til coax overgang (rød/blå ledning).  
 2 coax kabler, ca 0.5m lange.  
 2 TG8104 signalgeneratorer, innstilt på AM modulering, uten selvmodulering (nedre høyre knapp uttrukket og dreid ca 3/4 omdreining med klokka). Velg sinus bærebølge, frekvenser hhv ca 250kHz og 800kHz og amplitudeknapp ca. i midtstilling.  
 2 bananstikk-BNC overgang  
 1 "antenne" signalfordeler  
 1 "jord"-fordeler

Signal fra forsterkernes høyttalersignal-utgang koples via koplingsboks og coax kabel til hver sin signalgenerator (TFG8104, External Input). Banan-BNC overganger brukes på signalgeneratorenes utgang. Jord for de to utgangene koples sammen, og videre til sant jord. Signal fra de to utgangene koples også sammen, og videre til "antenne"signalfordeleren, koples til denne med krokodilleklype. Kan f.eks. kople koaks fra hver utgang til felles BNC T-ledd, banan-BNC-overgang til antenneledning (og eventuelt jorde til sant jord).

Jord-fordeler: kople sammen TFG8104 sine utgangsjord og videre ut. Forleng med en ledning ut til hver plass.



