

Mikrovågsteknik:

# Piezo komponenter

Krister Andreasson

Fler kapitel och böcker finns på

[Mikrovagsteknik.se](http://Mikrovagsteknik.se)

# Piezo kristaller

De piezoelektriska komponenterna bygger sin funktion på mekaniska vibrationer. En kvartskristall på 12 MHz gör 12 miljoner vibrationer per sekund. Det betyder att den får  $10^{12}$  mekaniska påkänningar per dag. Det ska den stå ut med i många år utan att utmattas.

Ytan på kristallen rör sig i takt med svängningen. En 50 MHz kristall har en yta som accelererar med flera miljoner g. Sen ska den vända tillbaks igen efter 10 ns, utan att för många atomer kastas loss.

Det är denna mekaniska svängning som används i de flesta elektroniska apparater som tidsreferens eller precisionsfrekvens. Den har mycket högt Q-värde, är liten och ganska billig.

En kristall har ett Q-värde på 20 000 - 1 000 000  
En LC-krets har bara Q-värdet 100 - 600

Kristalloscillatorer ligger vanligtvis på 5 - 10 MHz, men det finns oscillatorer på över 100 MHz. Kurvformen är sinus eller fyrkant.

Temperaturdriften kan minskas med analog kompensering, digital kompensering, ugnstabilisering eller med mikrodatorkompenserad dubbel-mode oscillator.

På mikrovåg används de mekaniska vågorna genom materialet (bulk vågorna) till fördröjningsledning. Eftersom de akustiska vågorna rör sig långsamt får man lång fördröjning i en liten komponent, flera  $\mu\text{s}$ .

# Piezo resonatorer

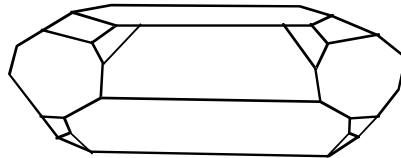
Piezo betyder "trycka" på grekiska. Med den piezo-elektriska effekten menas, att en elektrisk polarisering uppstår i vissa kristaller då de utsätts för mekanisk påkänning (tryck, vridning, böjning mm). Man kan också gå andra vägen och lägga på ett elektriskt fält över kristallen. Dess form kommer då att påverkas. Denna formförändring är proportionell mot fältstyrkan, och ändrar riktning då polariteten kastas om.

Det finns ganska många kristaller som är piezo-elektriska, men bara några få är användbara. Av dessa är det bara kvarts som är tillräckligt bra mekaniskt, elektriskt, kemiskt och termiskt.

## Kvarts

Kvarts består av kisel och syre,  $\text{SiO}_2$ . Berg och sand består till stor del av amorft  $\text{SiO}_2$ . Kristallisk kvarts av hög kvalitet är ganska sällsynt i naturen. Man kan odla kristaller på flera hundra gram på några veckor, men ju långsammare desto bättre kvalitet.

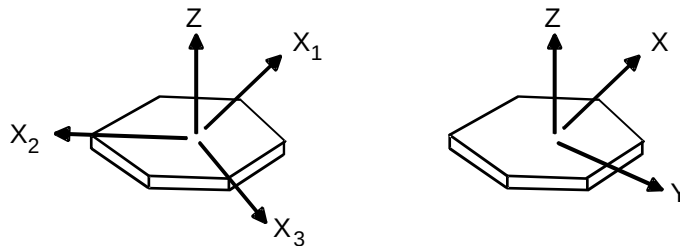
I en kristall är atomerna ordnade efter ett visst mönster, kristallgitter. Kvartskristallen har formen av en hexagonal prisma med snittytor i vardera änden.



Kristallens fysiska egenskaper är olika i olika riktningar, det kallas att den är anisotropisk. Det gäller alltså att orientera kristallen rätt då man ska tillverka kvartskomponenter.

## Kristallaxlarna

Eftersom kristallens egenskaper beror på dess riktning, så måste man först välja referensaxlar. En naturlig axel är i prismats längdriktning. Den kallas för Z-axeln. De övriga axlarna är vinkelräta mot Z-axeln. Det finns två sätt att specificera axlarna, beroende på vad man är ute efter.



Det ena axelsystemet består av tre X-axlar  $120^\circ$  från varandra. Det andra axelsystemet är det rätvinkliga koordinatsystemet med en X-axel som förut, samt en vinkelrät Y-axel.

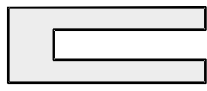

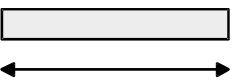
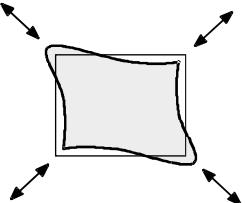

## Olika snitt

När man skär ner kristallen till resonatorer, är det efter det rätvinkliga koordinatsystemet man orienterar sig. Om man skär längs X-axeln eller Y-axeln så får man en resonator som varierar kraftigt med temperaturen.

Om man vrider kristallen, runt X-axeln eller Y-axeln, får man andra temperatur-koefficienter. Vissa lutningar på snitten ger extra liten temperaturvariation. Man kan till och med vrida runt både X- och Y-axeln innan man skär. De olika snitten betecknas med olika bokstäver, t.ex. BT eller AT.

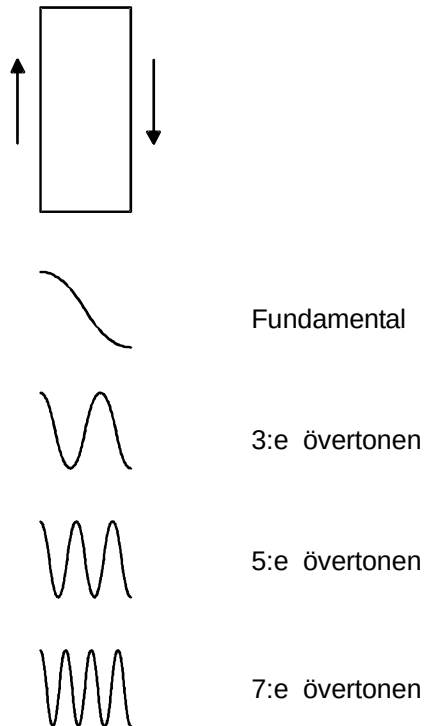
## Resonanser

Det är här fråga om mekanisk resonans. Ett litet stycke kvartskristall vibrerar med en viss frekvens. Ju mindre kristallen är desto högre blir resonansfrekvensen. Den kan dessutom vibrera på olika sätt, i olika moder.

Stämgaffel		24 - 50 kHz
Böjning		1 - 50 kHz
Förlängning		50 - 500 kHz
Formförändring		100 - 1000 kHz
Skjuvning		1 - 30 MHz

Den vanligaste typen av resonans är skjuvning (thickness shear). Här är det endast plattans tjocklek som bestämmer frekvensen. Genom att göra den tunn så svänger den på mycket hög frekvens (MHz). Den moden ger dessutom den högsta stabiliteten.

De båda ytorna förskjuts åt varsitt håll. Tjockleken är alltså en halv våglängd. Man kan också få den att svänga på 3, 5 eller 7 halvvåglängder (udda antal).



På det sättet kan man få en resonator på 200 MHz eller mer. När man bygger en referensoscillator används ofta 5:e övertonen för att få största möjliga Q-värde. Men man får fortfarande tillräckligt stort justeringsområde för att kompensera för tillverknings toleranser och åldring.

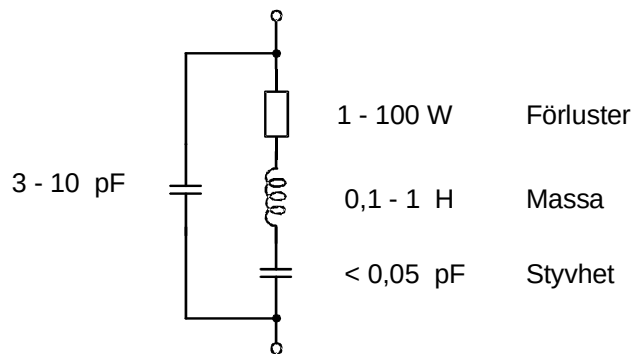
Frekvensen väljs mellan 2,5 - 10 MHz. Lägre frekvens ger högre Q-värde, men det behövs då större skiva. Vanligen används 5 MHz eller 10 MHz.

## Stress & Strain

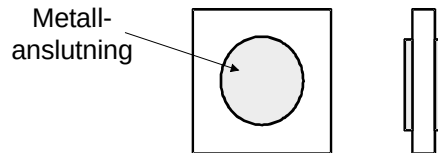
När ett stycke fast materia utsätts för krafter, kommer dess form att förändras (eller åtminstone sträva efter att förändras). Den är då utsatt för en viss påfrestning (påkänning). På engelska kallas det "stress".

"Stress" är en kombination av kompression, sträckning och skjuvning. Kompressionen vill förändra dess volym. Dragpåkänning påverkar dess längd, och skjuvning förändrar dess form. På engelska kallas dessa deformationer för "strain".

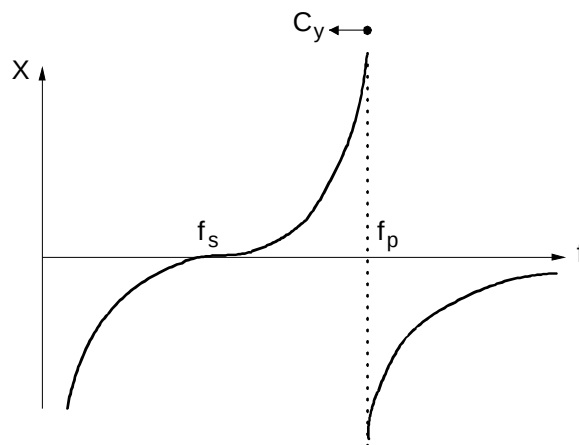
## Ekvivalent krets



En resonator är en resonanskrets.  $L$  beror på kristallens massa, och  $C$  på dess styvhet. I praktiken får man vissa förluster (dämpning) i kristallen och dess upphängning ( $R$ ). Kapacitansen mellan elektroderna betecknas med  $C_p$ .



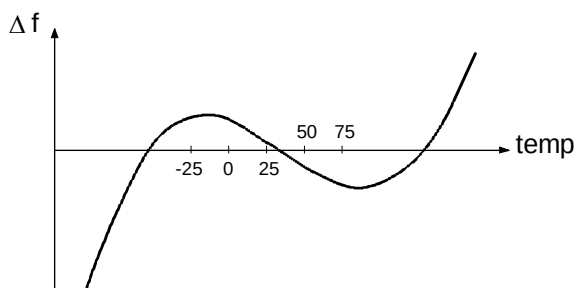
Kretsen innehåller alltså både en serieresonans och en parallellresonans. De båda resonanserna ligger mycket nära varandra.



Den yttre kretsens kapacitans ligger parallellt med  $C_p$ . Den kommer alltså att påverka resonansfrekvensen. Området mellan  $f_s$  och  $f_p$  är det område man kan trimma en kristallosillators frekvens.

## Temperaturvariationer

En kristall med AT-snitt ger en kubisk frekvensavvikelse som funktion av temperaturen.

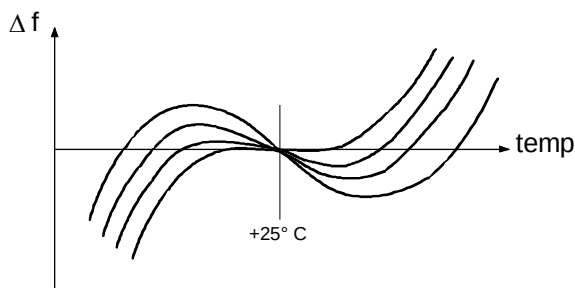


Det betyder att den totala frekvensavvikelsen är ganska hyfsad inom ett rätt stort frekvensområde.

$\pm 25$  ppm inom  $-40$  till  $+100$  °C  
eller  $\pm 15$  inom  $0$  till  $+70$  °C

ppm = parts per million , dvs miljondelar eller  $10^{-6}$

Temperaturkaraktistiken bestäms av hur mycket kristallen vrids innan den sågas upp, dvs snittet. Något olika snittvinklar ger något olika kurvor.



Man kan alltså välja en resonator som har en ganska platt temperaturkurva (hög temp. stab.) Men den är istället sämre vid stora avvikelser i temperaturen. Den punkt som kurvorna vrider sig runt är normalt ca  $+27$  °C. Man utgår från önskat temperaturområde och väljer sedan ett snitt som ger bästa stabilitet.

Temperaturstabiliteten anges alltid som max avvikelse, t.ex.  $\pm 5 \cdot 10^{-6}$  över ett visst temperaturområde. Eftersom det inte är ett linjärt förlopp kan man inte interpolera fram någon avvikelse per °C.

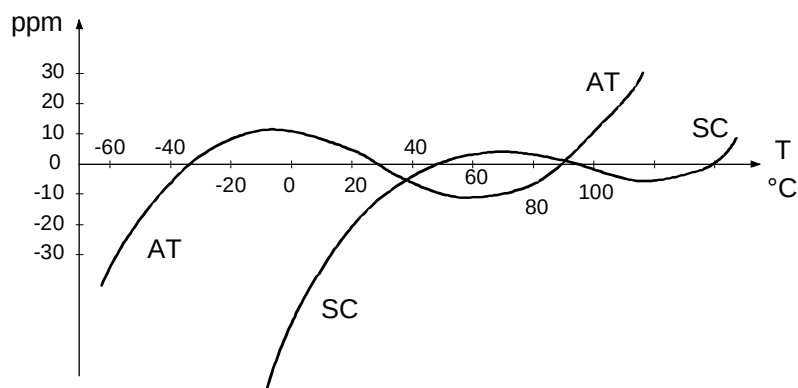


## SC-kristall

Om en kvartskristall utsätts för en mekanisk påverkan (stress) så ändras dess resonansfrekvens. Det kan vara fråga om ett tryck över skivans diameter eller en accelerationskraft. Det kan också vara de mekaniska spänningar som själva metallektrodena ger med tiden, t.ex. då temperaturen ändras. Även signalens effekt påverkar frekvensen. Om temperaturen ändras snabbt (termiska transienter) så får olika delar av kristallen olika temperatur. Det ger också mekaniska spänningar i materialet.

Frekvensändringens storlek beror på hur kristallen är orienterad, dvs den är anisotropisk. Man kan hitta vissa riktningar som har ett mindre frekvensfel under påfrestning.

Om kvartskristallen roteras runt både X-axeln och Y-axeln, kan man få ett snitt där resonatorn är okänslig för mekanisk påfrestning. Detta snitt, som är vridet ca 22° respektive 34°, kallas ofta för SC-snitt (Stress Compensated). Den har också kallats TTC-snitt (Thermal Transient Compensated) och TS-snitt (Thermal Stress).



SC-kristallen har mycket liten frekvensavvikelse, åtminstone vid högre temperaturer. Det gör den mycket lämplig som precisionsreferens om den monteras i en ugn. Kraven på ugnstabilitet kan minskas eftersom frekvenskurvan har mindre lutning på de högre temperaturerna. Frekvensstabiliteten inom -20 °C till +70 °C, är då för en ugnstabiliserad AT-kristall  $10^{-8}$  och för SC-kristall  $10^{-9}$

SC-kvarts tillåter dessutom mycket snabbare uppvärmning. Vid termiska transienter har den mycket mindre översläng och snabbare återhämtning. Uppvärmningstiden till stabiliteten  $10^{-8}$  är för AT-kvarts ca 20 minuter. SC-kvarts kan värmas upp så snabbt som på 3 minuter till motsvarande stabilitet.

Om man önskar hålla frekvensen inom  $5 \cdot 10^{-11}$  med hjälp av en AT-kristall, så får inte ugnstemperaturen variera mer än  $10^{-4}$  °C/tim. Använder man SC-snitt istället så kan temperaturen variera ca  $10^{-3}$  °C/tim.

En annan fördel är åldringen. Den inbyggda mekaniska spänningen vid monteringen förändras med tiden. AT-kristallen ger därför en motsvarande frekvensändring. SC-snittet är däremot inte så känsligt för mekaniska spänningar, och åldras därför mycket mindre.

En nackdel är att SC-snittet är mycket känsligt för luftens dämpning då den vibrerar. SC-resonatoren måste därför monteras i vakuum för att få bästa Q-värde.

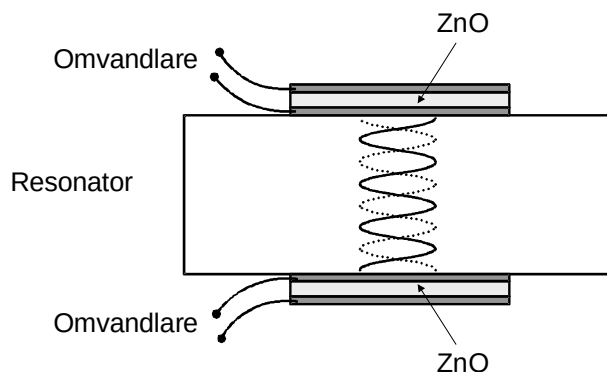
Ytterligare en nackdel är den stora frekvensdriften vid kyla. Vid högre temperaturer är den det bästa snittet, men vid kyla är den riktigt dålig. Om man inte kan använda en uppvärmd ugn så är det därför fortfarande bäst med AT-snittet.

Utöver den temperaturkompenserade svängningsmoden (C-mode) har SC-snittet ytterligare en mode (B-mode). Den ligger 9,4% högre i frekvens och har mycket sämre stabilitet. I kretskopplingarna måste denna B-mode undertryckas så att oscillatoren svänger på den stabila C-moden.

## Kompositresonator

### HBAR - High Overtone Bulk Acoustic Resonator

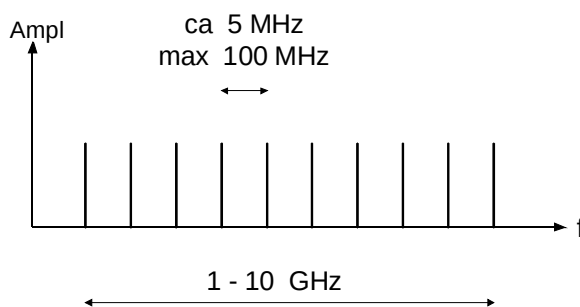
Den akustiska dämpningen i en piezokristall begränsar den användbara övertonsgraden. En kompositresonator består av ett material med låg akustisk utbredningsdämpning. På så sätt kan man utnyttja övertonerna långt upp i mikrovågsområdet.



Kompositresonatoren består av ett material som själv inte är piezoelektriskt. Ovanpå resonatormåsten måste då läggas en piezoelektrisk omvandlare. En omvandlare består av en mycket tunn film av zinkoxid, med metallisering på båda sidor.

Med omvandlare på båda sidor av själva resonatormåsten får man en två-ports resonator. En en-ports resonator har omvandlare bara på ena sidan.

Resonatormåstens tjocklek bestämmer resonansfrekvensen med dess övertoner. Genom att utnyttja stor övertonshalt behöver inte resonatormåsten bli så extremt tunn och skör. Den ger resonans för alla frekvenser där resonatormåstens tjocklek är ett helt antal halvvåglängder. Men det är viktigt att de motstående ytorna är mycket noggrant parallella.



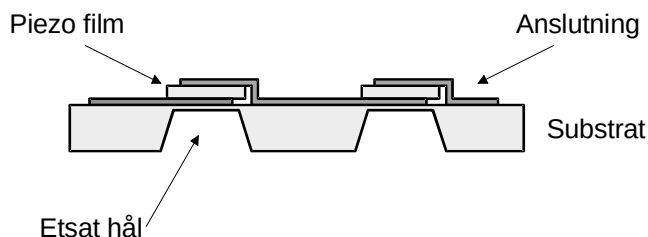
Övertonerna kan vara separerade så mycket som 100 MHz, men närmast 5 MHz är vanligare. Själva omvandlarna är ganska bredbandiga eftersom de är så tunna. Man får alltså ett mycket brett kamspektrum inom 1 - 10 GHz.

Q-värden större än 5000 är vanligt. Man kan få Q-värden ända upp till 20 000 på 1 - 2 GHz, eller 150 000 på 300 MHz.

En annan viktig fördel med HBAR är dess låga känslighet för vibrationer. Frekvensvariationer på  $10^{-11}$  per g är 100 gånger bättre än för vanliga kvartsresonatorer.

## FBAR

Film Bulk Acoustic Resonator



Mycket höga frekvenser kräver en mycket tunn piezokristall. I frekvensområdet 1 - 5 GHz kan kristallen tillverkas som en tunn film ovanpå ett bärande lager av halvledare ( $\text{SiO}_2$  eller GaAs). Under själva resonatorn etsas halvledaren bort, på samma sätt som ett via-hål. Resonatorn kombineras med passiva komponenter för att forma ett monolitiskt bandpassfilter.

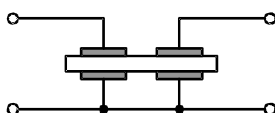
Filtret blir mindre än ett dielektriskt filter eller ett med diskreta komponenter, och det får lägre förluster än ett SAW-filter. Förlusterna för ett 2-pol filter kan bli 1 - 1,5 dB vid 1 GHz och 3 - 4 dB vid 3 GHz. En grundton på 1 GHz kan få ett Q-värde på 9000.

Andra namn på resonatorn är TFR (Thin Film Resonator) eller SBAR (Semiconductor Bulk Acoustic Resonator)

## Monolitiskt kristallfilter

## MCF

Ett par kristallresonatorer kan kopplas ihop till en filterkrets. Som filter är det viktigt att resonatorerna inte har några extra resonanser (spuriousmoder). I oscillatorn är det däremot mer intressant med Q-värdet, eftersom man här kan välja resonansmode.

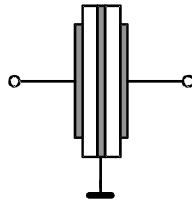


Ett monolitfilter består av två resonatorer på samma kristall. Vibrationerna sker mellan elektroderna och avtar ganska snabbt utanför området. Men om resonatorerna ligger tillräckligt nära varandra kan man få lämplig koppling.

Största bandbredden begränsas av hur hårt de vibrerande områdena kan koppla till varandra. Bandbredden kan bli max ca 0,5 %. Svängning på överton ger smalare filter. Minsta användbara bandbredd är ca 0,01 %.

Undertryckningen av spurious är 20 - 30 dB i grundmoden och 18 - 20 dB i övertonsmode.

Standardfilter finns på de vanligaste frekvenserna 0,1 1,4 1,75 3,1 9 10,7 21,4 38 45 70 och 75 MHz.



Två resonatorer monteras med mellanliggande jordplan. SCF kopplar alltså i tjockled, medan MCF kopplar i sidled. MCF har ungefär lika stor diameter som tjocklek. SCF har mycket större diameter än tjocklek. Diametern kan göras så stor att impedansen blir  $50 \Omega$ .

Resonans sker då tjockleken är en halv våglängd, samt övertoner vid flera halv våglängder. 2:a övertonen är den starkaste resonansen eftersom det ger en halv våglängd för vardera resonatorn.

Med resonatorerna tillverkade som tunna filmer kan man få ett stackat kristallfilter inom området 1 - 2 GHz. Förlusterna kan vara så små som 1,5 dB vid bandbredden 20 MHz.

Med ett jordplan i mitten slipper man kapacitiv koppling mellan in- och utgång. Det ger en bättre filtrering jämfört med en-ports resonatorerna.

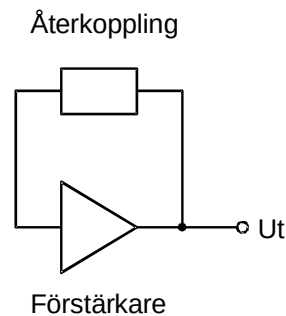
## Övriga applikationer

Den piezoelektriska effekten innebär att det bildas en elektrisk spänning då kristallen utsätts för mekanisk påverkan. Det kan man utnyttja för att mäta tryck eller acceleration. I och med att resonansfrekvensen är temperaturkänslig, så kan man också använda den till att mäta temperatur mycket noggrant.

En kvartsresonator är mycket känslig för om kristallytan belastas med extra massa. Frekvensen ändrar sig linjärt då massan ändras, upp till några procent. Med den frekvensändringen kan man mäta olika materials tjocklek, avlagrings-hastighet mm. Filmer från några picogram/cm<sup>2</sup> till 0,05 g/cm<sup>2</sup> kan mätas med en noggrannhet på 3 %. Man kan också mäta hur en kristall med viss ytbehandling reagerar med vissa gaser.

# Oscillator

En oscillator består av en förstärkare och ett återkopplingsnät. Förstärkaren består vanligen av en eller ett par bipolära transistorer. Det kan också vara en monolitförstärkare. Kristallen används som frekvensbestämmande resonanskrets i återkopplingskretsen.

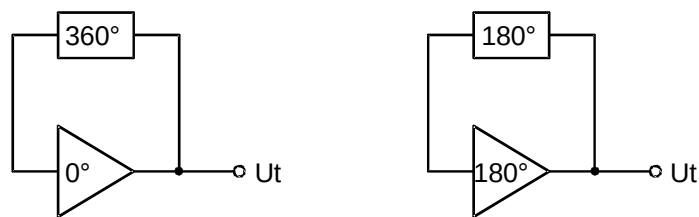


Kriteriet för att det ska börja självsvänga är att signalen som går runt i slingan kommer i exakt samma fasläge efter ett varv, och har en amplitud som är större än föregående varv. Amplituden kommer alltså att öka för varje varv. Efter några varv begränsas amplituden av förstärkaren eller återkopplingskretsen. Utsignalen får då en konstant amplitud. Vi får då:

$$\text{Slingans sammanlagda förstärkning} = 1$$

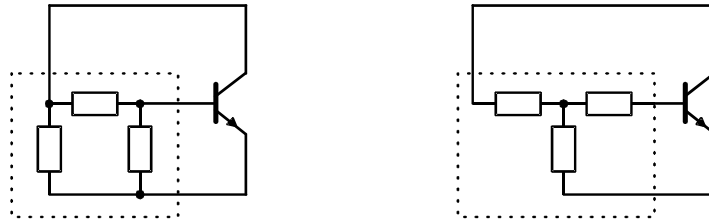
$$\text{Slingans totala fasvridning} = N \cdot 2\pi$$

Slingan ska alltså innehålla ett helt antal perioder. Det kan man åstadkomma med antingen tidsfördröjning eller fasvridning. På lägre delen av HF-området är perioden för lång för att man ska kunna använda praktiska fördröjningsledning. Här väljer man istället fasvridande nät.

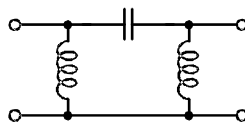


Man kan använda antingen en inverterande eller en icke-inverterande förstärkare. Det väsentliga är att signalen kommer i fas efter ett varv (360°).

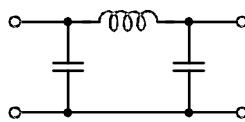
De fasvridande näten kan i sin enklaste form anta en  $\pi$ -ekvivalent eller en T-ekvivalent. Ofta består oscillatoren av en  $\pi$ -krets och en bipolär transistor.



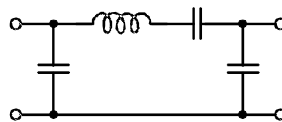
Det fasvridande nätet består av ett antal reaktanser. Oscillatorn har fått olika namn beroende på vilken kombination av reaktanser man valt.



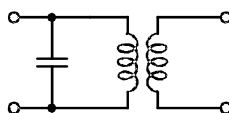
Hartley



Colpitt



Clapp

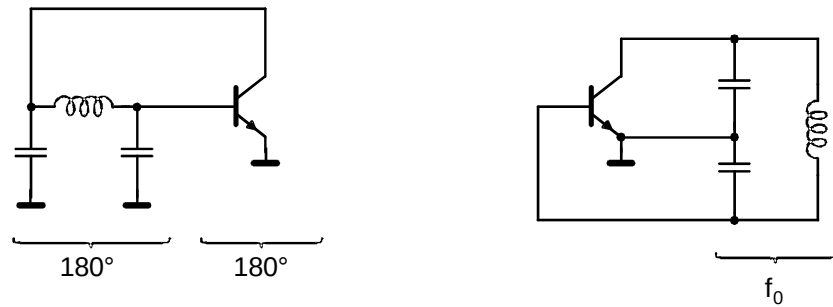


Armstrong

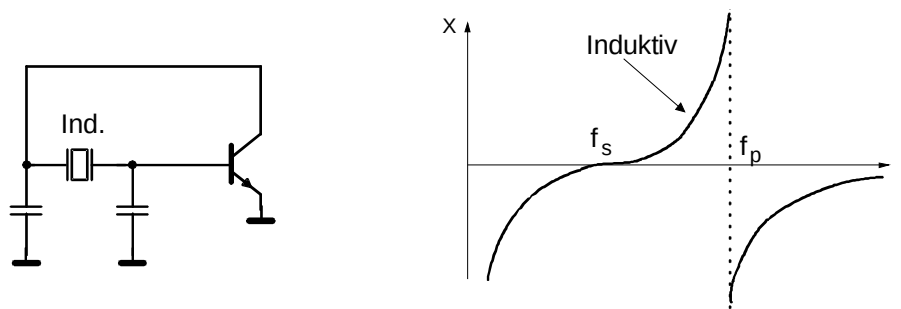
Spolar och transformatorer är besvärligare och dyrare i tillverkning än kondensatorer. Därför används främst Colpitts eller Clapp-oscillatorn.

Transistorn kan ha RF-jordad bas, emitter eller kollektor (common base, common emitter, common collector). Kretsens HF-ekvivalent blir alltid densamma. Valet bestäms av DC-förspänningen, trimningen eller andra praktiska synpunkter. Colpitt har kollektorn RF-jordad. Om istället emittern är RF-jordad kallas den ofta Pierce.

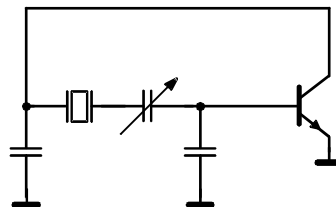
## Colpitt med GE-koppling , dvs Pierce



En GE-koppling inverterar signalen. In- och utström är närmare  $180^\circ$  ur fas. Reaktansnätet måste alltså vrida resten till  $360^\circ$ . Den andra figuren visar samma krets lite omritad. Här kan man betrakta kopplingen som en resonanskrets som bestämmer oscillatorns frekvens. Återkopplingen sker via en kapacitiv spänningsdelning.



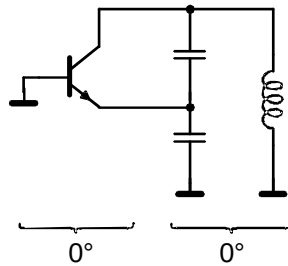
När oscillatoren stabiliseras med en kristall, så kopplas kristallen in istället för spolen. Kristallen används då något ovanför sin serieresonans (10 - 40 ppm), där den är induktiv. Man har alltså helt blivit av med spolar och fått en krets som är enkel att tillverka.



Om man vill kunna justera frekvensen kopplas en trimkondensator in i serie med kristallen. Frekvensen ökar då något. Trimområdet är några hundra Hz. Den totala reaktansen från kristallen och trimkondensatorn ska fortfarande vara positiv (induktiv) för att det ska bli rätt fasvridning.

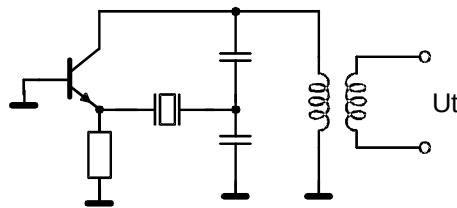


## GB-koppling



Strömmen i kollektorn ligger i fas med strömmen i emitttern. Övriga kretsen ska således också ha  $0^\circ$  fasvridning. En GB-koppling är speciellt lämplig om det är fråga om mycket höga frekvenser (VHF eller högre). Fasvridningen genom GB-steget är närmare  $0^\circ$  ända upp till 20% av transistorns maxfrekvens (unity gain).

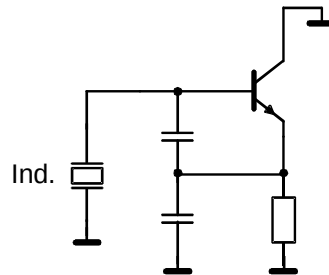
Utsignalen kan tas antingen direkt från kollektorn, eller från en sekundär lindning till spolen.



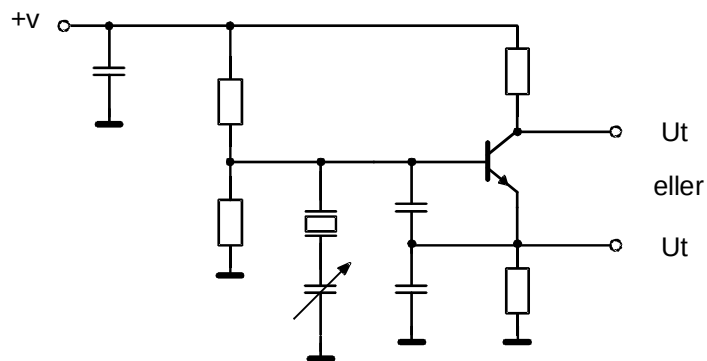
När den GB-kopplade oscillatoren stabiliseras med en kristall, behåller man vanligen Colpitt-kopplingen. Kristallen används då som en krets som endast återkopplar den rätta frekvensen. Kristallen ingår alltså inte i oscillatorns resonanskrets och behöver inte utsättas för dess cirkulerande strömmar. Oscillatoren kan arbeta på en stor signalnivå, med en hög uteffekt, samtidigt som dess kristall får låg effekt via den kapacitiva spänningsdelningen.

Eftersom svängningskretsen begränsar frekvensområdet så kan man arbeta på en av kristallens övertoner.

## GK-koppling

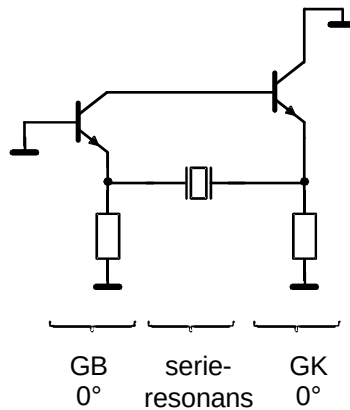


Vid en GK-koppling används kristallen som en induktans, dvs ovanför serie-resonans. En fördel med GK-koppling är att kristallens ena sida är jordad. En trimkondensator eller en varaktordiod kan då kopplas direkt mot jord. Det blir också enklare med switchning mellan flera olika kristaller om den ena sidan är jordad.



En nackdel är att motstånden till förspänningen ligger tvärs över kristallen. Q-värdet och stabiliteten kan då bli sämre. Utsignalen kan tas från emittern eller från ett kollektormotstånd.

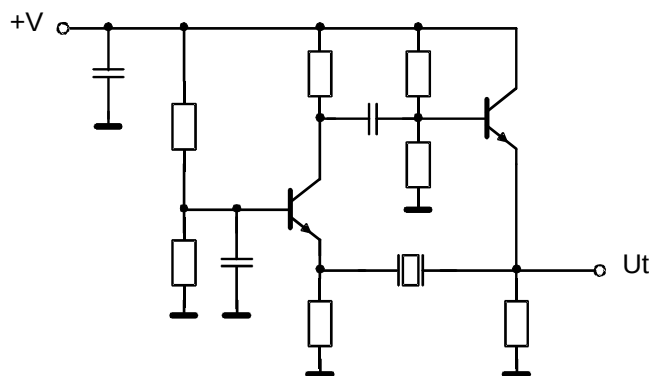
## Emitterkopplad oscillator



Både GB-steget och GK-steget (emitterföljaren) har fasvridningen  $0^\circ$ . Kristallen används alltså på sin serieresonans. Båda stegen fungerar bra även på höga frekvenser.

Kristallen kopplas mellan de två emitterna. Det ger bra stabilitet även med kristaller som har låg impedans.

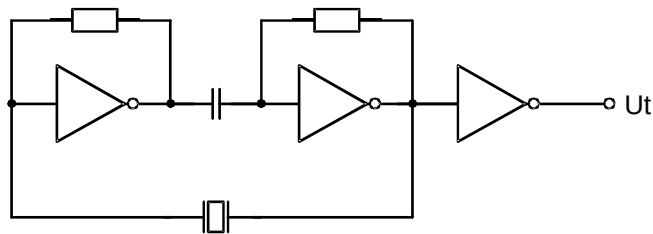
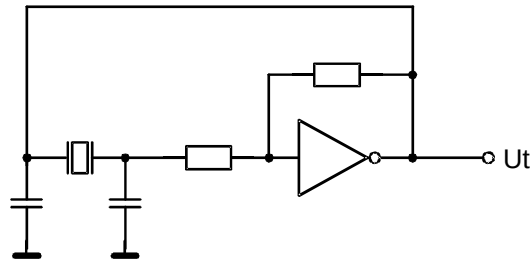
Totala slingförstärkningen är hög eftersom det används två transistorsteg. Med hög förstärkning kan man hålla kristallströmmen låg även vid stor utsignal.



Emitterkopplade oscillatorn har ett minimum av reaktiva komponenter. Den kan lätt tillverkas som en integrerad krets utan att behöva några yttre diskreta komponenter. Som integrerad krets kan den dessutom innehålla drivsteg, frekvensdelare mm.

Nackdelen är att den inte ger samma höga stabilitet som de övriga kretsarna. Den används där det krävs litet utrymme och måttlig stabilitet.

## Oscillator med logik-kretsar

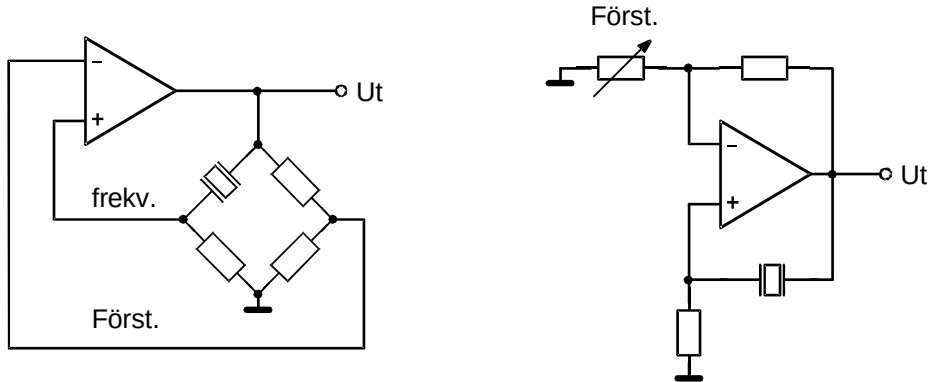


En logikkrets kan användas som en förstärkare om den förspänns till sitt linjära område. Det kan vara ett bekvämt sätt att bygga en kristaloscillator eftersom ett digitalt kretskort ofta innehåller några överblivna inverterare eller grindar.

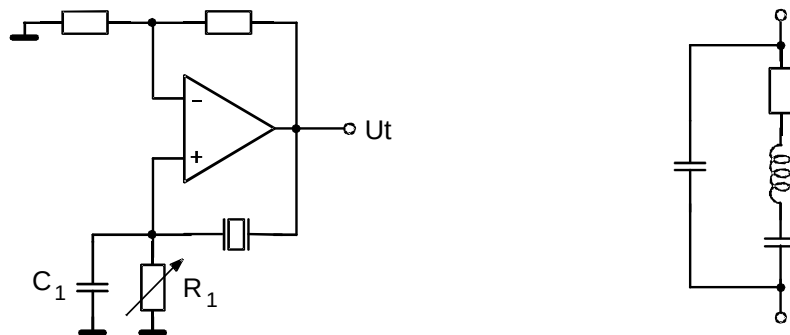
Logikkretsar är däremot inte tänkta att användas som förstärkare. Dess fasskift och förstärkning är mycket stor. Det kan leda till frekvensfel och icke-önskade signaler (spurious). Det stora antalet transistorsteg och den hårda drivningen av kristallen är inte lämpligt då man önskar hög stabilitet.

## Bryggkopplade oscillatorer

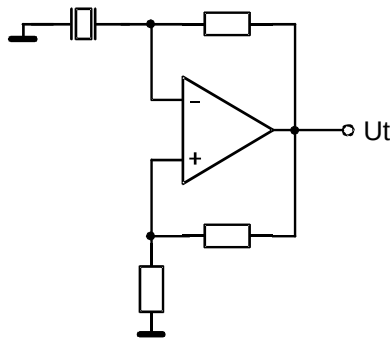
En bryggkopplad oscillator använder ofta en differentialförstärkare som aktivt element. Dess impedans är mycket hög, så bryggan belastas inte.



Bryggan ger både positiv och negativ återkoppling till förstärkaren. Den negativa återkopplingen bestämmer förstärkningen. Positiv återkoppling gör att kretsen självsvänger på den frekvens som kan koppla genom kristallen. Frekvensen är alltså kristallens serieresonans.

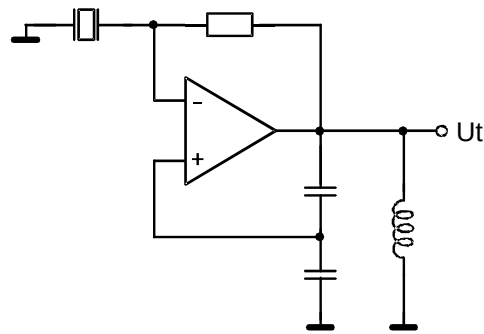


$C_1$  kompenserar kristallens parallellkapacitans  $C_n$ . Den variabla resistansen  $R_1$  följer kristallens  $R_m$  via en AGC-koppling. De två tidskonstanterna är alltså lika. Oscillatorn kommer därför att arbeta på kristallens serieresonans även då den utsätts för acceleration.

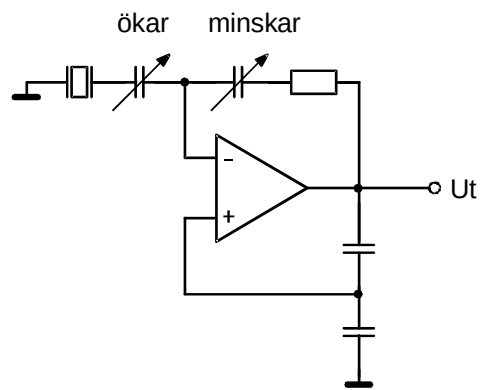


Kristallen kan alternativt kopplas till den negativa återkopplingen. Vid resonans har kristallen mycket låg impedans. Det ger mycket hög förstärkning. Alla frekvenser över eller under resonans får bara en förstärkning närmare 1. Det för med sig att oscillatoren får lägre sidbandsbrus. Det termiska bruset och hagelbruset är mycket bredbandigt brus, men endast det smala området inom resonansens bandbredd blir ju förstärkt. En annan fördel är att kristallen är jordad på ena sidan. Det ger lägre strökapacitanser och enklare kretsanalys. Dessutom blir det enklare vid varaktorstyrning.

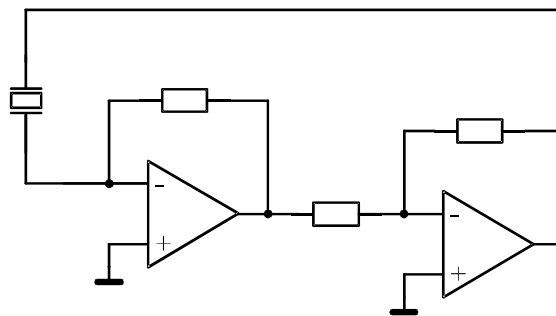
Till den positiva återkopplingen används motstånd, men man kan använda vilka impedanser som helst. Det gäller bara att se till att de inte ger någon fasvridning vid den aktuella frekvensen.



Här används en kapacitiv spänningsdelning. Spolen avstämmer kretsen till önskad frekvens. Därigenom förhindras icke önskade moder.

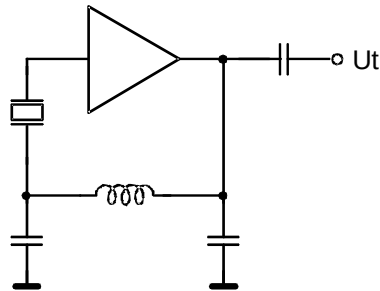


Med trimkondensatorer kan man justera frekvensen.  $C_1$  kommer att öka frekvensen. Resonatoren drivs mot induktiv reaktans så att den totala fasen blir noll.  $C_2$  kommer på motsvarande sätt att driva kristallen mot kapacitiv reaktans, dvs frekvensen minskar. Man kan alltså trimma frekvensen både uppåt och neråt från serieresonansen utan att behöva ta till induktanser.



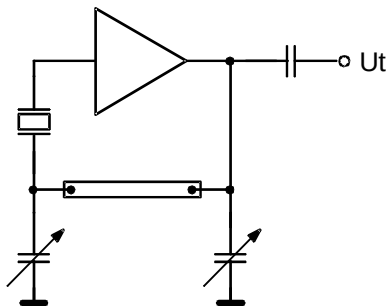
Med två OP-förstärkare slipper man använda den positiva ingången. Summeringsingångarna har mycket låg impedans till jord. Kapacitansvariationer ger därför mycket liten fasvariation. En annan fördel är att man slipper "common mode" problem när ena ingången är jordad.

## Oscillator med RF-förstärkare



På höga frekvenser (VHF, UHF) kan man använda en monolitförstärkare som aktivt element. Förstärkaren har  $50 \Omega$  impedans på in- och utgång. Man kan därför lätt bryta upp slingan för att göra mätningar på amplitud och fas.

Slingan består vanligen av en inverterande förstärkare och ett fasvridande nät. Förstärkaren har en viss fasvridning utöver inverteringen. Det blir alltså inte exakt  $180^\circ$  för nätet.



Fasvridningen kan man alternativt få med en transmissionsledning. På höga frekvenser är ledningen både enklare och billigare. En bra kombination är att ha den största fasvridningen i en ledningsbit och en liten fasvridning med kondensatorer. Det har den fördelen att man kan fintrimma med variabla kondensatorer.

Monolitförstärkaren är mycket bredbandig. En lednings fasvridning är periodisk med våglängden. Med olika fasvridande nät väljer man mellan de olika övertonerna.

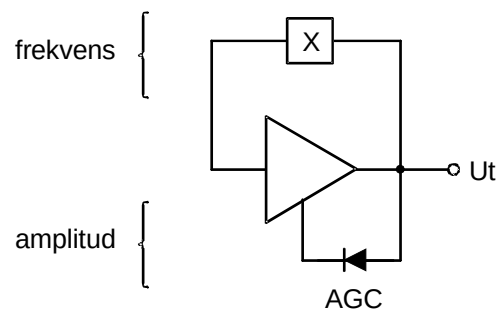


## ALC

ALC - Automatic Level Control

AGC - Automatic Gain Control

Oscillatorn måste vid tillslag ha en viss total förstärkning i slingan för att starta, vanligen ca 2 - 6 dB. När svängningen byggs upp minskar förstärkningen till 1 (dvs 0 dB) och kretsen svänger med konstant amplitud. Minskningen i förstärkning kan ske genom att förstärkarsteget limiterar. Ett annat sätt är att använda dioder till limiteringen. Men det bästa sättet är att använda ALC.



Förstärkaren har då två återkopplingar. Dels via den reaktiva kretsen som bestämmer frekvensen på oscillatorn. Dessutom detekteras utsignalens amplitud, och den likspänningen bestämmer förstärkningen.

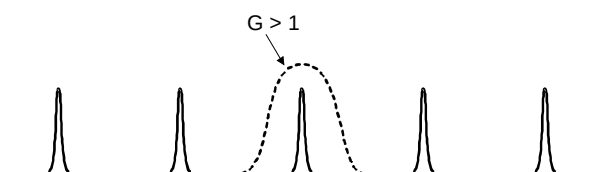
Förstärkningen dras ner så mycket att signalen inte limiterar någonstans. Förstärkaren arbetar alltså inom sitt linjära område. Därigenom minskas överföringen från amplitudvariationer till fasvariationer (AM/PM konvertering) För att få hög stabilitet bör dessutom förstärkningsregleringen ske utan någon förändring av fasläget.

## Oscillator för övertoner

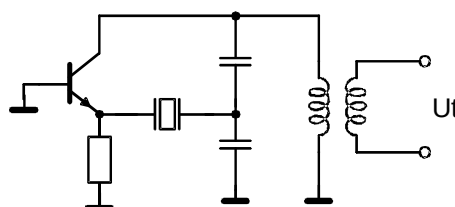
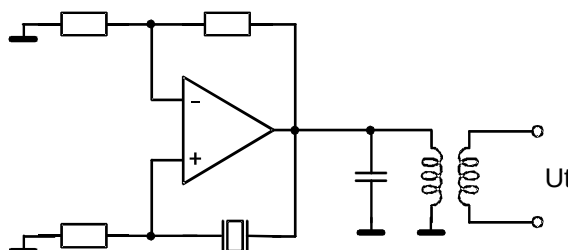
Det är tjockleken på kristallskivan som bestämmer resonansfrekvensen. Tunnare skiva ger högre frekvens. Med standardutrustning kan man polera plattorna till en grundfrekvens på ca 50 MHz. De blir då ca 30  $\mu\text{m}$  tjocka, dvs mycket tunna och sköra att handskas med. Vanligen nöjer man sig med ca 25 MHz som högsta grundfrekvens.

För att nå högre frekvens är det lämpligare att utnyttja svängningens övertoner. Vanligen används 3:e eller 5:e övertonen för att nå upp till 75 MHz respektive 125 MHz. Men det går också bra att få 200 MHz på 9:e övertonen.

Om oscillatoren ska svänga på en överton så måste man förhindra att den börjar svänga på lägre frekvens. Kristallen kan mycket väl ha lägre resistans på grundtonen och mycket hellre svänga där.

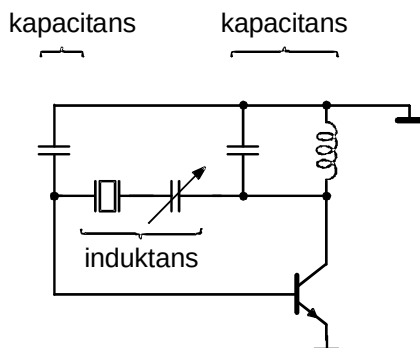


Det finns två sätt att förhindra grundfrekvensen. Det ena är att man med extra resonanskrets på övertonen får de lägre frekvenserna dämpade, så dess slingförstärkning blir mindre än 1.



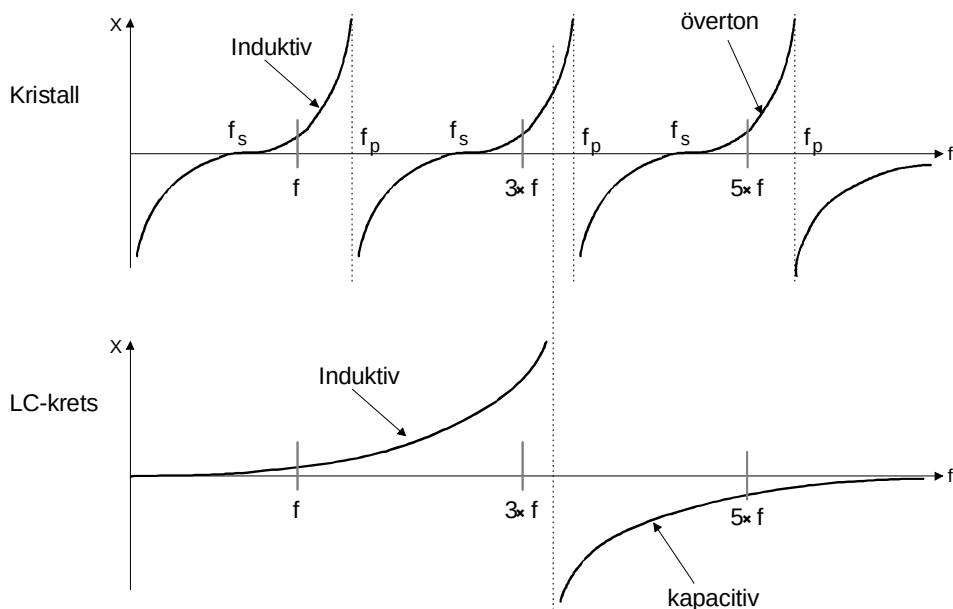
Med avstämmd transformator får man undertryckning av icke önskade frekvenser (spurious). Dessutom får man en undertryckning av det bredbandiga brusset.

Det andra sättet att undertrycka lägre frekvenser är att införa ett fasvridande nät, så att de störande frekvenserna inte kan få det nödvändiga fasläget för självsvängning.



Den här kretsen kallas modifierad Pierce. Kristallen har, tillsammans med trimkondensatorn, en induktiv reaktans. På ömse sidor om induktansen ska det vara kapacitanser för att det ska bli den rätta fasvridningen.

Modifieringen är att det tillkommit en induktans över ena kondensatorn. LC-kretsen är en parallellresonanskrets. Resonansfrekvensen ska alltså förläggas nedanför den önskade övertonen, men ovanför den närmast lägre.

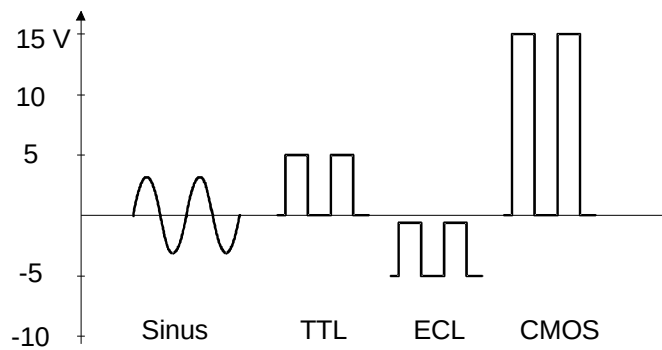


LC-kretsens resonans förläggs så långt ner som möjligt, för att det inte ska bli så stor fasvridning på den önskade frekvensen. Dvs strax ovanför den närmast lägre oscilleringen.

## Olika typer av oscillatorer

Man kan dela upp oscillatorerna i två kategorier. Sinusgeneratorn ger en ren sinussignal utan övertoner eller spurious. Den används som referens i analoga RF-kretsar.

Den andra kategorin är fyrkantgeneratorn, som används som klockgenerator i digitala applikationer. Eftersom det är en fyrkantvåg med stor amplitud innehåller den mycket starka udda övertoner. Man kan utnyttja dessa högre frekvenser utan att behöva någon extra frekvensmultiplikator.



Man kan också dela in oscillatorernas olika kretskopplingar i:

Kapslad oscillator	XO
Spänningsstyrd oscillator	VCXO
Temperatur kompenserad	TCXO
Ugn stabiliserad	OCXO
Mikrodator kompenserad	MCXO

## **Kapslad kristalloscillator**

Hit räknas allt från den enklaste miniatyrkapseln till den frekvensmultiplicerade mikrovågsreferensen. Den kan ibland ha en manuell finjustering av frekvensen. Den används ofta som klocka till digitala kretsar, ytmonterat eller i dual-in-line kapsel. Den kan då med TTL-utgång gå upp till ca 70 MHz. Med 5:e övertonen kan den pressas upp till ca 100 MHz. Med ECL når man upp till ca 200 MHz, men med standard CMOS bara till ca 15 MHz.

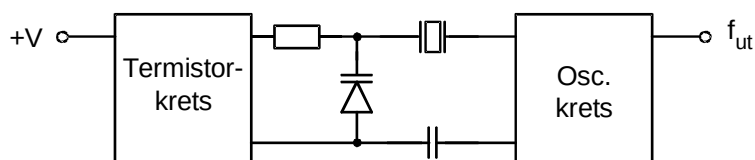
Om man önskar riktigt låga frekvenser kan man få en kapsel som innehåller både kristalloscillator och frekvensdelare. Det kan dessutom vara en programmerbar frekvensdelare. Utfrekvensen kan bli så liten som en hundradels Hz. Ett annat alternativ är klockdelning till sekunder, minuter, timmar osv.

## **Spänningsstyrd kristalloscillator    VCXO**

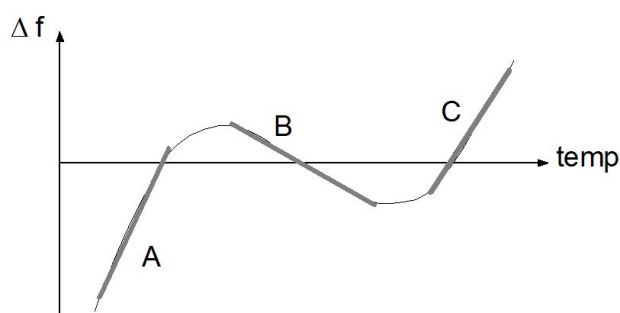
Den spänningsstyrda kristalloscillatören används i faslåsta kretsar (PLL) och som FM-generator i kommunikationssystem. Frekvensvariationen får man vanligen genom att variera förspänningen på en varaktordiod i serie med kristallen.

## Temperaturkompenserad kristalloscillator TCXO

Det vanligaste sättet att stabilisera en kristalloscillators frekvens, som funktion av temperaturen, är att korrigera frekvensen med hjälp av en varaktordiod.

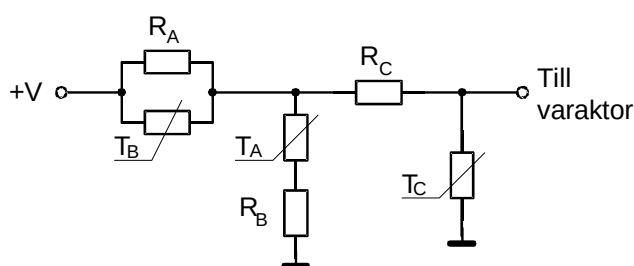


Temperaturen mäts upp och en likspänning korrigerar frekvensen precis så mycket som kristallens avvikelse vid den temperaturen.



Kristallens frekvens varierar med kuben på temperaturen. Vid rumstemperatur (B) minskar frekvensen vid ökad temperatur. Både vid låga (A) och höga (C) temperaturer ökar frekvensen med temperaturen. Det finns olika sätt att bygga elektroniska kretsar som kompenserar den kurvan.

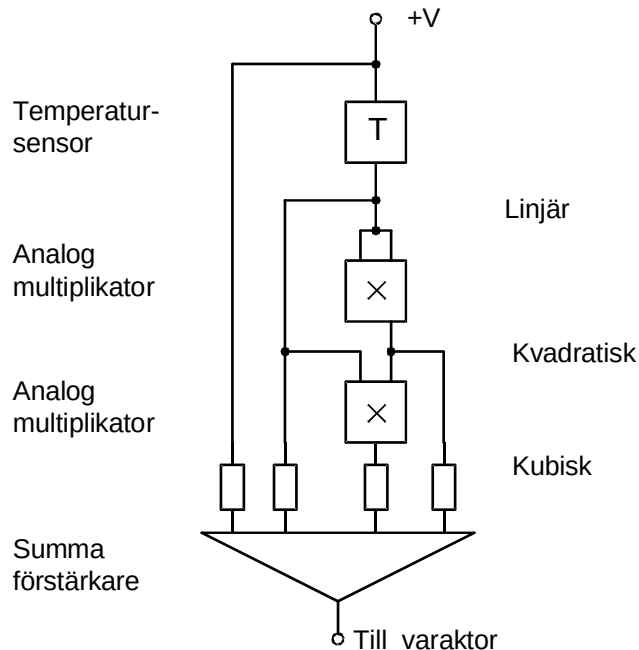
### Termistorkrets



När det är riktigt kallt är  $T_B$  och  $T_C$  i stort sätt öppna. Korrigeringen sker med  $R_A$  och  $T_A$ . Vid rumstemperatur är  $T_A$  kortsluten. Korrigeringen sker med  $R_B$  och  $T_B$ . Vid höga temperaturer är både  $T_A$  och  $T_B$  kortslutna. Variationen bestäms då av  $R_C$  och  $T_C$ .

## Kurvgenerator

Med tre termistorer får man den kubiska korrektionskurvan approximerad i tre steg. Ett annat alternativ är att använda en linjär temperatursensor följt av en IC-krets som har en kubisk funktion. Det ger en kontinuerlig variation.



Den kubiska kurvformen kan delas upp i en konstant, en linjär funktion, en kvadratisk funktion samt en kubisk funktion.

Genom att summera spänningarna i lämpliga proportioner (amplituder) kan man få en kurvform som stämmer överens med den aktuella kristallresonatoren. Om man vill kan man ta med 4:e och 5:e gradens term för att bättra på följsamheten (stabiliteten) ytterligare.

Samtliga komponenter får plats i en IC-krets. Man kan till och med passa på att stoppa in delar av den spänningstyrda oscillatoren, spänningsregulatorn och utgångssteget.

Med ett analogt system för temperaturkompensering (termistorkretsar eller kurvgenerator) kan man uppnå:

	$\pm 0,5 - 3 \text{ ppm}$	$-40 \text{ }^\circ\text{C}$ till $+100 \text{ }^\circ\text{C}$
eller	$\pm 0,3 - 1 \text{ ppm}$	$0 \text{ }^\circ\text{C}$ till $+70 \text{ }^\circ\text{C}$

## PROM kompensering



Man kan också använda en digital korrigeringskrets. Temperatursensorn ger en linjär spänning som funktion av temperaturen. Den spänningen digitaliseras och det digitala ordet adresserar ett PROM. Detta PROM är programmerat med kristallens temperaturkurva (samt eventuellt varaktoravstämningens olinjäritet). Ut från PROM-kretsen får man alltså ett ord som beskriver hur mycket oscillatorn måste korrigeras. Man går därefter över till analog spänning igen och styr ut varaktordioden i oscillatorn så att frekvensen hålls konstant.

Med digital korrigeringskrets kan man få en mycket stabil oscillator. Avvikelsen kan hållas inom

	$\pm 0,1$ ppm	över	0 °C till +60 °C
eller	$\pm 0,3$ ppm	över	-40 °C till +85 °C

## Mikroprocessor kompensering

Om man ska ha hög stabilitet, behövs det hög upplösning i både frekvens och temperatur. Det ger en mycket stor PROM-tabell. Istället kan man använda en mikroprocessor som är programmerad att interpolera mellan värdena i en liten PROM-tabell.



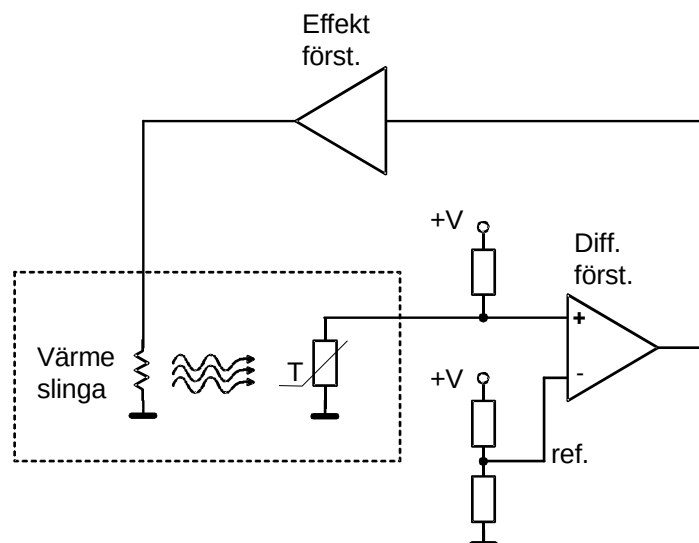
När temperaturen varierar så varierar kristallens resonansfrekvens. Den frekvensvariationen blir man av med om man håller konstant temperatur. Kristallen värms då upp till lite över den förväntade omgivningens temperatur. Sen gäller det att justera ugnen då omgivningstemperaturen varierar.

## Termostat

Den enklaste och billigaste temperaturregleringen får man med en termostat. Ugnens uppvärmning slås då till och från efter behov. Nackdelen är att temperaturen kommer att pendla runt termostatens inställning. Man kan alltså se på frekvensdriften fram och tillbaks hur termostaten slår. Dessutom är termostatens inställningstemperatur benägen att driva över långa tidsperioder.

## Proportionell kontrollering

Precisionoscillatorer använder istället en ugn som är proportionellt kontrollerad. Värmeslingan tillförs då effekt kontinuerligt. Hur mycket effekt den matas med bestäms av hur stor temperaturskillnaden är från det önskade värdet.



Vanligen används en bryggkoppling med termistor. Genom återkopplingen via värmeslingan hålls bryggan alltid i balans, dvs temperaturen hålls konstant.

Det är viktigt att hela kristallen har samma temperatur. Finns det temperaturgradienter så uppstår det mekaniska spänningar i kristallen, som ger ett frekvensfel. En övertonskristall med AT-snitt ger en frekvensavvikelse på ca  $10^{-9}$  när den utsätts för en temperaturramp på ca  $0,01 \text{ }^\circ\text{C}/\text{tim}$ .

En ugn har alltid vissa termiska förluster. Det gäller att nedkylningen respektive värmeslingans uppvärmning är så fördelade över kristallen att dess temperatur blir jämn. Temperatursensorn placeras så att den får en direkt koppling till värmeslingan. Det behövs en snabb respons mellan värmeslingan och termistorn för att det inte ska uppstå termiska svängningar (hunting). Dessutom måste ugnens upphettning ske tillräckligt långsamt. Det uppnår man genom att begränsa tillgänglig uppvärmningseffekt.

Då omgivningens temperatur är i det kallaste gränsläget, åtgår det en hel del effekt för att hålla ugnen varm. Vanligtvis isoleras ugnen med cellplast. Det åtgår då ca 10 W. Om man dessutom stoppar in den i en termosflaska så klarar man sig med ca 1 W.

## Dubbel ugn

Med en ugn kan man uppnå en temperaturstabilitet på 0,5 till 0,01 °C. Man kan få ännu högre temperaturstabilitet om man placerar ugnen i en annan ugn. Helst ska de ha varsin kontrollkrets. Då kan man få stabiliteten 0,001 till 0,0001 °C när omgivningens temperatur varierar från -10 till +50 °C. Även om man använder samma kontrollkrets så blir det klart bättre stabilisering än med endast en ugn. Båda värmeslingorna styrs då från en gemensam sensor. Förbättringarna beror främst på att man minskar temperaturgradienterna i den inre ugnen.

Det är bara kristallen, och kanske RF-kretsarna, som placeras i den inre ugnen. Övriga kretsdelar kan klara sig med en temperaturstabilitet på 0,1 °C. I den yttre ugnen finns alltså spänningsregulator, kontrollkretsar och effektsteg.

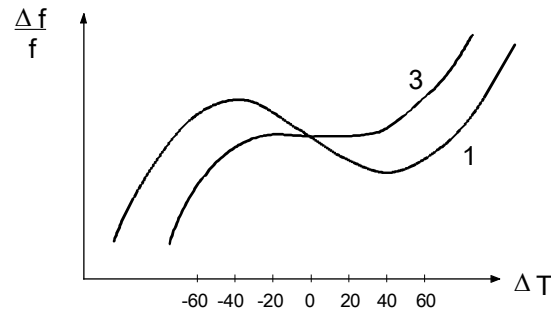
Den yttre ugnen stabiliseras vanligen på 10 - 15 °C över den högsta temperatur som omgivningen kan förväntas ha. Om den inre ugnen innehåller RF-kretsarna bör den ligga 10 °C över den yttre ugnen. Med en omgivning på max +50 °C blir kristallen alltså uppvärmd till +75 °C.

Med ugnstabilisering uppnår man mycket hög frekvensstabilitet. Driften i frekvens blir så liten som  $10^{-7}$  över temperaturen 0 - 70 °C. Om man använder dubbla ugnar får man en så extremt liten avvikelse som  $2 \cdot 10^{-10}$ . För att uppnå så liten frekvensdrift gäller det också att välja en kristall som har en temperatur-kurva som vänder precis vid ugnstemperaturen. Där kurvan har sin minsta lutning blir också frekvensfelet som minst.

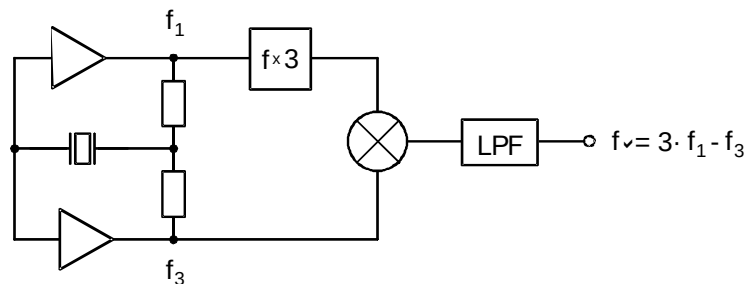
Eftersom ugnen måste värmas upp så tar det ganska lång tid att uppnå den höga stabiliteten. En precisionsoscillator har ofta en uppvärmningstid på 15 - 30 minuter. Ibland används en extra värmeslinga som kopplas in vid uppstart. Men det är viktigt att se till att temperaturgradienterna snabbt dämpas ut då extravärmen kopplas bort.

I många applikationer är det fördelaktigt att aldrig slå från spänningen till oscillatoren. Förutom stabilisering av temperaturen så tar det också en viss tid för kristallen att återstabiliseras. Karakteristiken liknar den vid åldring, fast det går mycket fortare.

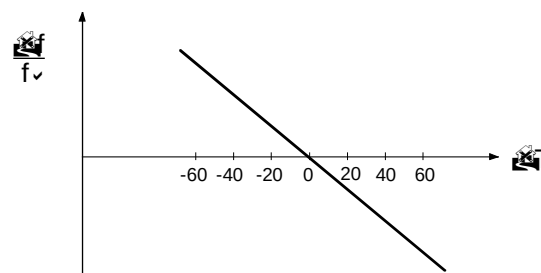
## Temperaturmätning med dubbel-mode oscillator



En kristall kan fås att svänga på både dess grundfrekvens och 3:e övertonen samtidigt. Temperaturkaraktistiken för de två frekvenserna är lite olika.



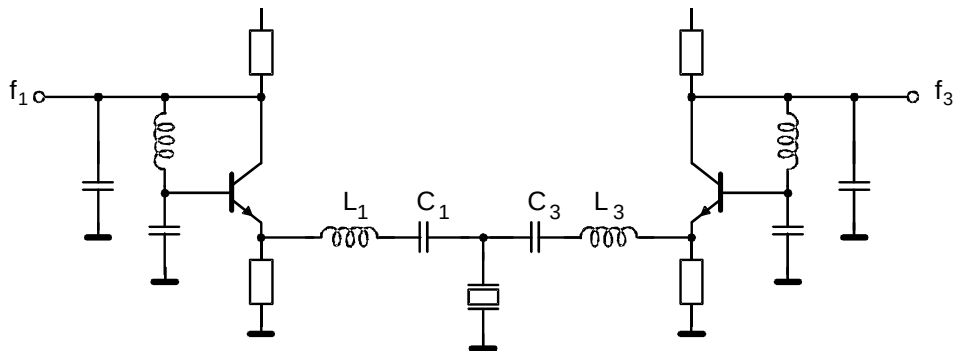
Grundfrekvensen multipliceras med 3 och blandas med 3:e övertonen.



Skilnadsfrekvensen varierar linjärt med temperaturen. Inom temperaturen  $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$  till  $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$  är avvikelser från en rak linje bara 2 % av hela frekvensvariationen. Lutningen är ca  $-14\text{ Hz}/^{\circ}\text{C}$

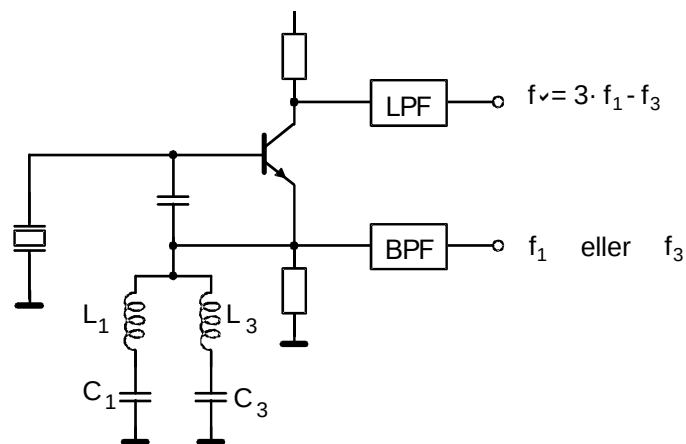
Med dubbla moder får man alltså en signal som är ett mått på temperaturen. Fördelen är att man mäter temperaturen inne i själva resonatorn. Man slipper alltså de felaktigheter som uppstår genom att mäta temperaturen med en yttre termistor. Dvs olika termiska tidskonstanter, olika temperaturer och åldring.

## Dubbel-mode kretsar



Två skilda oscillator-kretsar är kopplade till en gemensam kristall. Den ena svänger på grundfrekvensen och den andra på 3:e övertonen. Kristallen arbetar i sin serieresonans.  $L_1C_1$  är avstämmd till grundfrekvensen så att totala impedansen på vänstra emittorn är låg. Förstärkningen blir hög och oscillatorn svänger. Den högra oscillatorn fungerar på samma sätt för 3:e övertonen.

Serieresonanskretsarna isolerar de båda kretsarna från varandras frekvenser. I kretsen med dubbel-mode används kristallen i sin serieresonans. Det ger låg impedans och låg spänning, så att isolationen mellan kretsarna blir hög.



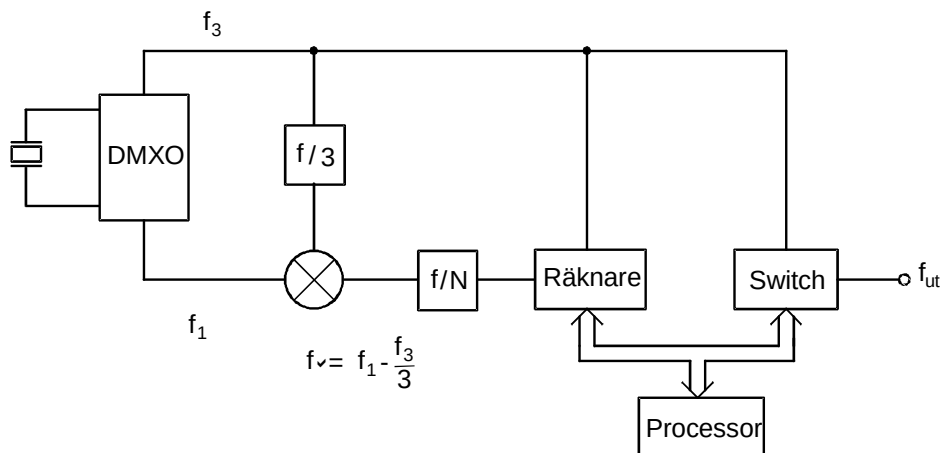
De två oscillatorerna kan kombineras till en gemensam transistor. Oscillatorn är av Collpitts typ. Den svänger på både grundtonen och 3:e övertonen samtidigt. Resonanskretsarna  $L_1C_1$  och  $L_3C_3$  är avstämmda till att ge kapacitiv reaktans för respektive frekvens.

Transistorns olinjäritet utnyttjas till blandningen. Skillnadsfrekvensen kan därför filtreras fram på kollektorn.

Men gemensamt aktivt steg för båda frekvenserna får man en mindre krets med lägre strömförbrukning. Med två separata oscillatorsteg kan man istället optimera de två kretsarna var för sig. Det ger högsta stabilitet.

# Mikrodator kompenserad kristalloscillator MCXO

Microcomputer Compensated Crystal Oscillator



En dubbel-mode oscillator används för temperurmätningen. Den 3:e övertonen delas med 3 och blandas med grundfrekvensen för att få frekvensavvikelsen. Efter ytterligare frekvensdelning räknas frekvensavvikelsen med 3:e övertonen som tidbas. Räknaren ger ett tal till mikroprocessorn, som representerar kristalltemperaturen.

Mikroprocessorn har lagrat kristallens temperaturkaraktäristik, antingen som en PROM-tabell eller som ett polynom i en ekvation. Mikroprocessorn kan därför räkna ut hur mycket oscillatorns utsignal måste korrigeras för att det ska bli den rätta frekvensen.

Pulskorrigeringen är en switch som släpper igenom rätt antal pulser per tidsenhet. Överflödiga pulser switchas bort.

Kristalloscillatorns frekvens väljs så att den vid alla temperaturer ligger högre än den önskade frekvensen. På så sätt kan man alltid få rätt frekvens genom att ta bort pulser. Det är valfritt att korrigera grundfrekvensen eller den 3:e övertonen.

Om den beräknade korrektionen innehåller del av puls, sparas delvärdet för att vid senare tidsavsnitt kunna bilda en hel puls.

Genom att switcha bort pulser får man visserligen rätt antal pulser per tidsenhet, men pulståget blir oregelbundet. Om man önskar en ren sinussignal använder man pulserna från MCXO till att låsa en VCXO i en PLL. Signalen filtreras alltså med PLL.

## Jämförelse

Temperatur-kompensering (TCXO) innebär en korrigerig av oscillatorns frekvens. Det behövs då en spänningsstyrd kristaloscillator (VCXO). Mikrodator-kompenserade oscillatorn (MCXO) innehåller en oscillator som tillåts att driva med temperaturen. Korrigeringen görs efteråt genom att switcha bort vissa pulser. Oscillatorn kan därför optimeras för högsta Q-värde. MCXO ger 10 - 100 gånger högre stabilitet än den analoga TCXO, dvs. ca  $\pm 3 \cdot 10^{-8}$  över  $-55\text{ °C}$  till  $+85\text{ °C}$ .

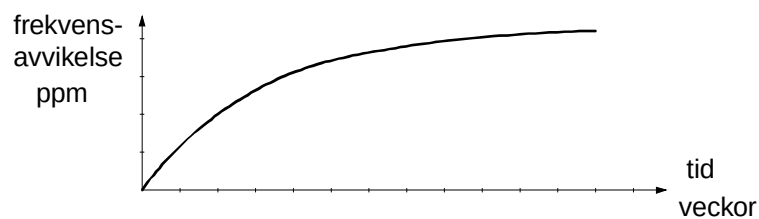
Fortfarande ger den ugnstabiliserade oscillatorn (OCXO) den högsta stabiliteten. Men ugnen kräver hög effekt. En MCXO kan klara sig på 50 mW. Ugnstabilisering behöver dessutom en ganska lång tid till uppvärmning.

Typ	Frekvensdrift 0 - 70 °C	Effekt- förbrukning
Miniatyr	$10^{-5}$	5 - 100 mW
TCXO	$10^{-6} - 3 \cdot 10^{-7}$	15 - 200 mW
MCXO	$10^{-8}$	50 - 100 mW
OCXO	$10^{-7} - 2 \cdot 10^{-10}$	1 - 40 W

# Specifikationer

## Åldring

Med åldring menas kristallens mycket långsamma frekvensändring under lång tid. När man startar kristalloscillatorn så ändras frekvensen först snabbt, men med tiden blir stabiliteten bättre.



Avvikelsen kan vara positiv eller negativ. För att få god stabilitet bör oscillatorn för-åldras, åtminstone ett par månader. För att få bästa åldringsstabilitet väljer man en AT-kristall med grundfrekvensen någonstans mellan 2 - 5 MHz.

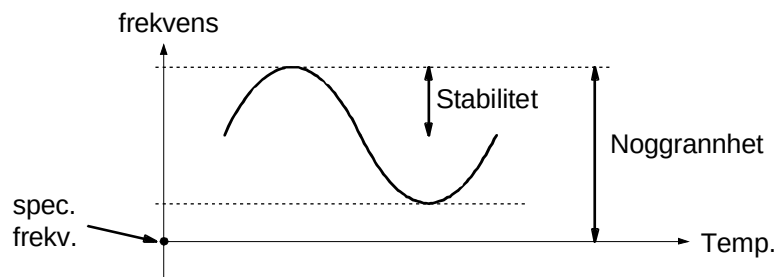
En enklare oscillator, vars kapsel har lödits ihop, ger en åldring på 10 ppm under första året. En kristalloscillator av högsta kvalitet och med bättre kapsling, kan få stabiliteten 0,5 ppm under första året, förutsatt att den är för-åldrad.

Efterföljande år blir bättre, enligt åldringskurvan. Vill man ha låg åldring ska man också se till att strömmen genom kristallen hålls låg. Det kanske blir nödvändigt med AGC.

Kristallen behöver en viss effekt för att börja svänga. Men om effekten är för hög får man sämre stabilitet (Q-värde) och snabbare åldring. Vanligtvis drivs kristallen med ca 1  $\mu$ W - 1 mW RF-effekt. Låg drivning (1 - 20  $\mu$ W) för bästa långtidsstabilitet, men hög drivning (100 - 500  $\mu$ W) för bästa korttidsstabilitet.

När en kristalloscillator stängs av för en tid, och sedan sätts på igen, behöver kristallen en viss tid för att återstabiliseras. Den återhämtningen liknar för-åldringen på fabrik, men stabiliteten återgår mycket snabbare. Om man vill ha hög precision låter man ofta det ugnkontrollerade instrumentet vara kontinuerligt spänningssatt.

## Noggrannhet - Stabilitet



Noggrannhet är den största avvikelsen från den specificerade frekvensen.

Stabilitet är avvikelsen runt ett visst medelvärde.

### Ursprunglig noggrannhet

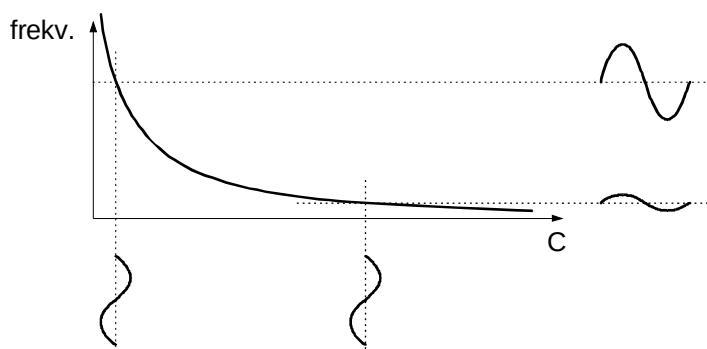
Om oscillatoren inte har någon justeringsmöjlighet, måste frekvensen ställas in på fabrik. Den ställs då in med en viss noggrannhet vid ca 25 °C vid leverans. Det finns då ingen garanti att frekvensen ska hamna inom den toleransen då mottagaren erhåller den.

I kritiska situationer är det därför bäst att beställa en oscillator som man kan justera frekvensen på. Det är då mer intressant hur stort trimområdet är. Inställningen gör man ju ändå själv.



## Trim-effekt

En varaktordiod används för att kompensera temperaturvariationerna. Den används också till fininställning av frekvensen, och justering vid åldring. Tyvärr kommer trimningen att påverka temperaturstabiliteten.



Frekvensen varierar olinjärt med kapacitansen. Det betyder att en styrsignal ger olika frekvenskorrigering beroende på arbetspunkten. Den kompenserade oscillatorns frekvens (som funktion av temperaturen) bör alltså kontrolleras vid trimområdets båda ytterlägen.

## Stabilitet

Hög stabilitet behöver hög ström för att få stor förstärkning. Då kan man använda stora kondensatorer så att inte transistorernas strökapacitanser inverkar så mycket. Med stor kapacitans behöver inte induktansen vara så stor. Man kanske rent av slipper använda järnkärna. Men om man kräver låg strömförbrukning blir hela situationen omvänd.

Kondensatorer kan ha temperaturkoefficienten  $\pm 30$  ppm/ $^{\circ}$ C. Induktanser varierar från +20 till +50 ppm/ $^{\circ}$ C. En luftlindad spole har lägre temperaturkoefficient än en med järnkärna. Koppartråden som används i alla spolar har positiv temperaturkoefficient. Koppar expanderar ju med temperaturen. Det man kan göra är att linda spolen på en hård (keramisk) kärna, och sträcka den så mycket som möjligt så att den håller kärnans form. I en toroid är det däremot svårt att sträcka tråden. Det kan ge hysteres och åldring på grund av att tråden rör sig.

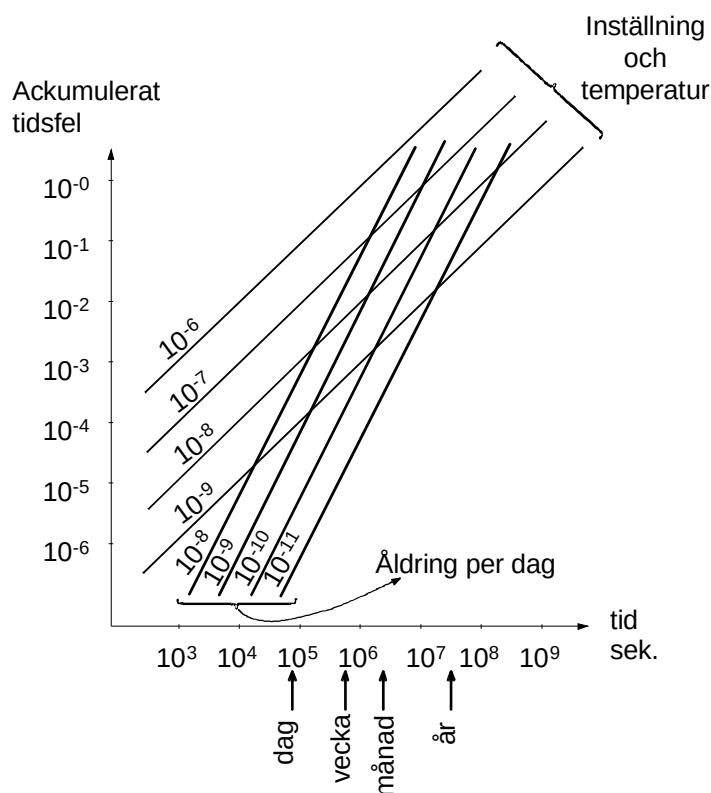
## Tidmätning

En vanlig användning av kristalloscillatorn är som tidsreferens i t.ex. tidkod-generatorer eller digitala klockor. Här är det tidsfelet från oscillatoren som är viktigast. Om frekvensen ställs in fel så kommer klockan att gå för fort eller för sakta. Tidsfelet för en period är mycket litet, men felet ackumuleras så att det blir stort efter en lång tid. En avvikelse på 1 ppm ger ett fel på 0,6 sekunder efter en vecka.

Avvikelsen kan härröra från antingen en felinställning från början, eller en frekvensändring på grund av temperaturen. Vid en uppskattning av tidsfelet måste man ta med båda avvikelserna, det kan ju hända att frekvensfelen går åt samma håll.

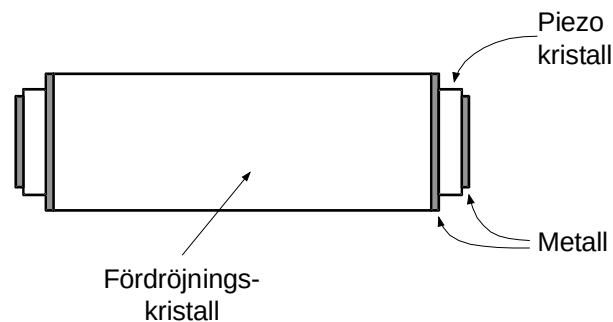
Åldring ger ytterligare en kontinuerlig förändring av frekvensen. Det ger ett tidsfel som från början ökar långsamt, men med tiden ökar felet allt snabbare.

Vid mycket korta tidsperioder är tillskottet från åldring ganska litet. Över långa tidsperioder kan åldringen däremot ge det största tillskottet i tidsfelet.



# Fördröjningsledning

## Bulk-våg fördröjning



Bulkvågorna fortplantas i en kristallstav. Kristallen är vanligtvis safir, kvarts, litium-niobat eller YAG (Yttrium Aluminium Garnet).

Elektriska signalen omvandlas till akustiska bulkvågor med hjälp av ett piezoelektriskt material. Omvandlaren består av en tunn skiva zinkoxid mellan två tunna metallektroder. Omvandlarens impedans är ganska låg, 1-15  $\Omega$ . Därför behövs det ett nät på in- och utgång för att transformera impedansen.

Kristallstaven är rund eller fyrkantig i genomskärning. Diametern är ca 2,5 - 10 mm. Omvandlarna, som också är några mm stora, är mycket stora i förhållande till våglängden ( $\mu\text{m}$ ). Det betyder att strålningsloben är ganska smal. Sidytorna på kristallstaven är därför ganska okritiska, och kan vara opolerade. Ändkanterna är däremot extremt kritiska. De måste vara mycket plana och parallella.

## Fördröjning

Fördröjningen beror på avståndet mellan omvandlarna. Eftersom hastigheten på bulkvågorna är låg så blir fördröjningen ganska lång, ca 1  $\mu\text{s}/\text{cm}$ . Som jämförelse behövs det ca 300 m kabel för att få 1  $\mu\text{s}$ . Den maximala fördröjningen som man kan få beror på hur lång kristallstav man kan tillverka, samt hur stor dämpning man kan tolerera. Det blir då ca 15  $\mu\text{s}$  vid 1 GHz, ner till ett par  $\mu\text{s}$  vid 10 GHz.

## Dämpning

Dämpningen beror på de termiska vibrationerna i kristallgittret. Vid rumstemperatur ökar dämpningen ungefär kvadratisk med frekvensen.

1 GHz	30 dB
5 GHz	40 dB
10 GHz	50 dB
18 GHz	60 dB

Dämpningsangivelsen är bara ungefärlig. Den beror även på andra parametrar, t.ex. längden på staven och själva omvandlarna.

## Fasvariation

Avvikelsen från linjär fas kan vara så liten som  $\pm 4^\circ$ . Fasvariationen kommer från anpassningskretsarna till omvandlarna.

Sammansättning av spurious (överhörning och triple-transit) ger också ett visst fasrippel. Däremot är bulkvågorna i sig inte dispersiva.

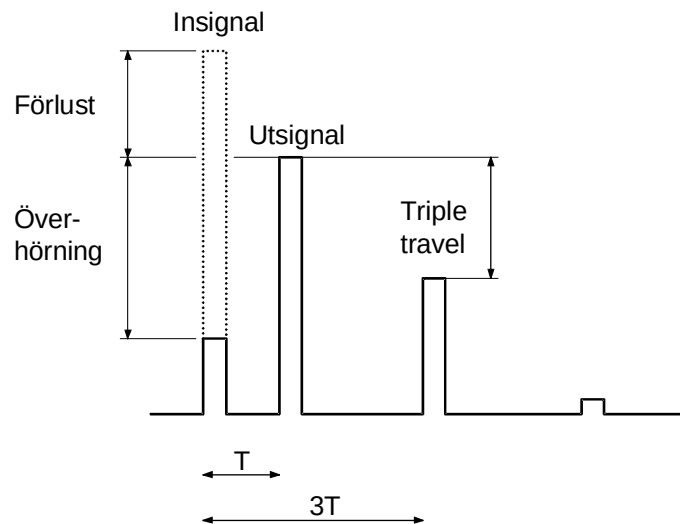
## Temperatur stabilitet

Fördröjningen varierar med temperaturen. Dels för att kristallen expanderar (blir längre) vid högre temperatur, och dels eftersom hastigheten beror på elasticiteten som är temperaturberoende.

En safirstav ger 27 ppm/ $^\circ\text{C}$  och en kvartskristall ger 86 ppm/ $^\circ\text{C}$ . Det är bättre än vad man kan uppnå med koaxialkabel.

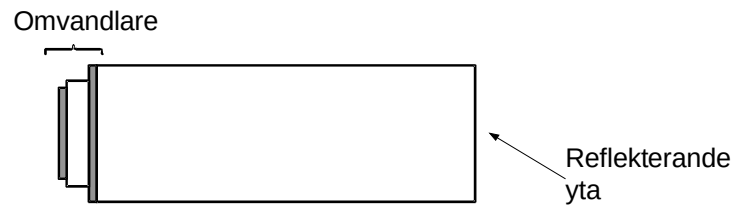
## Spurious

De falska signaler (spurious) som uppstår i en fördröjningsledning, är främst överhörning och triple-transit. Överhörningen mellan in- och utgång har ingen fördröjning alls. Triple-transit är den multipelreflektion som har gått tre gånger genom kristallen.



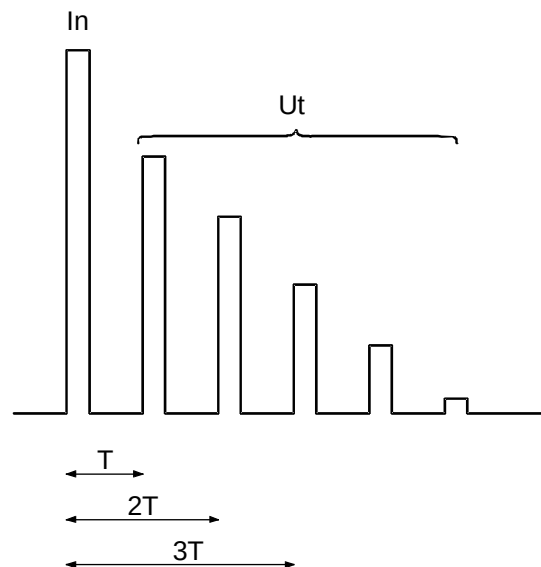
Naturligtvis bör spurioussignaler relateras till den önskade utsignalen. Men det finns också fördröjningsledningar som har störsignaler relaterade till insignalen. Man får alltså passa sig när man jämför olika datablad.

## En-ports fördröjning



En-ports kopplingen är en annan typ av fördröjningskomponent. Den kallas också för reflektionsfördröjning, till skillnad från två-ports komponenten som kan kallas transmissionsfördröjning.

Den har endast en omvandlare, som används både för sändning och mottagning. Bulkvågen reflekteras i den polerade bortre änden.

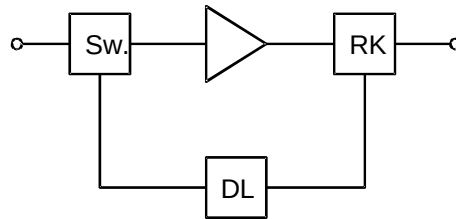


När det gäller en-ports fördröjningen är man ofta intresserad av att det sker en reflektion vid omvandlaren också. På det viset får man multipel-reflektioner med avtagande amplitud.

Genom att forma den reflekterande ytan och placera omvandlaren lämpligt, kan man välja vilket eller vilka ekon som ska komma ut. Övriga ekon undertrycks ca 20 dB.

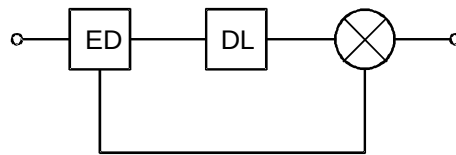
# Applikationer

## Minnesslinga



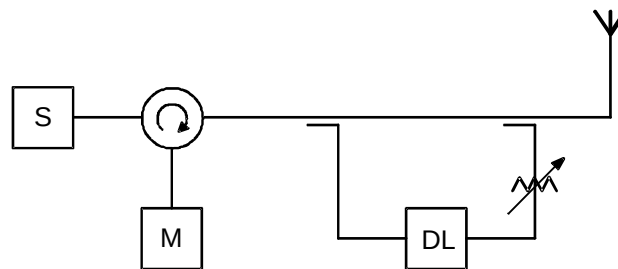
En minnesslinga används för att bevara den inkommande signalens frekvens. Minnesslingan (Memory-Loop) används för att störa och lura en radar (ECM).

## Avståndstrig



Radarns utsända RF-puls lagras i fördröjningsledningen. För ett visst målavstånd kommer den mottagna signalen fram till mixern samtidigt som signalen genom fördröjningsledningen. Man får alltså en utsignal för ett visst målavstånd. Den används för trigging av missiler (proximity fuses).

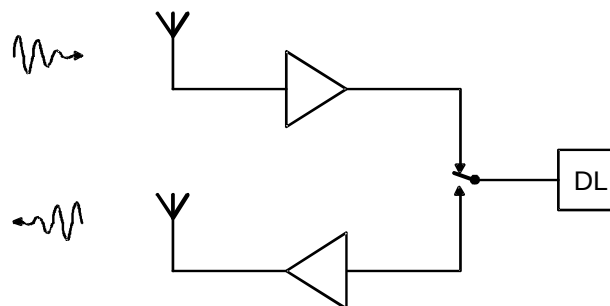
## Radartest och kalibrering



Fördröjningsledningen ger en avståndskalibrering i form av en ring på PPI-skärmen. En en-ports fördröjning kan ge flera kalibrerade avstånd. Dämpsatsen kan användas till kalibrering av känsligheten.

En eko-box gör ungefär samma sak, men den akustiska fördröjningen behöver ingen kritisk avstämning. En annan viktig fördel är att den akustiska fördröjningen klarar kodade pulser och frekvensnyckling.

## Transponder



Vid en inkommande signal svarar transpondern på ett förutbestämt sätt. Svaret består av ett pulståg på den rätta RF-frekvensen. Med switchen kan man koda pulståget.

Den används som radarfyr och till målidentifiering (IFF).