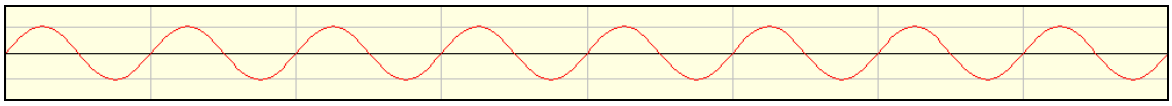
Programmet ’Intervalgeneratoren’

I det følgende forklares og demonstreres (i den nævnte rækkefølge) begreberne frekvenskvotient, superposition, naturintervaller, pytagoræiske intervaller, tempererede intervaller, det syntoniske komma, differenstoner, stødtoner, svævning og faseforskydning. Desuden finder man en tabel over de diatoniske intervaller.

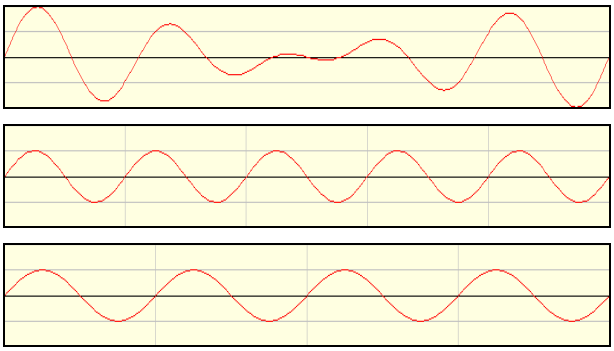
Ethvert interval er akustisk defineret ved forholdet mellem de to involverede toners frekvenstal. Dette forhold, der skrives som en brøk, hvor tæller og nævner er hhv. den højeste og den dybeste tones frekvenstal, kaldes *frekvenskvotienten*. Omvendt kan enhver brøk tolkes som en frekvenskvotient og realiseres som et klingende interval. Det er på den måde, dette program fungerer. Man vælger tæller og nævner i en brøk, hvorefter en virtuel tonegenerator, som udgør en del af programmet, realiserer de to toner som et klingende interval (forudsat naturligvis at der til computeren er knyttet en lydfunktion).

Den omtalte virtuelle tonegenerator genererer en sinustone. Lydkurven bliver derfor den bekendte bølgeformede sinuskurve, dvs. den simplest tænkelige trigonometriske kurve. Her ses et eksempel:



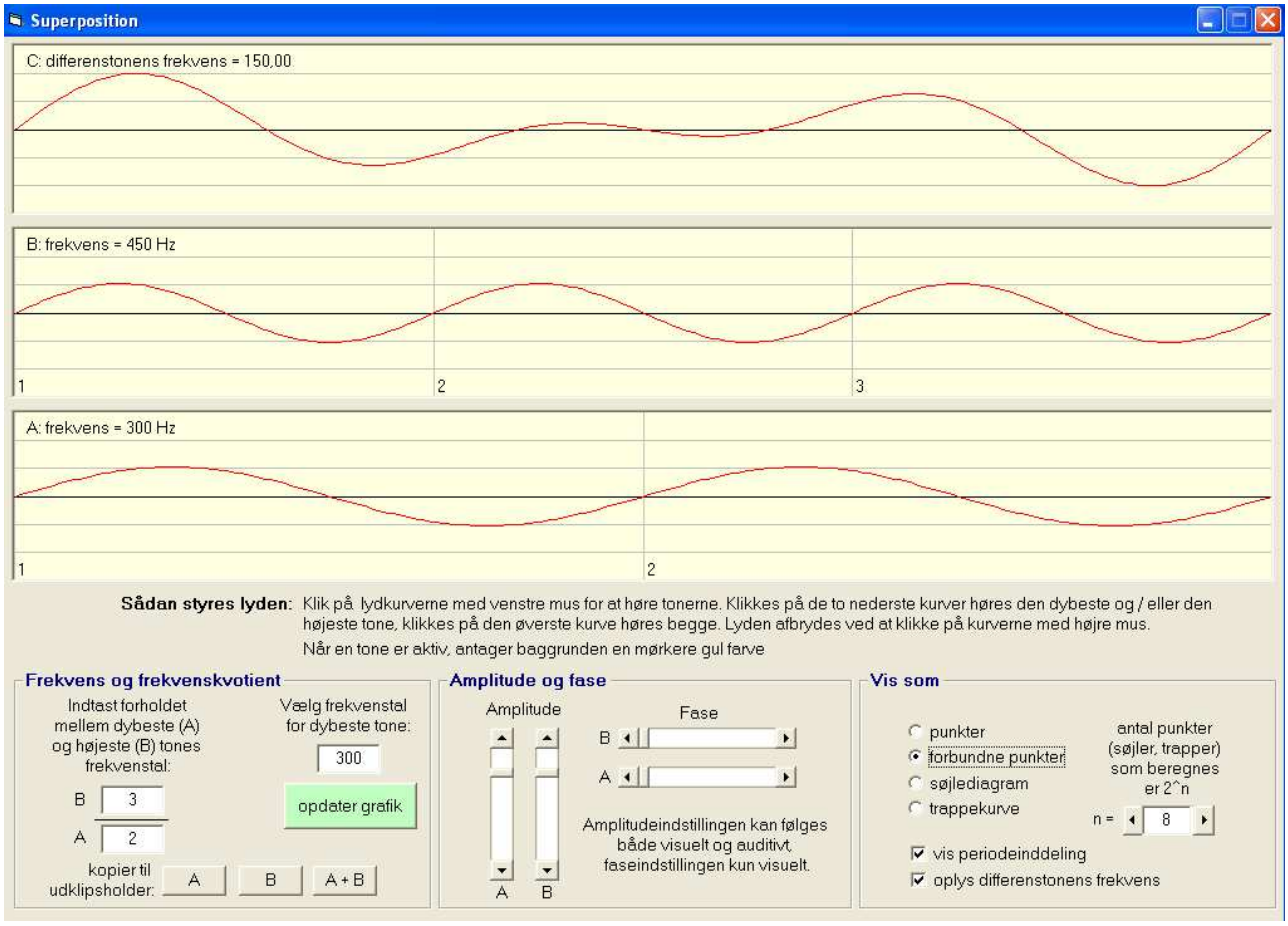
Figur 1

Kurven gentages i et periodisk forløb. I eksemplet er medtaget 8 *perioder*, hver markeret ved en lodret linje. Lydkurvens udsving kaldes *amplituden*. Den er et mål for lydstyrken. Jo større amplituden er, desto kraftigere lyder tonen. Når to eller flere toner klinger samtidigt, fremkommer den resulterende lydkurve simpelthen ved at man lægger amplituderne for hver enkelt tone sammen. Det kaldes *superposition*. Er der kun tale om to toner, fremstiller den resulterende lydkurve er altså det, vi normalt betegner som et interval. De to nederste lydkurver i det følgende eksempel fremstiller to toner, hvis frekvenstal forholder sig til hinanden som 4 : 5, dvs. mens den ene tone svinger 4 gange, svinger den anden 5 gange. Resultatet bliver den øverste kurve, som altså fremstiller det interval, der er defineret ved frekvenskvotienten 5/4 (det er det interval, der er kendt som naturtertsen). Prøv selv med en lineal at måle amplituden af de to nederste kurver på forskellige steder af forløbet; når du lægger de to tal sammen, får du amplituden på det tilvarende sted i den øverste kurve.



Figur 2

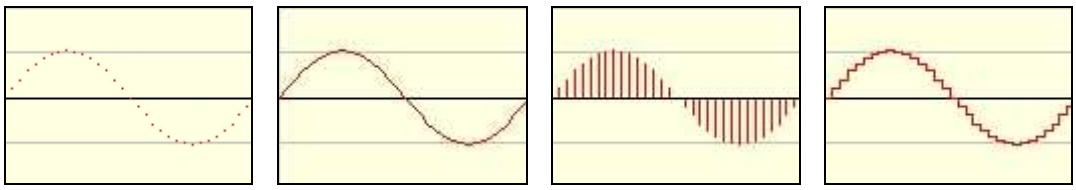
Dette og meget andet demonstreres i programmet INTERVALGENERATOREN, som jeg nu vil gennemgå, samtidig med at jeg foreslår en række øvelser. Når programmet åbnes ser man dette billede på skærmen:



Figur 3

Øverst ser man de tre lydkurver, som jeg netop har beskrevet, og nederst ser man ”kontrolpanelet”, hvor frekvenskvotienten indtastes og diverse indtillinger vælges. For hver af de to nederste kurver vises netop så mange perioder, som angivet ved hhv. nævner og tæller i frekvenskvotienten. I den sammensatte kurve øverst ses kun én enkelt periode, for dennes længde vil nemlig altid svare til summen af perioder i de to nederste kurver.

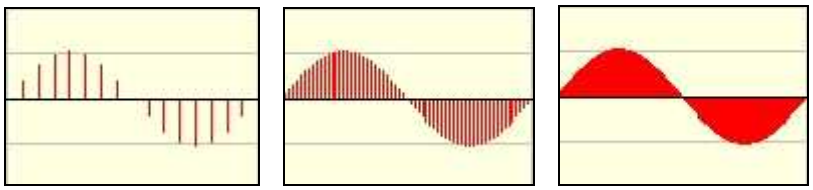
Når man har indtastet en frekvenskvotient, klikker man på knappen ”opdater grafik”, hvorefter kurverne tegnes. Man kan vælge at få kurven tegnet på fire forskellige måder (se højre del af ”kontrolpanelet”): som punkter, som forbundne punkter, som søjlediagram og som trappediagram. Det næste eksempel forklarer bedre end mange ord, hvordan det skal forstås:



Figur 4

Programmet beregner under alle omstændigheder en række punkter, og det er så kun et spørgsmål om at forbinde disse punkter med hinanden, så der (tilsyneladende) fremkommer en ubrudt linje, eller med nullinjen (x-aksen), så der fremkommer et søjlediagram, osv. Men man kan også vælge hvor tæt punkterne skal ligge, idet der for hver periode beregnes 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128, 256, 512

eller 1024 punkter (altså generelt 2^n). F.eks. tager søjlediagrammet sig sådan ud, når n vælges som hhv. 7, 9 og 10:



Figur 5

Lyden aktiveres når man med venstre museknap klikker i et af billedfelterne – klikker man i det nederste høres den dybeste tone, klikker man i det mellemste høres den højeste tone, og klikker man i det øverste høres begge toner samtidig. På tilsvarende måde afbrydes lyden ved at man klikker med højre museknap – dvs. hvis man har aktiveret begge toner, vil man eksempelvis fortsat høre B, når man afbryder A.

Selv om man måske ikke reelt har lyden koblet til, kan man alligevel se om den er aktiveret, idet baggrunden for den eller de kurver, der er aktiveret, antager en mørkere gul farve.

Endelig kan man vælge tonehøjden, dvs. frekvenstallet for den dybeste tone. Defaultværdien er sat til 300 Hz, som er et behageligt mellemleje at lytte til. Amplituden og dermed lydstyrken for begge toner kan vælges separat. Den kan af tekniske grunde ikke vælges lavere en 10 Hz og ikke højere end 4000 Hz.. Når en tone aktiveres kan dens frekvenstal aflæses øverst til venstre i billedfeltet. Begrebet differenstone, som optræder i forb. med den sammesatte lydkurve, vil blive omtalt i forbindelse med de efterfølgende forsøg. Det samme gælder begrebet faseforskydning.

De følgende forsøg demonstrerer den matematisk-akustiske baggrund for såvel samklangsfænomenet (intervaller og akkorder) som for overtonefænomenet; den eneste forskel mellem de to er nemlig, at en overtone er naturligt begrundet i lydgiverens fysik, hvorimod en samklang normalt er resultatet af et musikalsk begrundet valg. Når vi ser bort fra, at de naturligt dannede overtoner altid vil være svagere end grundtonen, vil det, vi får at høre, altså lige så godt kunne tolkes på den ene som på den anden måde.

De musikalsk relevante intervaller er som bekendt opkaldt efter deres placering på den diatoniske skala, idet navnene er afledt af de latinske talord – eksempelvis sekunden, tertsen, kvarten og kvinten. Det tonalt set vigtigste interval, oktaven, er defineret ved frekvenskvotienten 2/1 (bemærk af nævneren skrives med, også når den er 1), og frekvenskvotienten 3/2, som er brugt i eksemplet fig.1, er identisk med kvinten. Det kan også nævnes, at kvarten er defineret ved frekvenskvotienten 4/3, men ellers bør man foreløbig være tilbageholdende med at bruge disse betegnelser, for deres definition viser sig nemlig i flere tilfælde at være flertydig – eksempelvis kan den store terts både være defineres ved frekvenskvotienten 5/4 (naturtertsen), ved 81/64 (den pytagoræiske terts), og ved det irrationelle tal $\sqrt[12]{2^4}$ = ca.1,2599 (den tempererede terts). Mange misforståelser omkring det tonale system er netop opstået, fordi man bruger de forkerte definitioner.

Forsøg med Intervalgeneratoren

1. Konsonerende og dissonerende intervaller

Det klassiske forsøg med intervaller går ud på at sammenligne intervallets akustiske definition, dvs. frekvenskvotienten, med den virkning intervallet har på øret, idet man her skelner mellem konsonerende (velklingende) og dissonerende (ubehageligt klingende) intervaller. Med andre ord går forsø-

get ud på at undersøge, om der er en sammenhæng mellem intervallets kvantitative og kvalitative egenskaber.

Det er en ubestridelig kendsgerning, at intervaller, der er definerede ved simple talforhold – eksempelvis 2/1, 3/2, 4/3, 5/4 og 6/5 – er behagelige at lytte til, mens omvendt intervaller som eksempelvis 13/7, 19/18 og 23/11 virker ubehageligt dissonerende. Prøv selv at lytte til resultatet, når frekvenskvotienterne i eksemplerne indtastes. Vælg den dybeste tone et sted mellem 200 og 400 Hz; i dette frekvensområdet træder intervallets karakter tydeligst frem, hvorimod det kan være vanskeligere eller ligefrem umuligt at bestemme intervallet korrekt, når vi nærmer os det hørbare frekvensområdes grænser.

Lyt både til de to toner hver for sig (klik først med venstre museknap i A, afbryd så tonen med højre museknap og gentag det samme i B), og sammen (klik i øverste billedfelt).

Men hvor går grænsen mellem konsonans og dissonans? Prøv foreløbig hvor langt du kan fortsætte rækken 2/1, 3/2, 4/3, 5/4, 6/5 . . . . (n +1)/n før virkningen bliver ubehagelig.

Jo længere vi bevæger os op gennem rækken, desto tættere ligger tonerne ved hinanden, og des mere grel bliver virkningen. Læg mærke til at der allerede omkring 20/19 begynder at opstå det ejendommeligt pulserende fænomen, der kaldes stødtoner eller svævning – men herom senere.

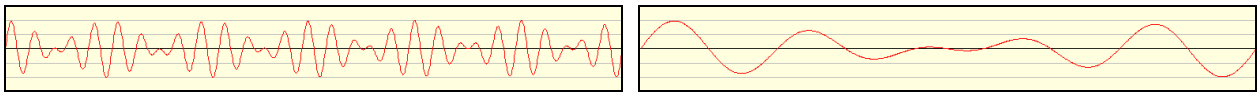
Intervallerne er her ordnet i den rækkefølge, hvori de forekommer på naturtoneskalaen. Derfor taler man også om de naturlige intervaller; eksempelvis kaldes intervallet 5/4 naturtertsen. Men navnet er misvisende, for i og med at *ethvert* interval er relateret til naturtoneskalaen, er det ene interval ikke mere naturligt end det andet – og at et interval optræder blandt rækkens første led berettiger på ingen måde til prædikatet 'naturlig'.

2. Den klassiske definition på konsonans er ikke holdbar

Men hvordan skal vi forklare, at et interval som eksempelvis 29/23 slet ikke klinger så ubehageligt, som vi skulle forvente efter ovenstående definition på konsonans? Intervallet klinger faktisk som en terts, og det kunne i en musikalsk sammenhæng sagtens fungere som sådan, uden at nogen ville gøre indsigelser. Udtrykt som decimalbrøk er frekvenskvotienten 1,2609, hvor det tilsvarende tal for den terts, der rent faktisk bruges i musikken, den såkaldte "tempererede" terts, er 1,2599.

Det er åbenbart ikke kun de eksakte simple talforhold, der virker konsonerende – det gør også de intervaller, som ligger i deres umiddelbare nærhed, dvs. som matematisk set er en tilnærmelse til den ideale brøk – i dette tilfælde 5/4 = 1,25. Ser vi på lydkurverne, som er vidt forskellige i de to tilfælde (se fig.6), kunne man forvente, at denne forskel også gør sig gældende kvalitativt, at vi med andre ord hører en konsonans i det ene tilfælde og en dissonans i det andet. Men lyt engang selv!

frekvenskvotient 29/23 frekvenskvotient 5/4



Figur 6

Den klassiske konsonansdefinition forleder let til den forestilling, at den musikalske oplevelse er betinget af, at skalaens toner indbyrdes er afstemt efter de eksakte simple talforhold – at det så at sige er disse, som "trigger" det musikalske øre. Denne forestilling får man som oftest bekræftet i faglitteraturen, specielt i lærebøger i "Elementær musikteori" (forestillingen går tilbage til antikken, og hos Platon er den yderligere forbundet med en forestilling om *etisk* gode og slette intervaller). Som jeg redegør nærmere for i andre artikler (bl.a. *Det naturlige tonesystem og skaladannelsens*

matematiske princip), handler det imidlertid om noget helt andet, nemlig det som kort kan sammenfattes i begrebet *tonalitet*.

Med hensyn til den kvalitative oplevelse af intervallerne, vil det være rigtigere at sige, at inden for en vis afstand, som er defineret ved forholdet 5/4 (for nu stadig at bruge tertsen som eksempel), har alle intervaller en kvalitet, som vi passende kan kalde ”tertsagtig”. Dermed udtrykkes, at de er behagelige at lytte til, men det er ikke ensbetydende med, at de også kan fungere i en musikalsk sammenhæng. For at det er tilfældet, skal de nemlig opfylde bestemte krav, som er bestemt af hvordan tonaliteten er defineret (her må jeg igen henvise til ovennævnte artikel).

Prøv nu selv at finde nogle intervaller, der ligger i større eller mindre afstand fra de konsonerende intervaller, der blev omtalt i foregående afsnit – sammenlign lydkurverne og sammenlign det umiddelbare indtryk, når man lytter til intervallerne.

Læg i øvrigt mærke til, at i den kombinerede lydkurve (den øverste) er sidste halvdel af kurven altid et nøjagtigt spejlbillede af den første halvdel, dog sådan at forstå, at hvor kurven før gik op, går den nu ned og omvendt. I musikalsk terminologi er der altså tale om både en spejlvending og en krebsvending – således f.eks. også i de to eksempler fig.6.

3. Den pytagoræiske terts og naturtertsen – det syntoniske komma

Vi bliver ved tertsen lidt endnu, fordi den jo spiller en særdeles vigtig rolle i musikken. Den danner sammen med grundtonen og kvinten den fundamentale akkord, treklangen, og mens der aldrig har hersket tvivl om kvintens akustiske definition, har det helt tilbage til oldtiden været et stridsspørgsmål, hvordan den musikalsk relevante terts skal defineres.

Som allerede nævnt har tertsen (underforstået den *store* terts) ikke færre end tre forskellige akustiske definitioner: 5/4, kendt som *naturtertsens*, 81/64, kendt som *den pytagoræiske terts*, og $\sqrt[12]{2^4}$, kendt som *den tempererede terts*. Den sidste vil vi foreløbig lade ligge, men det skal lige tilføjes, at når ”skæve” talforhold ifølge den klassiske definition af konsonans resulterer i dissonanser, så skulle man tro, at et interval defineret ved et irrationelt tal ville være helt ulideligt at høre på. Men det er tydeligvis ikke tilfældet, og faktisk er i det tempererede tonesystem (som har været normen siden midten af 1700-tallet) *samtlige* intervaller bortset fra oktaven irrationelt definerede!

At naturtertsen og den pytagoræiske terts ligger meget tæt på hinanden fremgår rent aritmetisk af, at 5/4 kan forlænges til 80/64. Prøv nu at indtast sidstnævnte brøk og lyt til intervallet; udskift så 80 med 81 og lyt igen til resultatet (læg mærke til at en eventuel forkortning bliver noteret til højre for indtastningsboksene). Når man lytter til de to intervaller umiddelbart efter hinanden, er det ikke svært at høre forskel; men man skal have et veltrænet øre, hvis man spontant kan sige hvilken af de to tertser, det handler om, når intervallet optræder alene.

Den lille forskel mellem naturtertsen og den pytagoræiske terts kan med god ret kaldes et mikrointerval. Så små intervaller har ingen musikalsk relevans, men intervallet var allerede kendt af de græske musikteoretikere under navnet *det syntoniske komma* (syntonisk kommer af græsk ’tonos’ der betyder ’spænding’, og det ligeledes græske ord ’komma’ betyder egl. ’en afhugget del’).

Frekvenskvotienten for det syntoniske komma finder vi således: 81/64 : 80/64 = 81/80.

Prøv engang at indtaste denne frekvenskvotient; når man derefter lytter til intervallet, vil man høre et nyt eksempel på det før omtalte fænomen stødtoner eller svævning, som vil blive omtalt nærmere længere fremme. Prøv også om du kan høre forskel på de to toner, når du spiller dem efter hinanden.

3. Irrationelle intervaldefinitioner

Vi stiftede før bekendtskab med et irrationelt defineret interval, nemlig den tempererede terts. Et irrationelt tal kan kun udtrykkes med en tilnærmelse, men inden for rimelighedens grænser kan vi godt indtaste sådanne tilnærmelser i programmet og dermed få en fornemmelse af, hvordan intervallet lyder. Med fire rigtige decimaler kan $\sqrt[12]{2^4}$ udtrykkes som 1,2599. Vi skal nu blot omskrive denne decimalbrøk til en almindelig brøk, hvad vi gør ved at gange den med en så stor potens af 10, at der fremkommer et helt tal. Dette tal fungerer nu som tæller, men potensen af 10 fungerer som nævner – den tilnærmede frekvenskvotient bliver altså i dette tilfælde 12599/10000. Prøv at indtaste den og lyt til resultatet.

I dette tilfælde kan vi naturligvis ikke regne med lydkurverne, for skærmen kan umuligt gengive så mange perioder af lydkurven, som der her er tale om – heller ikke selv om antallet af punkter sættes så højt som 1024 (n = 10). Hvis der er et ”flueben” i den checkbox, hvor der står ’vis periodeinddeling’, vil billedfelterne A og B desuden blive grå, fordi de lodrette grå periodeinddelinger nu ligger så tæt, at de smelter sammen – fjern eventuelt fluebenet! Prøv også med den grovere tilnærmelse 126/100 (som automatisk vil blive forkortet til 63/50).

Den tempererede kvint er defineret ved tallet $\sqrt[12]{2^8}$ = ca. 1,5874. Prøv at indtaste 15874/10000 (bliver forkortet til 7937/5000), og sammenlign det hørte med den rene kvint 3/2.

I øvrigt skal det bemærkes, at hvis man har sat antallet af punkter til $2^7 = 128$, vil kurverne i sidste eksempel se ud, som om man havde indtastet indtastet 1/8 (sådan er det i hvert fald på min skærm!); men det er blot interferensmønsteret, der forenkles på denne måde fordi skærmens opløsning ikke kan følge med længere. Se selv hvad der sker, når man ændrer antallet af punkter!

4. Differenstonen

Den sammensatte kurve er naturligvis også periodisk, og vi kan slutte os til dens frekvens gennem følgende overvejelser, *der refererer til fig.1*:

Den sammensatte kurves længde (dens bølgelængden) må nødvendigvis være dobbelt så stor som A’s længde og tre gange så stor som B’s længde. Da bølgelængden og frekvensen er reciprokke (se kommentarerne til progr. TONEN), gælder det så omvendt, at den nye tones frekvens er hhv. det halve og en trediedel af de oprindelige frekvenser, altså

$$512 / 2 = 256 \qquad \text{eller} \qquad 768 / 3 = 256$$

Den nye tone kaldes også *differenstonen* – den er nemlig identisk med differensen mellem de to oprindelige toners frekvenstal (prøv selv at forklare hvorfor). Hvis checkboxen ’oplys differenstonens frekvens’ er forsynet med et flueben, vil denne kunne aflæses foroven i billedfeltet (sml. fig.1)

Differenstonen ligger i dette tilfælde nøjagtig en oktav under den dybeste tone (eller en duodecim under den højeste). Man skal dog koncentrere sig meget for at høre differenstonen, når den som her danner et harmonisk interval med de to oprindelige toner. Da øret ikke er lige følsomt med hensyn til tonehøjde i alle frekvensområder, afhænger det også af hvilken frekvens vi giver den underste tone – men her følger et eksempel, hvor det skulle være forholdsvis let at høre differenstonen selv med en primitiv computer-højttaler, og hvor alt desuden udtrykkes i pæne runde tal:

Sæt frekvenstallet til 200 og frekvenskvotienten til 4/3 (identisk med en kvart). Den øverste tone får altså frekvensen $200 \cdot 4/3 = 266{,}67$ Hz, og differenstonens frekvens finder vi som $266{,}67 - 200 = 66{,}67$ Hz. Med lidt koncentration kan man godt fornemme, at der under de to oprindelige toner ligger en dybere (i dette tilfælde en duodecim under den dybeste og 4 oktaver under højeste af de to oprindelige toner).

Har man en god højttaler eller hovedtelefon, vil man stadig kunne høre differenstonen, når den dybeste tone sættes til 100 eller endnu lavere. Men når vi nærmer os 60 Hz begynder differenstonen at lyde som en pulserende rytme – nu når vi os nemlig den nedre grænse for, hvad øret kan opfatte som en tone (i progr. TONEN demonsteres mere detaljeret, hvordan at toner og rytmer er to sider af samme sag). Prøv selv at regne ud hvad differenstonens frekvens bliver, når den dybeste tone er på 60 Hz, og frekvenskvotienten stadig er 4/3 (kvarten); prøv også at udregne den for 3/2 (kvinten) og for 5/4 (naturtertsen).

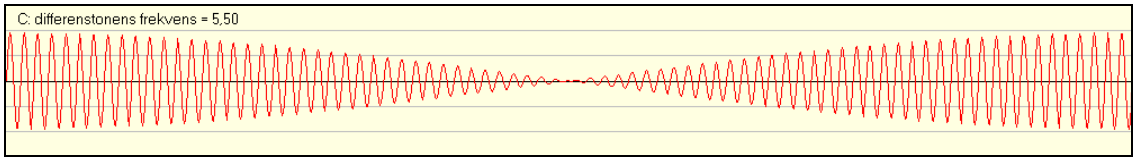
Stadig under forudsætning af at gengiveapparaturet er i top vil man fortsat kunne høre differenstonen, selv om begge de oprindelige toner ligger under det hørbare frekvensområde – dog ikke som en tone i egentlig forstand, men som en pulserende rytme. Prøv at sætte den dybeste tone til 15 Hz; hvis frekvenskvotienten er 4/3 og gengiveapparaturet er i top, skulle nu kunne høre en dyb pulserende lyd på 5 Hz.

Man kan læse mere om differenstoner i de fleste bøger om akustik, men her er der lejlighed til selv at gå på opdagelse – og så kan man jo altid checke af, om resultaterne stemmer med bogen!

5. Stødtoner eller svævning – klaverstemning

I forbindelse med det syntoniske komma har vi allerede stiftet bekendtskab med fænomenet *stødtoner* eller *svævning*. Den første betegnelse, som er den almindeligste i akustikken, hentyder til lydens pulserende karakter; den sidste anvendes specielt af klaverstemmeren, og hentyder til den egendommelige fornemmelse af at tonen ligesom svæver frem og tilbage. Men egentlig er der blot tale om differenstoner under det hørbare frekvensområde, så de opleves som en pulserende rytme (der henvises igen til progr. TONEN).

Lad os vende tilbage til det syntoniske komma.Vi sætter altså frekvenskvotienten til 81/80, den dybeste tone sætter vi til 440 Hz, og for at kurven ikke skal blive for hakket, sætter vi antallet af punkter til maksimum. Lydkurven skulle nu gerne se ud som i fig.3, hvoraf det også fremgår, at differenstonens frekvens er 5,5 Hz – og med lidt god vilje kan man godt høre, at der kommer ca. 5 stød per sekund.



Figur 7

Når vi ser på denne lydkurv, er det nemt at forstå, hvordan den omtalte pulseren fremkommer. Allerede da vi afprøvede rækken 2/1, 3/2, 4/3, 5/4, 6/5 . . . (n+1)/n, bemærkede vi, at lydkurven mere og mere trak sig sammen mod midten, for derefter at udvide sig igen. Det er det vi i udpræget grad ser her. Med andre ord bliver energien mere og mere koncenteret omkring periodens begyndelse, og det medfører så, at lyden begynder at pulsere med præcis ét stød for hver periode.

Det er dette fænomen klaverstemmeren udnytter. I det næste forsøg vil vi imitere, hvordan klaverstemmeren justerer en ikke-renstemt streng, så den passer med en allerede renstemt streng. Vi vælger at sætte frekvenstallet til 440 Hz, hvorved A altså repræsenterer den renstemte streng (i dette tilfælde énstrøget a). Ved nu at sætte frekvenskvotienten til 105/100 (= 21/20) er den anden streng, repræsenteret af lydkurven B, stemt noget for højt. Det er vi heller ikke i tvivl om, når vi lytter til de to toner hver for sig – faktisk er afstanden næsten en halv tone. Men jo tættere tonerne ligger desto vanskeligere er det at vurdere intervallet nøjagtigt, og derfor fokuserer klaverstemmeren i stedet på

differenstonen, der optræder som en langsommere og langsommere svæven, jo nærmere han kommer den rigtige stemning – hvor svævningen forsvinder helt.

Når vi nu lytter til intervallet 105/100, indser vi også, at det i virkeligheden er differenstonen, der frembringer den skurrende virkning, når vi lytter til en lille sekund (den mere korrekte betegnelse for ”en halv tone”).

Vi sænker nu trinvist frekvenskvotientens tæller fra 105 til 100, altimens vi lytter til virkningen. Der er ingen grund til at afbryde tonen mellem trinene – ret blot i tælleren og klik så igen på den sammensatte lydkurve. Fortsætter vi med at sænke tælleren, optræder effekten igen, men i omvendt rækkefølge.

Prøv event. også at følge effekten, idet tælleren trinvist hæves fra 105 til 112. Ved 112 vil intervallet ligge meget tæt på den store sekund (det der med en uheldig betegnelse også kaldes ”en hel tone”)

6. Eksempler på musikalsk relevante intervaller

Jeg sagde i indledningen, at vi bør være tilbageholdende med at bruge de musikterminologiske navne for intervallerne, så længe vi endnu ikke kender disses præcise akustiske definition. Men også uden denne viden er det let at indse, at de musikalsk relevante intervaller kun udgør en forsvindende lille mængde af det samlede antal intervaller (som jo i princippet er uendelig på samme måde som talmængden er det!). Her følger imidlertid en oversigt over de i alt 13 intervaller, der kan dannes ud fra den diatoniske skala (14 intervaller, hvis vi regner primen med).

Intervalnavn	**pytagoræisk**		**Helmholtz**		**tempereret**	
lille sekund	256/243	1,053498	16/15	1,066667	$(\sqrt[12]{2})^1$	1,059463
stor sekund	9/8	1,125	9/8	1,125	$(\sqrt[12]{2})^2$	1,122462
lille terts	32/27	1,185185	6/5	1,2	$(\sqrt[12]{2})^3$	1,189207
stor terts	81/64	1,265625	5/4	1,25	$(\sqrt[12]{2})^4$	1,259921
kvart	4/3	1,333333	4/3	1,333333	$(\sqrt[12]{2})^5$	1,334840
forstørret kvart	1024/729	1,404664	64/45	1,422222	$(\sqrt[12]{2})^6$	1,414214
formindsket kvint	729/512	1,423828	45/32	1,40625	$(\sqrt[12]{2})^6$	1,414214
kvint	3/2	1,5	3/2	1,5	$(\sqrt[12]{2})^7$	1,498307
lille sekst	128/81	1,580247	8/5	1,6	$(\sqrt[12]{2})^8$	1,587401
stor sekst	27/16	1,6875	5/3	1,666667	$(\sqrt[12]{2})^9$	1,681793
lille septim	16/9	1,777778	16/9	1,777778	$(\sqrt[12]{2})^{10}$	1,781798
stor septim	243/128	1,898438	15/8	1,875	$(\sqrt[12]{2})^{11}$	1,887749
oktav	2/1	2	2/1	2	$(\sqrt[12]{2})^{12}$	2

Som man kan se har hvert interval tre forskellige definitioner, afhængigt af hvilket tonesystem man opererer med. Det system, der er baseret på de simplest mulige talforhold (frekvenskvotienter), er her samlet underoverskriften ’Helmholtz’ (det er først og fremmest med Helmholtz’s bog *Die Lehre von den Tonempfindungen*, disse definitioner fik ”officiel status” som tonesystemets grundlag og siden er blevet gentaget i lærebog efter lærebog!). Af hensyn til sammenligningen er frekvenskvotienterne tillige udtrykt som decimalbrøker. Da definitionerne i det tempererede tonesystem er irrationelle, ligger det i sagens natur, at de ikke kan udtrykkes som en rationel brøk. Ud fra de tilnærmede decimalbrøker kan man selv (efter de anvisninger der er omtalt i afsnittet om irrationelle inter-

valdefinitioner) udregne og afprøve nogle rationelle brøktilnærmelser. Bemærk at der i det temperede tonesystem ikke skelnes mellem den forstørrede kvart og den formindskede kvint, og det er derfor korrekt, når definitionen i begge tilfælde er $(\sqrt[12]{2})^6$.

Prøv nu at indtaste nogle af disse frekvenskvotienterne i programmet og hør hvordan intervallerne lyder – og lyt også til forskellen mellem de tre definitioner.

7. Amplitudens betydning

I de foregående forsøg er det stiltiende forudsat, at de begge toner klinger med samme styrke; men det er almindeligt bekendt, hvordan intervallet lyder, når vi f.eks. på et klaver spiller kvinten C-G, men anslår C'et kraftigere end G'et. I de næste forsøg kan vi, hvordan dette påvirker lydkurven – og lad os begynde med kvinten:

Vi sætter altså frekvenskvotienten til 3/2, vælger en passende grundtone, og aktiverer tonen. Idet det nu forudsættes at de to amplitudeindstillinger er ens, sænker vi langsomt den ene, altimens vi iagttager hvordan både den aktuelle lydkurve og den sammensatte lydkurve forandrer udseende. Undersøg det samme med mere komplekse lydkurver, og undersøg også hvad der sker, når den ene eller begge amplituder nærmer sig 0.

Enhver ændring af amplitudeindstillingerne afspejler sig momentant i lydkurven. Men bemærk, at amplitudeindstillingen ikke afspejler, hvordan vi rent faktisk *hører* lydstyrken; i så fald skulle skalaen nemlig være logaritmisk.

8. En foreløbig demonstration af overtoner

Det blev nævnt i indledningen, at forsøgene demonstrerer den matematisk-akustiske baggrund for såvel samklangsfænomenet (intervaller og akkorder) som for overtonefænomenet, og det blev videre nævnt, at de naturligt dannede overtoner altid vil være svagere end grundtonen. Er der kun tale om en enkelt overtone, kan virkningen heraf demonstreres i dette program, men ellers demonstreres dette fænomen mere detaljeret i progr. KLANGSYNTESE, hvor man kan eksperimentere med op til 15 overtoner.

Eksempelvis kan det tolkes som grundtone + 1. overtone, hvis man indtaster frekvenskvotienten 2/1, og sætter B's amplitude en hel del lavere end A's. For at demonstrere grundtonen + en af de følgende overtoner skal man ganske enkelt sætte nævneren lig 1; det tal, man derefter indtaster som tæller, svarer til den pågældende overtone. Vær opmærksom på, at man her hurtigt kan komme op på meget høje frekvenser. Har man f.eks. som grundtone valgt 440 Hz, vil overtone nr. 15 have frekvensen 6600 Hz; en så høj tone vil som tidligere nævnt ikke kunne genereres i dette program – men man vil kunne høre den i progr. KLANGSYNTESE.

9. Begrebet faseforskydning

Faseforskydning er et begreb, som man i praksis bl.a. støder på, når man skal tilslutte højttalerne til sit stereoanlæg. Det handler om, at de to signaler måske ikke begynder på samme sted i perioden. Det mærkes som en generende flimren mellem højttalerne, og i en speciel situation kan det resultere i at lyden helt forsvinder, fordi de to højttalere neutraliserer hinanden – man siger da, at de er i *modfase*. Hvis man arbejder med elektroniske musikinstrumenter, kender man sikkert også fænomenet. Man vil formentlig også af og til støde på det, når man arbejder med nærværende program, selv om det her er utilsigtet! Tonegenereringen skulle nemlig normalt altid starte ved periodens nulpunkt, og det er derfor ikke muligt at demonstrere virkningen af faseforskydning auditivt. Vi må altså nøjes med at iagttage, hvad der sker med lydkurven.

Vælg en tilfældig frekvens og et tilfældigt interval. Opdatér nu grafikken (der er ingen grund til at aktivere lyden, for man vil som sagt ikke kunne høre at der sker noget), og forskyd langsomt den

ene eller den anden faseindstilling – det er slet og ret hvad begrebet *faseforskydning* står for! Hvad angår virkningen på den sammensatte lydkurve taler kurverne for sig, og yderligere kommentarer skulle være overflødige. Hvis man standser op et par steder, vil man efter anvisningen i indledningen kunne se, at den sammensatte lydkurve stadig er bestemt af superpositionspricippet (og er man ikke ukendt med trigonometriske ligninger, vil man også kunne lave en beregning, idet man medregner faseforskydningen).

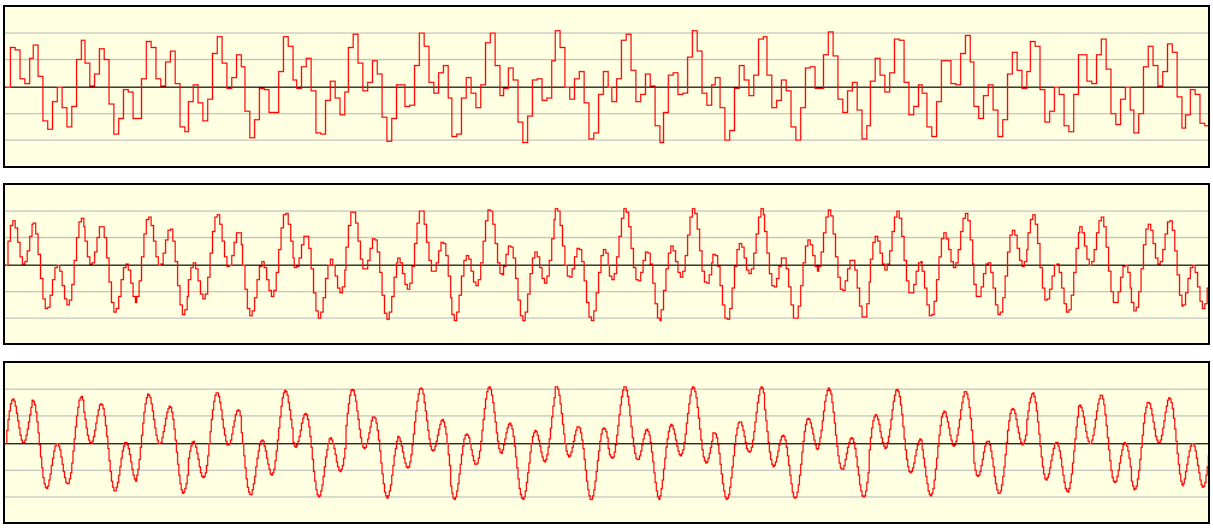
Den omtalte modfase fremkommer, når de to toner er identiske. Vælg igen en tilfældig frekvens og sæt frekvenskvotienten til 1/1. Hvis de to toner til at begynde med er i fase, vil man kunne se, at de nu forstærker hinanden. Udsvinget er til enhver til dobbelt så stort på den sammensatte kurve som på A og B. Men se nu hvad der sker, når nulpunktet for den ene tone langsomt forskydes – ikke alene forskydes den sammensatte lydkurve også, men den bliver også smallere og smallere, og på et tidspunkt forsvinder den helt. De to toner er nu i modfase – og hvis ellers programmet havde haft denne funktion med, ville der nu være total stilhed!

Det er bl.a. denne effekt, man forsøger at udnytte i moderne støjbekæmpelse!

10. Om trappekurven – en demonstration af begrebet sampling

Trappekurven har jeg kun medtaget, fordi den illustrerer begrebet *sampling*. Ligesom tætheden af den lydkurve programmet genererer er et spørgsmål om hvor mange punkter og dermed hvor mange beregninger, vi vælger inden for rammerne af en periode, så er også digital lydoptagelse (og afspilning) et spørgsmål om antallet af beregninger per sekund (ikke per periode). Dette tal kaldes *samplingsraten*. Til en god lydoptagelse bruges normalt en samplingsrate på 44100. Programmets virtuelle tonegenerator opererer med en samplingsrate på 11050, og det er fuldt tilstrækkeligt til en simpel sinustone.

Den visuelle side af programmet kan som sagt maksimalt operere med hvad der svarer til en samplingsrate på 1024, men det giver dog alligevel et *visuelt* indtryk af, hvad der sker, når man sampler lyd. I de tre følgende eksempler er ”samplingsraten” først 256, derefter 512 og i sidste billede 1024. Tolket som sampling af en tone, ville det første eksempel gengive den oprindelige lyd højest ufuldkommen (det ville lyde meget ”syntetisk”). Men i takt med at samplingsraten øges, bliver trapperne på kurven mindre og mindre, og lyden nærmer sig den oprindelige. Når samplingsraten er over 40000 (som på en CD), kan det menneskelige øre ikke længere registrere nogen forskel selv i det højeste frekvensområde.



Figur 8