

VÅR HÖRSEL OCH MUSIKEN

Sex föredrag vid ett
seminarium, anordnat av
Musikaliska akademiens
musikakustiska nämnd

Kungl. Musikaliska Akademiens skriftserie nr 23

Stockholm 1979

Innehåll

	Sid
Förord	3
Reinier Plomp: Konsonans/dissonans och hörselns kritiska band	4
Reinier Plomp: Fysikaliska motsvarigheter till klangfärg hos stationära ljud	16
Reinier Plomp: Kontinuitetseffekter i ljuduppfattning	30
Graham Caldersmith: En väg till nya konstruktioner av stränginstrument	41
Erik Jansson-Alf Gabrielsson: Analyser av fiol- och gitarrklang	47
Johan Sundberg: Rent och falskt i klingande praxis	78
Ljudexempel	102

Förord

Kungl. Musikaliska akademins musikakustiska nämnd anordnade i april 1978 ett seminarium över ämnet

Hur uppfattar vår hörsel musikljud?

Det ägde rum på Tekniska Högskolan i Stockholm och inledde en serie seminarier i musikakustiska ämnen, som nämnden avser att anordna under de närmaste åren. Bl a följande frågor ventilerades:

Är ett konsonant intervall alltid konstant?

Varför klingar samma ackord så olika på hammarklaver och flygel?

Hur noga är det med intonationen för att det skall låta rent?

Hur olika är klangen hos olika stämmor i en orgel?

Vad räknas som förtjänstfullt i fiol- och gitarrklang?

Hur kan en dirigent uppfatta alla stämmor i ett orkesterpartitur?

Huvudföreläsare var den holländske hörsselforskaren professor Reinier Plomp som är internationellt ledande inom musikljudens uppfattningslära. Övriga föreläsare var docenterna Johan Sundberg, Erik Jansson och Alf Gabrielsson samt M.Sc. Graham Caldersmith.

Här publiceras nu samtliga föredrag vid seminariet. Redigeringsarbetet har utförts av Erik Jansson, Johan Sundberg och Sven Wilson. Sundberg ansvarar för översättningen av Plomps och Jansson för Caldersmiths föredrag till svenska. Håkan Sjögren har ombesörjt grammofonskivorna, innehållande ljudillustrationerna.

Hösten 1978 anordnades ett seminarium rörande rums- och konsertsalsakustikforskningen under ledning av Manfred Schroeder. Under 1979 behandlar A. H. Benade blåsinstrumentens akustik och Carleen Hutchins föreläser om sin nya fiolfamilj och dess akustiska kriterier.

Akademien hoppas att kunna publicera samtliga föredrag i sin skriftserie.

Konsonans/dissonans och hörselns kritiska band

av

Reinier Plomp

Institute for perception TNO, Soesterberg, Holland och
Faculty of Medicine, Free University, Amsterdam, Holland

1. Inledning

I de föreläsningar jag ger i detta seminarium kommer jag att följa en psykologisk väg att studera hörseln. Det innebär att jag kommer att betrakta förhållandet mellan fysiska eller akustiska parametrar hos det ljud som når örat och de perceptuella kvaliteterna av den ljudupplevelse som därvid uppstår. Med hjälp av en serie försöksresultat hoppas jag kunna demonstrera för er hur betydelsefullt detta tillvägagångssätt är för en förståelse av några grundläggande perceptuella aspekter av musik.

För att i möjligaste mån klargöra betydelsen av försöksresultaten kommer jag att förklara varje experiment så att var och en ser hur resultaten erhållits. På detta sätt kan man få en föreställning om hur psyko-fysiska hörselexperiment läggs upp och hur man bär sig åt för att få pålitliga resultat. Det mesta av det som kommer att presenteras är hämtat från egna undersökningar. Referenser till forskning gjord av andra på området kan återfinnas i min bok "Aspects of Tone Sensation" (Plomp 1976).

2. Örat som frekvensanalysator

Toner som alstras av de flesta musikinstrument liksom av människorstämman är komplexa toner som kan sägas bestå av s k harmoniska deltoner. De inbördes frekvensförhållandena för sådana deltoner kan skrivas som 1:2:3:4... Örat kan urskilja varje enskild delton upp till en viss gräns. Två exempel skall ges som visar hur man kan mäta denna frekvensanalysförmåga.

Första exemplet illustreras i Fig 1. De nio vertikala linjerna i figurens övre del utvisar frekvenserna för de nio lägsta harmoniska deltonerna i en ton med en viss grundfrekvens, t ex 250 Hz. Lyssnaren får en trevägs-kontakt att manövrera, som visas till vänster på figuren. I mittläget ger kontakten den komplexa tonen. De två andra lägena ger rena toner, av vilka den ena sammanfaller i frekvens med en av den komplexa tonens deltoner och den andra ligger halvvägs mellan samma delton och den närmast högre eller lägre. Figuren visar fallet att det högre läget på kontakten ger lyssnaren en ren ton på 500 Hz, och det lägre en ton på 625 Hz. Lyssnaren får fritt koppla in vilken som helst av de tre tonerna. Hans uppgift är att bestämma vilkendera av de båda rena tonerna som finns också i den komplexa tonen. Mätningen upprepas flera gånger för alla deltoner hos den komplexa tonen. Det finns alltid en 50-procentig sannolikhet för att den "rätta" rena tonen erhålles med det högre eller det lägre läget på kontakten. För flera detaljer, se Plomp (1964).

Diagrammet visar några resultat medelvärddade över ett stort antal grundfrekvenser hos den komplexa tonen. Man ser att lyssnarna gav nästan 100 procent rätt svar för de tre lägsta deltonerna, men resultatet försämras kontinuerligt för de högre. Eftersom lyssnarna alltid måste ge ett svar, även när de bara kunde gissa, når de en nivå på 50 procent, när de inte kan urskilja en given delton längre. Om man godtar en 75-procentig nivå som ett tröskelvärde, kan vi dra slutsatsen att örat kan särskilja de 5 till 7 lägsta harmoniska deltonerna i uthållna komplexa toner. Mera ingående undersökningar visade att genomsnittligt ca 5 deltoner kan urskiljas om grundfrekvensen är högre än ca 250 Hz och upp till ca 7 deltoner för lägre grundfrekvenser (Plomp & Mimpen 1968).

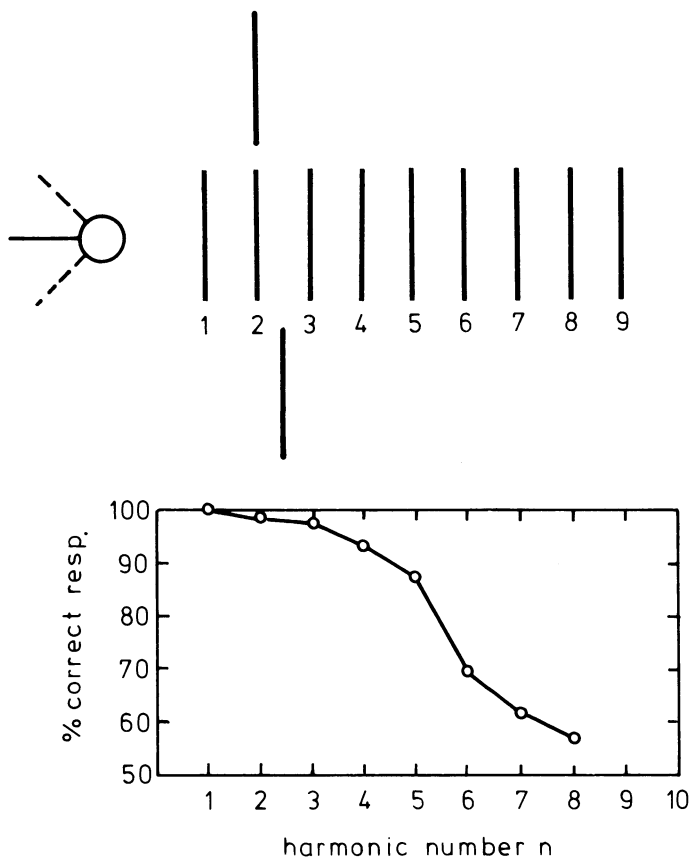


Fig 1. Överst illustreras hur antalet särskiljbara deltoner i en komplex ton kan mätas (se texten). Kurvan under visar hur andelen rätta svar genomsnittligt varierar med deltonens nummer för många olika grundfrekvenser. (Efter Plomp 1964)

En helt annan metod att belysa örats frekvensanalysförmåga utnyttjar det faktum att den maskerade hörtröskeln inte återgår till sitt normalvärde (absoluta hörtröskeln) omedelbart efter det att ett ljud plötsligt upphör. Den övre delen av Fig 2 visar att tröskeln för en 20 msek. lång ren ton ligger högt, om hörseln just utsatts för ett ljud som innehåller denna rena ton. Vi kan utnyttja den här effekten genom att använda en komplex ton med en grundfrekvens på t ex 500 Hz som det första ljudet och mäta hörtröskeln hos en följande ren ton som ges olika frekvenser. Det lägre diagrammet visar resultatet. Åter ser vi, att de första fem deltonerna utmärks av toppar i

tröskelkurvan, men inte de högre deltonerna. Hörseln har tydligen en filtreringsförmåga, som sitter i hörsnäckan i innerörat och som gör att vi kan urskilja var och en av de fem lägsta deltonerna i en komplex ton.

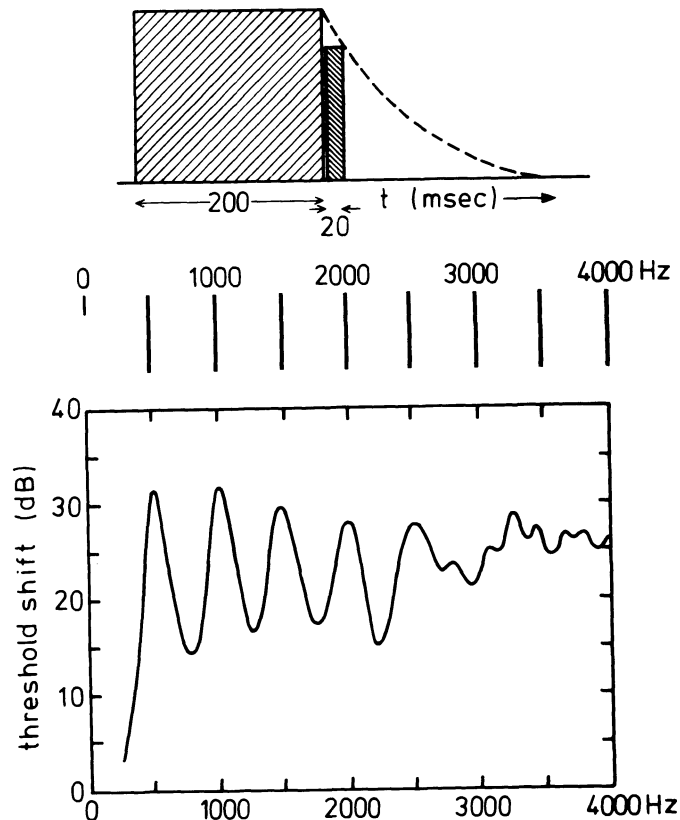


Fig 2. Den övre figuren illustrerar faktum att hörtröskeln för en kort testton inte återvänder till sitt normala ostörda minimivärde omedelbart när ett komplext ljud plötsligt avbryts. Kurvan under visar hur denna ändring av hörtröskeln varierar med frekvensen, när örat stimulerats med en komplex ton med grundfrekvensen 500 Hz. Resultaten visar medelvärden över fyra lyssnare (Plomp 1964)

Detta var bara två exempel på en stor mängd experiment som demonstrerar hörselns förmåga till frekvensanalys. Bandbredden på denna hörselns upplösnings- eller filtreringsförmåga är för frekvenser ovanför 500 Hz lika med ungefär 20 % av den analyserade frekvensen (vilket motsvarar avståndet mellan

5:e och 6:e harmoniska deltonerna dvs ungefär en liten ters). Detta är hörselns sk kritiska bandbredd. (I den här framställningen har jag uteslutit effekten av lateral inhibition, som i korthet innebär att en stark ton undertrycker andra närliggande svagare toner och som gör saken mera komplicerad, se Plomp (1976).)

3. Konsonans/dissonans mellan två rena toner

I musik har enkla frekvensförhållanden en grundläggande betydelse: samklanger (ackord) som består av (komplexa) toner med enkla frekvensförhållanden mellan grundtonerna kallas konsonanta (oktav 1:2, kvint 2:3), medan de anses mera dissonanta ju mindre enkla dessa förhållanden är. Detta fenomen kan sättas i samband med interferens mellan deltonsgrannar som örat inte kan särskilja.

Låt oss betrakta två toner i närheten av 500 Hz. Det är klart att dessa toner ger svävningar, om frekvensskillnaden mellan dem är liten (lägre än ca 10 Hz). Örat kan inte särskilja dessa två toner, och svävningarna mellan dem betyder att de än ligger i medfas, vilket ger förstärkning, än i motfas, vilket dämpar. Svävningarnas hastighet är lika med frekvensskillnaden. Ökas denna skillnad, blir samklangen mer och mer dissonant, eller sträv/rå (rough) med en maximal strävhet vid en frekvensskillnad på 40 Hz; efter detta värde avtar strävheten mer och mer.

Fig 3 visar graden av dissonans som funktion av frekvensskillnaden. Lyssnarna skulle här uttrycka graden av dissonans/konsonans med en siffra längs en 7-gradig skala, där 1 motsvarade mest dissonant och 7 mest konsonant. Eftersom dissonans/konsonans här gäller en sensorisk kvalitet hos varaktiga ljud, skall vi tala om tonkonsonans och tondissonans. Figuren visar att tonkonsonansskalans värde når en platå vid frekvensskillnader större än 100 Hz. Detta värde är lika med kritiska bandbredden vid 500 Hz, som vi nyss såg. Av undersökningar vid andra frekvenser kan vi dra slutsatsen att två rena toner börjar interferera, när deras frekvensskillnad minskas till ett värde mindre än ungefär en kritisk bandbredd. Denna interferens tar sig

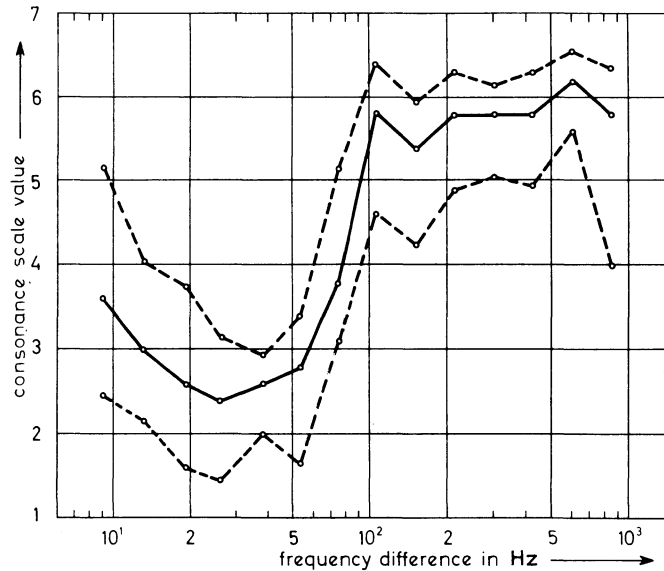


Fig 3. Genomsnittligt lyssnaruppskattad tonkonsonans/dissonansgrad hos samklngen av två sinustoner omkring 500 Hz som funktion av deras frekvensskillnad. Den heldragna kurvan anger medianvärdena, de streckade 25- resp. 75-procentvärdena för 11 lyssnare. (Plomp & Levelt, 1965)

uttryck i tondissonans eller strävhet, som når ett maximum och sedan avtar för mycket små frekvensskillnader. De övre och undre gränserna av det skuggade området i Fig 4 visar hur kritiska bandbredden (där konsonans-platån uppnås) resp. maximala tondissonansen varierar med frekvensen.

4. Tonkonsonans/dissonans för två komplexa toner

När det gäller två enkla toner, uppkommer interferens endast när deras frekvenser ligger varandra nära. För komplexa toner är situationen mycket mera komplicerad. Fig 5 visar hur de harmoniska deltonerna i en lägre, konstant ton med grundfrekvensen 250 Hz interfererar med de harmoniska deltonerna i en högre ton med en grundfrekvens som ökar från 250 till 500 Hz. De vertikala linjerna visar de 8 lägsta deltonerna hos den konstanta tonen. De lutande linjerna anger den variabla tonens deltonsfrekvenser som funktion av grundfrekvensen (vertikala axeln). De horisontella linjerna motsvarar

enkla frekvensförhållanden.

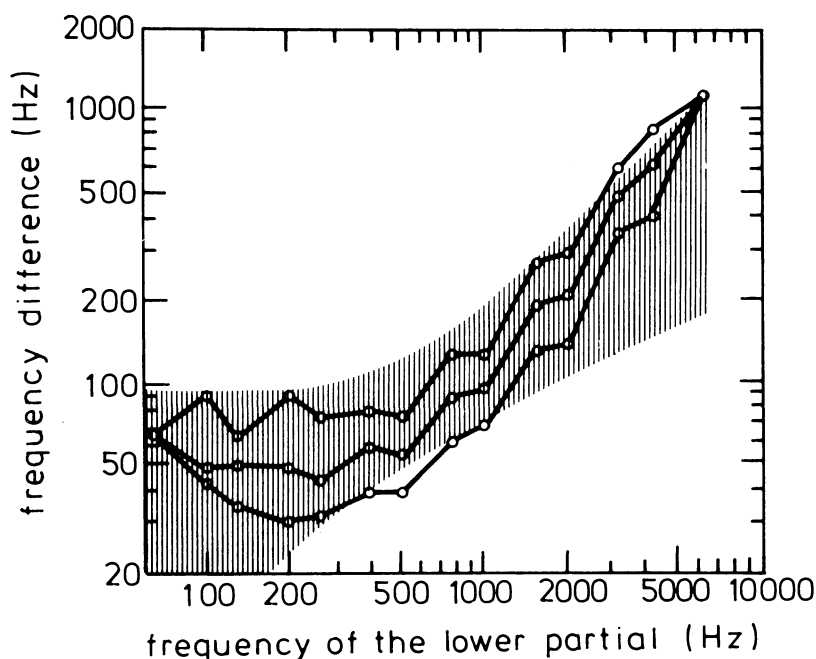


Fig 4. Den övre gränsen av det skuggade området motsvarar gränsen för ren tonkonsonans, den undre gränsen maximal tondissonans för samklang av två sinustoner. Kurvorna anger den frekvensskillnad som inte överskrids i 25, 50 resp. 75 % av tiden av närliggande deltoner i ackord. Den statistiska analysen utfördes på ackorden i tredje satsen (Romanze) i A. Dvořáks Stråkkvartett op 51 i Ess dur. (Plomp, 1976)

Fig 5 visar också att tondissonansgraden är en komplicerad funktion av frekvensskillnaden mellan de två grundtonerna till följd av interferens mellan deltoner tillhörande den konstanta och den variabla tonen. De mest tonkonsonanta samklangerna är de, där frekvensskillnaden mellan närliggande deltoner är antingen mycket stor eller mycket liten. Figuren visar att enkla grundfrekvensförhållanden ger lägsta tondissonansgrad (ty då sammanfaller lutande linjer med lodräta): ju enklare frekvensförhållanden desto mindre dissonans.

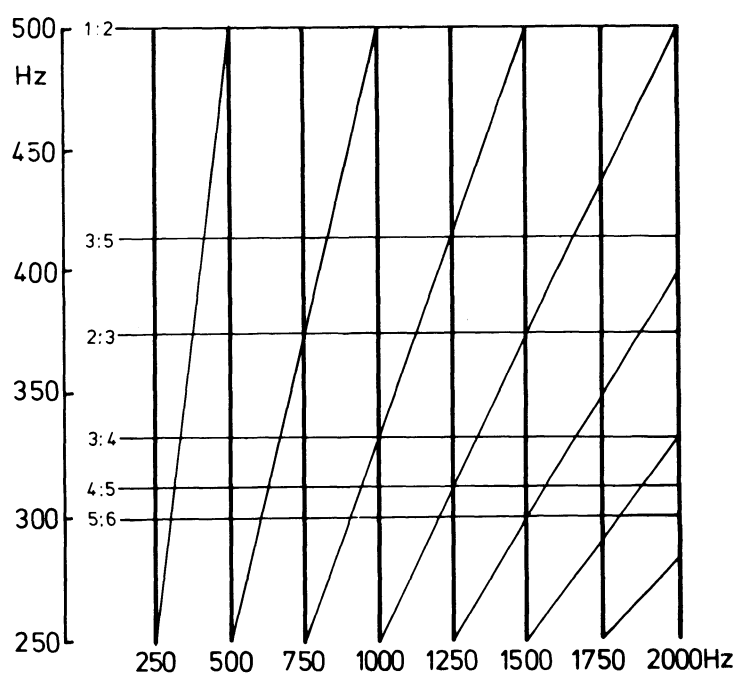


Fig 5. Deltonsfrekvenserna hos en komplex ton vars grundfrekvens ökar från 250 till 500 Hz. De vertikala linjerna visar frekvenserna av deltonerna hos en konstant 250-Hz-ton, de horisontella motsvarar enkla frekvensförhållanden.

Detta kan åskådliggöras på ett annat sätt genom att räkna ut den totala dissonansen som summan av dissonansbidragen från varje par av närliggande deltoner. På grundval av några sannolika regler (jfr Plomp & Levelt, 1965) erhöles Fig 6 för fallet att tonerna bestod av 6 deltoner var. De vertikala linjerna representerar intervallen i den liksvävande tempererade skalan. Toppar och vertikala linjer överensstämmer för oktav, kvint och kvart men inte för terserna eller den stora sexten. Dessa intervalls toppar är emellertid inte så skarpa som de andra intervallens. Detta betyder att avvikelserna mellan topparna (maximal tonkonsonans) och vertikala linjer (motsvarande intervall i liksvävande temperatur) är mycket lättare att fördrä för örat än vad samma avvikelser hade varit i fallet oktav, kvint och kvart.

Fig 7 visar hur beräknade tonkonsonans/dissonansvärden för konstanta frekvensförhållanden beror av den lägre tonens grundfrekvens. Diagrammet

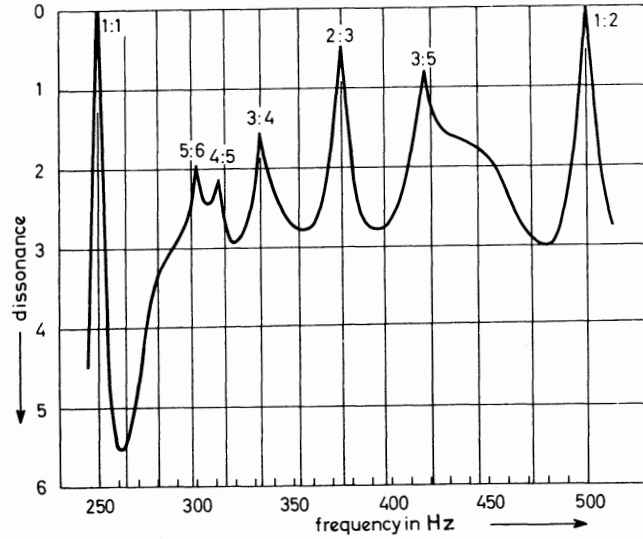


Fig 6. Illustration av hur tondissonansen hos ett intervall mellan en lägre konstant ton på 250 Hz och en högre variabel ton (båda uppbyggda av 6 harmoniska deltoner) beror av grundfrekvensen hos den senare tonen. Tondissonansen är summan av dissonansbidragen från vart par av närliggande deltoner. De vertikala linjerna representerar intervallen i den liksvävande tempererade skalan. (Plomp & Levelt, 1965)

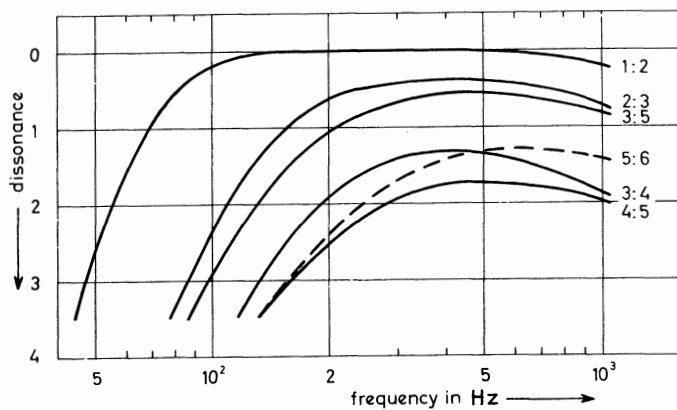


Fig 7. Illustration av hur tondissonansen för några intervall beror på den lägre tonens frekvens. Båda tonerna innehåller 6 deltoner. (Plomp & Levelt 1965)

visar att oktavintervalllets maximum sträcker sig ner mot betydligt lägre frekvenser än t ex terserna. Detta förhållande återspeglas i musikpraxis där terser brukar undvikas i låga lägen.

5. Intervallens förekomst i musik

I Fig 4 visade det skuggade området frekvensskillnaderna för maximalt tondissonant till konsonant. Detta område är alltså utomordentligt viktigt, om en tonsättare vill variera graden av tonkonsonans i musikens ackord: ett konsonant ackord har alla deltonerna i sina komplexa toner på frekvensskillnader nära eller ovanför den övre gränsen medan ett dissonant ackord har åtminstone några par av närliggande deltoner med frekvensskillnader nära den under gränsen. Därför är det av intresse att utröna hur de frekvensskillnader, som förekommer i musik, är fördelade.

En tillräcklig insyn i denna fråga kan erhållas om man analyserar ackord så som de skrivits ned av tonsättaren. Vi tar ett partitur och betraktar alla ackord där t ex tonen C 5 (tvåstrukna C med frekvensen 523,3 Hz) ingår. Sedan beräknar vi den tid under vilken den närmast högre samtidigt ljudande tonen skiljer sig från tonen C 5 med 1 halvtonsteg, (dvs utgör ett Ciss 5), 2 halvtonsteg (D 5) osv och sätter denna tid i relation till den totala tiden för alla ackord som innehåller tonen C 5. Då får man en kurva från vilken man kan räkna fram den kumulativa fördelningen; för varje intervallvidd adderar man procenttalen för alla intervall mindre än eller lika med detta intervall. Denna kumulativa fördelning representeras av punkter och streck i Fig 4. Kurvans 50 procent-punkt markerar den intervallvidd som överskrids 50 % av tiden. Denna procedur kan upprepas sedan man tagit med den andra deltonen hos tonerna, den tredje, den fjärde osv, precis som om de hade skrivits ut i partituret av tonsättaren. Ånyo kan 50 procent-punkten för den kumulativa intervallfördelningen beräknas. Mittkurvan på Fig 4 är ett exempel på 50 procent-punkter, här angiven i Hz i stället för halvtonsteg, och visar hur denna varierar med frekvensen för

den lägre tonen i intervallet. De lägre och övre kurvorna anger intervallvidder som inte överskrids 25 resp. 75 % av tiden. Man ser att intervallvidderna faktiskt mestadels håller sig inom det skuggade området, som representerar de viktigaste frekvensskillnaderna för tonkonsonans och dissonans. Fler exempel återfinns i Plomp & Levelt (1965).

6. Slutsatser

I det här föredraget har många förenklingar gjorts. Vi beaktade varken skillnader i deltonernas ljudtrycksnivåer eller hur många deltoner som tonerna i partituret innehöll. Dessa uppgifter är emellertid inte väsentliga vare sig för en förklaring varför enkla frekvensförhållanden spelar en så grundläggande roll i musik eller för att belysa den kritiska bandbreddens betydelse för upplevelsen av konsonans/dissonans. Resultaten har underbyggts av senare undersökningar, där icke-verbala metoder anlätts (Levelt, van de Geer & Plomp, 1966) och där effekten av svävningar eliminerats genom minskning av testtonernas längd (Plomp, Wagenaar & Mimpfen 1973).

Tidigare har helt olika förklaringar föreslagits för de enkla frekvensförhållandenas särställning bland mängden av alla tänkbara förhållanden (en redogörelse härför lämnas i Plomp & Levelt 1965). De flesta av dessa förklaringar har försökt att besvara frågan varför somliga intervall är så konsonanta. Det skall betonas att detta föredrag har förklarat varför många intervall är så dissonanta i stället för varför somliga är konsonanta.

När vi bedömer de här resultaten, måste vi erinra oss att de utvanns ur experiment där icke-musiker lyssnade på isolerade intervall. På detta sätt försökte man undvika effekter av musikutbildning likaväl som av musikens kontext. Följaktligen går särställningen för komplexa toner med enkla frekvensförhållanden tillbaka på ett sensoriskt fenomen. Resultaten säger varken att en musiker kommer att betrakta en isolerad stor septima mellan två enkla sinustoner som ett konsonant intervall eller att icke-musiker kommer att betrakta samma intervall som konsonant om det förekommer i ett musika-

listkt sammanhang. I musik har intervallen fått sin egen särskilda identitet, mer eller mindre oberoende av förekomsten av deltoner i det enskilda fallet. Denna identitet är resultatet av erfarenhet och utbildning. Den bakomliggande grundläggande rollen av enkla frekvensförhållanden i våra musikskalor är enligt min mening byggd på den sensoriska särställning som dessa förhållanden intar längs tonkonsonans/dissonans -dimensionen och som beror på interferens (strävhet) mellan deltonsgrenar.

Referenser

- Levelt, W.J.M., Geer, J.P. van de, and Plomp, R. (1966). Triadic comparisons of musical intervals. *Brit. J. Math. Psychol.* 19, 163-179.
- Plomp, R. (1964). The ear as a frequency analyzer. *J. Acoust. Soc. Amer.* 36, 1628-1636.
- Plomp, R. (1976). *Aspects of Tone Sensation*. London/New York, Academic Press.
- Plomp, R., and Levelt, W.J.M. (1965). Tonal consonance and critical bandwidth. *J. Acoust. Soc. Amer.* 38, 548-560.
- Plomp, R., and Mimpfen, A.M. (1968). The ear as a frequency analyzer. II. *J. Acoust. Soc. Amer.* 43, 764-767.
- Plomp, R., Wagenaar, W.A., and Mimpfen, A.M. (1973). Musical interval recognition with simultaneous tones. *Acustica* 29, 101-109.

Fysikaliska motsvarigheter till klangfärg hos stationära ljud

av

Reinier Plomp

Institute for perception TNO, Soesterberg, Holland och
Faculty of Medicine, Free University, Amsterdam, Holland

1. Inledning

Mitt föregående föredrag handlade om örats förmåga till frekvensanalys och dess betydelse för konsonans/dissonansdimensioner. Här skall vi stanna inför en annan viktig aspekt på frekvensanalys. Vi upplever inte ett komplext ljud som summan av enskilda deltoner utan som en helhet med sin egen särskilda klangfärg.

Först måste preciseras vad jag här menar med klangfärg. Enligt den definition man finner i American Standards Association avser klangfärg olikheten mellan toner med samma ljudstyrka och samma tonhöjd. Denna (negativa!) definition speglar det faktum att klangfärg är den dunklaste av de tre upplevelsekvantiteter som tillkommer komplexa ljud (styrka, tonhöjd, klangfärg).

I en vid bemärkelse står klangfärg också för de kännetecknande egenskaperna hos en ton alstrad av ett givet musikinstrument. Varje instrument liksom människorösten har i den meningen sin särskilda klangfärg. Den innefattar tonansatsen och avklingandet, små variationer i tonhöjd och styrka av den mera stationära delen av tonen osv.

Två exempel räcker för att belysa vikten av dessa temporala aspekter på klangfärg i denna vida mening. Fig 1 visar amplituderna hos de första 5 deltonerna under de första 80 msek. av en 110 Hz principalpipa i en orgel.

Kurvan visar att amplitudförhållandena mellan dessa deltoner förändras påtagligt under de första 40 msek., vilket ger den typiska tonansatsen i denna orgelstämma. Fig 2 visar hur ljudtrycksnivåerna hos deltonerna i en trumpet beror på grundtonens nivå. Vid låga nivåer är grundtonen dominerande, men övertonernas amplituder växer mycket snabbare än grundtonens upp till en viss nivå. Detta ger det typiska trumpetljudet.

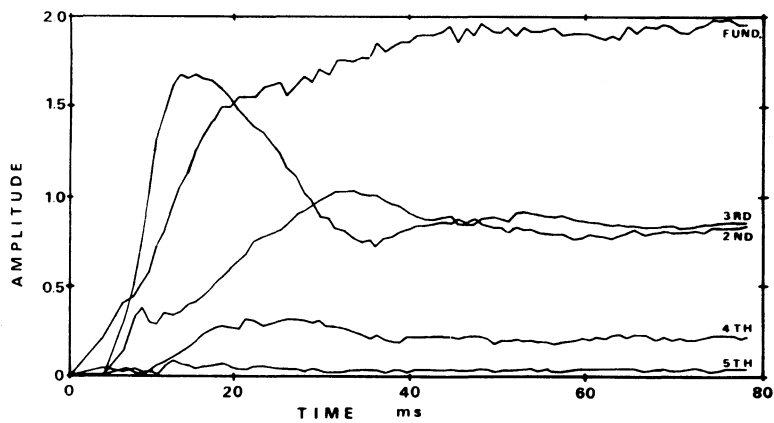


Fig 1. Relativa amplituderna hos de fem lägsta deltonerna under tonansatsen i en 110-Hz principalpipa. (Keeler, 1972)

Redan dessa två exempel visar att tonens deltonsuppbyggnad utgör en viktig faktor för klangfärgsuppfattningen. I det följande skall vi studera klangfärg uteslutande i dess trängre bemärkelse som den perceptuella olikheten mellan stationära toner med samma tonhöjd och -styrka.

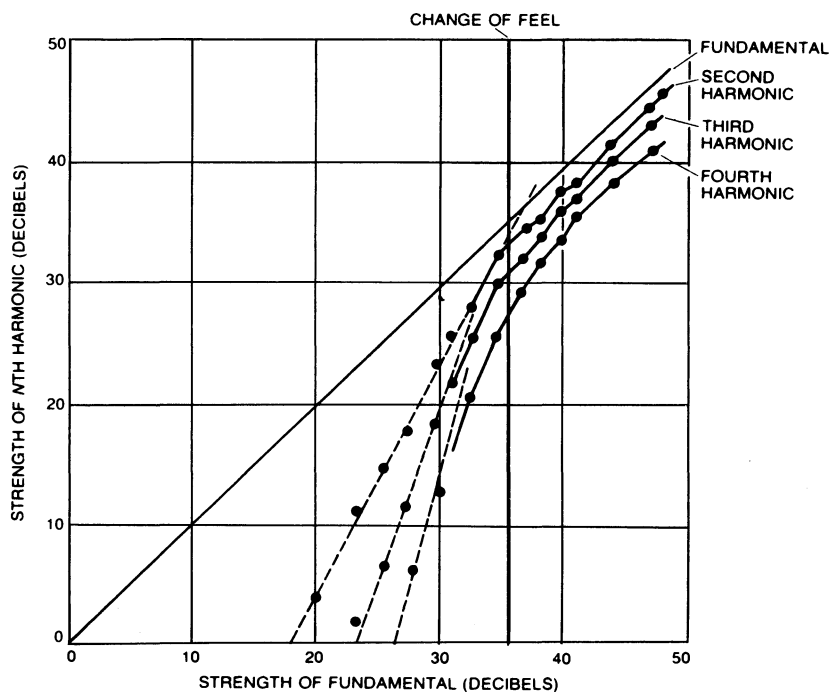


Fig 2. Relativa ljudtrycksnivåer hos de fyra lägsta deltonerna i en trumpet som funktion av grundtonsnivån. (Benade, 1973)

2. Klangfärgens mångdimensionalitet

Klangfärg är en helt annat slags tonegenskap än styrka och tonhöjd. De båda sistnämnda är endimensionella egenskaper hos en ton. Vi kan ordna alla tänkbara ljudstyrkor längs en skala som går från svagt till starkt, och alla tonhöjder längs en skala från lågt till högt. Detta återspeglas i partituret till kompositioner. Den önskade styrkan anges med symboler som pp, p, mf, f osv och gradvisa förändringar med svällaretecken (< >). Den önskade tonhöjden anges med nottecknets vertikala läge. Men för klangfärgen saknar vi symboler. Vanligen anger tonsättaren den avsedda klangfärgen genom att ange instrumentet.

Den här avsaknaden av en endimensionell klangfärgsskala återspeglas i svårigheten att beskriva klangfärg. Som von Bismarck (1974 a och b) har visat är den bästa semantiska skalan för klangfärgsolikheter den som går från dov till skarp ("stumpf-scharf"). Den korrelerar med den relativa ljudtrycksnivån hos de högfrekventa deltonerna i ljudet. Men två lika skarpa toner kan likafullt låta ganska olika.

Av detta kan vi dra slutsatsen att klangfärg är en mångdimensionell snarare än en endimensionell egenskap. Detta är kanske huvudskälet till att klangfärg inte har undersökts lika ingående som ljudstyrka och tonhöjd. Först på senare år har de metoder och den utrustning kommit fram som behövs för ett studium av en sådan mångdimensionell kvantitet.

Klangfärgens mångdimensionalitet finner sin motsvarighet i mångdimensionaliteten i ett ljudspektrum. För en periodisk ljudvåg bestäms spektrum av deltonernas (relativa) amplituder. Detta borde teoretiskt sett medföra att antalet dimensioner är lika med antalet deltoner. Vi bortser här från fasens betydelse för klangfärgen, eftersom dess roll är mindre framträdande än amplitudens (Plomp & Steeneken, 1969).

Vi såg emellertid att hörselorganet inte kan upplösa alla deltoner. Detta betyder att en bättre uppskattning av antalet spektrumdimensioner hos en komplex ton är antalet närliggande kritiska band som spektrum täcker. Vi såg också att de kritiska banden kan approximeras rätt bra med 1/3 oktavband. Slutsatsen blir att mångdimensionaliteten hos ljudspektra vad gäller örats frekvensupplösningsförmåga rätt väl kan representeras av ljudtrycksnivåerna från en serie av 1/3 oktavband. Som en första approximation förefaller dessa nivåer vara mera adekvata om de mäts i dB än om de mäts i ett mått som närmare ansluter till hörstyrkan, angiven i enheten son.

Vi har alltså två mångdimensionella storheter: klangfärgen som en perceptuell ljudegenskap och ljudspektrum i dB per 1/3 oktav som dess fysikaliska motsvarighet. Hur nära är dessa då korrelerade? Den följande fram-

ställningen skall illustrera hur klangfärg som en mångdimensionell egenskap hos tonupplevelsen kan undersökas.

3. Klangfärgsskillnad och spektrumskillnad

Klangfärgen hos en ton kan skilja sig avsevärt från klangfärgen hos en annan. Det är ganska onaturligt att studera sådana skillnader med hjälp av en uppsättning verbala skalor, ty de flesta sådana skalor används aldrig i praktiken för att beskriva klangfärgsskillnader. Det är mycket lämpligare att använda en icke-verbal teknik för att kvantifiera dem.

I vårt experiment anlätade vi metoden med jämförelser mellan tre toner. Lyssnaren bedömer klangfärgsskillnaderna mellan t ex 10 olika stationära toner. Dessa 10 stimuli kan grupperas i 120 olika grupper om 3 stimuli. För var grupp bestämmer lyssnaren vilka två stimuli som låter mest lika och vilka som låter minst lika. Detta förefaller vara en rätt enkel uppgift. Om stimuli i och j i gruppen i, j och k låter mest lika, får detta par 0 poäng; om paret $i - k$ låter mest olika, får det paret 2 poäng och det återstående paret $j - k$ 1 poäng. I en matris av alla par $i - j$ ackumulerar man poängtalerna man fått för alla 120 grupper om tre stimuli i motsvarande celler.

Tabell I visar resultaten för 10 stationära toner med samma tonhöjd (263 Hz) och tonstyrka erhållna från en piporgel.

Nu uppkommer frågan: kan vi finna ett motsvarande sätt att ange spektrumskillnaderna, så att vi kan korrelera dessa värden med klangfärgsskillnaderna? En möjlig väg är att addera ljudtrycksnivåskillnaderna i vart och ett av de olika 1/3-oktav-banderna enligt

$$D_{i,j} = \sum_{n=1}^m |L_{i,n} - L_{j,n}| \quad (1)$$

där $D_{i,j}$ = spektrala skillnaden mellan tonerna i och j ,

m = antalet filterband,

$L_{i,n}$ = ljudtrycksnivån i dB för ton i i frekvensband n .

	1 trumpet 8'	2 regal 8'	3 cromorne 8'	4 diapason 8'	5 octave 2'	6 diapason 2'	7 diapason 4'	8 waldflute 2'	9 rohrflute 4'	10 gedackt 8'
1 trumpet 8'	-	41	46	96	119	117	39	67	134	115
2 regal 8'	98	-	17	115	129	110	75	101	147	127
3 cromorne 8'	110	107	-	84	105	80	87	79	128	101
4 diapason 8'	144	170	134	-	17	35	90	58	66	57
5 octave 2'	163	176	144	57	-	50	111	44	27	37
6 diapason 2'	214	227	172	111	97	-	78	93	75	75
7 diapason 4'	124	128	114	100	114	126	-	86	131	113
8 waldflute 2'	94	148	96	101	102	162	119	-	64	22
9 rohrflute 4'	195	211	185	125	105	164	194	127	-	12
10 gedackt 8'	133	169	126	104	91	146	143	78	72	-

Tabell 1. Kumulativa olikhetsvärden (totala poäng från 10 lyssnare, övre högra triangeln) och skillnader i dB-nivåer summerade över 1/3-oktavband, $D_{i,j}$ (undre vänstra triangeln) för 10 toner härrörande från en piporgel. Alla toner hade samma tonhöjd (263 Hz) och ljudstyrka.

Det är mycket naturligt att anta att två toner med mycket olika ljudspektra, vilket ger ett stort värde på D , kommer att klinga mycket mera

olika än två toner med nästan samma spektra, som ger ett lågt D-värde. Den nedre vänstra triangeln av celler i Tabell I visar D-värdena för stimulusparen. Fig. 3 visar hur nära dessa värden överensstämmer med olikhetsvärdena. Vi kan dra slutsatsen att korrelationen är ganska god: i genomsnitt motsvarar ett högt D-värde en höggradig olikhet och tvärtom.

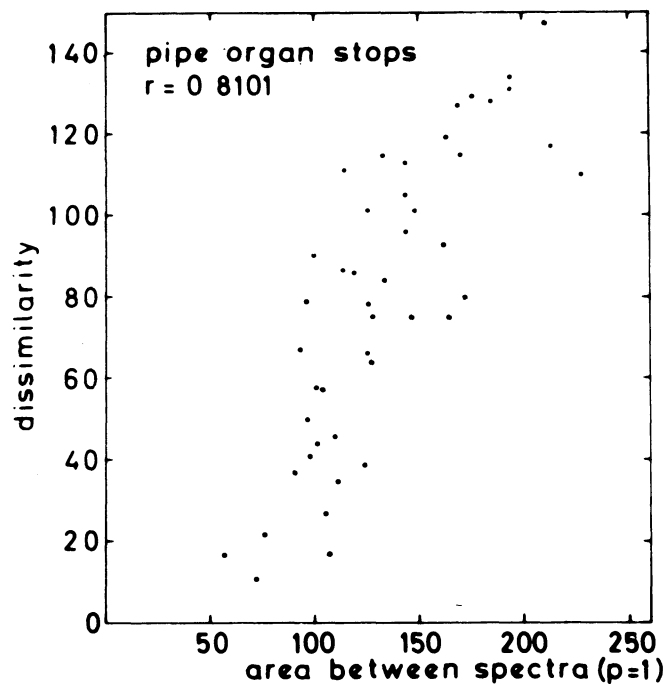


Fig 3. Olikhetsvärden (högre övre triangeln i Tabell I) som funktion av de summerade skillnaderna i dB-nivåer i 1/3-oktavband (nedre vänstra triangeln i Tabell I).

I ekvation (1) adderas ljudtrycksnivåskillnaderna i filterbanden linjärt. Ett annat och från statistisk synpunkt lämpligt sätt är att betrakta varje spektrum som en punkt i en m-dimensionell rymd. Koordinaterna för en sådan punkt är ljudtrycksnivåerna i dB för detta spektrum i de m stycken filterbanden. Som ett mått på spektrumskillnaden mellan tonerna i och j kan vi använda avståndet mellan deras resp. punkter i den m-dimensionella rymden. Detta avstånd är lika med

$$D_{i,j} = \sqrt{\sum_{n=1}^m (L_{i,n} - L_{j,n})^2} \quad (2)$$

Denna formel verkar ge en nästan lika god korrelation med olikhetsmättet som den man får med ekv. (1) och brukar föredras av statistiska skäl (för en utförligare diskussion hänvisas till Plomp 1970 och 1976).

4. Klangfärgsrymd och spektrumrymd

Att representera klangfärgsskillnader med en matris med siffror är inte det bästa tänkbara när man studerar klangfärg. Precis som man kan ordna ljudstyrkor längs en skala som punkter utefter en rät linje, skulle det vara bra om man kunde inordna klangfärger som punkter i en mångdimensionell rymd. Man kan räkna ut en sådan fördelning av punkter med ett datorprogram som Kruskal utvecklade för några år sedan. Det enda villkoret för att programmet skall vara användbart är ett monotont förhållande mellan rangordningen enligt olikhetsvärdena och distanserna mellan motsvarande punkter i rymden. Den utsträckning, i vilken detta är fallet, anges med ett "stress"-procenttal. Den bästa lösningen är det lägsta antalet dimensioner med en tillräckligt låg stress.

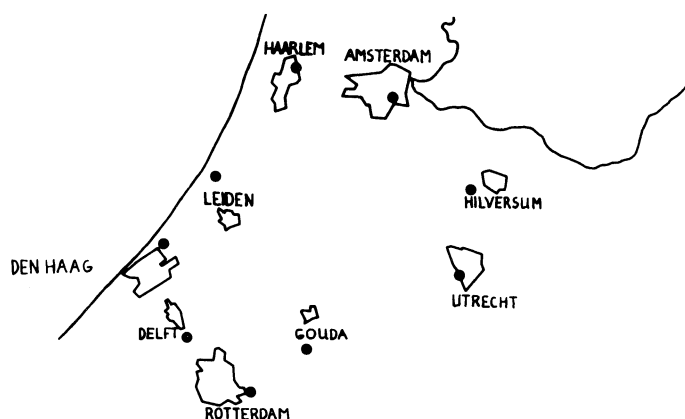


Fig 4. Punkterna visar resultatet av ett MDSCAL-program som använts på en olikhetsmatris erhållen från intuitivt gjorda 3-gruppsjämförelser av de relativa avstånden mellan 9 holländska städer (adderade resultat från 6 försökspersoner). Punktfördelningen kan jämföras med städernas faktiska geografiska fördelning.

Fig 4 visar hur bra ett sådant program lyckas. Jag bad försökspersoner att utan hjälp av karta skatta avståndsförhållandena mellan 9 städer i Holland i grupper om 3, precis som vi gjorde med toner. Den olikhetsmatris som därvid framkom för uppskattade ömsesidiga avstånd stoppades in i ett MDSCAL-program utvecklat av Kruskal. Den tvådimensionella lösningen kan jämföras med den geografiska verkligheten enligt en karta. Fig 4 visar hur användbar och pålitlig tekniken är.

Samma program tillämpades på olikhetsmatrisen för klangfärgerna hos de 10 orgeltoner som nämndes tidigare (övre högra triangeln av celler i Tabell I). Ringarna i Fig 5 ger som ett exempel den tvådimensionella lösningen.

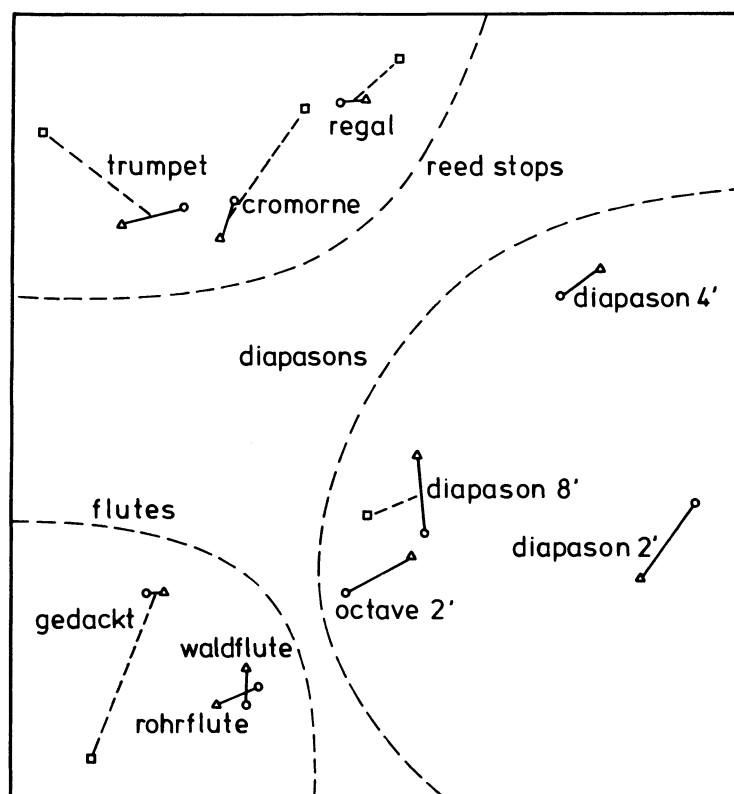


Fig 5. Resultat av anpassning av den tvådimensionella klangfärgsrymden (cirklar) i 10 orgelstämmor till den tvådimensionella spektrumrymden (trianglar). Fyrkanterna visar några preliminära data om en kognitiv rymd.

Fördelningen av punkter bör jämföras med en annan, nämligen den som härrör från spektra. Som jag nämnde tidigare kan varje spektrum representeras av en punkt i en mångdimensionell rymd med ljudtrycksnivåerna i 1/3-oktavbanden som koordinater. På detta sätt fick vi fram en grupp av 10 punkter i en 15-dimensionell rymd. Vi behöver emellertid inte så många dimensioner för att representera spektrumskillnader. Det kan t ex inte uteslutas att punkterna är belägna i ett (tvådimensionellt) plan i rymden eller i en tredimensionell subrymd. Det finns beräkningsmetoder för att få fram en sådan underordnad subrymd som ändå representerar de ursprungliga avstånden mellan punkterna så bra som möjligt (en s k principal-component-analys). Den tvådimensionella spektrum-lösningen anpassades till den tvådimensionella perceptuella och återges också den i Fig 5 (trianglarna). Vi kan dra slutsatsen att de två punktfördelningarna överensstämmer riktigt bra, vilket betyder att klangfärg korrelerar utomordentligt väl med spektrum. Den vertikala axeln i Fig 5 tycks korrelera mycket bra med den genomsnittliga lutningen i spektrum: rörverken har ett rikt spektrum med starka deltoner, flöjterna kännetecknas av en ganska stark grundton och endast ett fåtal övertoner. Principalstämmorna ligger någons emellan. Denna axel motsvarar således von Bismarcks dov-skarp dimension, som nämndes tidigare. Den horisontella axeln är svårare att finna en benämning för. Den sammanhänger med lokala avvikelser i spektrum från en rätlinjigt fallande spektrumenvelop.

Fig 5 innehåller också några andra punkter, fyrkanterna. Detta är mycket preliminära resultat av klangfärgsexperimentet med yrkesorganister, som emellertid inte fick lyssna till själva tonerna. På samma sätt som i försöket med städerna fick försökspersonerna endast namnen på 9 orgelstämmor i grupper om 3. Den "kognitiva" punktfördelningen verkar överensstämma rätt bra med de perceptuella och spektrala. Detta betyder att de stationära delarna av orgeltoner är utmärkande för våra minnesbilder av stämmorna. Av data som publicerats av Wedin & Goude (1972) kan vi dra slutsatsen att detta inte gäller toner hämtade från olika musikinstrument; här förefaller skillnader i ansats och avklingande vara mycket mera typiska än skillnader i spektrumenvelopens genomsnittliga lutning.

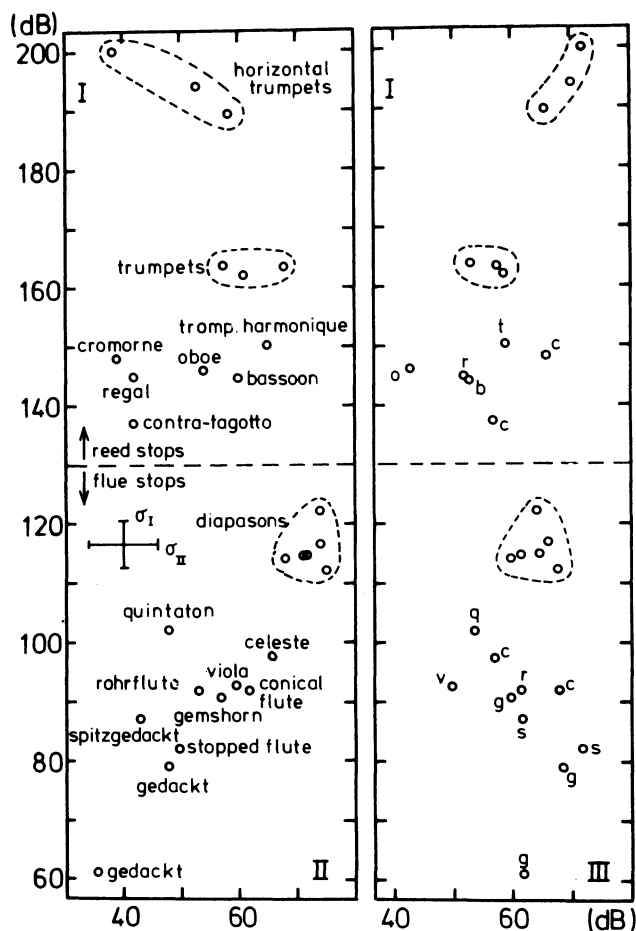


Fig 6. De tre första faktorerna (II mot I resp. III mot I) av den spektrala rymden för tonen C4 (ettstrukna c) hos 28 orgelstämmor. (Plomp, 1976)

Fig 6 visar resultatet av en principal-component-analys av 28 olika orgelstämmor, som inte korrigerats för olikhet i ljudtrycksnivå. Åter ser vi att stämmor som kännetecknas av en serie starka deltoner ligger högt på den vertikala axeln, och stämmor med en jämförelsevis stark grundton och svaga övertoner hamnar lågt. Korsen σ_I , σ_{II} anger standardavvikelsen för variationer på grund av efterklngen i rum (se vidare Plomp & Steneeken, 1973).

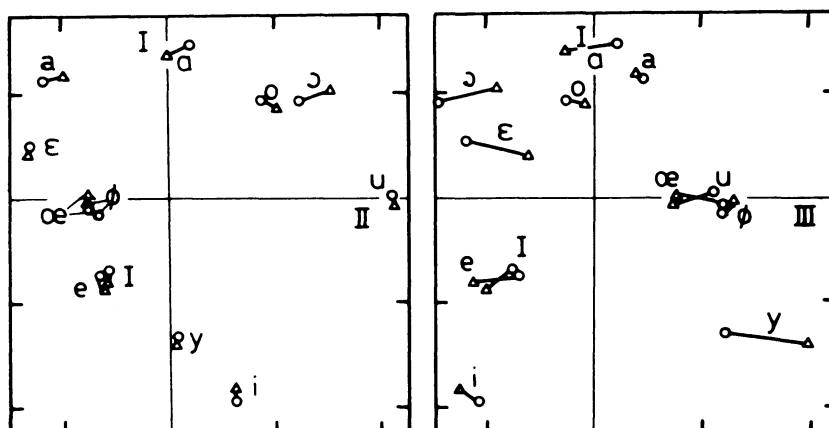


Fig 7 Resultat av en anpassning av den perceptuella rymden (cirklar) till den spektrala rymden (trianglar) erhållen från en förväxlingsmatris för 12 vokaler uttalade av 50 talare. Endast I/II-planet och I/III-planet av den fyrdimensionella lösningen visas. (Klein & al., 1970)

Fig 7 och 8 visar slutligen några resultat avseende vokaler. Lyssnare fick identifiera isolerade vokaler uttalade av 50 talare. Från förväxlingsmatrisen kan man räkna fram en olikhetsmatris, och från denna erhöles en punktfördelning i fyra dimensioner. Man kan anta att två vokaler förväxlas lättast när deras spektra är lika. Detta visas i Fig 7. Spektrum mättes också och omräknades till en punktfördelning (trianglar). Om man anpassar dessa punkter till den perceptuella fördelningen (cirklar) får man fram en utmärkt överensstämmelse.

Fig 8 visar att den spektrala punktfördelningen i två dimensioner överensstämmer mycket bra med det välkända formantplanet, där axlarna representerar första resp. andra formantens frekvens.

5. Slutsatser

I den här föreläsningen har en icke-verbal metod beskrivits som anlätats för att undersöka klangfärgens mångdimensionella karaktär. Vi har

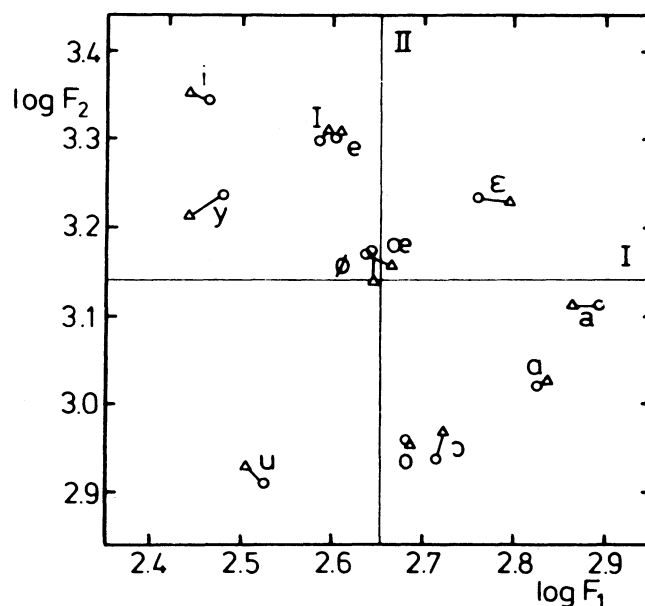


Fig 8. Resultat av en anpassning av den tvådimensionella spektrala rymden (trianglar) för 12 vokaler till motsvarande mönster i formant-planet. (Pols & al., 1973)

konstaterat att de två- eller tredimensionella punktfördelningarna, som motsvarar det ömsesidiga förhållandet mellan klangfärger hos en serie toner, utomordentligt väl stämmer med den punktfördelning som härrör från spektrumskillnaderna mellan tonerna. Denna överensstämmelse visar att klangfärg till stor del beror av spektrum. Denna slutsats gäller för komplexa toner av de slag som alstras av musikinstrument och människorösten. Vi borde kunna vänta betydande avvikelser för konstgjorda ljud såsom t ex komplexa toner med högst en delton per kritiskt band. Eftersom deltonerna då inte interfererar, låter sådana ljud mycket mera olika ett ljud innehållande samtliga harmoniska deltoner än vad skillnaderna i ett 1/3-oktav-spektrum skulle låta förmoda. En illustration av detta är ett "plenum" i en orgel (dvs en registrering med principalstämmor i t ex 8'-, 4'- 2'- och 1'-lägena). Spektrum av detta ljud innehåller deltoner som åtskiljs av antingen kvart eller kvint: 1, 2, 3, 4, 6, 8, 12, 16, 24 osv, dvs alla deltoner ligger mer än ett kritiskt band i sär. Dentyppiska klangfärgen hos ett sådant komplext ljud

visar att klangfärg och konsonans/dissonans hänger nära ihop. Mera forskning krävs för att studera reglerna för detta samband.

Referenser

- Benade, A.H. (1973). The physics of brasses. *Scient. Amer.* 229, No. 1 (July), 24-35.
- Bismarck, G. von (1974a). Timbre of steady sounds: A factorial investigation of its verbal attributes. *Acustica* 30, 146-159.
- Bismarck, G. von (1974b). Sharpness as an attribute of the timbre of steady sounds. *Acustica* 30, 159-172.
- Keeler, J.S. (1972). Piecewise-periodic analysis of almost-periodic sounds and musical transients. *IEEE Trans. Audio Electro-acoustics* AU-20, 338-44.
- Klein, W., Plomp, R., and Pols, L.C.W. (1970). Vowel spectra, vowel spaces and vowel identification. *J. Acoust. Soc. Amer.* 48, 999-1009.
- Plomp, R. (1970). Timbre as a multidimensional attribute of complex tones. In: "Frequency Analysis and Periodicity Detection in Hearing" (R. Plomp and G.F. Smoorenburg, eds.). Sijthoff, Leiden, pp. 397-414.
- Plomp, R. (1976). *Aspects of Tone Sensation*. Academic Press, London, New York.
- Plomp, R., and Steeneken, H.J.M. (1969). Effect of phase on the timbre of complex tones. *J. Acoust. Soc. Amer.* 46, 409-421.
- Plomp, R., and Steeneken, H.J.M. (1973). Place dependence of timbre in reverberant sound fields. *Acustica* 28, 50-59.
- Pols, L.C.W., Tromp, H.R.C., and Plomp, R. (1973). Frequency analysis of Dutch vowels from 50 male speakers. *J. Acoust. Soc. Amer.* 53, 1093-1101.
- Wedin, L., and Goude, G. (1972). Dimension analysis of the perception of instrumental timbre. *Scand. J. Psychol.* 13, 228-240.

Kontinuitetseffekter i ljuduppfattningen

av

Reinier Plomp

Institute for perception TNO, Soesterberg, Holland och
Faculty of Medicine, Free University, Amsterdam, Holland

1. Inledning

Mina båda föregående föreläsningar har behandlat stationära ljud. Huvuddelen av tillgängliga data från psyko-fysisk forskning gäller olika aspekter på hur sådana ljud uppfattas. Men i praktiken möter vi vanligen ljud som förändras oavbrutet (t ex tal) eller tonföljder (t ex klaverinstrumentmusik). Dessa förändringar i ljudflödet inför helt nya frågor, som ännu inte utforskats fullständigt. Därför får den här föreläsningen en betydligt mera inledande prägel än de föregående och den skall kretsa kring några intressanta ljudexempel. De återfinns i grammofonskivan, som följer med denna bok.

2. Uppfattad kontinuitet hos ett ljud som växlar med brus

Vår uppfattning av ljud är anmärkningsvärt okänslig för tillfälliga störningar av andra ljud. Vi kan t ex rikta vår uppmärksamhet på endera av två personer som talar samtidigt utan att ens inse att de båda ljudsignalerna är till synes oupplösligt sammanblandade i luften. Vi vet att svagare talljud från den ena rösten överröstar fullständigt av de starkare talljuden från den andra. Ändå tappar vi inte bort svaga ljud t ex konsonanter. Samma sak gäller de olika stämmorna i en musikalisk stämvävnad.

Detta fenomen kan studeras i laboratoriet genom att man använder en växelvís presentation av två ljud. Vi kan t ex låta 200 msek. korta toner växla med lika långa brusljud. Om bruset då är lagom starkt, hör vi inte

en regelbundet avbruten ton, utan tonen ljuder oavbrutet även genom bruset.

Ljudexempel 1. En sinuston, som glider mellan frekvenserna 500 och 2000 Hz, växlar med ett brusband som sträcker sig mellan 900 och 1100 Hz. Situationen illustreras i Fig 1. Så länge tonens frekvens ligger under 900 Hz eller ovanför 1100 Hz hör vi korta toner med stegvis stigande tonhöjd. Mellan 900 och 1100 Hz låter det emellertid helt annorlunda: tonen får en kontinuerligt stigande tonhöjd. Effekten av brusljuden låter inte alls som avbrott av tonen: brusljuden förbinder i stället tonerna så att de smälter samman till en som tycks oavbruten ton. (Observera att effekten i detta och följande exempel framträder tydligast i rum utan efterklang; de bör därför helst avlyssnas med hörlurar eller också nära högtalaren).

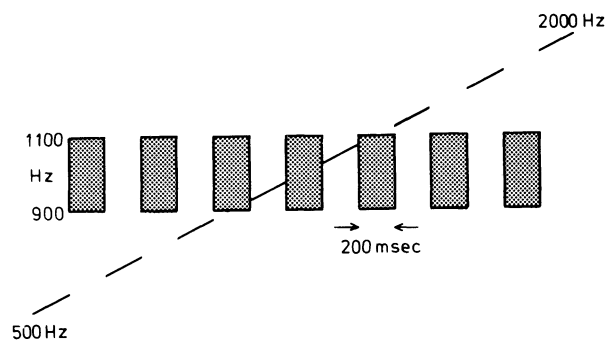


Fig 1. Illustration till Ljudexempel 1.

Kontinuitetseffekten förefaller ha upptäckts av många forskare oberoende av varandra (Miller & Licklider, 1950; Thurlow, 1957; Warren & al., 1972; Houtgast, 1972). Den inställer sig bara om spektrum av den signal, som skall låta som om den var kontinuerlig, helt och hållet "täcks" av brusets spektrum. (För en exaktare formulering hänvisas till Warren & al., 1972 och Houtgast, 1972.) Den högsta nivån vid vilken signalen låter kontinuerlig, den så kallade pulsationströskeln, har visat sig vara ett mycket användbart mått i hörselforskningen (se t ex Houtgast, 1974).

Ljudexempel 2, 3 och 4. I dessa exempel omväxlar musik antingen med pauser eller med bredbandiga brusljud. Skillnaden är dramatisk. När musiken omväxlar med pauser blir resultatet en så stark stympning, att man tycker sig höra bara en serie osammanhängande brottstycken av ljud. När brus inläggs i pauserna, upplever man detta som ett slags "restaurering" av musiken så att den åter blir ett kontinuerligt om än stört ljudflöde. (Musiken är hämtad från J Pachelbel: Toccata och Fuga i B-dur, Verdis opera Don Carlos resp. J S Bachs Violinpartita Nr 3 i Ess-dur.)

En intressant fråga är hur långa de brusfyllda pauserna kan göras utan att intrycket av kontinuitet går förlorat. Den frågan studerades av Dannenbring (1974) med omväxlande stigande, fallande eller sick-sackande frekvensglidningar kring 1000 Hz. På mitten av en frekvensglidning på 2 sek. kan brusljudet få vara upp till 450 msec. innan kontinuitetseffekten försvinner. Detta värde minskas ned till ca 350 msec. för en stationär ton, men ökar till 650 msec. om brusljuden förläggs till vändpunkterna i ett sick-sackande frekvensförlopp. Dessa resultat antyder att kontinuitetseffekten hos en ton främjas snarare än motverkas av att frekvensen ändras.

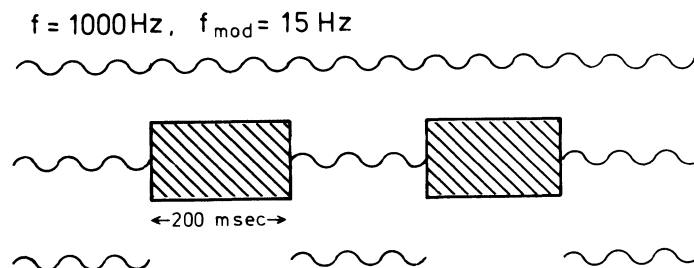


Fig 2. Illustration till Ljudexempel 5.

Ljudexempel 5 och 6. Att en ton inte behöver vara konstant för att låta konstant kan visas också med en frekvensmodulerad ton som illustreras på Fig 2. Om man alternerar denna signal med andra brusljud eller med

pauser, uppstår oerhört olika ljudupplevelser: Modulationen är inte särskilt tydlig så länge tonen omväxlar med pauser men blir mycket påfallande och oavbrutet hörbar om tonen omväxlar med brus. Detta gäller inte bara frekvensmodulering (Exempel 5) utan också amplitudmodulering (Exempel 6).

Ljudexempel 7. Det är inte nödvändigt att det är samma signal som upprepas för att kontinuitetseffekten skall uppstå. När en ton på 40 msec. omedelbart åtföljs av ett brusljud på 300 msec. hör vi en mycket längre ton, precis som om tonen fanns också i bruset. Detta kan visas på ett lustigt sätt genom att man spelar en skala med åtta toner, av vilka hälften varar 300 msec. medan den andra hälften varar 40 msec. och åtföljs av 260 msec. brus, jfr Fig 3. Vi hör en skala av lika långa toner med fyra störande brusljud, men vi hör inte omväxlandet mellan de faktiska långa och korta tonerna.

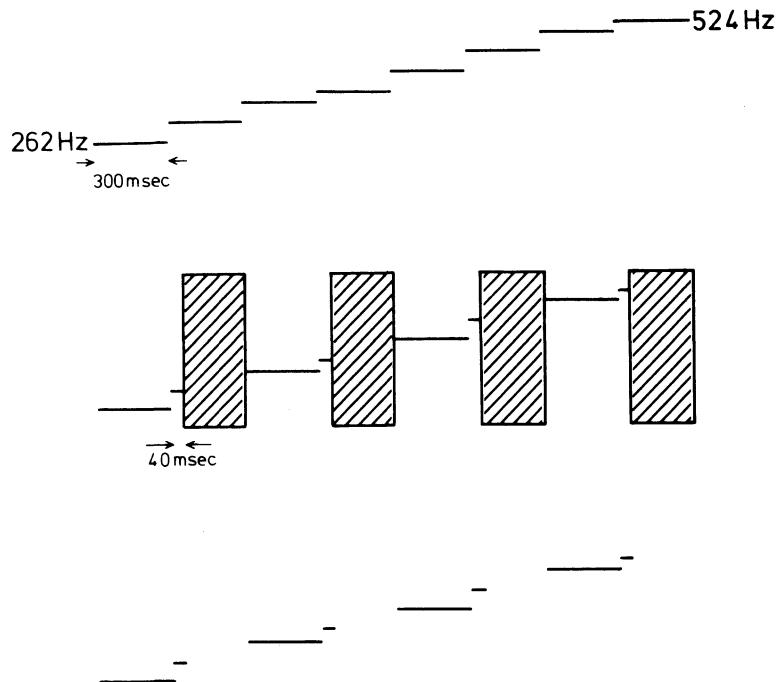


Fig 3. Illustration till Ljudexempel 7.

Ljudexempel 8. Situationen kompliceras om man inte presenterar början på tonerna nr 2, 4, 6 och 8, som illustreras på Fig 4. Det verkar som om lyssnarens förhandsinställning genom den brusfria skalan, som presenterades först, är mycket viktigare i det fallet.

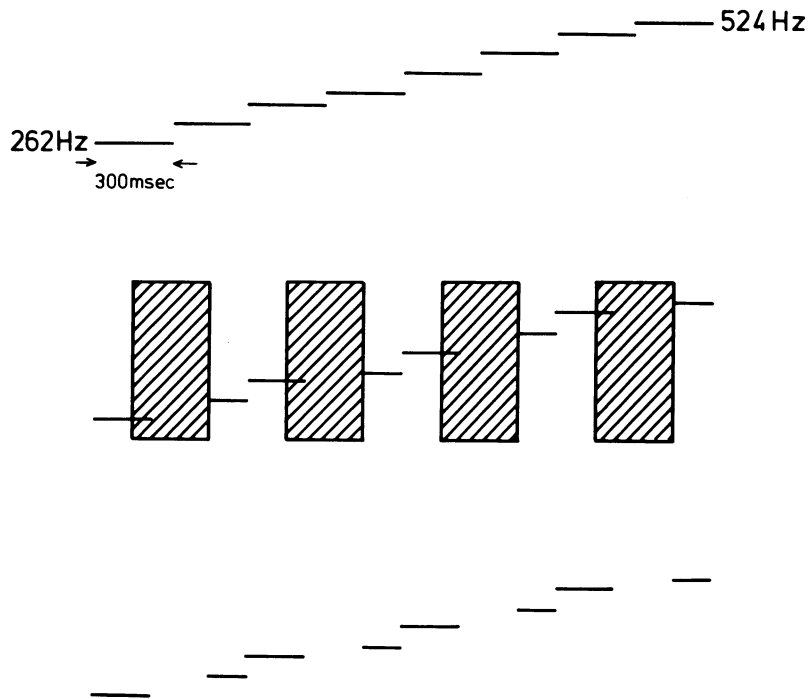


Fig 4. Illustration till Ljudexempel 8.

Av dessa iakttagelser kan vi dra slutsatsen att hörseln kan rekonstruera ljudmönster förutsatt att de felande delarna inte är längre än några hund-
ra msec. Observationen att kontinuitetseffekten fungerar också på ljud som varierar betydligt i tiden visar att fenomenet inte kan förklaras med peri-
fera hörselprocesser, utan centrala processer måste vara inblandade.

3. Samhörighet i uppfattning av tonföljder.

Ett annat exempel på kontinuitet uppträder i tonföljder. Successiva toner ger mycket starkare melodisk samhörighet om frekvensavståndet mellan

dem är litet än om det är stort. De perceptuella gränserna för detta samhörighetsfenomen utforskades nyligen av van Noorden (1975, 1977) och några av hans resultat skall presenteras här med hjälp av ljudexempel och kommentarer från den grammofonskiva som han fogade till sin doktorsavhandling*.

Ljudexempel 9. Om man alternerar 10 gånger per sek. mellan två toner som ligger ett halvtonsteg från varandra får tonföljden formen av en sammanhängande helhet, jfr Fig 5. Detta är ett exempel på samhörighet.

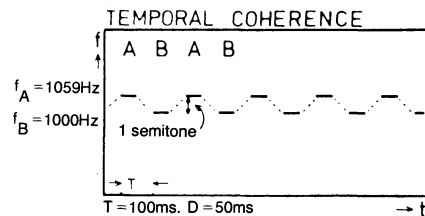


Fig 5. Illustration till Ljudexempel 9. (Efter van Noorden, 1975).

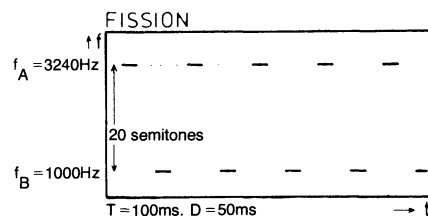


Fig 6. Illustration till Ljudexempel 10. (Efter van Noorden, 1975).

Ljudexempel 10. Om man alternerar 10 gånger per sek. mellan två toner som ligger exempelvis 20 halvtonsteg från varandra är det svårare att uppfatta en sammanhängande helhet (Fig 6). Man kan å andra sidan rikta sin uppmärksamhet mot räckan av höga toner; då ger de lägre ett intryck av ett slags bakgrund. Man kan också rikta sin uppmärksamhet mot räckan av de lägre tonerna. Detta är ett exempel på klyvning.

* Text och ljud återges med tillstånd av van Noorden och av Institute for Perception Research, Eindhoven, Holland.

Ljudexempel 11. Särskilt i långsamma tonföljder finns ett område av intervall där man kan uppfatta antingen samhörighet eller klyvning alldeles som man vill. Detta exempel består av en följd toner 7 halvtonsteg isär. Försök först att höra tonerna som en samhörande följd, och försök därefter höra följderna av höga toner och sist följderna av låga. Lyssnaren kan alltså rikta sin uppmärksamhet på olika delar av vad han hör.

Ljudexempel 12. Förutom fenomenen med samhörighet och klyvning finns fenomenet sammansmältning. Snabba tonföljder med små intervall låter som en oavbruten ton med modulerad frekvens, jfr Fig 7.

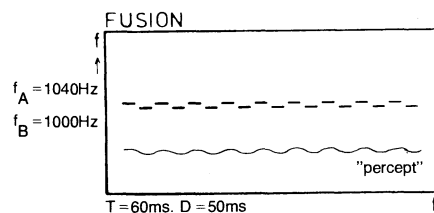


Fig 7. Illustration till Ljudexempel 12. (Efter van Noorden, 1975).

Ljudexempel 13. I följder med repetitionstider på mer än 2 sek. kan man knappast tala om samhörighet längre. De olika tonerna verkar fristående.

Ljudexempel 14. Samhörighet och klyvning demonstreras här i tonföljderna ABA ABA ABA, jfr Fig 8. B-tonernas tempo i denna följd är hälften av A-tonernas. B-tonerna ligger stilla i tonhöjd, medan A-tonerna startar ca en oktav ovanför B-tonerna. De rör sig sedan stegvis ned till ungefär en oktav under B och därefter upp igen. Följden av A-toner skär alltså B-tonföljden två gånger. Samhörighetsfenomenet uppträder i närheten av skärningspunkten och ger upphov till en "galopp"-rytm. Vid större intervall kan man höra klyvning; man kan rikta uppmärksamheten på B-tonerna med deras långsamma tempo och på A-tonerna med deras snabba tempo.

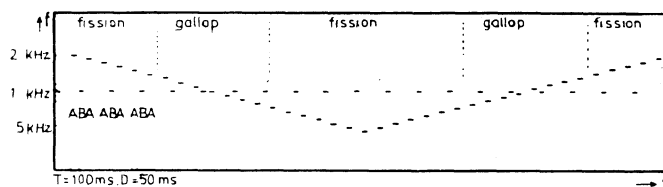


Fig 8. Illustration till Ljudexempel 14. (Efter van Noorden, 1975)

Fig. 9 visar det intervallområde där samhörighet och/eller klyvning kan uppfattas.

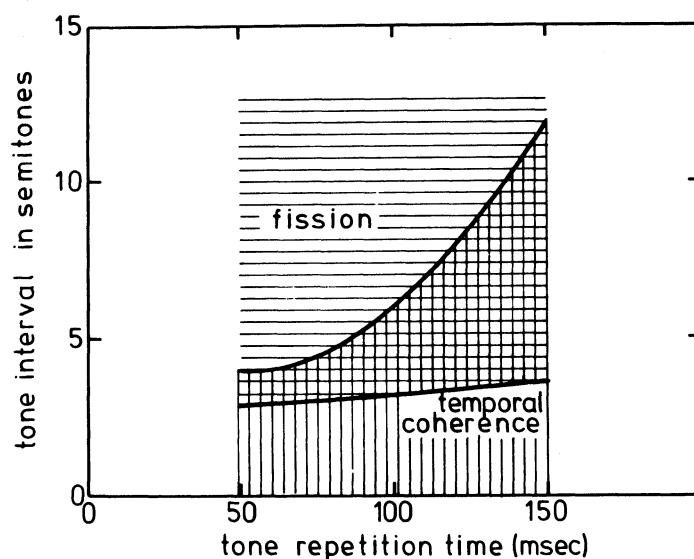


Fig 9. Den övre kurvan visar gränsen för samhörighet, den lägre gränsen för klyvning (medelvärden för tre lyssnare). För intervall mellan kurvorna kan lyssnarens uppmärksamhet riktas så att han upplever endera samhörighet eller klyvning. (Efter van Noorden, 1975).

Ljudexempel 15. Här hör man en slumpvis vald följd av toner med intervall på ett halvtonsteg. Tempot ökar gradvis till omkring 20 toner per sek. I inget tempo upplevs klyvning på grund av litet frekvensavstånd, halvtonsintervall. Man kan bara uppfatta samhörighet; när tempot är som högst t o m

sammansmältning. (Fig 10)

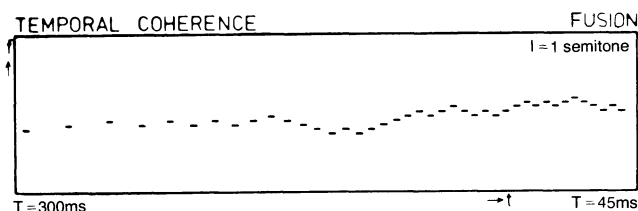


Fig 10. Illustration till Ljudexempel 15. (Efter van Noorden, 1975).

Ljudexempel 16. En slumpvis följd av toner presenteras här med intervall på ca 20 halvtonsteg och ett tempo på 20 toner per sek. Det går inte att uppfatta detta som en sammanhörande helhet även om ett cluster av toner kan höras här och där (Fig 11). Dessa cluster förefaller ofta vara orytmiska. När tempot sänks, kan man följa tonerna som en rytmisk tonföljd.

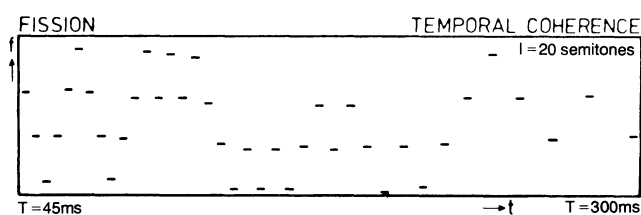


Fig 11. Illustration till Ljudexempel 16. (Efter van Noorden, 1975)

Ljudexempel 17. Kontrapunktteorin avråder från stäm korsningar, jfr Fig 12. Det är faktiskt svårt att följa en tonföljd genom en stäm korsning, som demonstreras i detta exempel. (Vanligen uppfattar man två stämmor, som kommer nära men inte korsar varandra, som pilarna i figuren visar.)

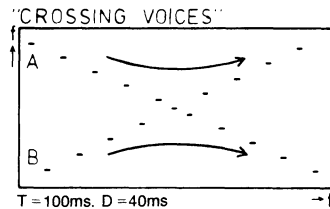


Fig 12. Illustration till Ljudexempel 17. (Efter van Noorden, 1975).

Ljudexempel 18. Här presenteras två sammanflätade melodier som ger en tonföljd. Tempot är 10 toner per sek., jfr Fig 13. I början känner man inte igen melodierna eftersom de korsar varandra hela tiden. Efter varje upprepning höjs tonhöjden för varannan ton i följden två halvtönsteg, så att klyvningseffekten till slut inställer sig och ger oss möjlighet att känna igen melodierna. (I figuren har notskriften för de två melodierna vänts åt olika håll.)

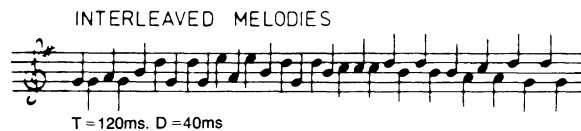


Fig 13. Illustration till Ljudexempel 18. (Efter van Noorden, 1975).

Detta föredrag präglas mera av kvalitativa resonemang om egenskaper än de tidigare. Ändå torde denna föreläsning ha visat att olika tidsaspekter på toner och tonföljder kan studeras genom användning av noga definierade ljudsignaler.

Referenser

- Dannenbring, G.L. (1974). Perceived auditory continuity with gliding frequency changes. Doctoral thesis, McGill University, Montreal.
- Houtgast, T. (1972). Psychophysical evidence for lateral inhibition in hearing. J. Acoust. Soc. Amer. 51, 1885-1894.
- Houtgast, T. (1974). Lateral suppression in hearing. Doctoral thesis, Free University, Amsterdam.
- Miller, G.A., and Licklider, J.C.R. (1950). The intelligibility of interrupted speech. J. Acoust. Soc. Amer. 22, 167-173.
- Noorden, L.P.A.S. van (1975). Temporal coherence in the perception of tone sequences. Doctoral thesis, Technological University, Eindhoven.
- Noorden, L.P.A.S. van (1977). Minimum differences of level and frequency for perceptual fission of tone sequences ABAB. J. Acoust. Soc. Amer. 61, 1041-1045.
- Thurlow, W.R. (1957). An auditory figure-ground effect. Amer. J. Psychol. 70, 653-654.
- Warren, R.M., Obusek, C.J., and Ackroff, J.M. (1972). Auditory induction: Perceptual synthesis of absent sounds. Science 176, 1149-1151.

En väg till nya konstruktioner av stränginstrument

av

Graham Caldersmith

Canberra, Australien, och Centrum för Talkommu-
nikationsforskning, Institutionen för talöverföring,
KTH, Stockholm

Den mest uppenbara och direkta vägen att studera och isolera skillnader mellan goda och dåliga stränginstrument är att mäta och jämföra egenskaperna hos många instrument, vilka tidigare har bedömts av erfarna musiker. Sådana studier utgör kärnan i tidigare undersökningar av stränginstrument. De har resulterat i praktiska anvisningar om hur fiolbyggare kan "finintonera" sina instrument medan de sätts samman så att instrumenten sannolikt blir bra. Att instrumenten blir utomordentligt bra kan däremot ännu inte garanteras (Hutchins 1967).

Det finns många andra sätt att försöka förstå och designa instrument. Det nya sättet för design och bygge av violinfamiljen som visas i fig 1 började med att följande fråga ställdes: Vilket gensvar skall resonanslådan ge till en exciterande kraft med harmoniska deltoner från en sträng för att ge någorlunda jämnstarka toner med liknande klang inom instrumentets hela tonomfång (Caldersmith 1978)? Bakom denna fråga ligger antagandet att en minimering av de ofrånkomliga ojämnheter i ljudstyrka och klangfärg inom ett instruments tonomfång är önskvärd för att göra spelningen lättare. Väljer man denna utgångspunkt behöver man inte försöka komma underfund med innebörden i de många termer som experterna använder för att beskriva instrumentegenskaper eller de ofta oklart definierade beskrivningar som "sonor, svarar lätt, attack, nasal, bärande, söt". Det är däremot rimligt att anta att den nämnda utgångspunkten för konstruktion kan förklara kvaliteter som "styrka (ljudlighet), fyllighet, briljans" genom att relatera dem till deltonernas styrka i den klingande tonen när denna produceras av instrumentet som svar på en någorlunda väldefinierad drivkraft med harmoniska deltoner från strängen.

Själva hypotesen är mycket kortfattat att man får ett instrument med hygglig jämnhet i styrka och klangfärg, om resonanslådan kan uppta vibrationsenergi från strängarna och utstråla en del av denna energi någorlunda effektivt över instrumentets hela tonomfång via någon eller ett par av de tre lägsta deltonerna (Caldersmith 1977). Med andra ord har vi utgått från antagandet att ett instrument blir jämnt i både ljudstyrka och klangfärg om den summerade ljudenergin - hos de tre lägsta deltonerna är densamma på alla toner. Hypotesen bygger på förutsättningen att det är de lägsta deltonerna som blir starkast när en sträng knäpps eller spelas med stråke samt vidare att man kan kompensera effekten på ljudstyrka och klangfärg från ett svagt gensvar för grundtonen genom starka gensvar för endera av eller båda närmaste två högre deltonerna. I praktiken betyder det sagda att resonanslådans resonansfrekvenser skall justeras att uppfylla detta villkor. Vidare skall resonanserna exciteras effektivt av vibrationskrafterna från strängarna i excitationpunkterna (på stallet) och ge en effektiv ljudutstrålning (några av de lägre resonanserna uppfyller ej det sista villkoret). För en något utförligare beskrivning av stränginstrumentens fysik, frekvenssvar, resonanser etc. hänvisas till Jansson (1977).

Resonanslådans gensvar, dvs dess frekvenssvar, visas i fig 2. Frekvenssvaret avser violinen till höger i fig 1. Det har registrerats på följande sätt. Resonanslådan sätts i vibration av en vibrationskraft som har konstant styrka men långsamt ökande frekvens och som anbringas vid den vänstra stallfoten. På ca 2 m avstånd från fiolens lock registrerar en mikrofon hur starkt det resulterande ljudet blir. Läsaren kan se att åtminstone i lågfrekvensområdet, där de få resonanserna (topparna) kan justeras till olika frekvenser och vibrationsfördelning (s k modgeometri), föreligger som regel ett starkt gensvar vid två resp. tre gånger frekvensen för ett svagt gensvar. Dessa regioner har markerats med två parallella resp. ett tjockt streck i fig 2.

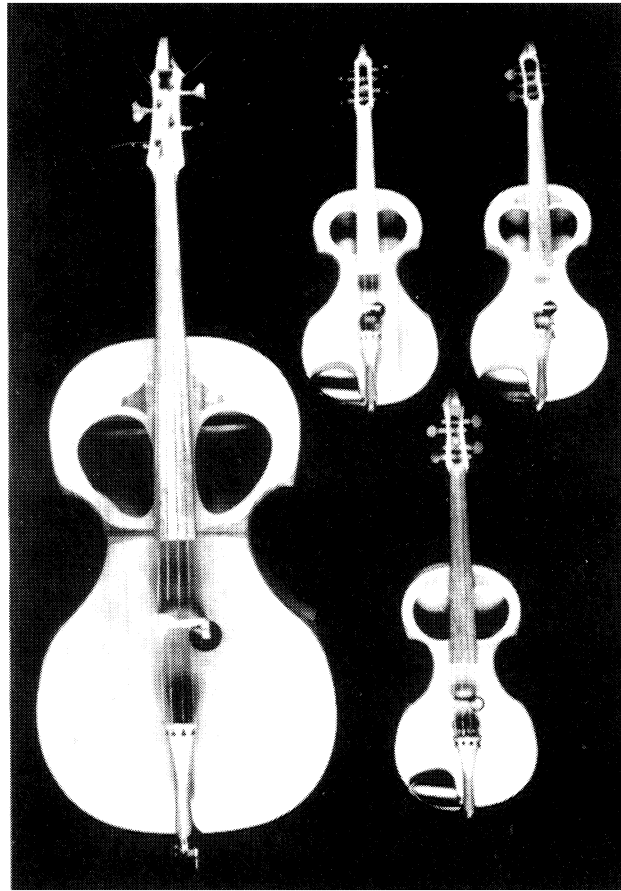


Fig 1. Den nya violinfamiljen bestående av två violiner, en altfiol och en cello med konventionella sträng- och halslängder.

Den ovanliga konstruktionen av dessa instrument utvecklades från en form med så enkla fysikaliska egenskaper att man kan förstå dem och således även manipulera dem. Formen valdes också med tanke på effektiv ljudutstrålning. Det extra ljudhålet omkring den stumma ljudpinnen under den högra stallfoten (under E-strängen) har två funktioner. Dels överförs vibrationsenergi från strängen till locket enbart via en vickningsrörelse hos stallet Dels gör den också lockets resonansgenskaper enklare än den traditionella violinens resonansgenskaper. Locket har gjorts relativt lätt för att reducera friktionsförlusterna i lockets material. Det har vidare försetts med förstärkningslister på undersidan, vilka möjliggör justering av de få viktiga lägre resonanserna.

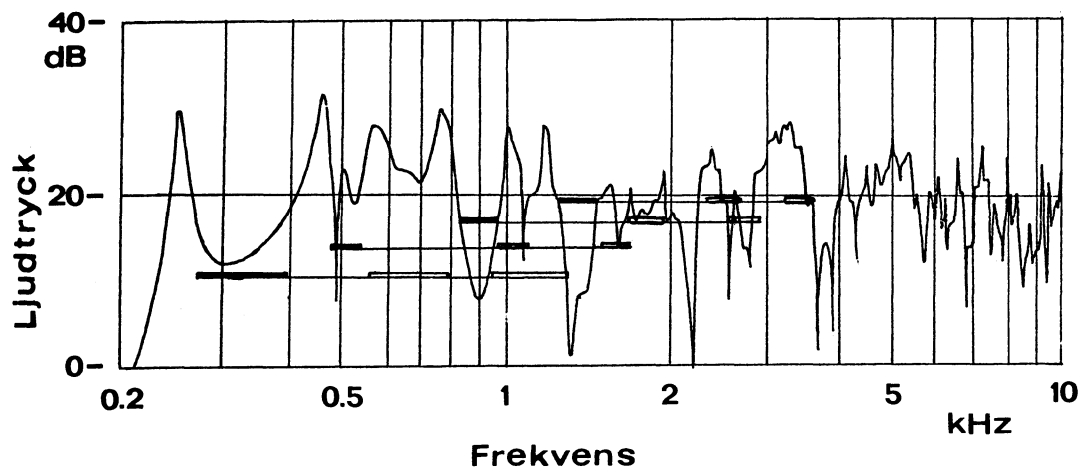


Fig 2. Frekvenssvar för den ena violinen.

Naturligtvis är det också många flera överväganden som ligger bakom konstruktionen av dessa instrument, och vi har tvingats att kraftigt förenkla de egenskaper som rekommenderas för ett gott instrument. Meningen med en sådan här konstruktion är att den ger ett fysikaliskt väldefinierat instrument, vars egenskaper omedelbart kan uppfattas och fastställas av musikerna som spelar på instrumenten liksom av auditoriet som lyssnar. De upplevda skillnaderna mellan dessa och de traditionella instrumenten ger oss därigenom inblick i vilka kvaliteter och karakteristika som är önskvärda eller icke önskvärda i konventionella instrument med tanke på konstruktion. Därför kan dessa experimentinstrument användas både som verktyg för att pröva hörbara och fysikaliska prestanda för normala instrument, och för att pröva hypoteser avseende resonansavstämning, excitation- och ljudutstrålningseffektivitet. Instrumenten kan också påvisa intressanta möjligheter att modifiera traditionella instrumentkonstruktioner. De kan också bilda utgångspunkt för den intressanta historiska frågan huruvida den traditionella utformningen av violinen och gitarren verkligen representerar den bästa möjliga designen för dessa, särskilt med hänsyn tagen till den enorma komplexitet av egenskaper hos det ljud som utstrålas från resonanslådorna och variationerna i musiksmak.

Men hur klingar då dessa violiner som alltså utmärks av att summan av de tre lägsta deltonernas ljudenergi är ovanligt konstant inom hela tonomfånget? De flesta lyssnares första reaktion är "Men det låter ju som en fiol!" Alla musiker märker dock omedelbart stora skillnader i klang och "känslan" av dess spelegenskaper. Ord som "inåtvänd, lådaktig, sonor, kraftfull, rå" brukar användas för att beskriva klangen i deras lägre tonomfång och "instängd, silverlik, attraktiv, ljus" för att beskriva det övre tonomfånget (A- och E-strängen). Musikaliskt erfarna lyssnare är klart medvetna om en ovanligt stor styrka i det lägre tonomfånget men har något delade meningar om kvaliteten på klangfärgen. De flesta lyssnare uppskattar tonen i det högre tonomfånget men med någon reservation för bristande "bärighet". Läsaren kan själv bilda sig en uppfattning om instrumentens egenskaper i de medföljande ljudexemplen.



Fig 3. Den nya gitarren.

Experimentgitarren av klassisk modell visas i fig 3. Den konstruerades för att undersöka effekten av en planmässig avstämning av resonanser och möjligheten att öka ljudutstrålningen från de tre lägsta resonanserna i ett lätt lock med mycket osymmetriskt utplacerade förstärkningslister. (Caldersmith 1977). Lockets vikt var 100 g vilket utgör endast ca hälften av det normala. Den låga vikten kunde uppnås genom att göra locket endast 1,5 mm tjockt och genom att med en mycket kraftig förstärkningslist avgränsa dess vibrerande del till nedanför ljudhålet. Gitarrens botten gjordes mycket styv och tjock så att den skulle påverka gitarrens egenskaper föga. Därigenom förenklas den fysikaliska funktionen av instrumentet. Av flera orsaker kunde den önskade resonansavstämningen i gitarren inte helt uppnås - delvis genom lockets lätthet. Men klangen från dess E-, A- och D-strängar, upplevdes som fullödiga och rika av gitarrister, medan diskantsträngarna inte ansågs ha den högklassiska spanska gitarrens "bett" och tonklarhet. Dessa kännetecken har observerats tidigare för gitarrer med lätta lock och beror troligen på en dålig ljudutstrålning eller svag excitering i mellanfrekvensområdet (500-2000 Hz).

De här presenterade instrumenten är de första som är gjorda efter det nya konstruktionssättet. Ljudexemplen ger några prov på hur de klingar. De första reaktionerna från spelare och lyssnare uppmuntrar till fortsättning av experimenten med en förfinad design.

Referenser

- Caldersmith, G. (1977): Low Range Guitar Function and Design. Catgut Acoustical Society Newsletter No. 27, pp. 19-25.
- Caldersmith, G. (1978) (kommande): A New Family of Fiddles, Catgut Acoustical Society News-letter.
- Hutchins, C.M. (1967): Founding a Family of Fiddles, Physics Today 20, No. 2, pp. 27-38.
- Jansson, E.V. (1977): Timbre and String Instruments, pp. 93-109 i Music, Room and Acoustics, Kungl. Musikaliska akademien.

Analyser av fiol- och gitarrklang

av

ERIK JANSSON, Centrum för Talkommunikations-
forskning, Institutionen för Talöverföring, KTH, Stockholm
och ALF GABRIELSSON, Psykologiska institutionen
vid Uppsala universitet

Vid ett tidigare seminarium talades det om musikinstrumentens akustik och ljudutstrålning (Jansson 1977 a, b). Därvid presenterades översiktligt funktion och tonegenskaper för olika instrumentfamiljer. Här ska vi begränsa oss till fiolen och gitarren och speciellt deras klangliga egenskaper. Vi ska försöka besvara två frågor: 1) Vilka egenskaper karaktäriserar tonen hos fiolen och gitarren? och 2) Hur ska dessa egenskaper vara i ett gott instrument? Svaren på frågorna skall ges genom presentation och demonstration av a) allmänna klangliga egenskaper och b) kvalitetsbestämmande egenskaper. Först lämnas en redogörelse för fiolens, sedan för gitarrens klangliga egenskaper. Vid våra mätningar av dessa egenskaper har sådana metoder eftersträvat som så nära som möjligt efterliknar hörselns egenskaper. På så sätt blir det lättare att jämföra akustiska analysresultat med lyssnarens upplevda egenskaper.

I. Analyser av fiolklang.

Vid det tidigare seminariet presenterades en nyutvecklad analysmetod med långtidsspektra lämplig för analys av fioler. Metoden har nu prövats på ett större material. Låt oss demonstrera metodens styrka med ett exempel från förra seminariet. Klangen av ett instrument är oberoende av vilken musik man spelar så länge spelsättet är likartat. Således bör två långtidsspektra bli ungefär lika om det ena avser en skala och det andra ett musikstycke t ex ur en svit av Bach spelade på ett och samma instrument. De två ljudexemplen återfinns i den tidigare seminarieuppsatsens ljudillustra-

*) Till alla som medverkat och hjälpt till vid våra undersökningar ber vi att få framföra ett varmt tack. Denna artikels andra hälft beskriver delar av ett forskningsprojekt som bedrivs i samarbete med AB Herman Carlson Levin. Projektet stöds ekonomiskt av Styrelsen för Teknisk Utveckling.

tioner (Jansson 1977 a). Motsvarande två långtidsspektra visas i Fig 1. Men innan vi analyserar diagrammen, låt oss förklara hur de är uppritade. Den vänstra ramkanten ger en styrkeskala graderad i dB. Den undre ramkanten är graderad i frekvens omräknad till tonhöjds måttet Bark, som bättre stämmer med hörselns egenskaper. För att kunna förstå Barkskalan har även en frekvensskala graderad i kHz utritats. Vidare har den vanliga tonhöjdsskalan inritats med fiolens lösa strängar markerade med pilar. Låt oss så tolka diagrammet. Den streckade linjen (Bachsviten) och den heldragna linjen (skalan) följer nära varandra. Detta visar att diagrammen ger nära samma akustiska bild av instrumentet oberoende av musikvalet.

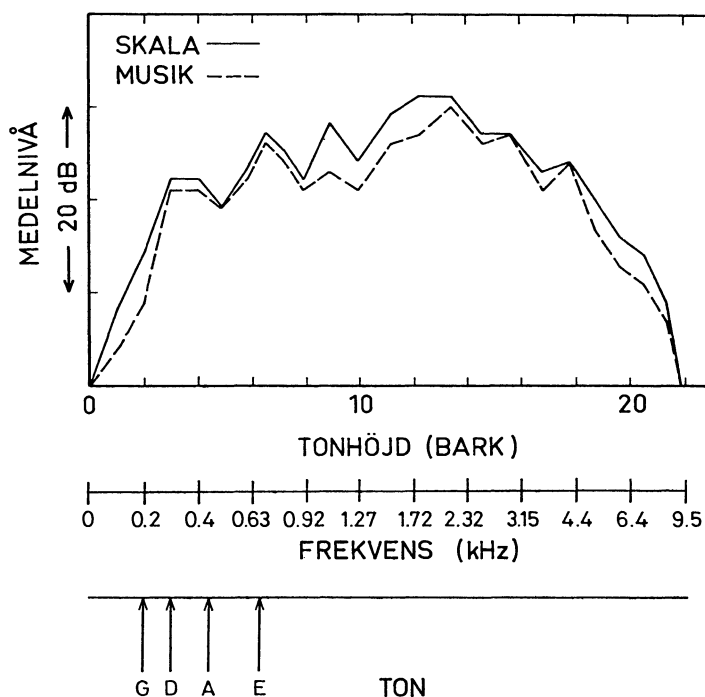


Fig 1. Långtidsspektrum av en skala (heldragen linje) och ett musikstycke (streckad linje) spelat på en Violino Grande.

Total tidslängd 100 sek

2 sek 10 sek

Fig 2. Avsnitt av Sonata da Camera a Tre, Op. 1, nr 8 av A. Vivaldi, total tidslängd ca 100 sek, spelad détaché och forte för analys med långtidsspektrum i fig 3.

Med hörseln kan vi mycket snabbt skapa oss en bild av klangen. Gäller detsamma ett långtidsspektrum (Jansson och Sundberg 1975)? Musikstycket i fig 2 spelades in på band. Varje ton spelades forte, détaché och med tempot två toner i sekunden. Därefter uppritades långtidsspektra av de första 2, 10 och 20 sekunders musik och av hela musikstycket, se fig 3 (bortsett från att frekvensskalan i Fig 3 är graderad i kHz, är diagrammen gjorda på samma sätt som i Fig 1). Fig 3 visar att långtidsspektra redan efter två sekunder ger en viss likhet, efter 10 sekunder nära nog perfekt likhet och efter 20 sekunder så god likhet som vi över huvud kan hoppas på med långtidsspektra av 100 sekunders musik. Man kan således säga att långtidsspektrum redan efter någon sekund ger en reproducerbar akustisk bild av instrumentet, d v s ungefär lika snabbt som hörseln ger oss en bild av klangen. Långtidsspektra tycks således vara en metod lovande för analys av ett större material.

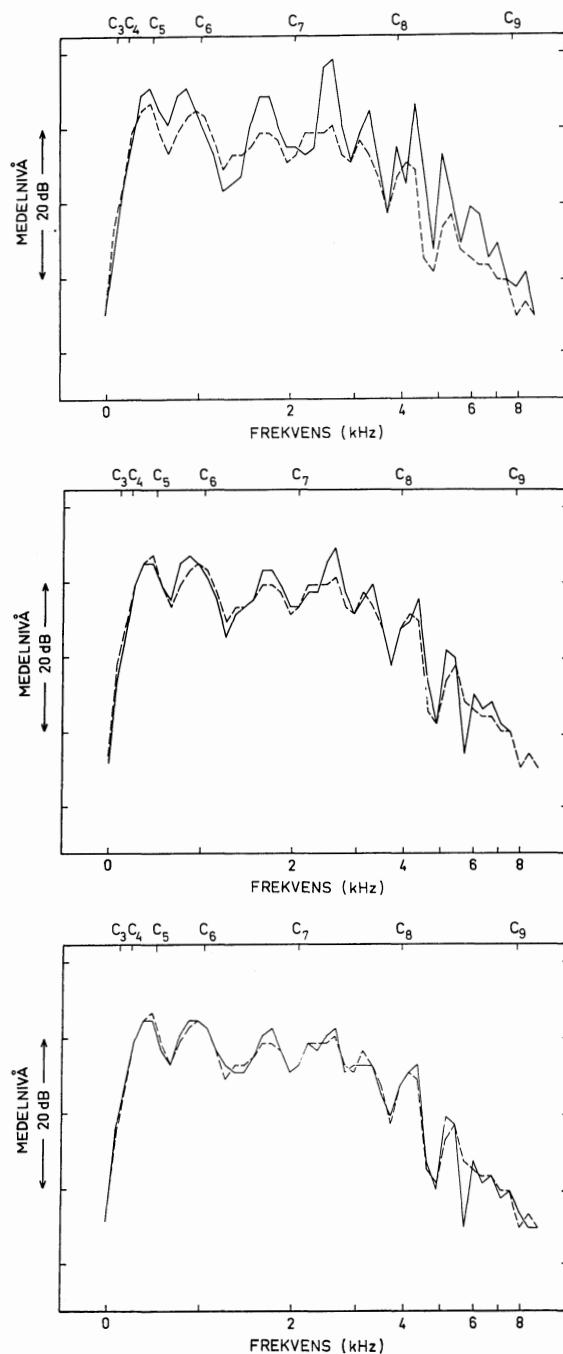
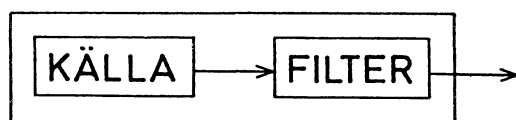


Fig 3. Långtidsspektrum av spelad musik enl. fig 2. Streckad kurva avser hela avsnittet (100 sek) i alla tre figurerna. Heldragen kurva i översta figuren gäller de första 2 sek av samma avsnitt, mellersta de första 10 sek, och den understa de första 20 sek. (från Jansson och Sundberg 1975, Acustica).

Hur ska fioltonen uppmätas?

Men innan vi går in på detta, låt oss tänka igenom lite mer i detalj hur och vad man bör mäta (Jansson 1978). Ofta betraktas fiolen som bestående av två delar: strängarna och resonanslådan. När fiolen spelas sätts strängarna i vibration. Strängvibrationerna fortplantas till, omvandlas i (filtreras) och strålas ut från resonanslådan och blir därvid de fioltoner vi hör. Ett enkelt schema som beskriver denna process visas i fig 4; källan är strängvibrationerna och filtret är resonanslådan. Vid akustiska mätningar av en fiols egenskaper mäter man resonanslådans (filtrets) egenskaper och säger att detta är fiolens egenskaper.



MUSIKINSTRUMENT

Fig 4. Enkel källa-filtermodell av ett musikinstrument.

Men detta är ej hela sanningen - instrumentets egenskaper är strängarnas plus resonanslådans. Lite eftertanke säger också att man inte kan bortse från spelaren och rummet. Ett mera komplett schema för instrumentet ges i fig 5. Spelaren kontrollerar med stråken ljudkällan, strängen och känner i stråken hur strängen svarar - d v s det föreligger en återverkan från ljudkällan till spelaren. En del av spelaren bör således räknas till instrumentet. Instrumentet strålar ut tonerna som ljud i rummet. Spelaren lyssnar till dessa toner och kan anpassa spelsättet och ge tonerna de egenskaper han önskar. Lyssnarna befinner sig på en annan plats i rummet. Det är därför långt ifrån självklart var i rummet instrumentets egenskaper ska uppmätas. Ska man uppmäta dem i närheten av spelaren eller på en lyssnarplats? Låt oss göra en enkel jämförelse. I fig 6 visas långtidsspektra av samma musik inspelad

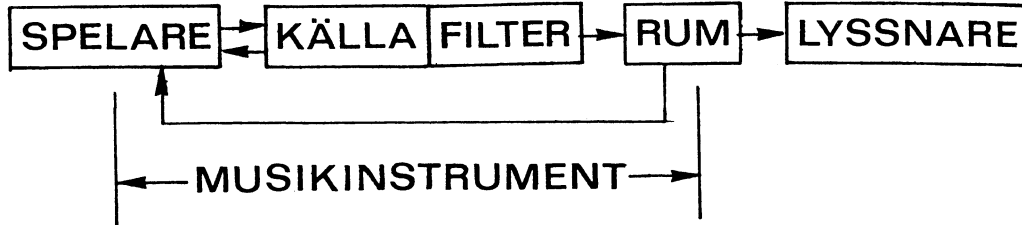


Fig 5. En mer komplett källa-filtermodell av ett musikinstrument.

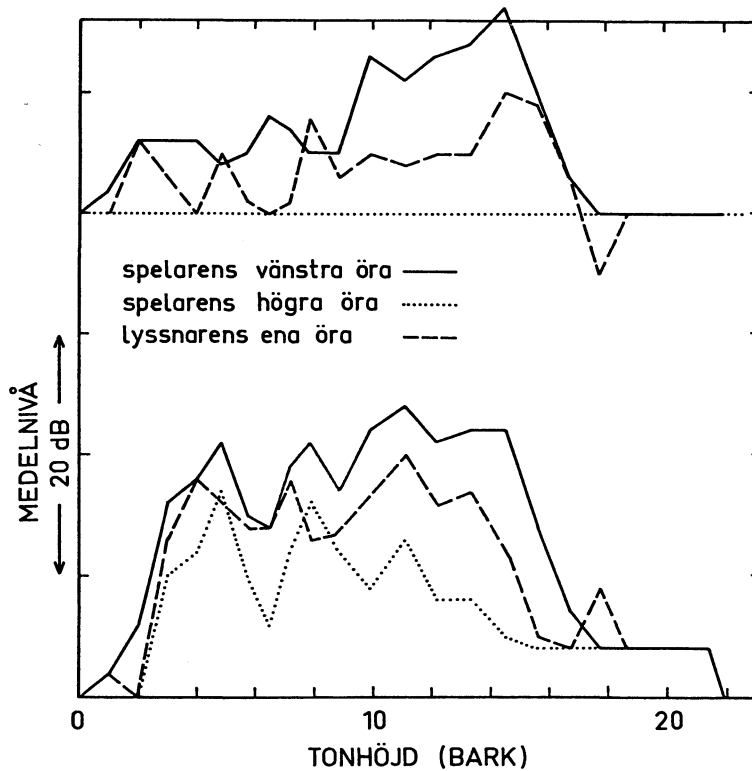


Fig 6. Långtidsspektra av inspelningar med mikrofon i en spelares och en lyssnarens öron, jfr Ljudexempel 1 (från Jansson 1978, Svensk Tidskrift för Musikforskning).

dels i spelarens båda öron, dels i ena örat på en lyssnare. Vi ser att vid låga frekvenser är ljudet måttligt olika. Vid högre frekvenser är ljudet däremot mycket starkare i spelarens vänstra öra än i det högra. I lyssnarens öra ligger ljudets nivå emellan dessa extremer.

Låt oss få demonstrera med Ljudexempel 1 hur olika ett kort musikstycke kan klinga i en spelares vänstra och högra öra. Först kommer inspelningen från vänstra örat. Alla torde märka att tonerna som når det vänstra örat är betydligt starkare. Vidare är rummets inverkan påtaglig - i viss mån beroende på att inspelningen gjordes i ett rum med påtaglig efterklang.

Med den här bakgrunden är det troligt att fiolen låter olika för spelaren och för lyssnaren ute i rummet. Men redan spelaren märker ett inflytande av rummet på fiolklängen, trots att han är mycket nära instrumentet.

Men även litet längre bort från fiolen klingar ljudet mycket olika i olika riktningar. I princip gäller att vid låga frekvenser strålar ljud ut ungefär lika starkt i alla riktningar. Vid höga frekvenser strålar ljudet däremot starkare i vissa bestämda riktningar. En analys av de olika riktningarnas egenskaper visas i fig 7. Vi ser att fiolen, relativt riktningen till höger om spelaren, ger a) i halsens riktning en högre nivå mot högre frekvenser b) bakom spelaren en mycket lägre nivå särskilt för höga frekvenser och c) till vänster om spelaren en lägre nivå.

Låt oss lyssna på denna effekt. Ljudexempel 2 är inspelat i ett ekofritt rum, där rummet inte påverkar ljudet. Mikrofonens placering är i tur och ordning 1a) till höger om spelaren, 1b) i halsens riktning, 2a) återigen till höger om spelaren, 2b) bakom spelaren, 3a) till höger och 3b) till vänster om spelaren. Av diagrammen och av lyssningen kan man dra slutsatsen att som solist ska man sikta på publiken med snäckan för att höras bäst. Vidare är det tydligt att när andrafiolerna placeras till höger om dirigenten så klingar de tystare och mindre briljanta än sina kamrater i första fiolstämman.

7 a.

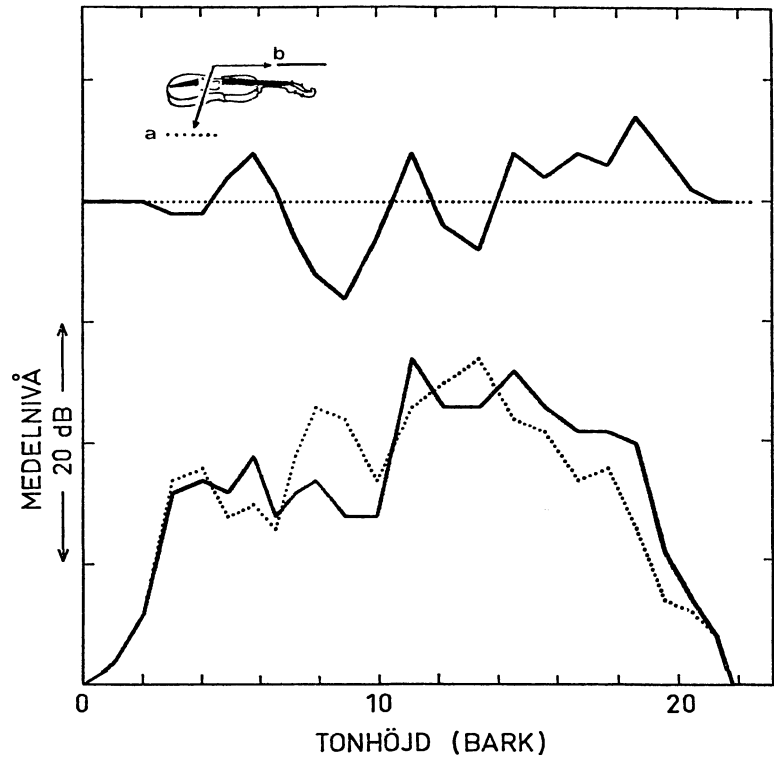
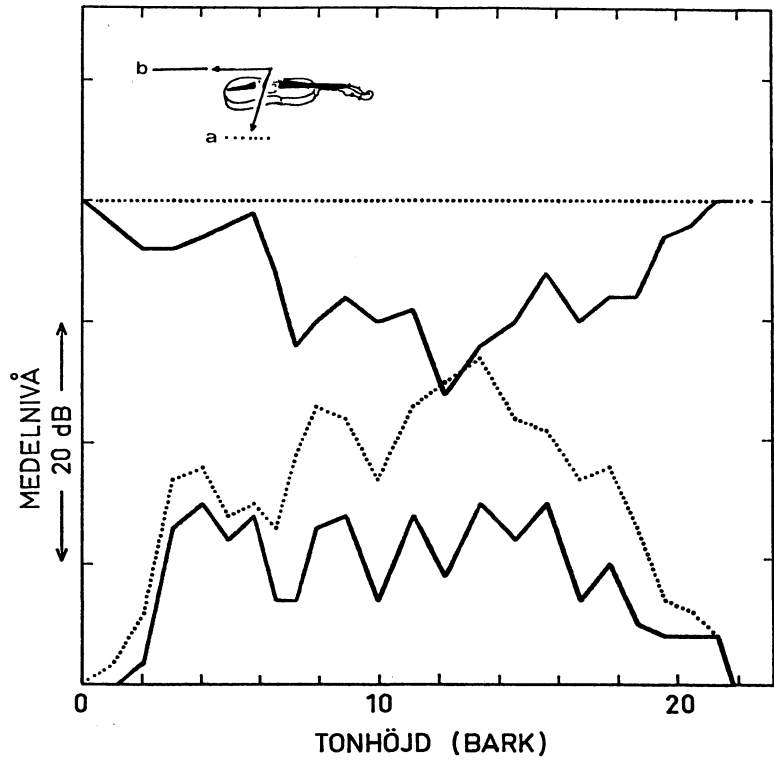
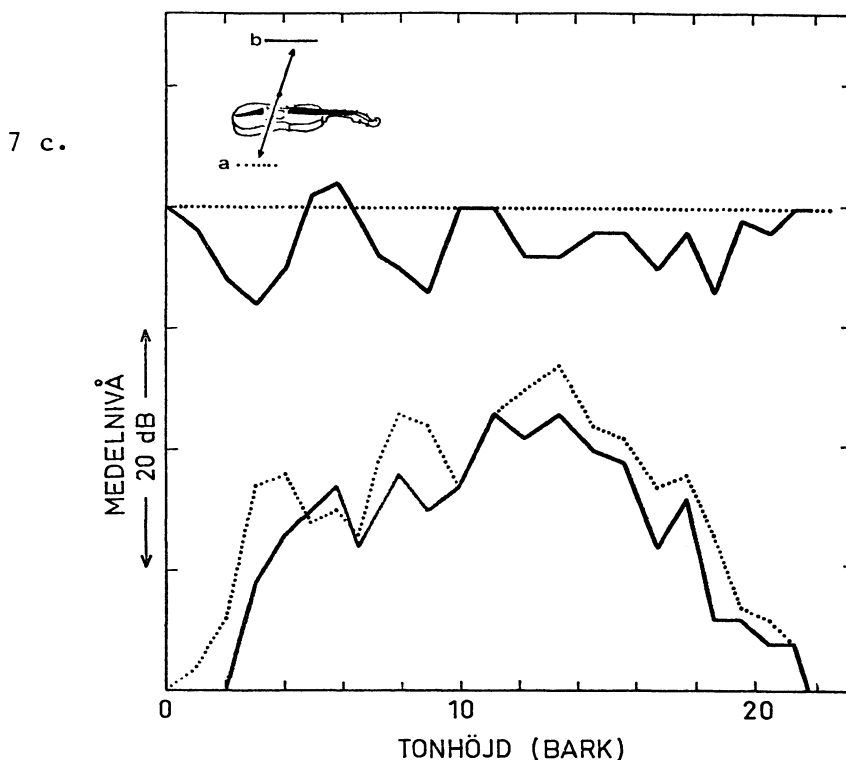


Fig 7. Långtidsspektra av musik (ur första fiolstämman av J.S. Bach: Brandenburgerkonsert no. 3, BWV 1048), inspelningar med mikrofonen i fyra olika riktningar, jfr Ljudexempel 2 (från Jansson 1978, Svensk Tidskrift för Musikkforskning).

7 b.





Det föreligger således vissa svårigheter med att välja mikrofonpositionen för analys av en fiol. Ska man analysera det spelaren hör eller det lyssnaren hör och i vilket rum? Ett mättekniskt knep är att använda ett sk efterklangsrum i vilket mikrofonen tar upp ljudet från fiolen i alla riktningar. Fig. 1, utgjorde ett exempel på detta.

Vilka egenskaper ska en fiol ha?

Metoden med långtidsspektra har vi använt vid en större undersökning av tonkvalitetsbedömda fioler (Gabrielsson och Jansson, 1976). Drygt tjugo violiner lånades från Nordisk Violinbyggares förenings utställning 1975. Alla 103 fiolerna i denna utställning hade givits tonkvalitetspoäng. De åtta med de högsta tonkvalitetspoängen jämte ett representativt urval av övriga med lägre poäng utvaldes. Inspelningar av dessa gjordes i ett efterklangsrum tillsammans med två gamla italienska violiner, en från Cremona och en från Neapel. För alla dessa instrument gjordes inspelningar av heltonsskolor över tre oktaver. Därefter upptogs och lagrades långtidsspektra för vart och ett av instrumenten för senare analys med datorn.

Och vad visade då analysen? Låt oss börja med den första och enklaste analysen för att se alla typiska skillnader som föreligger mellan de åtta instrumenten med högsta tonkvalitetspoäng och de sju med lägsta, fig 7. I genomsnitt är skillnaderna små. Trots detta tycks skillnaderna peka i rätt riktning, ty hyfsad korrelation erhöles mellan de givna tonkvalitetspoängen och ett slags kvalitetspoäng som beräknades från skillnaderna i långtidsspektra mellan gruppen av de åtta med högsta och gruppen av de sju med lägsta tonkvalitetspoängen (korrelationskoefficient = 0,8). Av detta och av skillnaderna i långtidsspektra i fig 7 kan vi dra slutsatsen att hög nivå är bra vid låga och medelhöga frekvenser, medan låg nivå är fördelaktigt vid 10 Bark och de högsta frekvenserna.

Ett annat enkelt sätt att analysera resultaten är att studera hur olika frekvensområden korrelerar med tonkvalitetspoängen. Därigenom får man fram vilka delar av spektrum som är viktiga, och om hög eller låg nivå är önskvärd i dessa. Resultatet av en sådan analys visas i fig 8, vilken som synes rätt nära liknar fig 7, även om avvikelser från nollinjen är större. Figuren visar att för låga och medelhöga Barkvärden föreligger en påtaglig positiv korrelation mellan hög tonkvalitet och hög nivå, d v s höga nivåer i dessa regioner tycks höja tonkvaliteten. För 10 Bark och de högsta Barkvärdena finns en påtaglig negativ korrelation, d v s höga nivåer i dessa regioner tycks dra ned tonkvaliteten.

I ett av de föregående föredragen vid detta seminarium har Reinier Plomp visat hur mer avancerade metoder som multidimensionell skalning kan användas för att utvärdera resultat som t ex långtidsspektra av våra tjugo violiner. Vi har tillämpat sådana metoder av några olika varianter. På så sätt har vi kunnat tillskriva våra resultat i olika sammanfattande faktorer. En lösning som nära nog erhöles i samtliga fall återfinns i fig 9. I figuren har de fem faktorerna, en per rad, ritats som avvikelser från den prickade nollinjen. De Barkregioner som är utslagsgivande för de olika faktorerna har skuggats. De tre första faktorerna är lättast att tolka; faktor 1 är en lågfrekvensfaktor, faktor 2 är en högfrekvensfaktor och faktor 3 en mellanfrekvens-

faktor. En vidare analys visar att höga nivåer i skuggade områden är gynnsamma för faktor 1 (bortsett från 9 Bark) liksom för faktor 3 och att låga nivåer i skuggat område är gynnsamma för faktor 2.

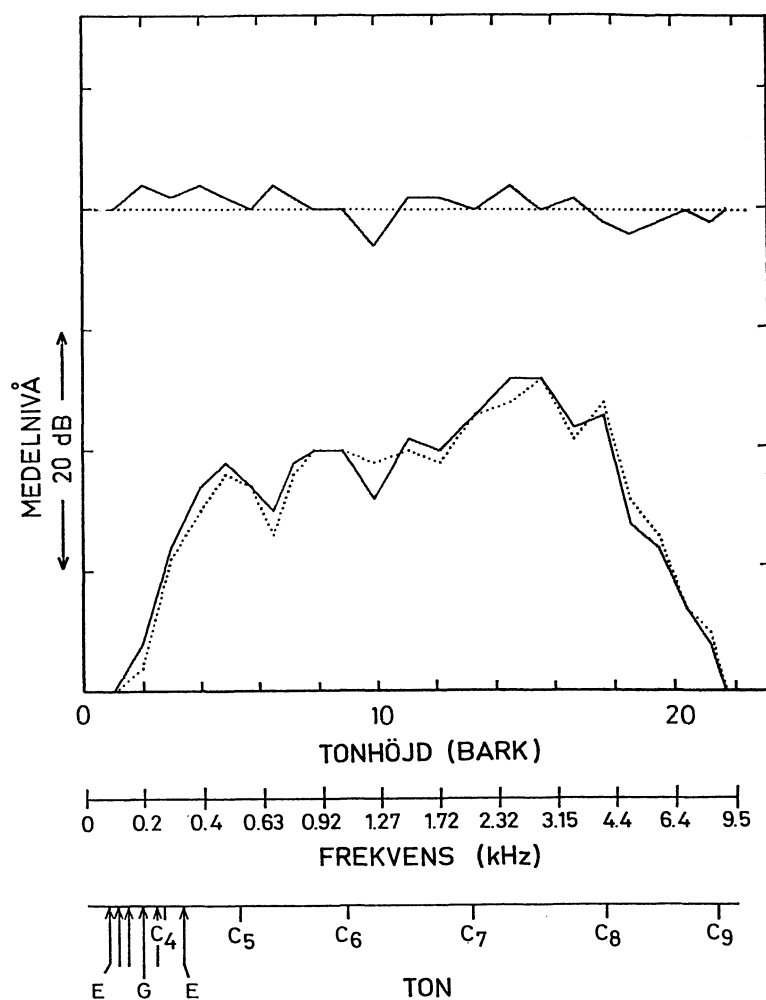


Fig 8. Medelvärde av långtidsspektra för de åtta violinerna med högsta (heldragen linje) och de sju med lägsta (prickad linje) tonkvalitetspoäng. Den övre delen av figuren visar skillnaden mellan dessa två spektra (från Gabrielsson och Jansson, 1976).

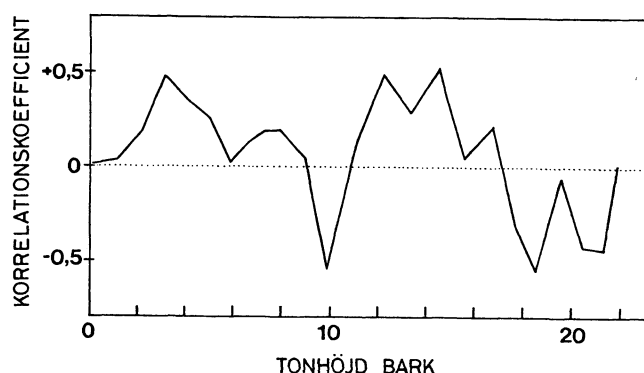


Fig 9. Olika frekvensområdens korrelation med givna tonkvalitetspoäng (från Gabrielsson och Jansson 1976).

Låt oss även se hur de olika enskilda fiolerna placerar sig med avseende på de olika faktorerna, fig 10. Utefter den horisontella skalan visas spridningen av fiolernas position inom var och en av de olika faktorerna, som har markerats utefter den vertikala skalan. Vi ser att variationerna mellan olika spelningar på en och samma violin är betydligt mindre än variationerna mellan de olika violinerna. Vidare intar Cremona- och Neapel-violinerna extremvärden i de tre första faktorerna endast i ett av sex möjliga fall. En möjlig tolkning är att de bästa instrumenten erhålls genom en balans mellan olika faktorer och ej nödvändigtvis genom maximum- eller minimumposition i de olika faktorerna.

Fig 7 visade att den genomsnittliga skillnaden i långtidsspektra mellan de åtta fiolerna med högsta resp. de sju fiolerna med lägsta poäng var mycket liten. Om vi istället jämför två enskilda instrument kan skillnaderna bli betydande. Fig. 11 visar skillnaderna mellan de två instrument som var mest olika med avseende på faktor 3. Mellan enskilda instrument kan alltså föreligga påtagliga differenser som är av helt annan storleksordning än skillnaderna mellan instrumentgrupperna i fig 7. De inspelade skalorna kan även användas till lyssningsexperiment och borde därigenom öppna vägen för direkta jämförelser mellan långtidsspektra och upplevd tonkvalitet. Pilotexperiment

visade emellertid att vid kraftig efterklang är det svårt att höra skillnader i tonkvalitet t o m av den storlek som i fig 12. Läsaren kan pröva detta genom att lyssna till Ljudexempel 3 (fiol motsvarande heldragen linje först).

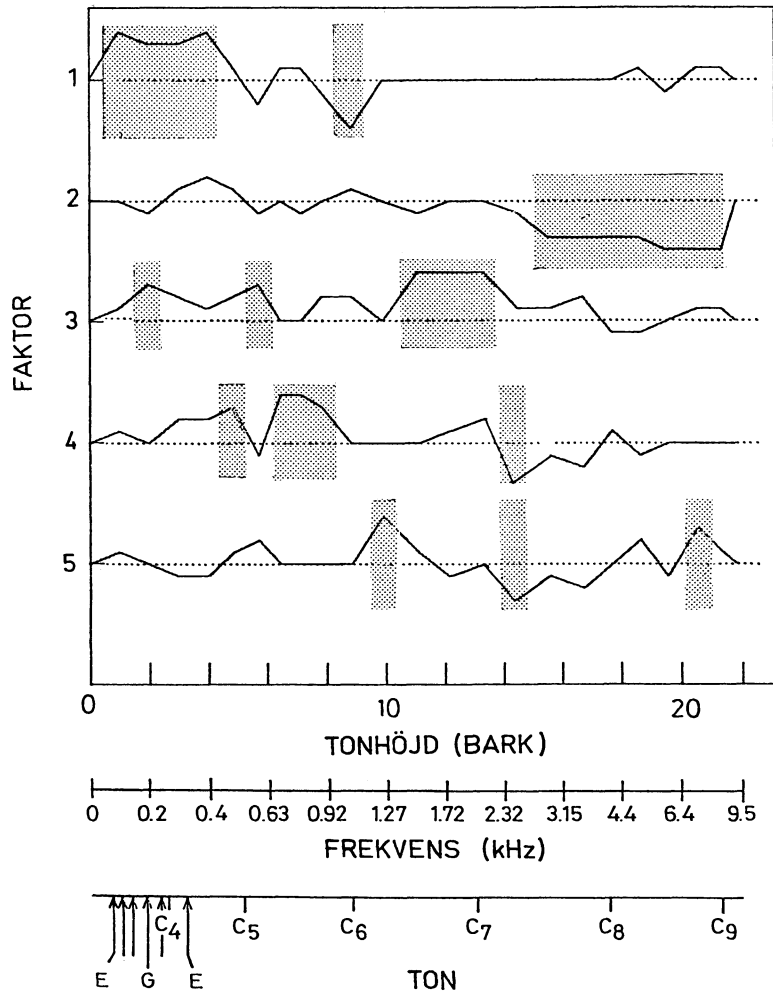


Fig 10. Faktorladdningar för faktorerna 1 till 5, horisontella linjer, för olika frekvensområden (horisontella axeln). Skuggade delar markerar faktorladdningar $\geq 0,50$ (från Gabrielsson och Jansson, 1976).

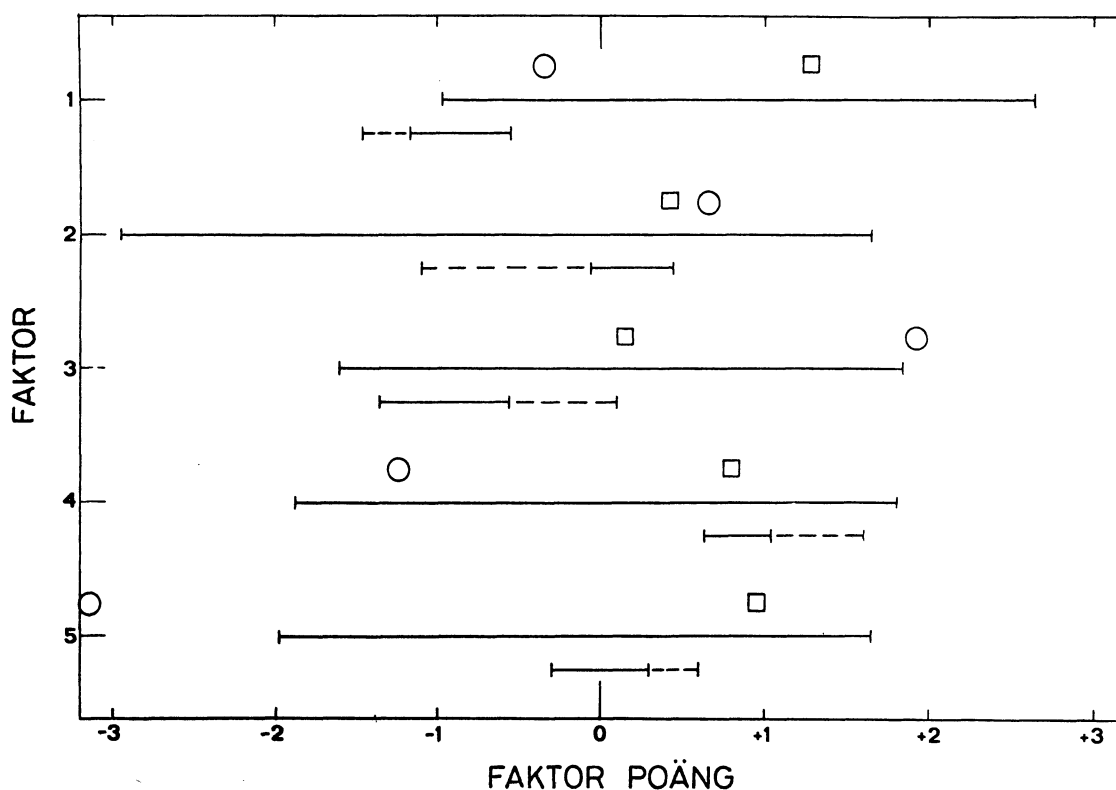


Fig 11. Spridning i faktorpoäng från faktoranalysen av tjugosju violiner för faktor 1 till 5. Spridningen för alla tjugosju violinerna är markerad med heldragna linjer. De delvis streckade och delvis heldragna linjerna markerar spridningen för åtta spelningar på en och samma violin (den streckade delen avser den första spelningen relativt de sju övriga). Faktorpoäng för en Cremona-violin har markerats med cirklar och en Neapel-violin med kvadrater (från Gabrielsson och Jansson, 1976).

Låt oss avsluta med Ljudexempel 4 och visa att analys av fiolklang i breda frekvensområden är väl motiverad (Jansson 1978). Exemplet ger därtill inblick i olika frekvensområdens betydelse för klangen. Exemplet består av ett och samma Bach-stycke som upprepas fyra gånger. Varje gång hör vi först fem sekunder normalt, därefter fem sekunder med alla ljudkomponenter ovanför en viss frekvens bortskurna (lågpassfiltrering), återigen fem sekunder normalt, därefter med ljudkomponenter under samma frekvens

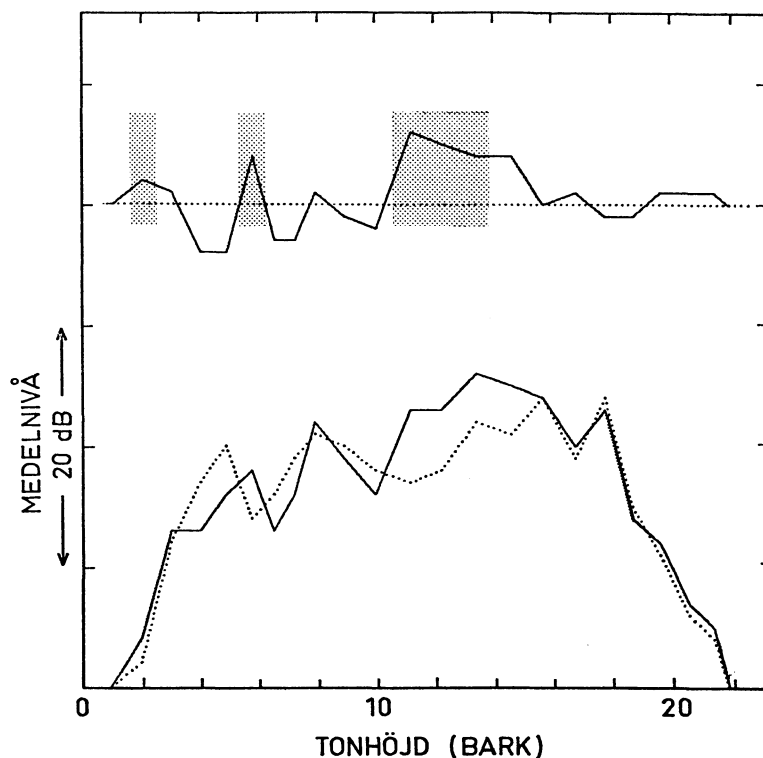


Fig 12. Två långtidsspektra som ligger extremt i faktor 3. Heldragen linje avser maximal faktorpoäng, prickad linje minimal. Frekvensområden med faktorladdning $\geq 0,5$ har skuggats, jfr. Ljudexempel 3 (från Gabrielsson och Jansson, 1976).

bortskurna (högpasfiltrering) och slutligen fem sekunder normalt. I första delexemplet har bortskärningsgränsen valts till 21 Bark (8 kHz) i det andra till 17.5 Bark (4 kHz), i det tredje till 13 Bark (2 kHz) och i det fjärde 8.5 Bark (1 kHz), se [fig 13](#). Av figuren framgår att alla ljudkomponenter ligger under 21 Bark, att den allra största delen av dem ligger under 17.5 Bark. En dryg tredjedel av ljudkomponenterna ligger ovanför 13 Bark och drygt hälften ligger ovanför 8.5 Bark. Det föreligger ingen enkel relation mellan de olika filtreringarna och de fem faktorerna som analyserats fram.

13 a.

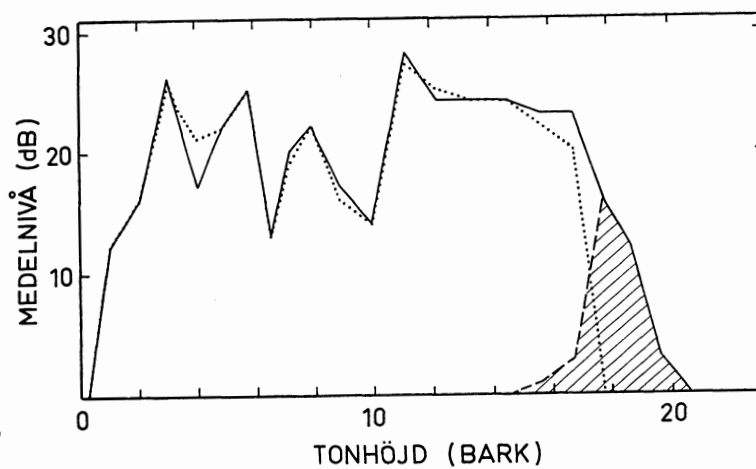
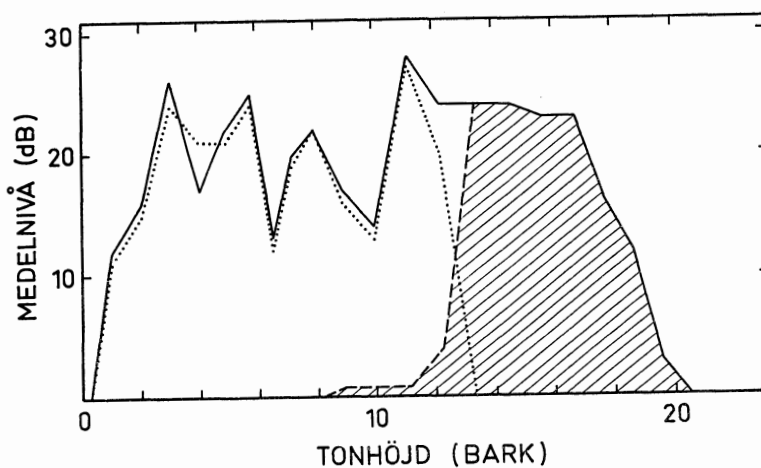


Fig 13.

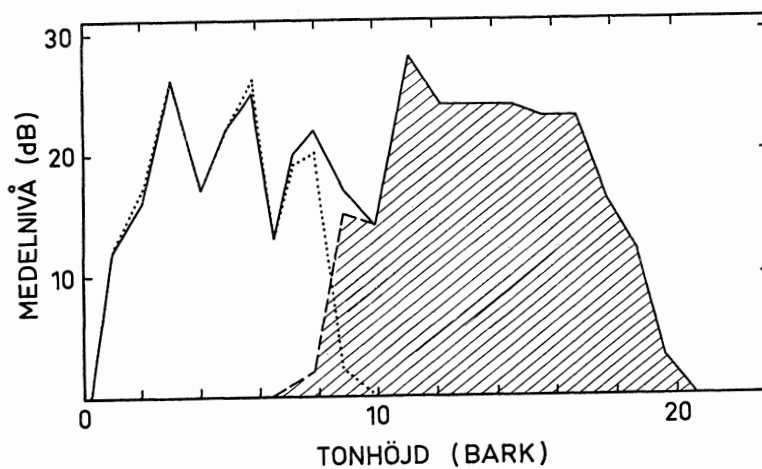
Långtidsspektra för musik (ur förstafiolstämman av J.S. Bach: Brandenburgerkonsert no. 3, BWV 1048) normalt (heldragen linje), lågpassfiltererat (prickad linje), och högpassfiltererat (streckad linje med skuggning) med filtergränserna:

överst 17,5 Bark (4 kHz)
mitten 13 Bark (2 kHz)
underst 8,5 Bark (1 kHz)
jfr ljudexempel 4 (från Jansson 1978, Svensk Tidskrift för Musikforskning).

13 b.



13 c.



I stort gällar dock att faktor 2 ligger i högfrekvensdelen i tredje delexemplet dvs ovanför 13 Bark (2 kHz), fig 13b. Faktor 1 ligger i lågfrekvensdelen i delexempel fyra dvs under 8.5 Bark (1 kHz), fig. 13c.

Låt oss så lyssna till Ljudexempel 4. Vi kan nog alla vara överens om att begränsningen av frekvensområdet till under 21 Bark påverkar tonkvaliteten föga vilket överensstämmer med långtidsspektra i fig. 13 - man hör liten skillnad när de höga frekvenskomponenterna skärs bort och dessutom knappast något ljud alls när de lägre frekvenskomponenterna är bortskurna. Frekvenskomponenterna högre än 17.5 Bark visar på samma sätt måttlig inverkan på tonkvaliteten (andra delexemplet), även detta i överensstämmelse med långtidsspektrum i fig. 13a. Frekvenskomponenterna ovanför 13 Bark, som omfattar faktor 2, har en påtaglig inverkan på klangen (delexempel tre). Den huvudsakliga påverkan på tonkvaliteten tycks komma från frekvenskomponenter under 13 Bark, vilket långtidsspektrogrammen i fig. 13b ger anledning att förvänta. Man kan höra en klar inverkan på karaktären i tonkvaliteten med de olika filtreringarna. De högsta frekvenskomponenterna ger ett rasselljud. När mer och mer av lägre frekvenskomponenter tas med låter det mer fiolliknande, medan högpassfiltreringen i det sista delexemplet ger en tunn och hård klang. Att påverkan av filtreringen är stor i detta fall stämmer väl med vad man kan förvänta av fig. 13c. När bara de allra lägsta frekvenskomponenterna, som ung. motsvarar faktor 1, tas med får man en burkig ton med otydliga tonansatser (i viss mån kan detta bero av filtret). Ju mer höga frekvenskomponenter som finns med desto mer avtar burkigheten och de oklara ansatserna. Långtidsspektra i fig. 13 och Ljudexempel 4 antyder återigen att en balans mellan nivåerna i olika frekvensregioner ger den bästa fiolen.

Låt oss så summera våra slutsatser. Analys av drygt tjugo violiner har visat att deras långtidsspektra kan indelas i tre områden: ett lågfrekvensområde till 5 Bark, ett mellanfrekvensområde 11-14 Bark och ett högfrekvensområde ovanför 15 Bark. Frekvensområdet under 13 Bark verkar vara det viktigaste för klangen. I de två lägre frekvensområdena är starka deltoner gynnsamt. Alltför kraftiga deltoner vid låga frekvenser torde dock ge en

burkig ton. Alltför kraftiga deltoner och ljudkomponenter vid höga frekvenser ger en rasslande klang. Detta antyder att en balans mellan deltonernas styrka i olika frekvensområden ger det bästa instrumentet.

II Analyser av gitarrklang

Musikern med sin skärpta hörsel är den enda goda mätaren av ett instruments kvalitet. Därför föll det sig naturligt att börja vårt sökande av tonkvalitetsbestämmande egenskaper med att ta kontakt med kvalificerade musiker för att få ett grepp om vilka dessa egenskaper kan vara. Men musikinstrument och dess toner har många egenskaper. Hur vissa av dessa bör vara är de flesta musiker överens om medan olika musiker fäster olika vikt vid andra egenskaper. Det räcker således inte att intervjua en musiker. För att få ett grepp om vilka egenskaper som är viktiga för många och vilka som mer är en fråga om tycke och smak för den enskilde musikern måste man sammanställa erfarenheter från flera musiker.

Ett frågeformulär sammanställdes och skickades ut till lärare i gitarrspelning vid musikhögskolor och folkhögskolor (Jansson 1977 c). I detta formulär ställdes frågorna: "Vilka, tycker Ni, är de viktigaste akustiska egenskaper för en konsertgitarr?" och "Vilka egenskaper, tycker Ni, att en konsertgitarr inte får ha?". Vid sammanställningen av svaren på den första frågan befanns, som väntat, att de tillfrågade ej gav samma svar. Sju egenskaper kunde dock uttolkas mer eller mindre klart, se tabell 1. Benämningarna av egenskaperna har utvalts av författaren ur de givna svaren. Som svar på den andra frågan sa man som regel att en konsertgitarr inte fick ha motsatta egenskaper till dem de skulle ha.

Egenskaperna i tabell 1 har ordnats alfabetiskt. Den första termen "attack" bör rimligtvis ha att göra med gitarrens svar på spelarens anslag. "En snabb attack", "att svara direkt på anslaget" har angivits som en positiv egenskap. Den andra termen "bärighet" utgör författarens uttolkning av "en bärig ton", "en bärande ton", "kraftig ton" etc. utgör posi-

tiva egenskaper, medan "tunn" och "liten" utgör något negativt. "Dynamik" bör motsvaras av samma musikaliska term. "Stor dynamik", "tåla fff" och "klinga klart och tydligt i pp", är bra. Ett bra instrument ska vidare vara jämnt. Man har inte specificerat jämnheten närmare, men den torde avse jämnhet över strängarna och jämnhet mellan olika toner på samma sträng. I jämnheten bör även kunna innefattas att instrumentet ej ska ha enskilda defekta toner, t ex "vargtoner". Klängen från gitarren ska vidare vara formbar. Det är bra med "klanglig dynamik", "klanglig formbarhet", "stora möjligheter att registrera", etc. Men klängen (tonen) ska inte bara vara formbar. Den ska även ha vissa absoluta egenskaper. Tonen ska "klinga", "ha klarhet", "ha kärna" och inte vara "murrig", "suddig", "kort" eller "skrällande" etc. Slutligen är tonens längd viktig. Den ska vara lång.

Tabell 1. Viktigaste akustiska egenskaper för en konsertgitarr enligt 9 gitarrister.

1. Attack	3 av 9
2. Bärighet	9 av 9
3. Dynamik	3 av 9
4. Jämnhet	5 av 9
5. Klang	6 av 9
6. Klangformbarhet	4 av 9
7. Tonlängd	6 av 9

En möjlighet att rangordna egenskaperna i tabell 1 är att se hur många av de tillfrågade som har angivit de olika egenskaperna som viktiga. Detta framgår av tabellens andra kolumn. Dessa siffror antyder att "bärigheten" är viktigast, därefter i tur och ordning "klängen" och "tonlängden", "jämnheten", "klängens formbarhet", och slutligen "attacken" och "dynamiken". Rangordningen bör tas med stor försiktighet även om den inte verkar orimlig. Enstaka defekta toner torde utgöra så allvarliga fel att ett instrument troligen underkänns om sådana föreligger. I vårt fortsatta arbete bestämde vi oss för att i första hand studera bärighet, klang och tonlängd.

Inspelningar för lyssningsprov och akustisk analys.

När gitarristen vill lära känna ett instruments egenskaper vill han pröva i stort sett allt. Strängarna får dock ej vara märkbart gamla. Att pröva allt i en akustisk analys är inte praktiskt genomförbart, utan avgränsningar är nödvändiga. Efter lite tankearbete kom vi fram till följande.

Enstaka toner som får "hö ut" spelade i ekofritt rum (ett speciellt mycket hårt dämpat akustiskt mättrum) kan akustiskt analyseras i detalj. Sådan analys kan antas ge väsentliga bidrag till förståelsen av de tre egenskaperna bärighet, klang och tonlängd men även attack och jämnhet.

Kromatiska skalor spelade i normalt tempo gör det möjligt att täcka in ett stort tonomfång. Analys av dessa toner bör kunna ge väsentliga delar till förståelsen av egenskaperna bärighet och klang och vidare jämnhet.

Lämpliga musikstycken torde slutligen kunna ge analysmaterial för att studera vad som bestämmer gränserna för klangens formbarhet och dynamiken. Även de nämnda enstaka tonerna spelade med olika spelsätt och styrkenyanser torde kunna användas för samma syfte. Ett mycket frestande stycke musik är ur "Lagrima" av F. Tarrega, se fig 14, trots att det antagligen inte är särskilt lämpligt för att studera dynamiken och klangens formbarhet. Detta stycke visade sig nämligen vara det i särklass mest utslagsgivande för bedömning av kvalitet vid ett tidigare lyssningsprov (Meyer och Meyer 1975 och Meyer 1976).

Ett väl avvägt urval av det skisserade materialet bör således ge ett lämpligt material för akustisk analys och lyssningsprov. Genom att göra inspelningar både i ekofritt och normalt rum, kan inflytandet av rummet analyseras.

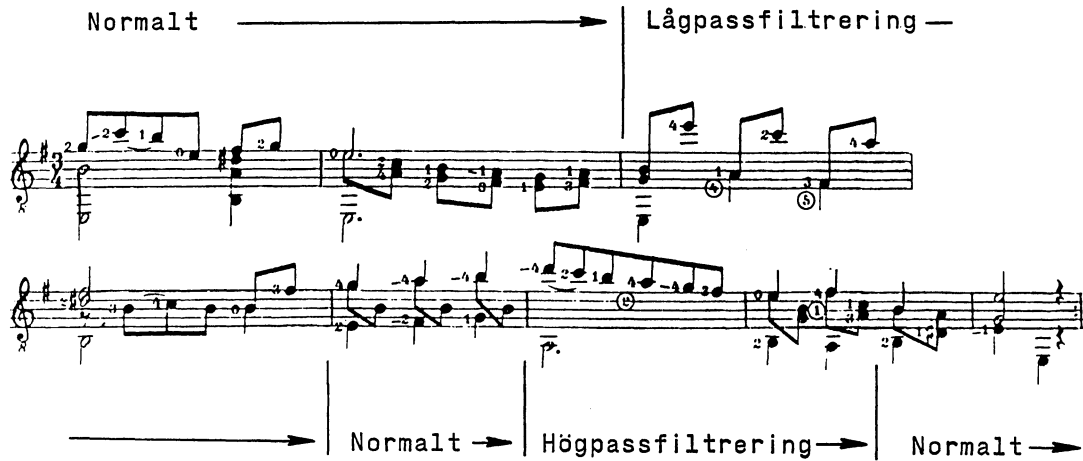


Fig 14. Musik för analys ur "Lagrima" av F. Tarrega med de olika filtreringarna i Ljudexempel 5 inritade.

Mot denna bakgrund inspelades följande material på fem gitarrer av varierande kvalitet (numrerade 1 till 5) med tre spelare: 1) i ekofritt rum enstaka toner på sjätte, tredje och första lösa strängarna och deras okta-
ver, 2) i ekofritt rum en oktav långa kromatiska skalor på var och en av de
sex strängarna, och 3) i ett normalt rum en del ur musikstycket "Lagrima".

Akustisk analys med musik.

I vår första analys av de fem gitarrernas tonegenskaper användes långtids-
spektra. Sådana spektra av "Lagrima" visade stora likheter mellan gitarrerna
1 och 3, och mellan 4 och 5. Gitarren 2 hamnade någonstans mittemellan.
Samma gruppering erhöles för alla tre spelarna och den stämde väl överens med
deras omdöme om instrumenten. Grupperingen var således inte beroende av vem
som spelade. Långtidsspektra av de kromatiska skalorna spelade i ekofritt
rum gav även de samma gruppering som "Lagrima" i normalt rum, d v s rummet
och musikvalet inverkar föga på analysresultatet.

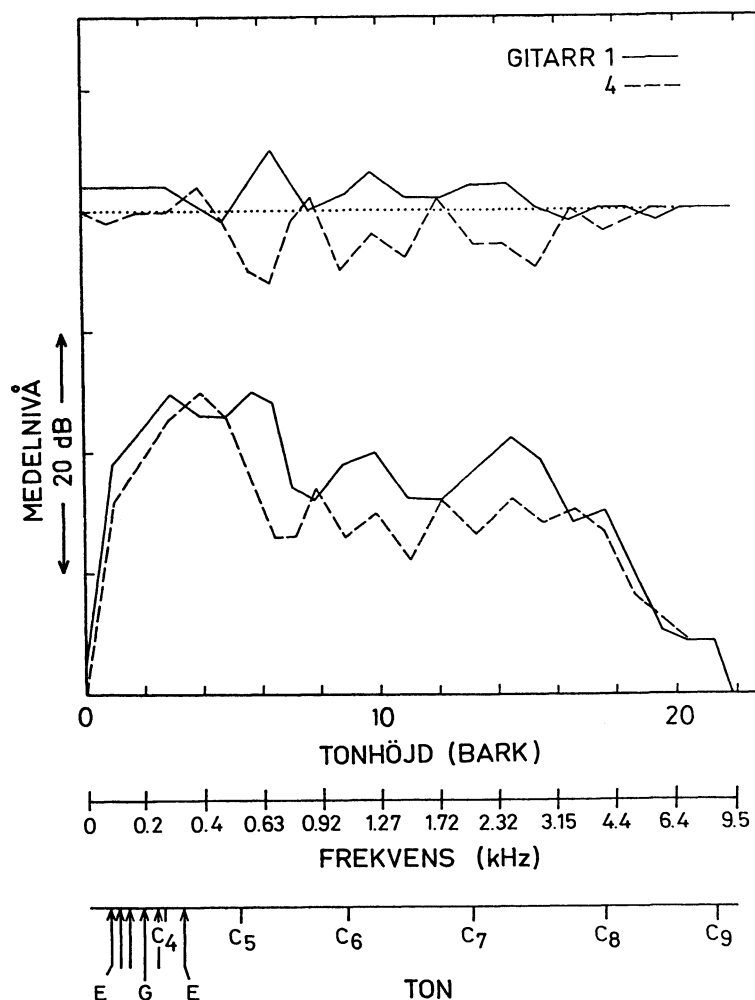


Fig 15. Långtidsspektra för gitarr 1 och 4 (nedre delen) och skillnader i långtidsspektra mellan medelvärdet av gitarrerna 1 - 5 och gitarr 1 resp. gitarr 4 (övre delen).

Vad är då skillnaderna mellan de tre olika instrumenten? Ett typexempel visas i fig. 15 med långtidsspektra av "Lagrima" för gitarr 1 och 4, med en horisontell frekvensskala omräknad till tonhöjdsmaßttet Bark och en vertikal dB-skala. Långtidsspektra visar hur starka deltoner ett instrument i genomsnitt ger vid varje frekvens. Den nedre delen av fig. 15 visar att långtidsspektrum för gitarr 1 (heldragna kurvan) ligger som regel högre vid låga frekvenser (den vänstra delen) och betydligt högre vid höga

frekvenser än för gitarr 4 (den streckade linjen). I överdelen av fig. 15 visas skillnaden mellan gitarr 1 (heldragna linjen) resp. mellan gitarr 4 (den streckade linjen) och alla gitarrer (den punkterade linjen). Fig. 15 visar således att gitarr 1 ger akustiskt sett starkare och övertonsrikare toner än genomsnittet för de fem gitarrerna och betydligt starkare och övertonsrikare toner än gitarr 4. Den akustiska analysen antyder således att styrka och övertonsrikedom är två viktiga instrumentskiljande egenskaper.

Lyssningsprov med musik

Det faller sig naturligt att därefter fråga sig hur de uppmätta akustiska egenskaperna relaterar till kvalitetsupplevelsen. De tre gitarristerna som spelade in musiken såg och kände på instrumenten. I sin bedömning av instrumenten kunde de därigenom ta hänsyn även till icke akustiska faktorer. Ett sätt att undvika denna osäkerhetsfaktor i ett bedömningsförsök är att använda musik inspelad på band eller att spela bakom en skärm. Sådana enkla lyssningsprov utfördes med gitarrklasserna vid Musikhögskolan i Stockholm. I dessa prov placerades gitarrerna 1, 2 och 3 alltid före gitarrerna 4 och 5, både för den inspelade musiken och för spelningarna bakom skärm. Gitarrerna 1 och 3 ligger således före gitarrerna 4 och 5 i rangordning och man kan på grundval av lyssningsprovet indela gitarrerna i två grupper, gitarr 1 och 3 resp. 4 och 5, vilket är samma gruppering som den nyss nämnda baserad på långtidsspektra. Detta resultat, att lyssningsprov och akustisk analys av samma material givit samma gruppering pekar på att starkare och övertonsrikare toner är positivt.

Låt oss lyssna på gitarrerna 1 och 4 i Ljudexempel 5. De flesta lyssnare torde vara överens om att det inte är så lätt att höra några påtagliga skillnader. Ändock anses nr 1 mycket bättre och kostar mycket mer än nr 4. Vid våra lyssningsförsök visade det sig också att det var mycket svårt för en otränad lyssnare att ge ett säkert omdöme. De tränade lyssnarna avgav ett säkrare omdöme när de bedömde gitarrerna spelade bakom skärm i lyssnarrummet än med inspelad musik.

Akustisk analys av enstaka toner

Analys och lyssningsprov med musik gav klara anvisningar om viktiga egenskaper men krävde mycket tränade lyssnare. En stor svårighet, särskilt för en mindre tränad lyssnare, är att bevara klangbilder av långa ljudexempel i minnet. Därför fortsatte vi med att analysera och göra lyssningsprov med enstaka toner. För det fortsatta arbetet tog vi härvid ut en representativ gitarr från vardera av de två grupperna, nämligen gitarr 1 och 4.

Låt oss innan vi går in på analysen titta lite allmänt på egenskaper hos gitarrtoner. Som alla vet är en gitarrton inte lika stark från början till slutet som t ex en fiolton - den är stark i början och klingar sedan av. Mindre känt torde däremot vara att på knappt en hundradels sekund når gitarrtonen sin maximalstyrka på ca 50 dB över bakgrundsnivån i ett mycket tyst rum. Den avklingar vidare tämligen snabbt - ca 20 dB på en sekund. Typexempel för avklingningsförlopp för tredje lösa strängen och oktaven på gitarrerna 1 och 4 visas i fig. 16 (vertikal dB-skala och horisontell tidsskala). Vi ser att gitarr 4 är något starkare alldeles efter anslaget men att gitarr 1 ger starkare ton efter 1,5 resp. 0,5 sek. Gitarr 1 ger således en ton som är längre. Uppmätta tonlängder i Fig 17 (till -50 dB) visar att sjätte strängen (6L och 60) har ca 10 sek långa toner, tredje strängen (3L och 30) ca 4 sek och första strängen (1L och 10) ca 3 sek.

Men en gitarrton är ju akustiskt inte bara en ton utan en hel klang av toner, deltoner. Den lägsta tonen i denna klang är grundtonen, d v s den ton vi anger i notskriften. De närmast högre deltonerna i "klangen" består av oktav, oktav plus kvint, dubbeloktav etc., d v s deltonerna ligger på grundtonsavstånd från varandra i frekvens. En bild av hur deltonerna för tonerna i fig 16 avklingar visas i fig 18. I denna figur har vi återigen en horisontell tidsskala men en vertikal frekvensskala. Varje horisontellt streck motsvarar en delton och streckets längd ger ett mått på deltonens längd. Deltonen längst ned är den lägsta deltonen, grundtonen, och den översta den högst uppmätta deltonen. Vi ser

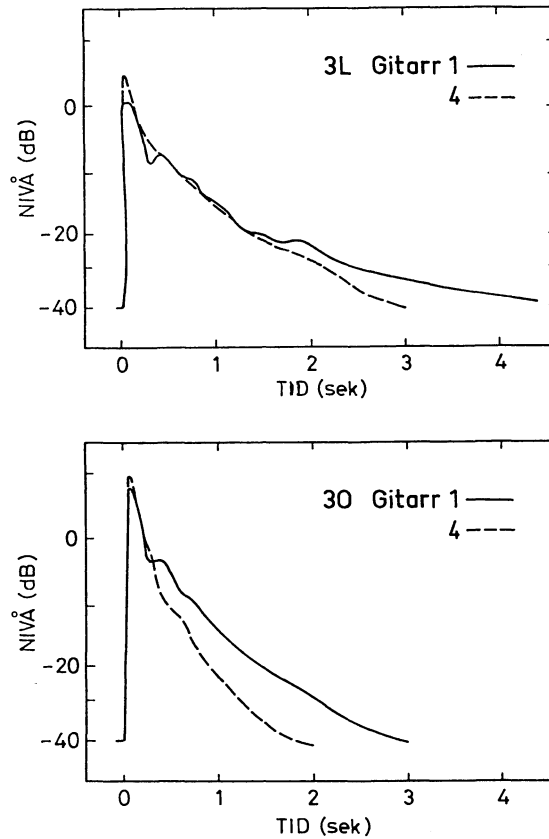


Fig 16. Avklingningsförlopp för tredje lösa strängen (3L) och dess oktav (30) hos gitarrerna 1 och 4.

att de låga deltonerna är långa och de höga är korta. Vidare ser vi att med få undantag ger gitarr 1 (fyllda cirklar) längre övertoner än gitarr 4 (öppna cirklar) och för grundtonen är skillnaderna betydligt större.

Lyssningsprov med enstaka toner

För lyssningsprov sammanställdes ett band med enstaka toner från gitarrerna 1 och 4. Tonernas längd begränsades elektroniskt så att alla toner fick en och samma maximala tonlängd. Lyssnarna fick höra tonerna i par, en från gitarr 1 och en från gitarr 4, utan att veta i vilken ordning de pre-

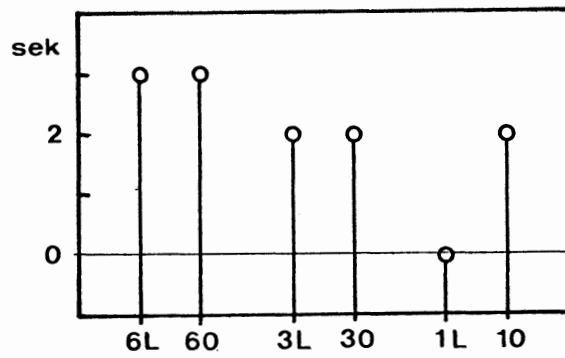
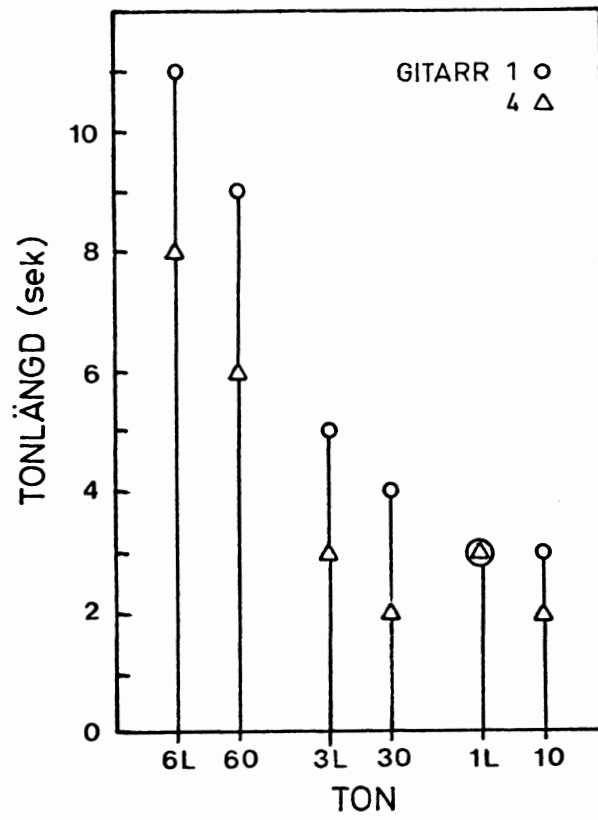


Fig 17. Uppmätt tonlängd (till - 50dB) för enstaka toner från gitarr 1 och 4. Siffran under varje stapel anger strängnumret, L och O avser lös sträng resp. dess oktav.

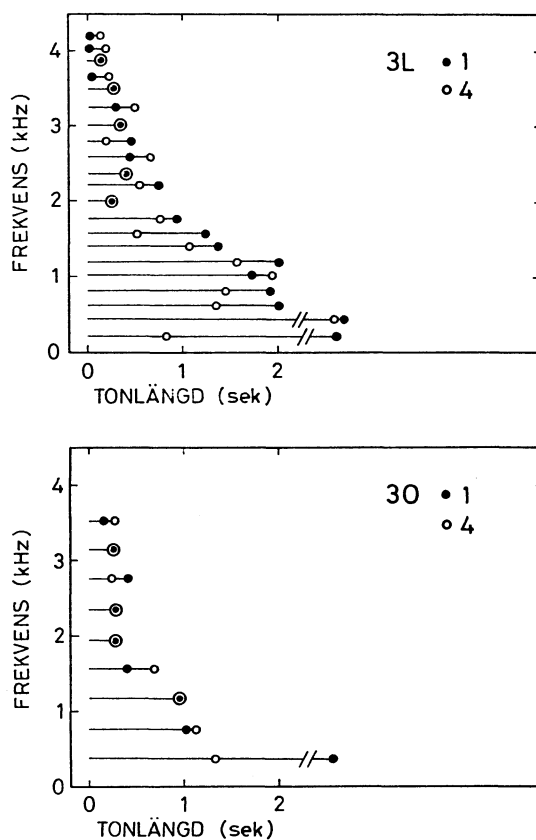


Fig 18. Deltonslängd för tredje lösa strängen (3L) och dess oktav (30) för gitarr 1 och 4.

senterades, och bedöma dem mot varandra. I det första lyssningsprovet med en gitarrklass vid Stockholms Musikpedagogiska Institut frågades efter vilken gitarr som gav den starkaste tonen. Resultatet framgår av fig 19, där 6L, 60, 3L, 30, 1L och 10 står för tonerna från sjätte lösa strängen och oktaven, från tredje lösa strängen och oktaven etc. Ringarna på staplarna markerar hur mycket starkare (avläst efter den vertikala skalan) gitarr 1 genomsnittligt upplevdes. Positivt värde betyder att gitarr 1 upplevdes som starkare än gitarr 4 och ett negativt värde att gitarr 1 upplevdes som svagare. Vi ser att med endast ett undantag upplevdes tonerna från gitarr 1 som starkare än från gitarr 4.

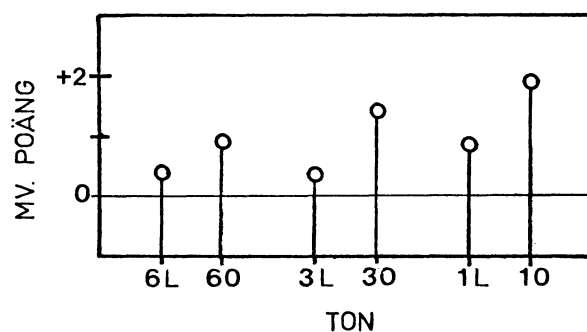
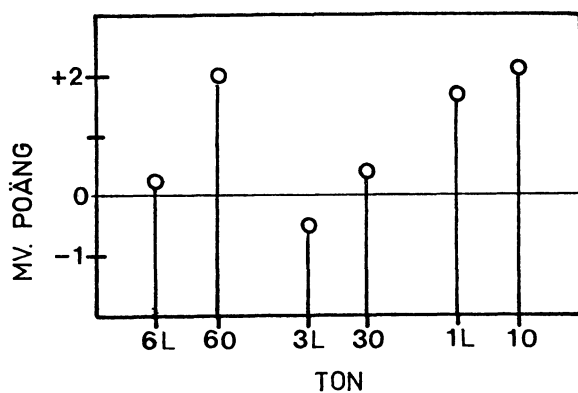


Fig 19. Resultat av lyssningsprov:
Hur mycket starkare är tonen
från gitarr 1 än gitarr 4?
Beteckningar som i Fig 17.

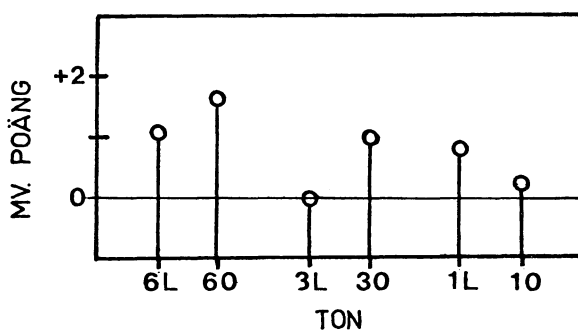


Fig 20. Resultat av lyssningsprov:
Hur mycket bättre klingar
tonen från gitarr 1 än från
gitarr 4? Beteckningar som
i Fig 17.

Fig 21. Resultat av lyssningsprov:
Hur mycket längre är tonen
från gitarr 1 än gitarr 4?
Beteckningar som i Fig 17.

Samma material prövades också på musikintresserade kolleger. Vid det ena lyssningsprovet frågades hur mycket bättre den första tonen klingade i jämförelse med den andra. Gitarr 1 visade sig klinga bättre än gitarr 4 med endast ett undantag, se fig 20.

Vid ett andra lyssningsprov med kolleger frågades efter hur mycket längre den första tonen var relativt den andra. Gitarr 1 visade sig ge den längsta upplevda tonen utan undantag, se fig. 21.

Dessa lyssningsprov med jämförelser mellan enstaka toner var mycket utslagsgivande. Vidare tycks här musikerns skärpta hörsel inte vara nödvän-

dig vid en första utvärdering, eftersom lyssningsprov med musikintresserade kolleger gav samma resultat som gitarrklassen när den starkaste tonen efterfrågades. I Ljudexempel 6 presenteras några exempel från lyssningsprovet. Vi hör här tonparet analyserat i fig 16, 17 och 18, tre gånger i omväxlande ordning. För de allra flesta torde det vara lätt att höra skillnader mellan tonparen och även att kunna avgöra vilken ton man upplever som starkast, klingar bäst och är längst.

Är den akustiska koden för tonkvalitet nu knäckt?

Den akustiska analysen visade att gitarr 1 gav den starkaste tonen utom alldeles efter anslaget, en övertonsrikare ton och en avsevärt längre grundton. Lyssningsproven visade att gitarr 1 upplevdes som starkare, bättre i klangen och längst i tonen. Dessa resultat antyder att vi enkelt kan mäta akustiska egenskaper hos gitarrtoner som har med kvalitet att göra. Något förenklat uttryckt verkar akustisk styrka motsvara upplevd styrka. Stark grundton och övertonsrikedom ger en ton som klingar bättre. Akustiskt längre toner upplevs som längre toner. Detta utgör enkla och klara samband mellan objektiva mätningar och den subjektiva upplevelsen.

Men är det egentligen så enkelt? Även om resultaten verkar rimliga måste de givetvis tas med en viss försiktighet bl a därför att det analyserade materialet är så begränsat. Och om man studerar de akustiska analysresultaten i detalj finner man att det inte är så enkelt och klart. Två fall skall tjäna som exempel. Fig 16 visar att tredje lösa strängen på gitarr 4 i början ger en starkare ton än motsvarande på gitarr 1, men efter 1,5 sek är det gitarr 1 som leder med en starkare ton. Samma förhållande gäller för oktaven på tredje strängen - gitarr 4 ger en starkare ton i början men efter knappt 0,5 sek är gitarr 1 starkare. Fig 19 visar att tredje lösa strängen upplevs som starkare på gitarr 4, medan gitarr 1 upplevs som starkast på oktaven på tredje strängen. Den upplevda tonstyrkan kan alltså vara olika trots liknande akustiskt styrkeförlopp. Detta första exempel visar att de enkla relationerna akustisk styrka och upplevd tonstyrka ej är enkelt relaterade. Den

upplevda tonstyrkan torde bli bero av den akustiska längden.

Vårt andra exempel gäller relationerna mellan upplevd och akustisk tonlängd. Fig 21 visar att tonerna från gitarr 1 upplevdes som längre, vilket väl stämmer överens med uppmätta tonlängder i fig 17. Men till lyssningsproven hade alla enstaka toner elektroniskt skurits av 3 sek efter ansatsen. Detta gör att tonerna från gitarrerna 1 och 4 var akustiskt lika långa för 6L, 60 och 3L. Trots detta upplevdes de som olika långa. Den upplevda tonlängden tycks således bero även av den akustiska styrkan.

Kan vi nu svara på den i rubriken ställda frågan: "Är den akustiska koden för tonkvalitet nu knäckt?" Svaret måste här bli att i mycket grova drag förstår vi sambanden mellan upplevd kvalitet av bärighet, klang och tonlängd och mätta akustiska egenskaper, d v s vi har i grova drag knäckt koden för dessa kvaliteter (förutsatt att bärighet är detsamma som upplevd styrka). Men om vi ser till finare drag återstår en hel del att förklara - d v s vi har ännu inte knäckt koden komplett.

Låt oss så till sist demonstrera olika frekvensområdets betydelse för gitarrens klang analogt med den sista fioldemonstrationen. I Ljudexempel 7 hör vi samma inspelning ur "Lagrima" som tidigare med gitarr 1. I fig 14 har i notbilden markerats var växlingarna mellan de olika filtreringarna sker. De olika filtergränserna har valts till 17.5, 13 och 5 Bark (4, 2 resp 0,5 kHz) i de tre delexemplen. En jämförelse med långtidsspektrum i fig 15 visar att i det första delexemplet ligger få ljudkomponenter högre än filtergränsen (ca 1/5), i det andra drygt en tredjedel och i det sista delexemplet tre fjärdedelar. Filtreringen vid 17.5 Bark (första delexemplet) ger en relativt liten påverkan på spektrum. Den lägre delen av spektrum låter något dovt och burkigt (i viss mån förmodligen på själva filtret) och i den höga delen enbart svaga slagljud. Med filtergränsen sänkt till 13 Bark, andra delexemplet, hörs en påtaglig inverkan, lågfrekvensdelen låter ännu burkigare och i den högfrekventa delen har klingande komponenter kommit med. I det tredje delexemplet låter grundfrekvensdelen (ung grundtonsomfånget)

mycket burkigt med otydliga "rumlande" tonansatser. Lågfrekvensdelen hörs hela tiden som en nästan konstant klangbakgrund. I högfrekvensdelen klingar det klart och tydligt men tunnt. Detta stöder våra tidigare slutsatser att lågfrekvensdelen bestämmer tonens längd, medan klangen bestäms till stor del av övertonsrikedomen.

Låt oss så summera våra slutsatser om gitarrens klang. I stort tycks gälla att akustisk styrka motsvaras av upplevd styrka (bärighet), att stark grundton och övertonsrikedom ger en ton som klingar bra, och att akustisk tonlängd motsvaras av upplevd tonlängd. Lyssningsförsök med olika filterringar antyder att alltför kraftiga deltoner vid låga frekvenser ger en burkig ton med otydliga tonansatser. De högre deltonerna ger klarhet i tonen speciellt i ansatserna, medan avsaknad av låga deltoner ger en kort tunn ton. De allra högsta frekvenskomponenterna ger cymballliknande slagljud i tonansatsen. Även för gitarren verkar det som om en lämplig balansering av flera faktorer ger det bästa instrumentet.

Referenser

- Gabrielsson, A. och Jansson, E. (1976): "An Analysis of Long-Time-Average-Spectra of Twentytwo Quality-Rated Violins", Speech Transmission Laboratory, Quarterly Progress and Status Report no. 2-3, pp. 20-34.
- Jansson, E. (1977a): "On the Acoustics of Musical Instruments", in Music Room and Acoustics, Royal Swedish Academy of Music, Stockholm.
- Jansson, E. (1977b): "On Sound Radiation of Musical Instruments", in Music, Room and Acoustics, Royal Swedish Academy of Music, Stockholm.
- Jansson, E. (1977c): "En förberedande undersökning för prövning av gitarrers akustiska kvalitet", Centrum för Talkommunikationsforskning och Musikakustik, KTH, Rapport 1.
- Jansson, E. (1978): "Tone Characteristics of the Violin", Svensk Tidskrift för Musikforskning 60:1 pp. 83-105.
- Jansson E. och Sundberg, J. (1975): "Long-Time-Average-Spectra Applied to Analysis of Music. Part I: Method and General Applications", Acustica 34, pp. 15-19.
- Meyer, J. (1976): "Die Bestimmung von Qualitätskriterien bei Gitarren". Das Musikinstrument 25, pp. 1211-1222.
- Meyer, A. och Meyer, J. (1975): "Hör-Test zur Bewertung der Klangqualität von Gitarren", Das Musikinstrument 24, pp. 1123-1130.

Rent och falskt i klingande praxis

av

Johan Sundberg

Centrum för Talkommunikationsforskning, Institutionen för Talöverföring, KTH, Stockholm

Titeln på det här föredraget lovar att det skall gälla praxis. Men det kan inte hindra mig från att börja i den grå teoriänden. Det kommer att s.a.s. kalibrera våra förväntningar på praxis, ty enligt en gammal god regel skall teori och praxis stämma överens. Vad säger alltså musikteorin om vad som skall låta rent och falskt?

Vår västerländska skala bygger liksom skalorna i de flesta andra kulturer på oktavintervallet. Ett oktavintervall uppåt och nedåt får man, så snart man fördubblar resp. halverar frekvensen på en ton. Oktaven motsvaras alltså av ett frekvensförhållande på 2:1 och varje annat intervall har på samma sätt sitt eget privata frekvensförhållande. Exakt vilket frekvensförhållande som tillhör det intervall som vi kallar t ex stor ters beror emellertid på vilken skala man tillämpar. En stor ters kan sålunda ha tre frekvensförhållanden: 5:4, $\sqrt[3]{2}$:1 eller 81:64, dvs 1,25:1, 1,2544:1 resp. 1,2656:1. Hur de tre terserna låter framgår av Ljudexempel 1. Vilken ters som gäller beror på om man tillämpar den rena skalan, den liksvävande tempererade skalan eller den pytagoreiska skalan. Låt oss titta litet närmare på dessa tre skalor.

Den liksvävande temperaturen är den teoretiskt sett enklaste skalan. Den är gjord så rakt på sak, att oktavintervallet med frekvensförhållandet 2:1 delas in i tolv stycken exakt lika stora frekvensförhållanden, vardera alltså på $\sqrt[12]{2}$:1. Detta är alltså frekvensförhållandet för vilket som helst av alla små sekundintervall som finns i den liksvävande temperaturens skala.

En nackdel med den liksvävande tempererade skalan för en hörselns läckergom är att inga samtidigt ljudande toner i den skalan blir helt svävningfria, oktaven undantagen. Detta beror på att själva deltonerna i klangen från de flesta musikinstrument bildar en annan typ av intervall med varandra. Dessa intervall kallas rena. Deras frekvensförhållanden kan uttryckas i små, hela tal, något som under alla tider fascinerat musikteoretiker med fallenhet för talmystik. Ett exempel. Deltonernas frekvenser för t ex tonen A₂ (A i grova oktaven) är hos alla instrument utom dem som anslås eller knäpps följande: 110, 220, 330, 440, 550, 660, 770 osv Hz. Deltonernas frekvenser bildar en s k harmonisk serie, varför deltonerna kallas harmoniska. Mellan dessa deltoner återfinns vi i tur och ordning intervallen: oktav, kvint, kvart, stor ters, liten ters, en ännu litet mindre ters. Dessa intervall kallas alltså rena, och deras frekvensförhållanden kan som sagt uttryckas som små, hela tal: 2:1, 3:2, 4:3, 5:4, 6:5 etc. Det kan här också nämnas att vår hörsel tillskapar harmoniska deltoner så snart mer än en ton ljuder samtidigt; eftersom intervallen mellan harmoniska deltoner är rena, kan man säga att rena intervall finns inbyggda i vår hörsel. Håller man sig till toner med de nämnda heltalsförhållandena mellan deltonsfrekvenserna gäller att alla intervall som avviker från dessa rena ger en samklang som svävar.

Svävningar tycks aldrig uppfattas som något positivt i musik. För att undvika dem kan man göra intervallen rena. Det är vad man försöker i den rena skalan. Den är uppbyggd på tre rena treklanger, staplade ovanpå varandra. På musikspråk kan man säga att den rena skalan innehåller renstämda varianter av tonika-, dominant- och subdominantackorden. Den rena skalan är emellertid ett otyg när det gäller instrument med fastliggande frekvenser som t ex piano, orgel osv. Man får olika stora heltonssteg mellan skaltonerna t ex, och sådant gör det omöjligt att transponera från en tonart till en annan.

Den tredje skalan kallas den pytagoreiska efter sin upphovsman Pythagoras. Utvecklingen inom skalteorin har nämligen inte precis gått med hisnande fart. I den pytagoreiska skalan får man skalans toner genom att stega

iväg i rena kvinter tills man besökt alla skalans toner. Sedan oktaverar man ned tonerna så att alla faller inom samma oktav. Den här skalan ger inga snarfagra små heltalsförhållanden. Den går litet lättare att använda än den rena skalan genom att alla dess hel- och halvtonssteg har samma storlek. Men problem uppstår ändå vid transponering på tangentinstrument.

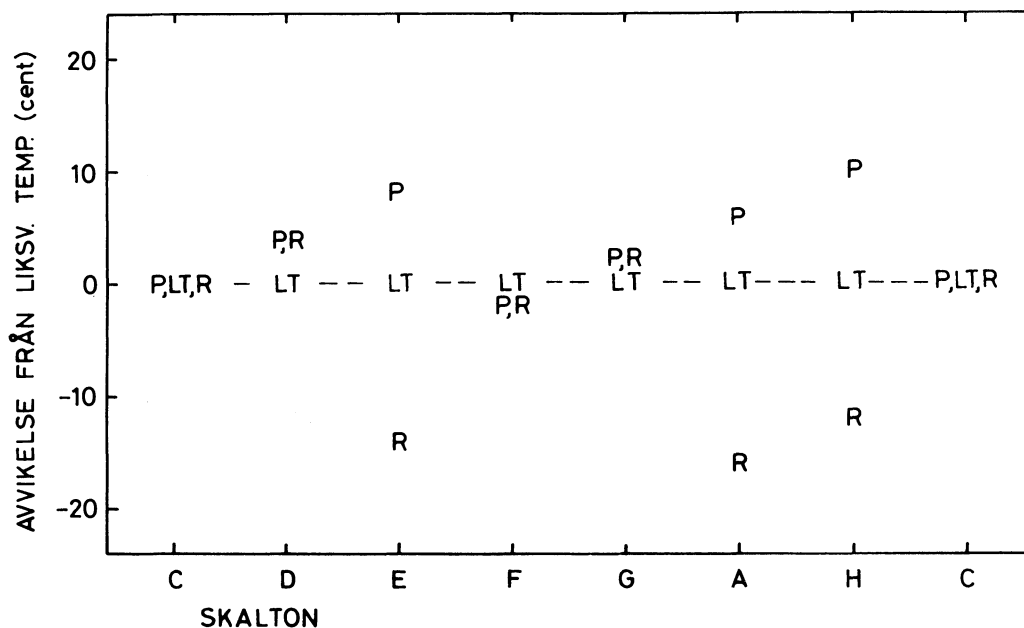


Fig 1. Storleken av rena (R), liksvävande temperaturens (LT) och pytagoreiska (P) skalornas intervall räknade från tonen C i en C-durskala och angivna i cent relativt liksvävande temperaturen.

Låt oss nu jämföra samma intervall i de olika skalorna. Det kan vi göra på Fig 1. Den visar intervallen från skalans utgångston och uppåt. För överskådlighetens skull har intervallen relaterats till sina motsvarigheter i liksvävande temperaturen och avvikelserna anges i hundradelar (cent) av ett halvtonssteg i den liksvävande temperaturen. När man betraktar värdena i figuren skall man komma ihåg att de lyhördaste musiköronen kan uppfatta en tonhöjdskillnad endast om den överskrider ca 5 cent, vilket alltså är minsta åtskillnadströskel i frekvens. Figuren visar att alla tre skalorna stämmer överens endast på utgångstonen och dess oktav. Den rena och den pytagoreiska överensstämmer sinsemellan dessutom på kvart och kvint, medan de

på övriga intervall ligger 22 cent isär med den liksvävande temperaturens värde någonstans emellan. Det är också intressant att se att på de flesta intervallen räknade från durskalans startton är det den rena skalans versioner som är lägre och den pytagoreiskas som ligger högre. På de intervall där ren och pytagoreisk skiljs åt är det alltså det rena värdet som är lägre.

I Ljudexempel 2 kan man lyssna till treklängen enligt de tre skalorna: först ren, sedan liksvävande tempererad och sist pytagoreisk stämning.

Detta om teorin. En musiker kan alltså, om teorin har något med klingande praxis att göra, välja mellan ett flertal olika versioner av ett och samma intervall. Vilket väljer han?

Svaret på den frågan bör bero på om det är fråga om solospel eller ensemblespel. I det förra fallet kan en musiker välja rätt fritt, i det senare måste han rätta sig efter kollegerna i ensemblen för att inte åstadkomma alltför hastigt svävande intervall. Det finns alltså skäl att skilja mellan melodiska intervall, där tonerna ljuder efter varandra och ackordiska, där de ljuder samtidigt. Det är bara i ackordiska intervall som risk för störande svävningar uppstår. Märk att svävningar kan uppstå också vid mindre frekvensskillnader än 5 cent, som är åtskillnadströskeln i frekvens. Man kunde därför anta att precisionen är större i ackordiska än i melodiska intervall och det är ytterligare ett skäl att skilja mellan dessa typer av intervall. I sanningens namn skall sägas att det går att spela svävningfria ackordiska intervall orent. Den första oktaven i Ljudexempel 3 är 4 cent för stor, teoretiskt sett, men den uppkom mellan vibratotoner och vibrato eliminerar svävningar. Den andra oktaven i samma ljudexempel är lika stor men ges mellan vibratofria toner och låter därför ganska otäckt. Den här effekten är nog ett gott försvar för vibratots förekomst i musicerande.

Låt oss nu återvända till vår fråga, vilka intervall musiker använder när de spelar musik. En amerikan vid namn Shackford (1961, 1962 a & b) har publicerat mätningar på intervall i en stråktrio. Han räknade antalet svängningar per sekund i registreringar från vart och ett av de tre instru-

menten. Om man betänker att han behövde räkna till 440 för att komma bara en sekund framåt i tiden på registreringen från en fiol som spelade tonen A4, så förstår man att det ligger mycket arbete bakom de här resultaten. Shackford var så lyckligt lottad att han kunde använda uppenbarligen exceptionellt mätglada mätknektar till studenter för detta tidsödande och säkert tämligen tråga arbete.

Tre stråktrios spelade fyra olika kompositioner, som Shackford själv tonsatte i olika stilar. Han fann, som man kunde vänta, vissa variationer både mellan de tre ensemblerna och mellan samma intervall i de fyra styckena. Valet av intervallstorlek används tydligen som musikaliskt uttrycksmedel och samma intervalls storlek kan variera något beroende på intervalllets harmoniska funktion.

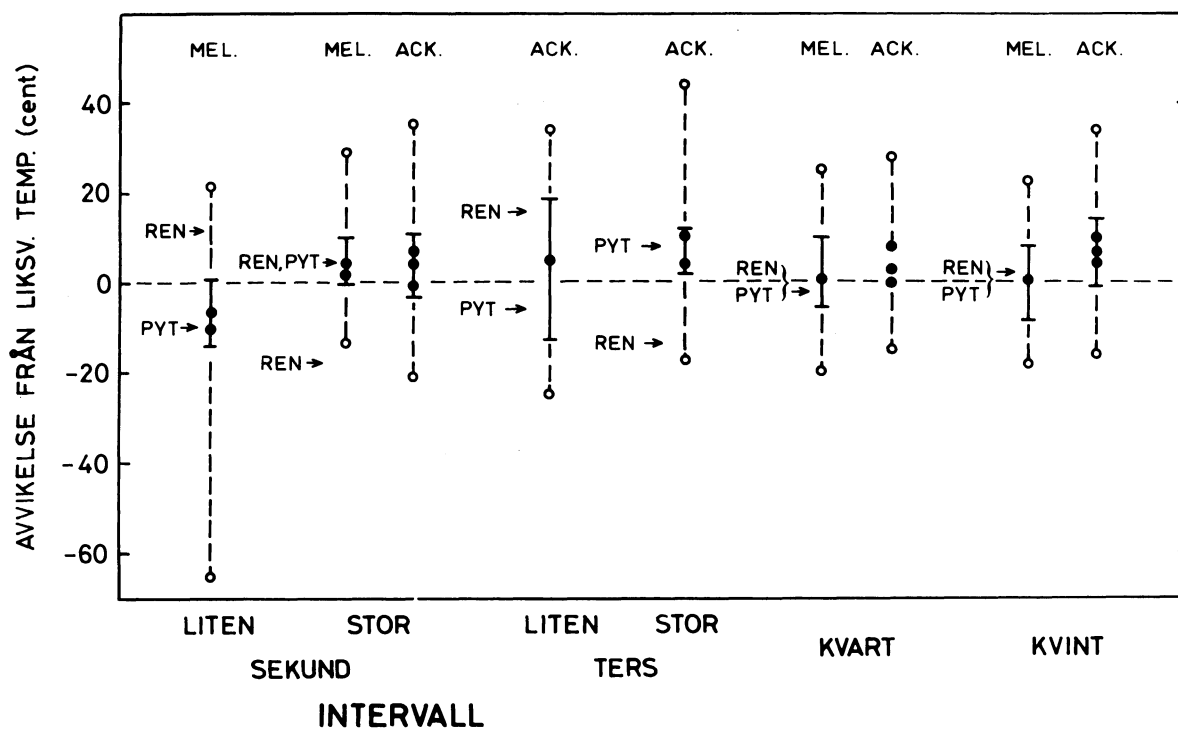


Fig 2. Genomsnittliga storlekar av melodiska (MEL) och ackordiska (ACK) intervall angivna i cent relativt den liksvävande temperaturen och uppmätta i stråktriospel. Strecken anger kvar-tilavvikelse, ringarna extremvärden. Efter Shackford (1961, 1962a, 1962b)

Fig 2 visar medelvärden från Shackfords resultat, återigen uttryckta i avvikelser från den liksvävande temperaturens värden och angivna i cent. De ofyllda cirklarna visar extremvärden, som verkligen ligger rätt vilt utspridda. Men alla musiker är människor och ingen människa får allt precis som hon tänkt sig. Punkterna visar medelvärden av intervall i olika kontexter och de vertikala strecken anger kvartilavvikelserna. Man ser att punkterna ligger rätt tätt ihop. Om ett intervall förekommer i ena eller andra kontexten spelar tydligen ändå inte någon så där avsevärd roll för hur stort intervallet spelas.

De flesta medelvärdspunkterna ligger rätt långt från de rena värdena som utmärkts med REN i figuren. Istället ligger de nära den liksvävande temperaturens värden men i de flesta fall en aning högre. Jämför man melodiska med ackordiska intervall finner man inga dramatiska skillnader alls. De här mätningarna tycks visa att intervallen i stråktriospel är någorlunda stabila och att de spelas en aning större än vad de skulle vara i den liksvävande temperaturen. En del ligger nära de pytagoreiska, märkta PYT i figuren.

Det finns mycket musik i vår kultur som inte spelas av stråktrios. Shackfords mätningar jämförs med andras i Fig 3. Den är gjord på samma sätt som den förra, men för överskådlighetens skull har spridningsmått utelämnats. Man ser att medelvärdena ligger rätt väl samlade, de avviker från varandra i samtliga fall med mindre än 11 cent för ett givet intervall. Man kan därför anta att de här intervallstorlekarna är ungefär vad som förekommer. Återigen är det påfallande att majoriteten av intervall ligger mycket nära men strax ovanför den liksvävande temperaturens värden. I de flesta fall ligger de spelade intervallen nära de pytagoreiska (P i figuren). Två intervall sticker av från resten. Den lilla sekunden och den förminskade kvinten spelas båda mindre än i liksvävande temperatur. Den förminskade kvinten kan i tonal musik uppkomma mellan tersen och septiman i dominantseptimackordet. När detta upplöses i det följande ackordet går den lägre tonen, tersen, i regel en liten sekund uppåt till tonikatonen och den övre, septiman, faller en liten sekund till tonikatersen. Om nu den lilla sekunden skall vara mycket liten måste den

lägre tonen intoneras högt och den högre lågt. Detta skulle ge den observerade trånga förminskade kvinten. Samma resonemang kan tillämpas på den överstigande kvarten. Om man alltså antar att melodiska överväganden spelar in också i ackordiska intervalls intonation, så kan man förstå varför överstigande kvart och förminskad kvint skiljer sig så pass som de gör enligt de här mätningarna.

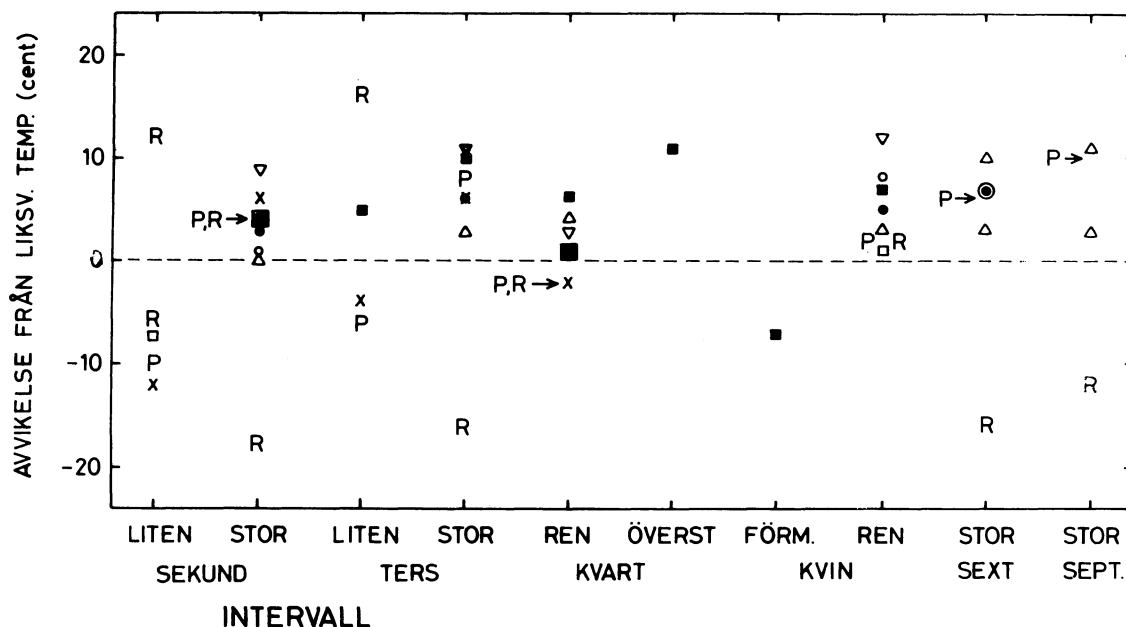


Fig 3. Genomsnittliga intervallstorlekar spelade av soloviolin (x), enskild stämma i stråkkvartett (o) och stråkkvartett-ensemble (●), melodiska intervall i stråktrio (□) ackordiska intervall i stråktrio (■) blåsarkvartett bestående av yrkesmusiker (△) och blåsarkvartett bestående av musikstuderande (▽). Intervallen anges i cent relativt liksvävande temperaturen. De pytagoreiska och rena varianterna har utmärkts med P resp. R. Data efter Ward (1970)

Även efter att ha granskat mätningar på andra typer av ensembler än stråktrios kvarstår huvudslutsatsen: De flesta intervall spelas en aning högre än de skulle varit i liksvävande temperatur. Det enda undantaget är

den lilla sekunden som spelas trängre och den förminskade kvinten, som troligen bara speglar önskan om en trångt intonerad liten sekund. Intervallen verkar inte att återge varken pytagoreiska, liksvävande tempererade eller allraminst rena varianter, vare sig det gäller melodiska eller ackordiska intervall.

Melodiska eller ackordiska intervall, det tycks alltså inte göra någon större skillnad. Men kan man nu lita på dessa resultat? I all musik finns ett melodiskt inslag som kan göra att intervallen intoneras för att möta de krav man ställer på melodiska intervall, även om intervallen ligger i ackord. Man kan alltså inte avvisa misstanken att alla de här mätningarna avser melodiska intervall även om de uppmätts i ensemblemusicerande. Vi borde i så fall jämföra de här mätvärdena med värden som hämtas från en typ av musik där det ackordiska utgör huvudsaken i högsta möjliga utsträckning. Det borde vidare vara en typ av musicerande som inte brukar vibrato, för vibratot eliminerar svävningar, och rädslan för svävningar är väl det enda som kunde förmå musiker att välja de teoretiskt sett rena intervallen. Det finns en musikgenre som nära motsvarar den här beskrivningen, nämligen den s k barbershopsången. Den utövas av fyrstämmiga manskvartetter och den har en uttalad ambition att göra bruk av rena ackord. Man borde därför få ett säkrare besked om vad som menas med ackordiskt rent i klingande praxis, om man studerar barbershopintonation. Vi engagerade barbershopkvartetten Stämjärnet, ansedd som en av de främsta i vårt land. På var och en av de fyra sångarhalsarna fastklustrades en liten kontaktmikrofon eller accelerometer. En sådan är stendöv, uppfattar inget ljud. Däremot registrerar den vibrationerna som uppkommer av de vibrerande stämläpparna. Kvartetten sjöng sin uppsjungsövning ett stort antal gånger. Dess syfte är att sångarna skall öva sig att hitta fram till de ideal frekvensvärdena, så att ackorden blir verkligt rena. Första delen av Ljudexempel 4 återger strupvibrationerna i ackordföljden tonika, subdominant, tonika, dominant, modulationsackord. Andra delen av samma exempel återger sången upptagen med vanlig luftmikrofon.

Frekvensmätandet anförtroddes vårt VISA-program, som omvandlar melodier

till notskrift (cf Askenfelt, kommande). På Fig 4 ser vi hur datorn visar mätresultatet. Det är en slags frekvenshistogram. Kurvans läge över den horisontella axeln visar hur ofta motsvarande frekvensvärden förekommer inom det analyserade musikavsnittet. Här ser vi t ex att bl a en frekvens strax ovan 100 Hz förekom mycket ofta. Det var tydligen frekvensen för en av tonerna i det här analyserade avsnittet. Om man nu pekar ut mitten av denna och övriga pucklar i histogrammet och anger vilken ton som skall räknas som referens, räknar datorn ut intervallen mellan denna referenston och övriga toner i cent. I det här fallet gällde det ett stämackord, som sångarna sjunger innan de börjar sjunga på allvar. Syftet är att "kalibrera" halsarna så att skalorna kommer att stämma överens.

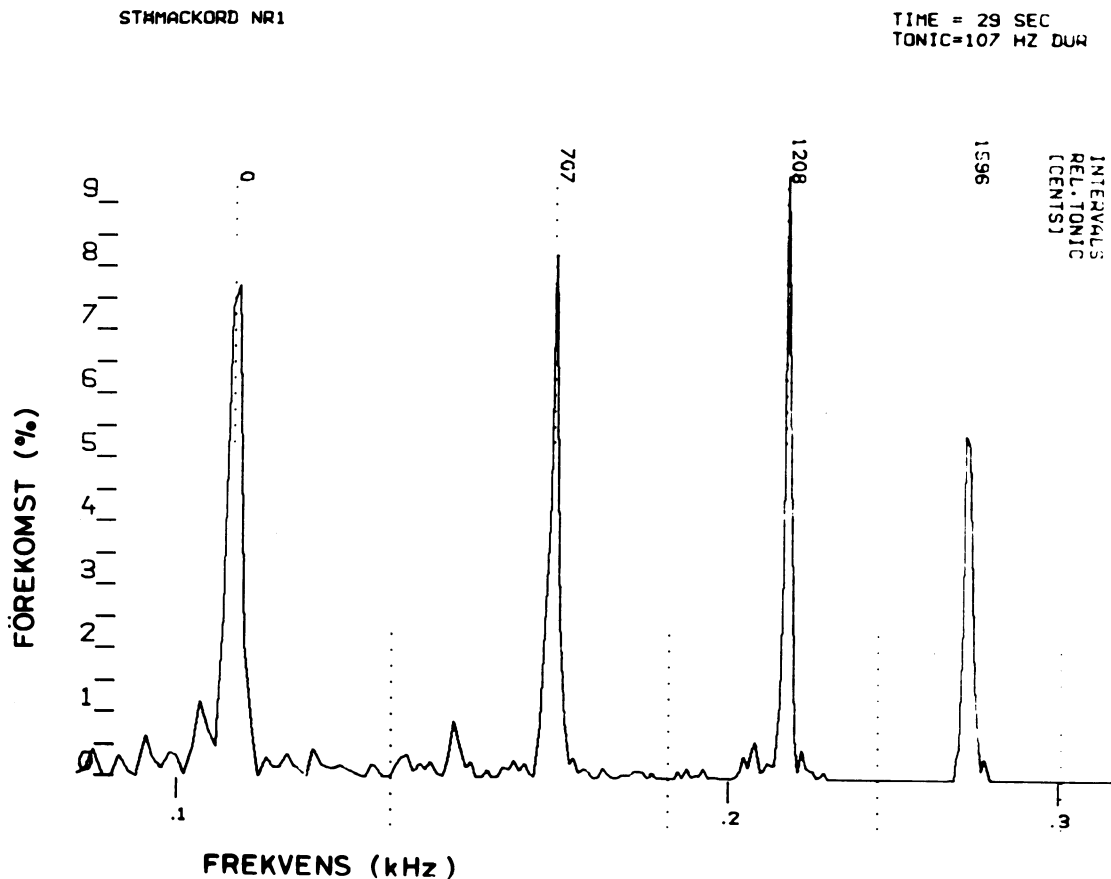


Fig 4. Fördelningen av grundfrekvensvärden i ett stämackord sjunget av barbershopkvartetten Stämjärnet.

Figuren visar att kvinten över bastonen är 707 cent, 5 cent högre än ren kvint, oktaven över samma baston är 1208 cent, 8 cent över ren och duodeciman är 1596 cent. Det ger en 388 cent stor ters mellan högsta och näst högsta stämmorna. Detta är 2 cent högre än ren stor ters! I den här stora tersen har vi alltså en klar skillnad mot de tidigare visade formaten av stor ters, som något överskred den liksvävande temperaturens 400 cent.

Innan jag nu drar växlar på detta fynd finns det skäl att titta på om fyndet står sig under ett ökat tryck från en större mängd data. Låt oss först titta på hur noggrann intonationen är. Barbershopsångarna vinnlägger sig verkligen om intonationen, precis som de säger. Eller kanske riktigare sagt, de sätter ackordens storlek i första rummet och tycks inte använda tonhöjden som ett fritt användbart uttrycksmedel. Den slutsatsen kan man dra av Fig 5 och 6.^{x)} De visar två frekvenshistogram. Fig 5 anger var frekvenserna för skaltonerna i melodistämman i barbershopkvartetten ligger i en sång. Fig 6 visar motsvarande mätning för en av våra främsta operasångare som sjunger en pianoackompanjerad sång. Barbershopsångaren ger spetsiga toppar vilket betyder att samma ton på skalan ligger ganska stilla på sitt frekvensvärde genom hela sången oavsett om tonen har den ena eller den andra harmoniska funktionen i det underliggande ackordet. Operasångaren ser ut att handskas litet friare med sina skaltoner. Operaröstens histogram uppvisar mindre spetsiga toppar än barbershopsångaren, trots att vibratots toppvidgande effekt eliminerats ur operarösten i den här mätningen.

x) Se nästa uppslag

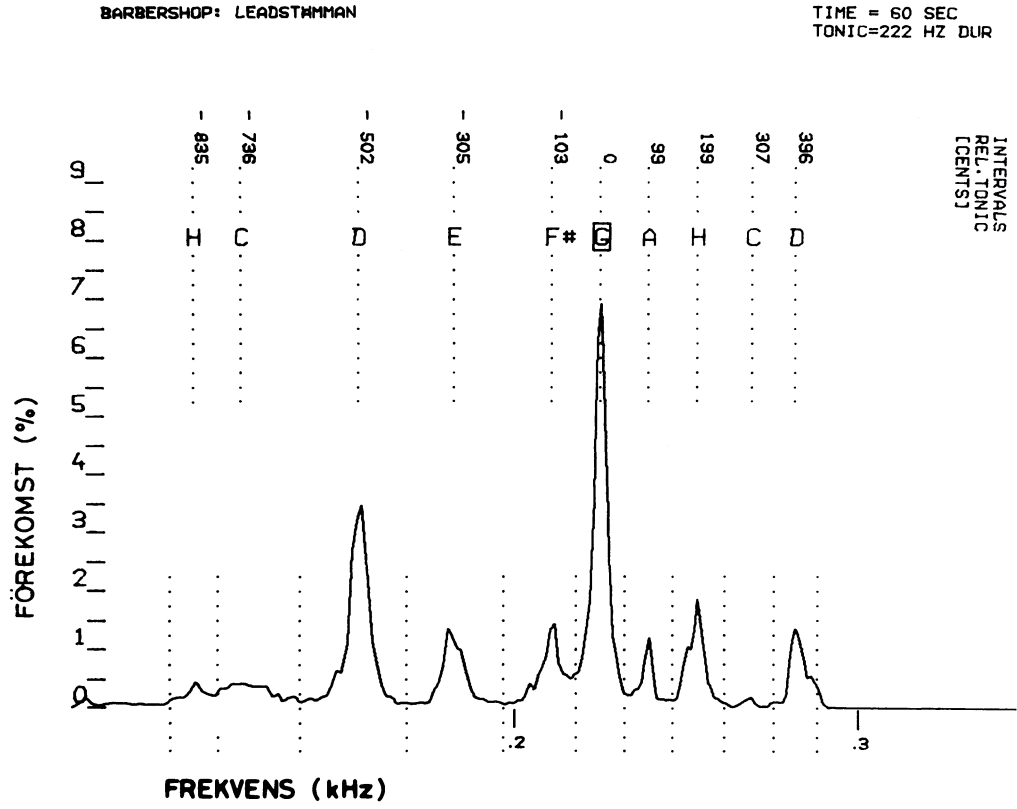


Fig 5. Fördelning av grundfrekvensvärden i melodistämman i barbershopsång.

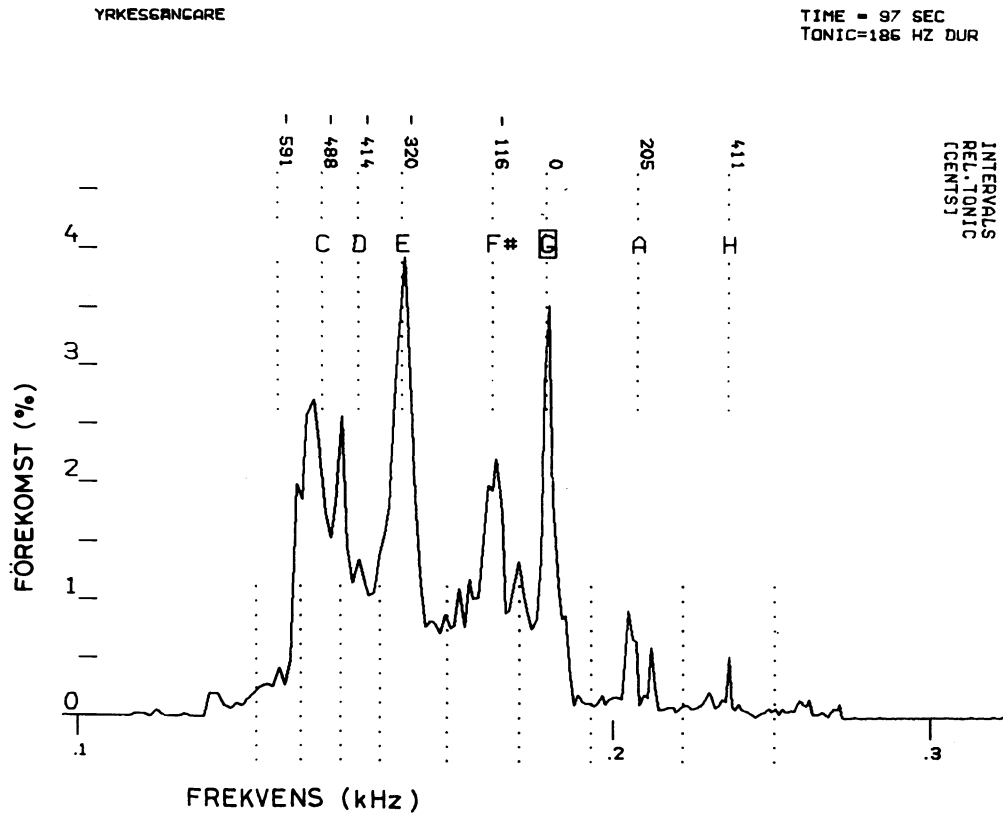


Fig 6. Fördelning av grundfrekvensvärden i melodistämman i pianoackompanjerad sång.

Låt oss nu granska intervallen i 19 tonikaackord och 16 modulationsackord hämtade från uppsjungsövningen. Medelvärdena av intervallen i dessa ackord visas på Fig 7, åter i form av avikelser i cent från liksvävande temperatursens intervall. Medelvärdena är faktiskt mycket pålitliga. Deras medelfel är i samtliga fall mindre än 3 cent. Intonationen är alltså mycket stabil. Man ser en påfallande olikhet mellan barbershopska intervall och intervall vi sett i tidigare figurer. Barbershopintervallen ligger alla under den liksvävande temperatursens medan de tidigare diskuterade nästan

alla låg över. I många fall kommer de nära rena intervall. Men med de standardavvikelsevärden som hör till medelvärdena, vore det orätt att påstå att de rena intervallen stått modell för sångarna. Det är andra intervall, men av samma figur framgår att dessa är klart lägre än dem vi sett i andra musiktyper. De skuggade fälten visar var de medelvärddade intervall vi nyss sett i instrumentalspel, faller. Kanske tonvikten på det harmoniska i barber-shopsjungandet tvingat ned intervallstorlekarna en god bit på vägen ner till rena, särskilt vad gäller stor ters och stor sext.

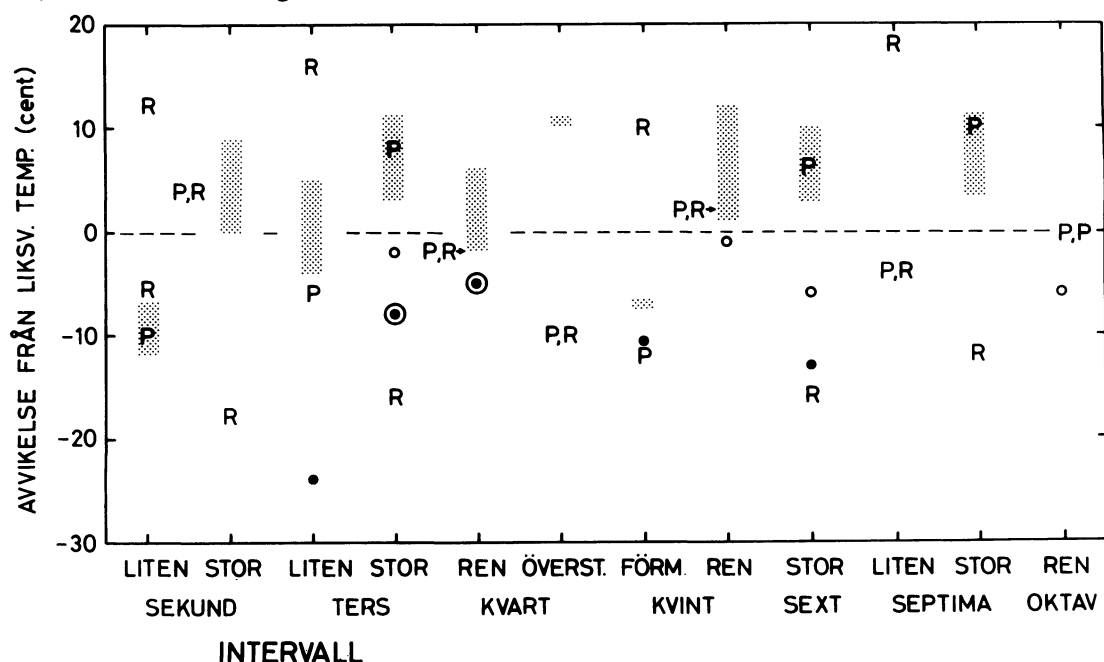


Fig 7. Genomsnittliga intervall i modulationsackord (●) och tonikaackord (○) sjungna av barber-shopkvartetten Stämjärnet. Intervallen anges i cent relativt liksvävande temperaturen, och de rena och pytagoreiska varianterna har utmärkts R resp. P. De skuggade fälten visar mätvärdena i Fig 3.

Den lilla tersen kan ses som ett stöd för den slutsatsen, och den är därför värd en extra kommentar. Den är 24 cent lägre än den är i liksvävande temperaturen, och den ligger 50 cent under den rena! Men tersen fanns högst upp i ett dominantseptimackord. Ett sådant ackord finner man även i naturtonserien mellan deltonerna 4, 5, 6 och 7. Om sångarna ville stämma efter naturtonseriens dominantseptimackord skulle de ge den högsta lilla tersen frekvensförhållandet 6:7, vilket är 33 cent under lilla tersen i liksvävande

temperaturen, alltså alldeles nära den de faktiskt sjöng. Man kan förmoda att det är den här tersen i naturtonseriens dominantseptimackord man efterbildar och struntar i den teoretiska rena skalan i det här fallet.

I de data som vi hittills tittat på har det hela tiden gällt musikers prestationer. Dessa har tolkats som indicier inte bara på hur stora intervall faktiskt är utan också på hur stora de bör vara för att låta rena. Det är väl också ett rimligt antagande, att skickliga musikers sätt att spela överensstämmer med lyssnarörats önskemål. Till slut är det ändå lyssnarens önskemål som s a s definierar vad som menas med skicklig musiker. Ändå är det intressant att se hur lyssnare reagerar på intonationen i musikpraxis. För några år sedan gjorde två musikvetenskapsstuderande, Helena Lindgren och Agneta Sundberg (1972), en undersökning av intonationen i sång. De samlade exempel ur gramofoninspelningar med mer eller mindre ledande världsstjärnor och fann både rena och ganska duktigt falska toner. De klippte ihop ett band med 16 exempel som innehöll toner med hörbarligen varierande grad av renhet. Bandet spelades upp för ett trettiotal sångexperter. Dessa fick följa med i noterna till exemplen och märka ut alla toner de uppfattade som orena. Lyssningsdata sammanställdes sedan med frekvensdata.

Fig 8 a ger ett smakprov på resultaten. Registreringarna i vänstra delen av figuren hör till toner som minst 75 % av bedömarna uppfattade som falska. Högra delen av figuren visar exempel som minst 75 % av bedömarna uppfattade som invändningsfria. Här visas frekvensen av den slingrande kurvan. Sitt utseende får den av vibratot, som innebär att frekvensen ormar sig kring ett medelvärde. Det är det medelvärdet som bestämmer den uppfattade tonhöjden. (Sundberg 1978) Det som enligt liksvävande temperaturen vore rent utmärks av mittlinjerna och de båda omgivande linjerna anger \pm en liten sekund. Det är alltså rätt saftiga exkurser frekvensen gör under vibratot. Den här typen av analys är också som man ser ganska grov. Det går inte att bestämma några mera subtila avvikelser från det teoretiskt rätta frekvensvärdet. Ändå kan man hitta rätt intressanta saker i mätningarna. Bland de

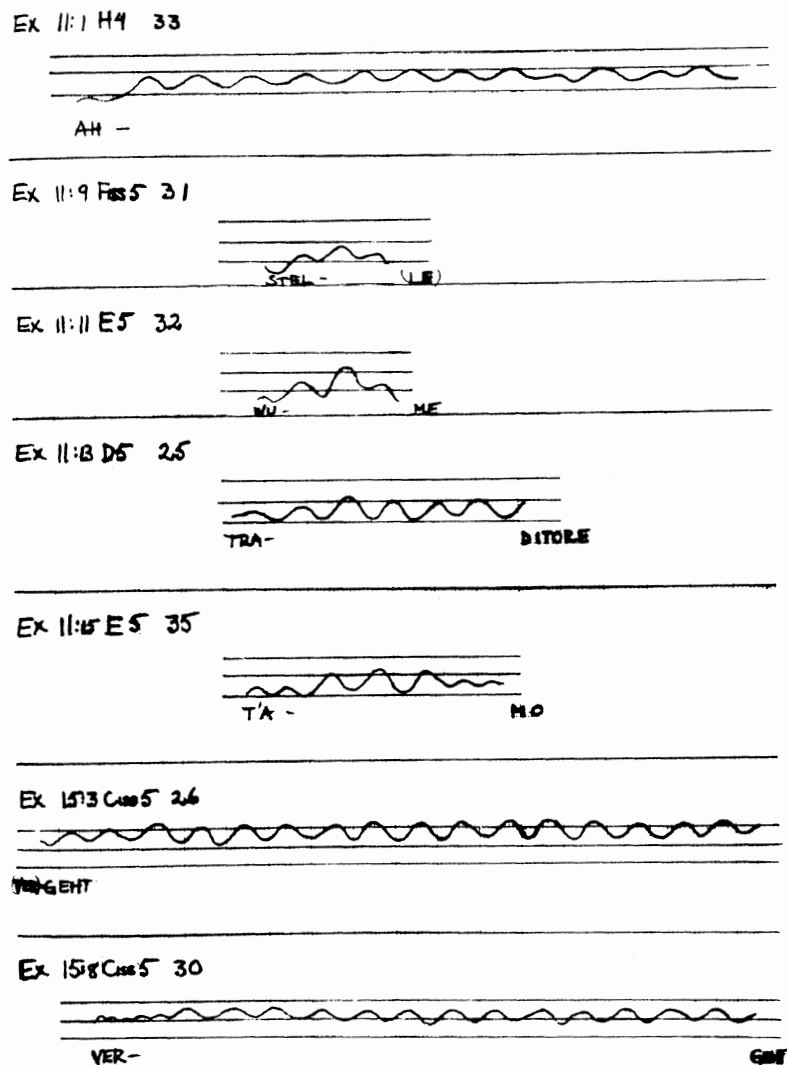


Fig. 8 a Exempel på grundtonsförlopp i sång. Den mittersta linjen i var kurva visar teoretiskt rätt frekvensvärde och omgivande linjer ligger ± 100 cent från detta. Exempelen i 8 a uppfattas som falska av flertalet musikvana lyssnare, i 8 b som invändningsfria. Efter Lindgren & Sundberg (1972)

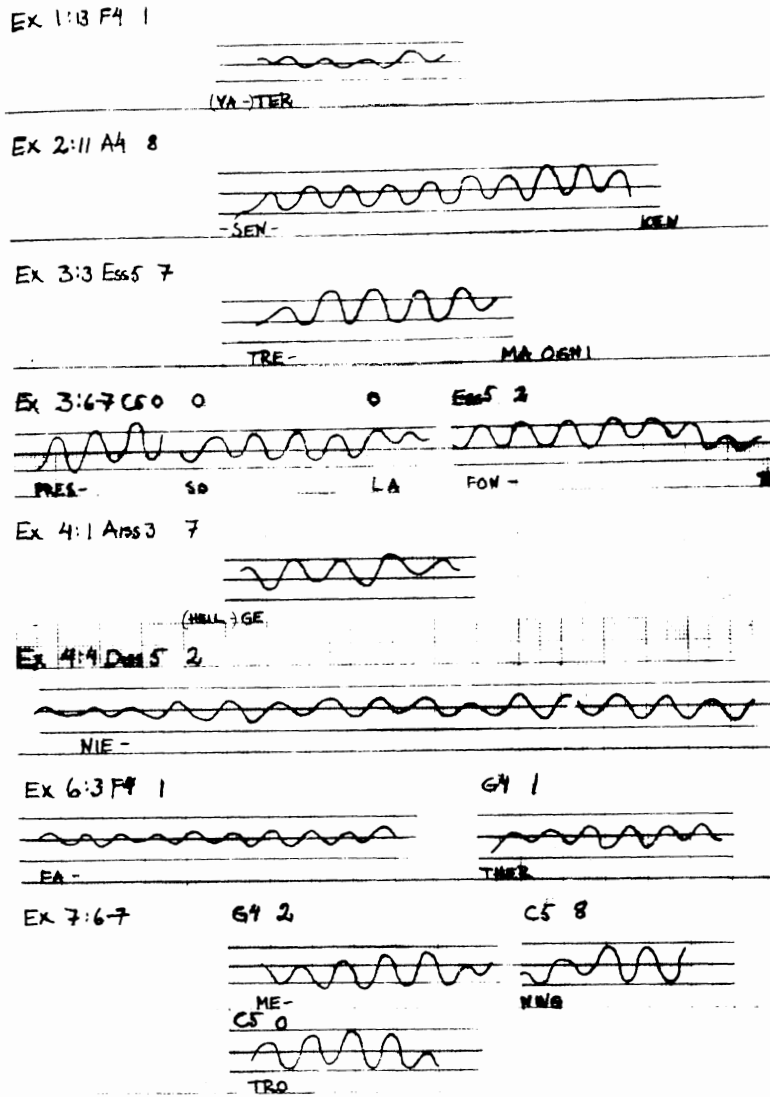


Fig 8 b. Se text till Fig 8 a.

akustiskt sett felintonerade tonerna, var det bara ett fåtal som godtogs som rena. Särskilt graverande verkade vara om tonen var för lågt intonerad eller om den stod på betonad taktadel. Det sistnämnda tyder på att uppmärksamheten sitter och stampar takten inne i en musiklyssnares hjärna! Bland de toner som accepterades som rena av minst 75 % av bedömarna fann man i första hand akustiskt sett rätt intonerade toner men också en del andra. Bland dem var flertalet för högt intonerade. Åter ser vi alltså ett bevis på lyssnarörats svaghet för teoretiskt sett för högt intonerade toner. Två för lågt intonerade toner passerade utan anmärkning. Den ena av dem kom från en oackompanjerad sång och kunde förklaras med att tonen var akustiskt rätt intonerad relativt angränsande toner. Den andra uppvisar en stigande glissandoartad intonation in mot rätt frekvens, vilken faktiskt besöks under tonens sista skälvande tiondels sekund.

Även det här resultatet tyder på att högt intonerade toner är lättare att fördrå än lågt intonerade. Detta stämmer alltså bra överens med vad vi nyss sett i instrumentalistsammanhang. Både påfallande och förvånande är vidare att tonträffningen är så oprecis: det är ingalunda fråga om någon barbershopsk precision. Fel på både 50 och 70 cent förekommer och ibland godtas sådana fel som klockren intonation! En tänkbar slutsats är återigen att också i sång används avvikelser från förväntade tonhöjder som ett uttrycksmedel.

Låt oss nu ta ett litet steg in mot teorin igen. Om vi lösgör intervall från deras musikaliska sammanhang, hur stora skall de då vara för att tillfredsställa ett kräset lyssnaröra? I ett examensarbete i talöverföring togs den frågan upp. Ågren (1976) lät musikvana lyssnare ställa in stor sekund, stor ters, kvint och oktav mellan två toner. De var syntetiskt framställda tenor- och altröster och båda tonerna hade vibrato. Intervallen var ackordiska, de ljud alltså samtidigt, och vibratot eliminerade eventuella svävningar. Fig 9 visar resultaten i form av medelvärden som viktats fram, så att bedömare med liten spridning har större effekt på medelvärdet än bedömare som var mindre säkra på sin sak. De här medelvärdena ligger otvivel-

aktigt mycket nära den liksvävande temperaturens värden, men än en gång måste konstateras att alla utom ett är en liten aning större. Det här rimmar alltså mycket bra med intonationen i musikpraxis sådan vi sett den i föregående figurer. Medelvärdena från instrumentalspel visas åter som skuggade fält. Lyssnares önskemål stämmer tydligen bra med skickliga musikers prestationer.

Alla skalor bygger på den matematiskt rena oktaven. I den sistnämnda undersökningen var emellertid en alldeles rent klingande oktav en aning högre än så, 4 cent. Och frågan är om inte den matematiskt sett rena oktaven i själva verket är en ganska bräcklig grund att bygga skalor på. Ward (1954) visade att en ren melodisk oktav mellan två sinustoner måste sträckas rätt många cent för att låta helt ren. Senare visade vi här på KTH att detta inte bara gäller sinustoner utan också komplexa toner med en massa övertoner (Sundberg & Lindqvist 1973). Genomsnittligt fann vi att man får en ren oktav, först när intervallet är ca 15 cent större än en teoretiskt ren oktav. Även om den undersökningen använde mera musikaliska toner än sinustoner, var det inte fråga om toner man hör i klingande musik. Idag är vi bättre rustade att framställa fullt kontrollerade toner som låter som sång. Syntesapparaten heter MUSSE, cf Larsson (1977). Det den producerar kan låta som Ljud-exempel 5.

Nå, var nu detta en godtagbar intonation av en treklang? Ja, genomsnittet av 13 musikexperter tyckte det. Ändå var oktaven här 14 cent större än en teoretiskt sett ren oktav.

Fig 10 visar hur de tretton bedömarna röstade i ett fall med syntetisk baryton och ett med syntetisk sopran. De lyssnade till sådana här treklanger där den sista tonens frekvens varierades. Varken majoriteten eller de sex bedömare som hade minsta spridningen accepterar en teoretiskt ren oktav som ren. Detta resultat stämmer väl överens med genomsnittet vi fick med de nyss nämnda komplexa men inte helt musikaliska tonerna. Överensstämmelsen talar för att de rena oktaver vi då fick fram faktiskt kan ha en musikalisk relevans.

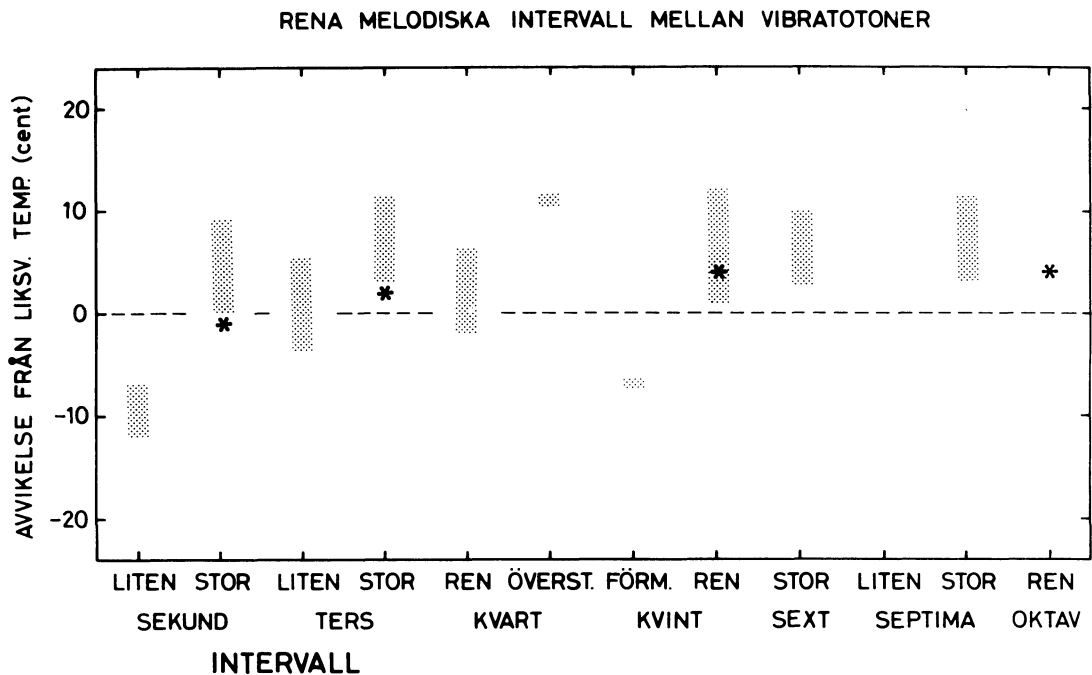


Fig 9. Genomsnittliga intervallstorlekar mellan två vibratotoner som inställts av musikvana lyssnare så att intervallen uppfattades som rena. Intervallen anges i cent relativt liksvävande temperaturen, och de skuggade områdena visar värdena i Fig 3. Efter Ågren (1976)

Vi kan nu göra följande experiment. Vi gör en kedja av oktaver som uppfattas som rena. Storleken varierar med oktavens frekvensläge. En sån kedja kommer att ge frekvenser som avviker från den liksvävande temperaturens värden. Eftersom alla oktaver är en smula större än de matematiskt rena, får vi för låga frekvenser i basen och för höga i diskanten. Ritar man upp avvikelserna från den liksvävande temperaturens värden får man den heldragna kurvan i Fig 11. Ringarna som ligger utströdda kring kurvan visar var frekvenserna genomsnittligt ligger i solistiskt violin-, oboe- och flöjtspel (Fransson & al 1974). Överensstämmelsen är inte så dålig. Fig 12 visar hur en flöjtist spelar efter diktamen och efter noter, dvs utan och med kunskap om vilken ton han skall spela härnäst, eller med andra ord utan och med melodiskt gehör. Pilarna visar vart frekvensen tog vägen när spelaren spelade efter noter. Nästan alla pilar hamnar mycket närmare

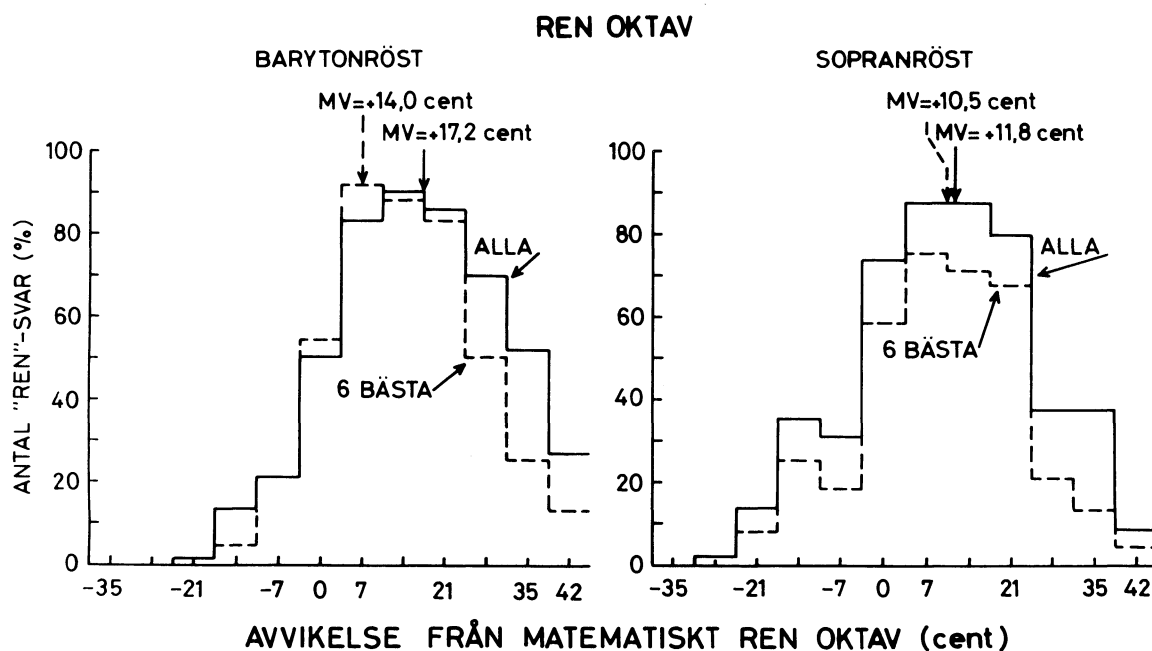


Fig 10. Fördelning av svaren i ett lyssnarförsök, där musikexperter bedömde vad som lät som en helt ren oktav. De tre lägsta tonerna var stämde enligt liksvävande temperaturen men överoktaven till utgångstonen var stämd på olika sätt.

kurvan än startpunkterna. Det tycks som om kurvan ger en bra approximation av den skala flöjtisten följer när det gäller melodiskt spel. Fig 13 visar samma kurva jämförd med hur ett nystämt piano genomsnittligt är stämt. Även här ser vi en bra likhet mellan kurvan och punkterna. Pianot är alltså inte heller det stämt efter den liksvävande temperaturen utan stäms med för stora oktaver, vilket för övrigt är ett sedan länge visat faktum, se Schuck & Young (1943).

De här tre figurerna visar att den skala man följer i klingande praxis är sträckt. Den innehåller intervall som alla är litet större än de borde vara teoretiskt sett. Teorin stämmer tydligen illa med verkligheten och bör alltså bytas ut.

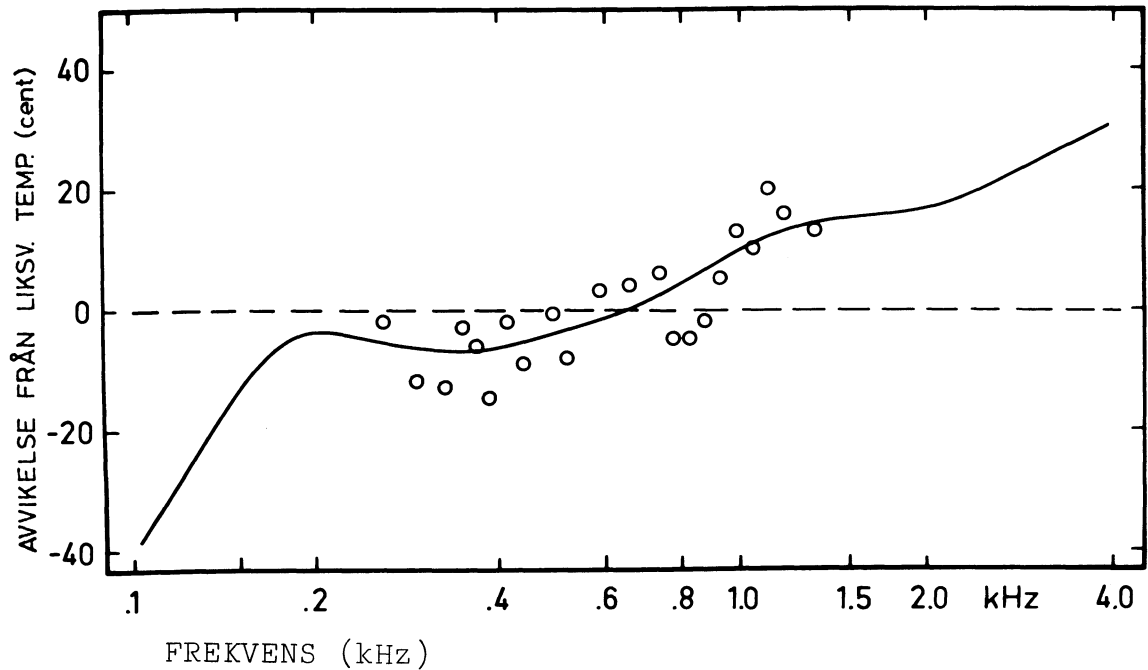


Fig 11. Pingen visar genomsnittliga avvikelser från liksvävande temperaturs frekvenser skaltonsfrekvenser i solospel på fiol, oboe och flöjt. Kurvan anger den avvikelse som skulle kunna förväntas om skalan vore uppbyggd av perceptuellt rena oktaver. Efter Sundberg & Lindqvist, Journ. Acoust. Soc. Amer. 54 (1973)

Den tyske hörsselforskaren Terhardt har gjort en ansats i den riktningen och han utgår - inte oväntat - från hörseln istället för från talförhållanden. Hans utgångspunkt är naturtonserien, men inte frekvenserna i den utan de tonhöjder man kan uppfatta från deltonerna i ett harmoniskt spektrum. Här ligger själva poängen. Det intervall som vi kan uppfatta mellan t ex första och andra deltonerna i ett sådant spektrum är litet större än intervallet mellan ensamt ljudande toner med samma frekvenser. Ligger alltså oktaven inne i ett spektrum "hörs" den litet större än om samma toner följer på varandra. Den här effekten vill Terhardt se som en typ av maskering. Två samtidigt ljudande toner påverkar varandras tonhöjder ömsesidigt så att den lägre tonen skjuter iväg den högre uppåt och den högre tonen skjuter

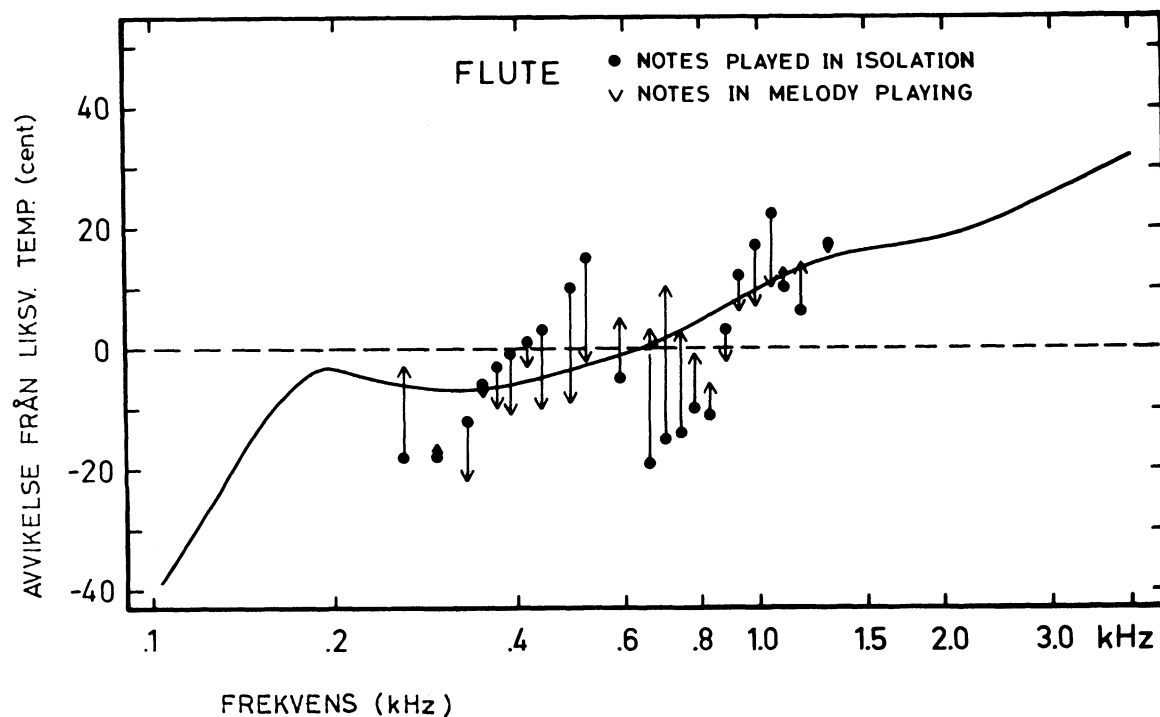


Fig 12. Punkterna visar skaltonsfrekvenserna uppmätta när en flöjtist spelar efter successiv diktamen. Pilarna visar hur frekvenserna ändrades när samma flöjtist spelade efter noter. Kurvan är densamma som i Fig 10. Efter Sundberg & Lindqvist, Journ. Acoust. Soc. Amer. 54 (1973)

ner den lägres tonhöjd något. På det viset ökas alltså tonhöjdsavståndet mellan de båda tonerna.

Detta stämmer bra överens med det faktum att de flesta intervall spelas litet större än de teoretiskt sett skulle vara. Det är helt enkelt ackordiska intervall som står modell för vad vi tycker är rent, och därför måste intervall spelas litet större än vad teorin förutsäger. Men en följd av Terhardts teori är att ackordiska intervall borde låta litet större än melodiska intervall av samma fysiska storlek. Å andra sidan konstaterade Shackford inga påtagliga skillnader mellan melodiska och ackordiska intervall.

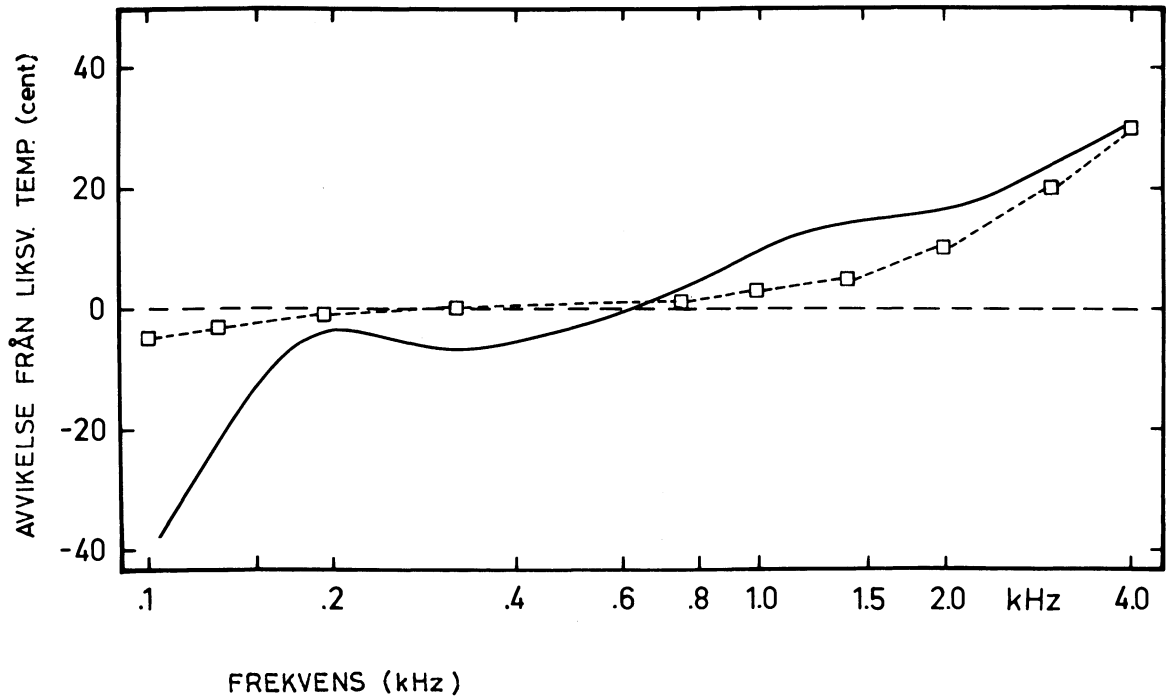


Fig 13. Ringarna visar genomsnittliga skaltonsfrekvenser i ny-stämnda flyglar. Kurvan är densamma som i Fig 10 och 11. Efter Sundberg & Lindqvist, Journ. Acoust. Soc. Amer. 54 (1973)

Frågan är ändå som nämnts om ackordiska intervall verkligen alltid är så rasande ackordiska. Det melodiska sammanhanget måste alltid spela in, så att en tons frekvens bestäms inte bara med hänsyn till frekvenserna för andra samtidigt ljudande toner. Också föregående och kommande toners frekvenser borde ha betydelse och i så fall får även ackordiska intervall en aning av melodiska intervall över sig. Finns det någon renodlat ackordisk musik så är det väl barbershop-sång. Om vi tar dess intervall som de mest ackordiska i det vi sett här, stämmer det hela litet bättre. Deras intervall intonerades ju litet trängre än intervallen vi sett i andra musiktyper. Det här får bli en hypotes tills vidare.

Vad kan vi dra för slutsatser just nu? Ja, talmystiken kring ren stämning tror jag vi kan förvisa till skuggornas värld, och det är tveksamt om den pytagoreiska och den liksvävande tempererade skalan har något med den klingande musikverkligheten att skaffa. De kan i alla fall knappast förut säga vad som kommer att låta rent och falskt. Den liksvävande temperaturen används så vitt jag vet endast på ett enda instrument, orgeln (cf Sundberg 1967) och den tolereras väl där i brist på bättre. Redan idén att bygga teorier om skaltonsfrekvensernas inbördes förhållanden på fysisk grund i stället för perceptuell ter sig, åtminstone i ljuset av vad som ovan visats, som rätt så dålig och på förhand dömd att misslyckas. En intressant uppgift för musikteorin verkar vara att med utgångspunkt från Terhardt och andra hörsselforskare tillverka en ny skala.

Referenser

- Shackford, C., (1961, 1962a resp 1962b): "Some Aspects on Perception I, II & III." *Journ. Music Theory* 5, pp.162-202, 6, pp. 66-90 and 6, pp. 295-303.
- Sundberg, J. & Lindqvist, J., (1973): "Musical Octaves and Pitch." *Journ. Acoust. Soc. Amer.* 54, pp. 922-929.
- Fransson, F., Sundberg, J. och Tjernlund, P., (1974): "The Scale in Played Music", *Svensk Tidskrift för Musikforskning* 56:1, pp. 49-54.
- Lindgren, H. och Sundberg, A., (1972): "Grundfrekvensförlopp och falsksång", 60-poängsuppsats i musikvetenskap, Stockholms Universitet.
- Ward, D., (1970): "Musical Perception", Kap. 11 i *Foundations of Modern Auditory Theory* (ed. J. V. Tobias), Academic Press, New York.
- Sundberg, J., (1978): "Effects on the Vibrato and the "Singing Formant" on Pitch", pp. 51-72 i *Musicologica Slovaca VI*, In memoriam Miroslav Filip.
- Larsson, B.: "Music and singing Synthesis Equipment", STL-QPSR 1/1977
- Ward, D., (1954): "Subjective Musical Pitch" *Journ. Acoust. Soc. Amer.* 26 pp. 369-380.
- Terhardt, E., (1969/70): "Oktavspreizung und Tonhöhenverschiebung bei Sinustönen", *Acustica* 22, pp. 4 348-351.
- Terhardt, E., (1971): "Die Tonhöhe harmonischer Klänge und das Oktavintervall", *Acustica* 24, pp. 126-136.
- Askenfelt, A., (1978): "Automatic Notation of Played Music: The VISA Project", kommer att tryckas i *Proceedings of the Internat. Ass. of Music Libraries/ Internat. Ass. of Sound Archives Annal Conf.*, Lissbon Juli.
- Ågren, K., (1976): "En akustisk jämförelse av alt- och tenorröster", examensarbete i talöverföring, KTH.
- Schuck O.H. & Young R.W., (1943): "Observations on the Vibrations of Piano Strings", *Journ. Acoust. Soc. Amer.* 15, pp.1-11.
- Sundberg, J., (1967): "The 'Scale' of Musical Instruments", *Svensk Tidskrift för Musikforskning* 49, pp. 119-133.

L J U D E X E M P E L

Sid. A

Plomp: Kontinuitetseffekter i ljuduppfattning

Spår I

- Ex. 1 Sinuston som glider mellan 500 och 2000 Hz och som omväxlar med brusband omfattande frekvensområdet 900 till 1100 Hz. Glissandot låter kontinuerligt när dess frekvens faller inom brusbandets område. (1' 15")

Spår II

- Ex. 2,3,4 Samma som exempel 1, men sinustonen har ersatts med (2) orgelmusik, (3) sång med orkester och (4) soloviolin. Då och då kopplas bruspulserna bort. Musiken blir avsevärt mera störd av de upprepade avbrotten när dessa inte fylls ut med brus. (3' 10")

Spår III

- Ex. 5.6 Frekvensmodulerad (5) och amplitudmodulerad (6) ton som småningom omväxlar med bruspulser eller pauser. (1' 15")

Spår IV

- Ex. 7 Skala följd av samma skala där dock senare delen av varannan ton har ersatts med brus. Exemplet upprepas 4 gånger, den tredje gången utan bruspulser i avbrotten. (25")
- Ex. 8 Samma som exempel 7, men första delen av varannan ton har ersatts med brus. (30")

Sid. B

Plomp: Kontinuitetseffekter i ljuduppfattning

Spår I

- Ex. 9 100 msek. långa toner åtskilda ett halvtonsteg i frekvens; exempel på samhörighet, se fig. 5. (8")
- Ex. 10 100 msek. långa toner åtskilda 20 halvtonsteg (oktav plus liten sext). De höga tonerna verkar bilda ett förlopp för sig och de låga ett annat; exempel på klyvning, se fig. 6 (8")
- Ex. 11 170 msek. långa toner åtskilda med 7 halvtonsteg (ren kvint). Man kan viljemässigt växla mellan att uppleva klyvning eller samhörighet. (10")

- Ex. 12 Snabb tonföljd av små intervall. Följden låter som en kontinuerlig, frekvensmodulerad ton; exempel på sammansmältning se fig. 7. (5")
- Ex. 13 Följd av toner som är 2 sek. långa. Tonerna verkar inte relaterade till varandra utan förefaller fristående. (10")

Spår II

- Ex. 14 Tonföljd enligt schemat ABA ABA ABA... B-tonerna är hälften så långa som A-tonerna och ligger stilla i frekvens, medan A-tonerna börjar en oktav över B-tonerna och rör sig stegvis nedåt tills de ligger en oktav under B-tonerna. När intervallet mellan A- och B-tonerna är stort upplevs klyvning. När det är litet upplevs samhörighet så att en galopp-rytm uppfattas, se fig. 8. (45")
- Ex. 15 Tonföljd av slumpmässigt valda halvtonsteg i ökande tempo. Vid måttligt tempouppfattas samhörighet, vid mycket snabbt tempo sammansmältning, se fig. 10. (15")
- Ex. 16 Tonföljd av slumpmässigt valda intervall på ca 20 halvtonsteg (oktav plus liten sext). Tempot är 20 toner per sek. Tonerna kan inte uppfattas som en sammanhängande helhet förrän tempot blir långsammare mot slutet av exemplet, se fig. 11 (17")

Spår III

- Ex. 17 Exempel på stäm korsning. Det är svårt att uppfatta en tonföljd genom en stäm korsning. Det låter snarare som om de två stämmorna beskriver en V-resp. A-formad kurva, se fig. 12 (17")
- Ex. 18 Två melodier spelas om och om igen i tempot 10 toner per sek. Varannan ton hör till den ena och varannan ton till den andra melodin. Mellan varje omtagning höjs tonerna i den ena melodin ett halvtonsteg, medan den andra melodins toner ligger stilla. När melodierna kommit tillräckligt vitt isär är de lätta att känna igen tack vare klyvningseffekten, se fig. 13. (35")

Sundberg: Rent och falskt i klingande praxis

Spår IV

- Ex. 1 Stor ters enligt ren, liksvävande tempererad resp. pytagoreisk stämning. (16")
- Ex. 2 Treklang i ren, liksvävande tempererad resp. pytagoreisk stämning. (26")

Spår V

- Ex. 3 Oktav som är 1204 cent (4 cent större än matematiskt ren oktav), först med sedan utan vibrato. Vibratot eliminerar svävningarna. (16")
- Ex. 4 Först strupvibrationerna upptagna med kontaktmikrofoner (accelerometrar) placerade på sångarna i Barbershopkvartetten Stämjernet, som sjunger en ackordföljd; därefter samma ackordföljd upptagen med vanlig mikrofon. (35")

- Ex. 5 Treklång sjungen av sångmaskinen MUSSE. Oktaven i treklången är 1214 cent (14 cent större än matematiskt ren oktav). (8")

Sid. C

Caldersmith: En väg till nya konstruktioner av stränginstrument

- Ex. 1 Violin: långsam skala spelad på traditionell violin (a) och ny violin (b), två snabba skalor spelade på traditionell violin (c) och ny violin (d). (1' 20")
- Ex. 2 Viola: långsam skala spelad på traditionell viola (a) och ny viola (b), två snabba skalor spelade på traditionell violin (c) och ny violin (d). (1' 20")
- Ex. 3 Cello: spel på traditionell cello (a), ny cello (b) och ett litet musikprov med ny cello (c). (50")
- Ex. 4 Stråkktrio med traditionella instrument (a) och nya instrument (b) (1' 10")

Sid. D

Jansson och Gabrielsson: Analys av fiol och gitarrklang

- Ex. 1 Inspelningar av en fiol med mikrofonen i
a) vänster öra
b) höger öra
på spelaren. Ur J.F. Mazas: Douze petits duos pour deux violons. Op. 38 no 3 D-dur. (Från Jansson 1978, Svensk Tidskrift för Musikforskning) (20").
- Ex. 2 Inspelningar av en fiol i fyra olika riktningar i ekofritt rum jfr fig. 7, med mikrofonen
a) till höger om och framför spelaren
b) till höger om och bakom spelaren
c) till höger om och till vänster om spelaren
Ur J.S. Bach: Brandenburgerkonsert nr 3, G-dur BWV 1048 spelad av Lars Frydén. (Från Jansson 1978, Svensk Tidskrift för Musikforskning), (45")
- Ex. 3 Ur inspelningar av skalor i efterklangsrums med fiolerna med
a) högsta
b) lägsta
faktorpoäng i faktor 3, jfr fig. 12. (Från Jansson 1978, Svensk Tidskrift för Musikforskning) (15").
- Ex. 4 Inspelningar av en fiol med olika filtreringar, jfr fig. 13.
a) Normalt, lågpass 21 Bark (8 kHz), normalt, högpass 21 Bark normalt
b) " " 17,5 " 4 " " " 17,5 " "
c) " " 13 " 2 " " " 13 " "
d) " " 8,5 " 1 " " " 8,5 "

Ur J.S. Bach: Brandenburgerkonsert nr 3, G-dur BWV 1048 spelad av Lars Frydén. (Från Jansson 1978, Svensk Tidskrift för Musikforskning) (2')

Ex. 5 Inspelning i normalt rum av

a) gitarr 1

b) gitarr 4

jfr fig. 15 Ur F. Tarrega: Lagrima (se fig. 14) spelad av Peder Riis (1')

Ex. 6 Inspelning i ekofritt rum av enstaka toner från

a) tredje lösa strängen; ordning: gitarr nr 1,4; 1,4; 1,4.

b) tredje strängens oktav; ordning: " " 1,4; 1,4; 1,4,
(55")

Ex. 7 Inspelningar av gitarr 1 med olika filteringar

a) Normalt, lågpass 17,5 Bark (4kHz) normalt, högpass 17,5 Bark normalt

b) " " 13 " 2 " " " 13 " "

c) " " 5 " 0,5" " " 5 " "

Ur F. Tarrega: Lagrima (se fig. 14) spelad av Peder Riis, (50")



