

## Rum och klang i upptagning och återgivning

Civilingenjör Stig Carlsson, Stockholm.

Rum har stor, ja ofta avgörande betydelse för hur ljud låter, hur musik klingar. Rummets bidrag till hörselupplevelsen brukar omtalas som rummets "akustik". Akustiken hos en lokal karaktäriseras vanligen med värdeord som skön, varm, levande, god, distinkt, torr, kall, hård, oklar, dålig. Omdömet varierar ofta med typen av ljud.

Rummets bidrag består i att dess vägg-, tak- och golvytor mer eller mindre fullständigt reflekterar infallande ljud, huvudsakligen enligt samma geometriska regler som gäller för optiska speglar. Som en följd av dessa reflektioner nås lyssnaren – efter det direkta ljudet från ljudkällan – av reflekterat ljud från olika riktningar och med olika tidsfördröjning i förhållande till direktljudet.

Det reflekterade ljudet ändrar successivt karaktär, snabbare ju mindre rummet är. Dels ökar mängden riktningar hos det reflekterade ljudet, samtidigt som ljudstyrkan hos varje enskild stråle avtar; det reflekterade ljudet övergår i en alltmer diffus efterklang. Dels undergår det reflekterade ljudet så småningom en klangfärgsförändring, eftersom absorptionen hos ljudabsorberande material i rummet och hos de reflekterande ytorna varierar med frekvensen; normalt dämpas höga frekvenser snabbast, låga frekvenser långsammast.

Om ljudet från ljudkällan inte är snabbt föränderligt utan består av relativt varaktiga toner kan rummets egenskap av akustisk resonator med ett stort antal resonansfrekvenser göra sig märkbar, speciellt i mindre rum, t.ex. bostadsrum och vid låga frekvenser. Det reflekterade ljudet, och därmed kombinationen av direktljud och reflekterat ljud, blir då ojämnt fördelat i rummet ("stående vågor"), och ljudets fördelning i rummet ändras med frekvensen. Samtidigt förstärks det reflekterade ljudet – och därmed kombinationen av direktljud och reflekterat ljud – vid de av rummets resonansfrekvenser som ljudkällan på grund av sin placering och sina riktningsegenskaper aktiverar.

71.02.23/GK  
521 086

## **Mikrofonen**

De vanliga typerna av mikrofoner är konstruerade att känna ljudtrycket eller ljudtrycksgradienten (skillnaden i ljudtryck mellan mikrofonens fram- och baksida) eller en kombination av dessa båda.

Den tryckkännande mikrofonen är utan riktverkan så länge ljudets våglängd är stor i förhållande till mikrofonens dimensioner, dvs. vid låga och medelhöga frekvenser.

Avancerade utföringsformer i litet format och med membran såväl framåt som bakåt är utan riktverkan tämligen högt upp i diskantregistret.

Den tryckgradientkännande mikrofonen, ofta kallad velocitymikrofon, känner ljud framifrån och bakifrån men är okänslig för ljud från sidan eller uppfifrån; riktningsmönstret liknar siffran 8.

Kombinationen av den tryckkännande och den tryckgradientkännande mikrofonen är gjord att känna ljud, som kommer framifrån, och att vara okänslig för ljud bakifrån; riktningsmönstret brukar kallas kardioid eller njure. Denna mikrofontyp finns med omställbart riktningsmönster och är ofta kontinuerligt variabel från enbart tryckkännande till enbart tryckgradientkännande funktion; omställningen ändrar normalt även tonkurvan.

Riktverkan hos mikrofoner är i första hand värdefull för uppgiften att undertrycka eventuella störande ljud från bestämda riktningar, således huvudsakligen från relativt närbelägna storkällor. Riktmikrofoner används också för att dämpa lokalens efterklang; riktningsmönstret "kardioid" ger 4 à 5 dB och riktningsmönstret "8" 7 à 8 dB efterklangsdämpning. (Minskning av mikrofonavståndet till hälften ger ungefär 6 dB dämpning av efterklngen).

Ur klanglig synpunkt är det vanligen fördelaktigare att dämpa efterklngen genom att minska mikrofonavståndet än genom att använda någon typ av riktmikrofon. Att dämpa efterklngen genom att undertrycka ljud från vissa riktningar innebar nämligen normalt att efterklngens diffusitet minskar. Ett i verkligheten mjukt avklingande ljud riskerar då att få ett ojämnt tidsförlopp, så att klngen låter hård eller "raggig".

Mikrofoner utan riktverkan möjliggör därför enligt mina erfarenheter klangligt mer levande och skönare upptagningar än riktmikrofoner. Riktmikrofoner åtnjuter emellertid stor popularitet.

## **Hörseln**

Örat är ljudtryckskännande och därför upp till 500 à 1000 Hz (så länge huvudet är litet i förhållande till ljudvåglängden) lika känsligt för ljud från alla riktningar. Över 1000 à 2000 Hz förstärks ljudtrycket vid den del av huvudet som är vänd mot ljudriktningen (på grund av reflektion) och försvagas ljudtrycket vid huvudets motsatta sida (på grund av skuggning). Diskantljud låter därför starkare, när de kommer från sidan; och styrkeskillnaden mellan de båda öronen kan då röra sig om 20 dB. Det brukar ofta medföra, att ansiktet vänder sig mot ljudkällan.

Hörseln är ett subjektivt sinnesorgan. Dess uppbyggnad och funktionssätt medger orientering i rummet och lokalisation och observation av enskilda ljudkällor. (För uppgiften att göra objektiva iakttagelser beträffande ljudet i en viss position är emellertid en förstklassig mikrofon vida överlägsen).

Hörselns förmåga att orientera sig mot en utvald ljudkälla eller grupp av ljudkällor förutsätter, att båda öronen bidrar med observationer. Vilken betydelse orienteringsförmågan har för möjligheten att urskilja och uppfatta enskilda ljud, märker man om man omöjliggör det binaurala hörandet genom att täcka över det ena örat.

Hörselintrycket grundar sig på en jämförelse och sortering av impulserna från de båda öronen. Direktljudet från den iakttagna ljudkällan sorteras fram och kombineras med motsvarande reflekterat ljud från olika riktningar. Den uppfattade ljudstyrkan är summan av intensiteterna hos direktljudet och det reflekterade ljudet. Den uppfattade ljudriktningen är direktljudets, åtminstone för den del av ljudet som har nått fram inom 30 à 50 millisekunder efter direktljudet; att reflekterat ljud, som når lyssnaren från andra riktningar, ingår i denna del av ljudet, brukar inte uppfattas. Denna tidiga del av det reflekterade ljudet bidrar vanligen till ökad uppfattbarhet hos ljudet.

Hörselns orienteringsförmåga har till följd, att både ljudkällor i andra riktningar och efterklangen i rummet (dvs. reflekterat ljud som når fram mer än 100 millisekunder efter direktljudet) märks väsentligt mindre och stör väsentligt mindre än vad som svarar mot de fysikaliska styrkeförhållandena. Den subjektiva dämpningen av dessa ljud är av storleksordningen 10 dB.

Det reflekterade ljud som når lyssnaren inom 30 à 50 millisekunder efter direktljudet, dvs. via högst 10 à 17 meter längre gångväg än direktljudet, bidrar inte bara till att öka direktljudets styrka och uppfattbarhet, utan det har också en avgörande betydelse för klangupplevelsen. Det ger ljudet en varmare, rikare, livfullare karaktär, ger klangen glans och fyllighet. Det ger också de enskilda instrumentljuden deras "kroppslighet", deras rumsliga förankring, eftersom det består av ljud som reflekterats i instrumentens närmaste omgivning och därmed förmedlar karaktäristiska informationer om instrumentens akustiskt-geometriska relationer till sin omgivning.

## **I konsertsalen**

De olika musikinstrumenten har – som alla typer av ljudkällor – vart och ett sina karaktäristiska riktningsegenskaper. Vissa instrumentkategorier har så brett riktningsmönster,

att de kan betraktas som i det närmaste utan riktverkan (exempel: flöjt, nästan fiol). Andra åter har utpräglad riktverkan, åtminstone i sitt övre register, och strålar ljudet starkast framåt (exempel: trumpet) eller bakåt (exempel: valthorn) eller uppåt (exempel: tuba). Ljudet riktas i en allt smalare stråle, ju mindre ljudets våglängd är i förhållande till dimensionerna hos den yta som sänder ut ljudet, dvs. ju högre frekvensen är.

I sin tonproduktion är musiker vanligen mycket beroende av det bidrag till klangen som en god musiklokal kan ge. Placera en violinist med sin fiol i ett ekofritt rum (där väggar och tak är så kraftigt ljudabsorberande, att inget ljud reflekteras), och han slutar spela. Placera en symfoniorkester mitt ute på en äng, långt från reflekterande väggar och tak, och man inser snart, att konsertsalen är en nödvändig del av instrumentariet.

Det tidiga reflekterade ljudet är i första hand ett resultat av reflektioner i musikinstrumentens närmaste omgivning. I konsertsalen har därför utformningen av podieområdet, dess väggar, golv och tak, stor betydelse. För åhörare ute i salen inverkar även utformningen av podieområdets anslutning till salen samt salens sidoväggar och tak.

För efterklangen har samtliga reflekterande ytor i salen betydelse, liksom mängden av ljudabsorberande material, dess beskaffenhet och placering. Podieområdets utformning kan emellertid ha avgörande inverkan. Om podieytorna riktar större delen av ljudet direkt mot det kraftigt ljudabsorberande åhörarområdet, blir efterklangsenergin nämligen betydligt mindre än om podieytorna är utformade att sprida ljudet tämligen godtyckligt i alla riktningar ut från podiet.

Både det tidiga reflekterade ljudet och en väl diffuserad efterklang är väsentliga för en god konsertsal. Men medan önskemålen beträffande efterklangens styrka och varaktighet kan variera med typen av musik, är en tillräcklig mängd tidigt reflekterat ljud av avgörande betydelse för god uppfattbarhet och väl differentierade klangegenskaper vid all slags musik. Existensen av olika utbredningsvägar från instrument till lyssnare är ofta bestämmande för både klangfärg och klangens karaktäristiska tidsförlopp (drastiskt exempel: valthorn). De olika utbredningsvägarnas respektive tidsfördröjningar medför också, att lyssnaren får ett akustiskt intryck av att instrumenten har en rumslig förankring och befinner sig i samma rum som lyssnaren.

### ***Upptagningen: balanseringen***

Modern upptagningsteknik har utomordentligt stora tekniska resurser till sin tjänst. Mikrofoner kan placeras varhelst man önskar; varje enskild ljudkälla kan ges sin egen mikrofon och förses med artificiell efterklang, och de enskilda ljudkällornas ljudstyrkor kan väljas och balanseras efter behag. Men ...

I gestaltningen av musiken ingår som väsentligt led den akustiska balans och den klangbild som musikerna själva hör och som deras styrkeavvägningar och fraseringar utgår från. Ingen upptagningsmetod erbjuder i sig själv garanti för att mikrofonerna fångar samma akustiska balans och klang som musikerna hör. Om upptagningen sker med individuella mikrofoner för de enskilda instrumenten eller de enskilda stämgrupperna, så bestäms balansen mellan de olika stämmorna i upptagningen helt av de styrkeställningar som upptagningsledningen i

kontrollrummet väljer, dvs. den blir då i första hand ett uttryck för upptagningsledningens värderingar. Risken är stor, att upptagningen då kommer att gå miste om den balans och den klang som den musikaliska gestaltningen utgår från, och att därmed den kontroll förloras som de konstnärligt ansvariga musikerna själva har utövat under interpretationen.

En metod att undgå allvarligare balanseringsfel är att låta inspelningen ske med en flerkanalig bandspelare med separat kanal för varje mikrofon och att utföra den slutliga balanseringen efteråt i samarbete med musikerna.

För att upptagningen skall kunna avspegla framförandets klangliga utformning, måste den emellertid tillgodogöra sig det tidiga reflekterade ljudet i upptagningslokalen och fånga något av dess samspel med instrumentens direktljud. Detta sker bäst, när upptagningen av såväl direktljudet som det reflekterade ljudet görs från endast en punkt i lokalen per slutlig återgivningskanal, dvs. med en mikrofon vid monoåtergivning och med två eller kanske tre mikrofoner vid stereoåtergivning.

### ***Upptagningen: klangen***

Tonkurvorna hos de mikrofoner som används vid upptagningen, kan – om de dels är något så när lika, dels har ett mjukt förlopp – korrigeras med hjälp av tonkontroller var som helst efteråt i återgivningskedjan. Men upptagningens akustiska egenskaper är fixerade och irreversibla (med det enda undantaget att artificiell efterklang kan påläggas i efterhand). Detta ger en särskild betydelse åt de klangliga egenskaper som beror på mikrofonernas riktningsmönster, mikrofonernas avstånd från ljudkällorna, ljudkällornas och mikrofonernas placering i förhållande till upptagningslokalens reflekterande ytor, upptagningslokalens akustik och eventuell elektronisk mixning.

Professionellt inspelningsarbete förefaller ofta bedrivas utan medvetet hänsynstagande till det tidiga reflekterade ljudets betydelse för klangegenskaperna. Upptagningsförfarandet koncentreras vanligen på direktljudet från de enskilda instrumenten. Därefter beaktas efterklangen, som ibland erhålles från en särskild mikrofon i upptagningslokalen, ibland från en separat efterklangsanordning. Studiolokaler, som konstruerats att vara arbetsmiljö för denna upptagningsteknik, karaktäriseras vanligen främst med uppgifter som innervolym och efterklangstid. De brukar utföras med frekvensoberoende efterklangstid som målsättning, medan i akustiskt mera normala lokaler efterklangstiden ökar något mot låga frekvenser.

Studiolokaler är ofta klangligt otillfredsställande. I allmänhet ger de inte tillräcklig mängd tidigt reflekterat ljud och därmed inte tillräckligt klangligt stöd åt musikerna; instrumentens karaktäristiska klangegenskaper går till en del förlorade. Antagligen är studioakustiken ett resultat av värderingar som mer har anknytning till teknisk metodik än till erfarenhet och behov hos musiker och musiklyssnare.

När höga krav ställs på upptagningars klangligt-musikaliska egenskaper, är det emellertid inte längre möjligt att bortse från att musikinstrumenten är konstruerade för en akustisk miljö där tidigt reflekterat ljud ger ett väsentligt bidrag till deras klang. Detta bidrag är ofta avgörande för de enskilda instrumentens och de enskilda tonernas klangfärger och för de enskilda klangernas tidsförlopp, och därmed också för den klangliga differentieringen mellan olika instrument och olika spelsätt. Det tidiga reflekterade ljudet har vanligen större betydelse än efterklangen och kan inte ersättas. Om man nämligen försöker att med hjälp av artificiell efterklang kompensera en brist på reflekterat ljud från upptagningslokalen, blir det en för efterklangsanordningen – inte för de enskilda instrumenten – karaktäristisk inverkan på klangfärg och tidsförlopp som införes.

Metodiska försök att fånga något av samspelet mellan direktljud och tidigt reflekterat ljud i upptagningslokalen tycks visa att de rumsliga informationer, som det tidiga reflekterade ljudet förmedlar, och som vid återgivningen kan ge lyssnaren intryck av att ha möjlighet att höra in i upptagningslokalen, kan utnyttjas effektivt bara när det akustiska händelseförloppet i lokalen upptages med en enda mikrofon per återgivningskanal. Förklaringen kan vara följande:

Om två (tre etc.) mikrofoner är inkopplade till samma överföringskanal kommer det ljud som från ett musikinstrument via de olika utbredningsvägarna når den första mikrofonen att överlagras med det ljud som från samma musikinstrument via olika utbredningsvägar når den andra (och tredje etc.) mikrofonen. Detta kan kanske liknas vid att två (tre etc.) akustiska perspektiv läggs över varandra med följd att de akustiska rumsinformationer som vart och ett av perspektiven bär, inte längre kan urskiljas.

Konsertlokaler eller i enstaka fall kyrkor förefaller vara bäst lämpade för upptagningar som syftar till att med hjälp av det tidiga reflekterade ljudet tillvarata ett musikframförandes hela akustiska informationsinnehåll. (En serie upptagningar för några år sedan visade, att livfull återgivning kunde erhållas redan i mono.) I konsertsalens podieområde och dess omedelbara närhet brukar mikrofonen eller mikrofonerna nås av ett stort antal tidiga reflexer; och mikrofonavståndet kan vanligen väljas så, att efterklangens styrka motsvarar önskemålen i de enskilda fallen. Genom att välja lämplig gruppering av musikerna på podiet är det möjligt att uppnå önskad akustisk balans mellan enskilda instrument och stämgrupper även vid komplicerade verk (exempel: mono-inspelningen av Blomdahls "I speglarnas sal" för fem vokalsolister, inklusive berättare, samt kör och symfoniorkester, upptagen med en mikrofon i Stockholms konserthus' stora sal, juni 1966, för Rikskonserter). Vissa ingrepp för att förbättra en konsertsals akustik vid tillfallen då den enbart används som upptagningslokal är ibland ganska lätta att utföra; exempelvis att täcka parkettens främre halva med reflekterande material, t.ex. masonitskivor, och på så sätt både öka mängden tidiga reflexer och förbättra efterklangen (exempel: monoinspelningen av Blomdahls orkestersvit ur baletten "Sisyfos", upptagen med en mikrofon i Stockholms konserthus' stora sal, oktober 1967, för

Rikskonserter).

### **Återgivningen: tonkurvan**

Kvaliteten hos en upptagning bedöms normalt genom att lyssna på den via högtalare. Brister i återgivningstekniken avspeglar sig därför ofta i form av brister i upptagningstekniken och är säkerligen den för närvarande viktigaste orsaken till den stora variationen i kvalitet mellan olika upptagningar. En av svårigheterna är att bestämma tonkurvan hos återgivningen. Man är ofta noga med enstaka decibel hos förstärkarutrustningen men sväljer fel på 10 dB eller mer hos länken mellan förstärkaren och ljudet, dvs. hos högtalaren i dess samarbete med lyssningsrummet.

Medan en mikrofon normalt används placerad fritt på avstånd från reflekterande ytor, vilket medför att dess tonkurvor i olika riktningar i ett ekofritt rum ger korrekt information, är detta inte fallet med högtalare. I rum av bostadsrums storlek placeras högtalare i allmänhet intill en vägg och ibland dessutom på golvet. Dessa närbelägna reflekterande ytor kommer då att påverka högtalarens tonkurva på ett sätt som nära sammanhänger med högtalarens dimensioner och allmänna utformning. För att kunna ge användaren några meningsfulla upplysningar om högtalarens överföringsegenskaper, måste en redovisad tonkurva givetvis hänföra sig till avsedda användningsförhållanden. Men att åstadkomma en sådan tonkurvemätning är inte lätt, vilket några exempel skall få belysa.

Vid låga frekvenser sänder alla högtalare ljud inte bara framåt utan också bakåt, och en närbelägen vägg och ett närbeläget golv (eller tak) kommer då att reflektera ljudet på sådant sätt, att högtalarens verkningsgrad påverkas. När ljudmynningens avstånd från den reflekterande ytan är mindre än  $1/5$  av ljudets våglängd, ökar högtalarens verkningsgrad. Vid de frekvenser där avståndet är mindre än  $1/10$  av våglängden, uppgår ökningen till 2 à 3 dB per reflektor, dvs. ungefär 5 dB för både golv och vägg. (Ljudets våglängd är vid 100 Hz 3,4 meter, vid 50 Hz 6,9 meter.)

Det ligger då nära till hands, att utföra högtalarmätningen med reflektorer närvarande, motsvarande de närbelägna begränsningsytorna i lyssningsrummet vid normal högtalarplacering. I en brittisk standard från 1954 (B.S. 2498:1954) avseende högtalarmätningar i fritt fält eller i ekofritt rum kunde man under "Acoustical loading" läsa: "Other surfaces restricting the solid angle of radiation should be used when they are an essential or intended part of the radiating system".

Men redan om bara ett reflekterande plan införes vid mätningen, uppstår svårigheter. Vid någon frekvens kommer nämligen skillnaden i vägsträcka mellan direktljudet och det reflekterade ljudet att uppgå till en halv våglängd, så att direktljudet i det närmaste utsläcks av det reflekterade ljudet. Detta inträffar vid varierande frekvens beroende på i vilken riktning ut från högtalaren som mikrofonen befinner sig. När ett reflekterande plan skall utnyttjas vid mätning i ett för övrigt fritt fält eller ekofritt rum, är det därför brukligt att montera högtalaren försänkt, med framsidan – om ljudmynningarna är samlade där – i plan med den reflekterande ytan. På så vis elimineras skillnaden i vägsträcka mellan direktljudet och det reflekterade ljudet, så att utsläckning ej uppträder. Denna montering föreskrivs bl.a.

av den tyska hifi-normen DIN 45500. Men det erhållna mätresultatet kan givetvis inte anses representativt, eftersom monterings sättet döljer en svacka hos högtalarens tonkurva, som uppträder när högtalaren är placerad på normalt sätt framför en vägg, vanligen vid ungefär 200 à 400 Hz.

Enda praktiska möjligheten att hos högtalare invid reflekterande ytor undvika ojämn tonkurva på grund av interferenser mellan direktljud och reflekterat ljud ger placeringen av högtalarelementen för bas och mellanregister hos högtalare typ OA-6 prov på. Bashögtalarelementet kommer där så nära både golv och vägg, att dessa båda reflektorer ger full verkningsgradsökning i hela basregistret. Högtalarelementet för mellanregistret kommer likaså på minsta möjliga avstånd från väggen, och variationerna i väggavstånd över ljudmynningens yta blir så stora som möjligt, så att utsläckningseffekter från väggreflexen undviks.

Förhållandena vid höga frekvenser är mera komplicerade. Om man tänker sig en högtalare som är helt utan riktverkan vid alla frekvenser – dvs. ett litet klot som "andas" med hela ytan – och mäter dess tonkurva framför ett reflekterande plan finner man utsläckning inte bara när skillnaden i vägsträcka mellan direktljud och reflekterat ljud är  $1/2$  våglängd, utan även när den är  $1\frac{1}{2}$ ,  $2\frac{1}{2}$ ,  $3\frac{1}{2}$  etc. våglängder. Och när skillnaden uppgår till helt antal våglängder förstärks direktljudet av det reflekterade ljudet. Allt vid olika frekvenser beroende på i vilken riktning ut från högtalaren mikrofonen befinner sig.

Motsvarande täta följd av utsläckning och förstärkning uppträder redan utan något reflekterande plan, om man försöker mäta tonkurvan hos en kombination av flera diskanthögtalarelement på avstånd från varandra, exempelvis diskantdelen hos högtalarna OA-5 och OA-6. Gör man om tonkurvemätningen i ett normalt bostadsrum, där väggar och tak bidrar med reflexer, finner man en ännu tätare följd av snabba pendlingar hos tonkurvan. Om man då lyssnar på ett långsamt frekvenssvep från 2000 à 3000 Hz och uppåt och kanske vrider på huvudet eller rör sig, finner man att ljudfältet i rummet från OA-högtalarnas diskantdel, sådant vår hörsel uppfattar det, ej uppvisar de pendlingar som mikrofonen registrerade hos tonkurvan. Med ett ensamt, framåt- eller uppåtriktat diskanthögtalarelement brukar emellertid tydliga, ibland störande styrkevariationer i snabb takt höras, trots att tonkurvan i ekofritt rum kanske är helt jämn. Den stora mängd olika ljudriktningar som uppsättningen högtalarelement i OA-högtalarnas diskantdel tillsammans med sina olika spegelbilder åstadkommer, medför tydligen att ljudfältet i ett normalt rum blir bättre diffuserat än vid högtalararrangemang av ordinär typ.

Mätningar av högtalares tonkurvor i ekofritt rum kan ge fackmannen vissa delupplysningar. Problematiska blir de först, då sådana tonkurvemätningar används med anspråk på att ge en användare information om en viss högtalares tonkurva, eller då de används för jämförelse mellan olika högtalartyper.

En realistisk behandling av högtalaråtergivningens tonkurva måste utgå från iakttagelsen, att – vid snabbt föränderliga ljud – hörseln integrerar direktljudet och det reflekterade ljudet inom ett visst tidsintervall, som kan antas uppgå till 30 à 50 millisekunder. I ett rum av bostadsrums storlek nås lyssnaren inom detta tidsintervall av ljud härrörande från i runt tal



100 olika riktningar ut från högtalaren. Normalt sänds låga frekvenser i alla riktningarna, medan antalet riktningar som även överför höga frekvenser beror på högtalarens riktningsmönster vid höga frekvenser och på placeringen av dämpande rumsinredning och varierar mellan ett fåtal och några tiotal. När tillräckligt många riktningar ut från högtalaren överför hela tonfrekvensområdet, blir återgivningen lika till alla lyssnarplatser i rummet och högtalarens tonkurva, uppfattad av hörseln, överensstämmer då nära med tonkurvan för högtalarens totala ljudflöde.

Det finns två principiellt olika sätt att mäta en högtalares totala ljudflöde vid placering nära en, två eller tre begränsningsytor av ett rum. Det ena sättet är ett integrationsförfarande i akustiskt fritt fält, avgränsat endast av reflekterande plan motsvarande de närbelägna begränsningsytorna hos lyssningsrummet. Den av de reflekterande planen begränsade rymdvinkeln för högtalaren tänkes indelad i ett stort antal lika del-rymdvinklar; del-ljudflödet i varje sådan del-rymdvinkel representeras av ljudintensiteten i en bestämd punkt. Ljudintensiteten i samtliga dessa punkter mäts, och del-ljudflödena adderas matematiskt. Denna metod kan göras hur noggrann som helst, om man har tid och råd. Det andra sättet består i att mäta ljudnivån ut från högtalaren i ett s.k. efterklangsrums, dvs. ett akustiskt mättrum med minimalt absorberande begränsningsytor och känd efterklangstid.

Båda sätten att mäta det totala ljudflödet har prövats för mätning av högtalares tonkurvor. Ett mättrum för integrationsförfarandet, med golv och två väggar reflekterande, dvs. avsett för hörnhögtalare, fanns i bruk vid laboratoriet för elektroakustik på Tekniska högskolan i Stockholm åren 1958–1965. Vid 85 mätfrekvenser mättes där ljudintensiteten i 36 punkter på 3 meters avstånd från hörnet; för varje frekvens adderades sedan de 36 ljudintensitetsvärdena, varefter tonkurvan kunde upprättas.

Metoden att mäta högtalares tonkurvor i efterklangsrums är sedan 1966 i bruk vid Statens Provvningsanstalt. I ett efterklangsrums är antalet utbredningsvägar för ljudet från en ljudkälla fram till mätmikrofonen i princip oändligt stort, och ljud från alla riktningar ut ur ljudkällan når via varierande vägsträckor så småningom fram till mikrofonen. Tonkurvan för överföringen från ljudkälla till mikrofon uppvisar då utsläckningar och förstärkningar i mycket tät följd, och denna tonkurva kommer att ingå i den uppmätta högtalartonkurvan (det är högtalarens tonkurva för relativt varaktiga toner i efterklangsrums som man kan mäta). Den erhållna tonkurvan, uppmätt exakt, dvs. med sinustoner, skulle följaktligen förete en mycket tät serie pendlingar mellan maxima och minima, där pendlingarna vid låga frekvenser uppgår till tiotals decibel. (Om högtalaren själv hade en sådan tonkurva skulle den vara oanvändbar.) För att få en avläsbar tonkurva måste man avstå från att utföra mätningen med sinuston, och vanligen användes i stället filtrerat brus av viss bandbredd; vid Statens Provvningsanstalt har bandbredden 30 Hz valts.

Fördelen med att utföra mätningen av tonkurvan för högtalarens totala ljudflöde i ett efterklangsrums ligger i att tonkurvemätningen då redan med måttligt apparatuppbåd kan upprättas automatiskt med tonkurveskrivare. Tids- och kostnadsmässigt blir mätningen jämförbar med vanliga tonkurvemätningar i ekofritt rum. Vid Statens Provvningsanstalt förefaller metoden ge god mätnoggrannhet vid höga och medelhöga frekvenser, men under 350 Hz uppträder vissa fel, och under 100 Hz överstiger mätfelet 3 à 4 dB.

Troligen tillämpas för närvarande inte någonstans något mätförfarande, som medger en noggrann bestämning av de tonkurvor, som högtalare uppvisar vid normal avlyssning i vanliga bostadsrum. De allmänt förekommande tonkurvemätningar, som visar tonkurvan framför högtalaren i ekofritt rum, är i flertalet fall grovt vilseledande som mått på högtalarnas normala överföringsegenskaper. Ökad uppmärksamhet bör ägnas tonkurvan för högtalarens totala ljudflöde, uppmätt vid normal placering av högtalaren invid reflekterande plan, motsvarande de närbelägna av lyssningsrummets begränsningsytor. Denna tonkurva är utslagsgivande främst när högtalaren är utformad att ge samma tonkurva till alla lyssnarpositioner i rummet. Men den är även representativ - som ett slags medelkurva för olika lyssnarpositioner och olika lyssningsrum – när olika lyssnarpositioner i rummet får olika tonkurvor. Detta inträffar dels vid återgivning av relativt varaktiga toner, särskilt vid låga frekvenser, dels vid högtalare med riktad återgivning av höga frekvenser.

Tonkurvan för högtalares totala ljudflöde vid normal placering i förhållande till reflekterande ytor mäts numera vid ett antal laboratorier världen över, men såvitt bekant ingenstans med metoder som har önskvärd noggrannhet i basregistret. Just i basregistret utsätts högtalarnas verkningsgrad för typbetingade förändringar på grund av de närbelägna reflekterande ytornas inverkan. Antagligen är OA-6 typ 2 än så länge den enda marknadsförda högtalartyp, som kan göra anspråk på att vara dimensionerad så, att tonkurvan för det totala ljudflödet blir i huvudsak rak i hela tonfrekvensområdet.

### ***Återgivningen: klangen***

I en konsertsal nås lyssnaren av ljud med flera utstrålningsriktningar från musikinstrumenten; klangfärgen är ofta olika i de olika riktningarna. Via olika utbredningsvägar når de olika utstrålningsriktningarnas ljud lyssnaren i form av direktljud och reflekterat ljud med olika ankomstriktningsriktningar och olika ankomsttider. Det reflekterade ljud, som når lyssnaren inom ungefär 30 à 50 millisekunder efter direktljudet, uppfattas av hörseln som ingående i direktljudet och som del av instrumentens egen klang, inte som efterklang.

Vid upptagningen kan hänsyn tas till det tidiga reflekterade ljudets betydelse för de olika instrumentljudens klangfärger, för klangernas tidsförlopp och för de rumsliga informationerna genom att placera mikrofonerna så, att de förses inte bara med direktljud utan även med tidigt reflekterat ljud i tillräcklig omfattning.

Vid återgivningen kan hänsyn tas till det tidiga reflekterade ljudets betydelse för lyssnarens rumsliga och sinnliga upplevelse av ljudet – bl.a. intryck av fyllighet och värme, glans och lyster – genom att förse lyssnaren inte bara med direktljud från högtalarna utan även med tidigt reflekterat ljud från återgivningslokalens väggar och tak. (En motsvarande verkan kan alternativt uppnås med hjälp av fördröjt ljud, utsänt av högtalare på båda sidor om och bakom lyssnaren.

Ljudutbredningsförhållandena från högtalare till lyssnare i återgivningslokalen lägger grunden för lyssnarens rumsliga upplevelse av ljudet och påverkar hörselns interpretation av de rumsliga informationer, som tidigt reflekterat ljud från upptagningslokalen kan ha tillfört upptagningen. Med hjälp av tidigt reflekterat ljud från återgivningslokalens väggar och tak kan de rumsliga informationer, som tidigt reflekterat ljud från upptagningslokalen eventuellt

tillfört upptagningen, skapa intryck av rumsligt levande återgivning.

Mängden tidigt reflekterat ljud från återgivningslokalen beror både på återgivningslokalens akustiska egenskaper och på högtalarnas riktningsmönster. Den rumsliga upplevelsen av ljudet påverkas dessutom av ljudmynningarnas placering i lokalen.

Två typer av återgivningslokaler har särskilt intresse: kontrollrum för yrkesmässig bedömning av upptagningars ljudegenskaper, och bostadsrum där i flertalet fall upptagningarna skall återges och avlyssnas.

Kontrollrum konstrueras vanligen med målsättningen, att efterklangstiden skall vara kort – kortare än brukligt i bostadsrum – och frekvensoberoende. Ofta förses de med så kraftigt ljudabsorberande vägg- och takytor, att mycket liten mängd tidigt reflekterat ljud erhålles. Syftet är förmodligen att uppnå ett ur teknisk synpunkt akustiskt neutralt rum, som ej skall färga återgivningen och som antas möjliggöra en akustiskt objektiv avlyssning. Kontrollrum brukar emellertid upplevas som en akustiskt syntetisk miljö, som avviker betydligt från normal rumsmiljö; och varken ljudet från en violin eller återgivningen av en violin brukar upplevas som tillfredsställande där. En sådan akustisk miljö kan knappast betraktas som lämplig för avlyssning av ljud från musikinstrument, som utformats för lyssningsmiljöer med relativt riklig mängd tidigt reflekterat ljud. Inte heller är det troligt att man där kan bedöma, vilka klangliga egenskaper en upptagning kommer att uppvisa i normal bostadsrumsmiljö.

För att musikupptagningars klangliga och rumsliga egenskaper skall kunna bedömas vid upptagningstillfället, behövs en kontrollrumskonstruktion, som både beaktar behovet av relativt kort efterklangstid och behovet av tillräcklig mängd tidigt reflekterat ljud från väggar och tak. Tekniskt förefaller det möjligt att uppnå väsentligt bättre kompromisslösningar än de nu gängse.

I bostadsrum dominerar i regel det tidiga reflekterade ljudet över både direktljudet och rummets efterklang; vanligen är antalet tidiga reflexer så stort, att redan det tidiga reflekterade ljudet når ganska stor diffusitet. Detta gäller praktiskt taget alla ljudkällor, förutsatt att lyssningsavståndet inte är mycket kort. Men i vissa fall kommer i stället antingen direktljudet eller rummets efterklang att dominera. Sålunda brukar vid höga frekvenser direktljudet vara det dominerande i diskantstrålen från en riktad högtalare (eller rakt framför en trumpet). Och om mängden ljudabsorberande och diffuserande rumsinredning är liten, är det risk för att efterklangen kommer att dominera. Normal rumsinredning har vanligen inte tillräckligt stor ljudabsorption vid låga frekvenser, och under en viss frekvens brukar därför rummets efterklang överväga. Samtidigt kommer varaktiga toner av låg frekvens att fördela sig mycket ojämnt i rummet, så att de återges med mycket ojämn tonkurva (s.k. stående vågor).

Så länge det tidiga reflekterade ljudet överväger, har ljudöverföringen från ljudkälla till lyssnare en hög grad av uppfattbarhet. Ett normaldämpat bostadsrum medger därför en detaljrikare avlyssning än en genomsnittlig åhörarplats i en konsertsal, samtidigt som förutsättningarna för lyssnarens sinnliga och rumsliga upplevelse av ljudet är utomordentligt goda. I två avseenden är emellertid ett rum av bostadsrums storlek underlägset konsertsalen

som musiklyssningsmiljö. Dels kan ett bostadsrum ofta upplevas som akustiskt trångt, medan en konsertsal brukar kunna ge intryck av akustisk rymd. Dels uppträder i ett mindre rum starkare störningar från ojämn fördelning av ljud av låg frekvens i rummet och från kraftig efterklang vid de lägre av rummets resonansfrekvenser som följd av att rummets ljudabsorption vid låga frekvenser är otillräcklig. Men högtalare erbjuder till skillnad från de flesta andra ljudkällor den fördelen, att de kan utformas och placeras så, att det lilla rummets akustiska brister minskas.

Högtalare placeras i bostadsrum normalt intill en vägg. De vanligaste typerna har samtliga högtalarelement monterade i frontpanelen och medger på så vis inplacering i skåpvägg eller bokhylla. Men ett ökande antal högtalare är av s.k. rundstrålande typ med högtalarelement vända i olika riktningar för att mer eller mindre fullständigt efterbilda den normala teoretiska modellen för högtalare utan riktverkan, ett litet klot som "andas" med hela ytan. Alla dessa olika högtalartyper är tillräckligt rundstrålande i basregistret för att avståndet från ljudmynningarna till väggen och till golvet eller taket skall få stor inverkan på såväl tonkurvan som ljudintrycket i övrigt. Vid högre frekvenser är det emellertid bara ljudet från de rundstrålande högtalartyperna som påverkas av väggavståndet.

Så länge ljudet sänds ut av ett högtalarmembran, vars diameter inte är större än  $1/2$  eller högst  $2/3$  av ljudets våglängd, kan högtalare med samtliga högtalarelement monterade i frontpanelen erbjuda lika jämn ljudspridning i rummet och lika stora möjligheter till tidiga reflexer inte bara från motstående vägg utan även från sidoväggar och tak, som rundstrålande högtalare ger. (Ljudets våglängd är vid 1000 Hz 34 cm, vid 10 000 Hz 3,4 cm.) Det förekommer diskanthögtalarelement med så liten membrandiameter som 2 cm.

Den rumsliga upplevelsen av ljudet påverkas kraftigt av diskantljudens utbredningsvägar i lyssningsrummet. Särskilt gäller detta riktningsintrycket, vilket kan förklaras av att ljudets våglängd ovanför 2000 à 3000 Hz är mindre än huvudets dimensioner och avståndet mellan öronen.

Högtalare med samtliga högtalarelement monterade i frontpanelen åstadkommer skarpare riktningsintryck än vad exempelvis en violin skulle ge upphov till i lyssningsrummet eller i en konsertsal. Med denna högtalarutformning dröjer det nämligen i diskantregistret mer än 20 millisekunder, och ofta mer än 30 millisekunder, från det att direktljudet från högtalarna nått lyssnaren, innan lyssnaren eventuellt får reflekterat ljud även från den vägg, där högtalarna finns. Eventuella reflexer från de övriga tre väggarna och från taket börjar däremot komma redan några få millisekunder efter direktljudet. En ensam högtalare av denna typ uppfattas därför som en utpräglad punktformig ljudkälla, som inte uppvisar någon likhet med de ursprungliga ljudkällornas normala rumsliga beteende. Vid stereoåtergivning erhålls följaktligen starka riktningsintryck av för högtalarutformningen karaktäristisk typ; och intrycket av rumsligt levande återgivning uteblir, även när reflekterat ljud från upptagningslokalen får lyssnaren att förnimma avstånd och djup.

Rundstrålande högtalare ger en jämnare riktningsfördelning hos det tidiga reflekterade ljudet och kan därför möjliggöra en mera normal rumslig upplevelse vid återgivningen. Om avståndet från högtalarens akustiska centrum till väggen inte är mer än ungefär 15 cm, uppfattas emellertid ljudkällan även i detta fall som punktformig. Men om högtalarens

väggavstånd ökas till 40 à 50 cm, förlorar riktningsintrycket sin punktskärpa och därmed sin dominans, och upptagningslokalens tidiga reflekterade ljud får viss möjlighet att påverka lyssnarens rumsliga upplevelse av ljudet. Återgivningen blir mera rumsligt levande; men väggavståndet har nackdelar, som bl.a. yttrar sig i att lyssnaren hör ljudkällan som belägen framför väggen.

Den med hänsyn till överföringsegenskaperna från högtalare till lyssnare bästa utformningen av en rundstrålande högtalare, som skall samarbeta med en vägg, visar sig på flera punkter avvika från den teoretiska modellen för rundstrålande högtalare, klotet som "andas" med hela ytan, och även från en halverad sådan. Det är sålunda bara i diskantregistret som huvudets dimensioner ger hörseln den riktningskänslighet, som motiverar relativt stort avstånd mellan den rundstrålande högtalarens akustiska centrum och väggen. I mellanregistret och basregistret blir återgivningen tydligast med ljudmynningen mycket nära väggen. Dessa iakttagelser leder till den högtalarutformning, som högtalartyperna OA-5 och OA-6 utgör exempel på. Även detaljutformningen av den rundstrålande diskant-högtalarenheten skiljer sig där från den teoretiska modellen och ger ett öppnare och behagligare ljudintryck, särskilt påtagligt nära högtalaren.

De viktigaste resultaten av denna anpassning av den rundstrålande högtalaren till väggplacering och mänskliga lyssnare är följande: Inga skarpa riktningsintryck dominerar lyssnarens rumsliga upplevelse av ljudet. Lyssningsrummet ger intryck av att öppna sig och fortsätta förbi väggen; lyssnaren hör inte att väggen finns. Upptagningslokalens tidiga reflekterade ljud har på så vis fått ökad möjlighet att påverka lyssnarens rumsliga upplevelse av ljudet; redan i mono med en högtalare kan en kör upplevas som en utbredd ljudkälla, samtidigt som en solist hörs utan bredd. Och inte minst: musikavsnitt med komplicerad akustisk struktur, exempelvis krävande körpartier, har fått ökad möjlighet att återges klart och tydligt.

Störningarna från lyssningsrummet vid låga frekvenser kan minskas genom att låta ljudmynningen för basregistret komma mycket nära både väggen och golvet; så är högtalartypen OA-6 utformad. För var och en av rummets begränsningsytor, som har mindre avstånd från ljudmynningens centrum än  $1/10$  av ljudets våglängd, ökar kvoten mellan direktljudet och efterklangsenergien med 3 dB, jämfört med en ljudkälla fritt i rummet (förutsatt att lyssningsavståndet är oförändrat).

Lyssningsrummets störningar vid mycket låga frekvenser påverkas främst av var i rummet högtalarna placeras. Eftersom rummets lägsta resonansfrekvenser brukar ha den minsta dämpningen, är placering vid kortvägg i regel sämst.