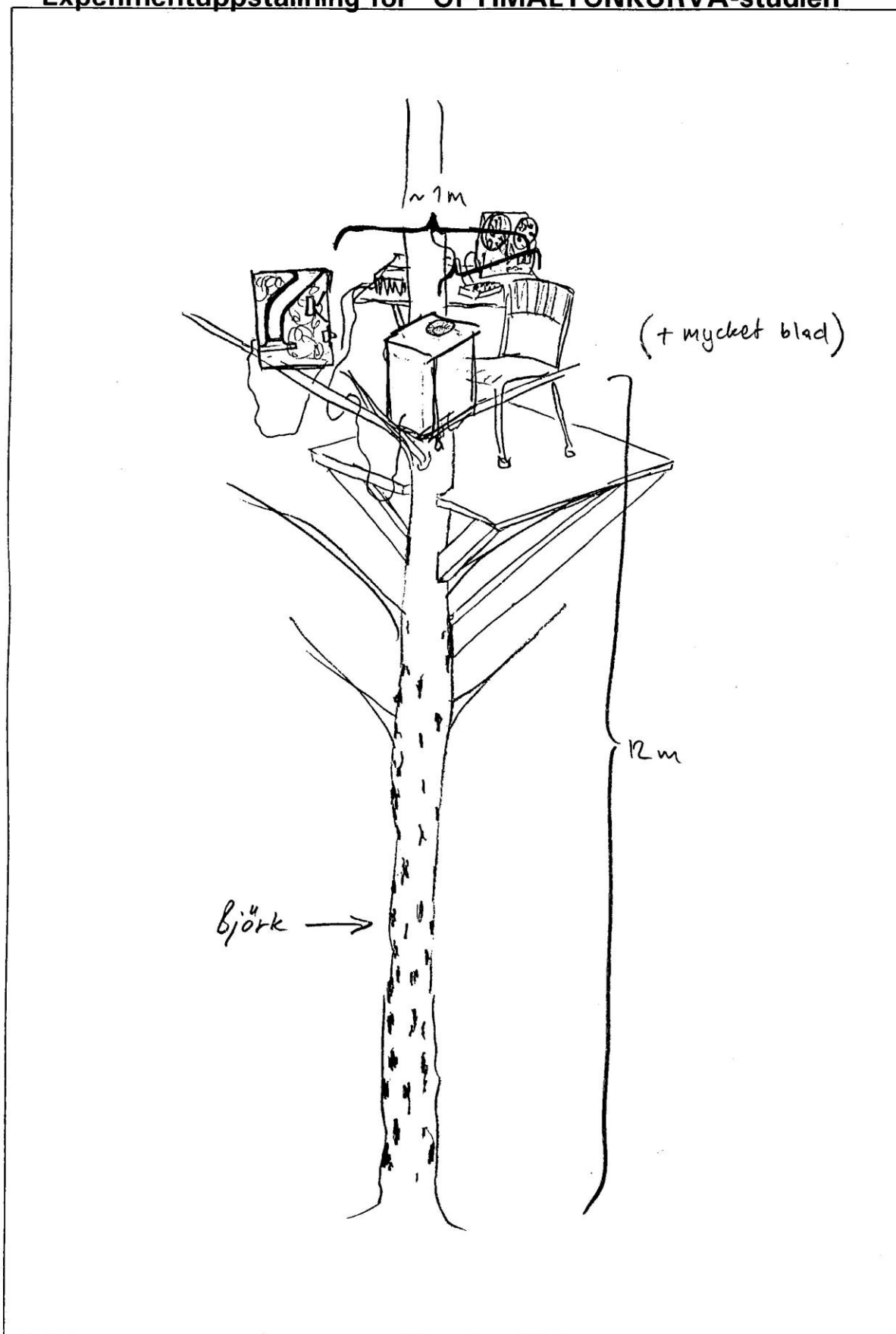


# Experimentuppställning för "OPTIMALTONKURVA-studien"



# Vardagsrumsakustik, del 1

## Hur hör vi i basområdet, egentligen?



Basåtergivning i ett bostadsrum hör inte till det lättaste. Det är knepigt nog att förstå hur en högtalare skall mäta för att det skall låta "rätt". De viktigaste faktorerna som försvårar det för oss är rummets inverkan och hörselns beteende. Sen är det likt förbaskat ändå knepigt att få det att låta bra när man väl lärt sig hur det skall mäta! Betydligt lättare är det dock, än då man famlade helt i blindo.

Den första delen i denna serie om rumsakustik skall därför handla om basområdet, närmare bestämt hur örat (och hjärnan) hör, samt vad lyssningsrummet gör. Artikeln bygger på, eller rättare sagt är till största delen rapporten från en studie som utfördes 1981, med lite "moderna" kommentarer före och efter rapporten.

Studien som skall presenteras i det följande gjordes egentligen främst ur högtalarkonstruktörens synvinkel, d v s med den ständiga frågan "hur skall en högtalare dimensioneras, egentligen?" i bakhuvudet. Min förhoppning är dock att den skall kunna vara intressant och kunskapsbringande läsning för alla med brinnande iver att skapa bättre akustiska förutsättningar hemma vid — trots att det är långt ifrån säkert att huvuddelen av de högtalare som används i hemmen uppfyller de krav om lämplig tonkurva som blir studiens slutsats om vad som är "optimala tonkurvor i basområdet".

### Andra skolor

Det skall dock påpekas att det finns många skolor om hur högtalare skall bete sig i basområdet. Enligt min alldeles personliga uppfattning är få av dem baserade på några djupare studier i ämnet, utan är vanligtvis bara idéer tagna ur luften eller ur otillräckligt forskningsmaterial, eller också bara gamla klangideal som man anser att högtalare skall uppfylla, "för så lät de

modellerna vi gjorde förra året, och för uppspelning via de klangidealen är minsann skivorna gjorda!"

Läsaren ombedes dock använda sitt eget goda omdöme för att avgöra om det som framkommit i studien är vettigt, eller om det möjligen är ren rapparkalja (medan någon av de traditionella tonkurvedimensioneringarna däremot skulle vara sund och vettig sett ur alla synvinklar).

Redan här vill jag även varna för att artikeln i det följande består av en ganska kompakt textmassa, svårgenomtränglig för den läsovane. Som små ljuspunkter i presentationen har jag dock lagt in några kurvor i texten (förekom som bilagor till originalavhandlingen) som förhoppningsvis tydliggör resultatet på tillfyllest vis.

Jag är medveten om att texten hade kunnat skrivas om, strykas ned och förenklas kraftigt, till en vanlig populistisk artikel, men valde ändå att behålla originalrapporten av studien, helt ocensurerad, med all historik, alla omständighetsbeskrivningar och reservationer kvar, värdefulla för den verkligt intresserade.

Här följer presentationen av studien (Den följande noggranna nedteckningen av studien gjordes några år efter själva studien och är baserad på nästan oändligt mycket anteckningar från densamma, och en förhoppningsvis inte helt förvrängd minnesbild.)

## Framtagning av "OPTIMALA TONKURVOR I BASOMRÅDET" -81

*Senkommen nedteckning av förhållandet runt experimenten som föregick tillblivelsen av "optimala kurvorna".*

*Dessutom skall i samma veva försöka utvecklas några synpunkter runt resultatet, och även söka utveckla förklaringsmodellen en smula eller två.*

### A. Historik och hörselpreferenser

Syftet med studien var att i en objektiv situation med lyssning fastlägga vilka avvikelser från rak tonkurva som var akustiskt ohörbar, samt dessutom fastlägga någon typ av subjektiv beskrivning av hur avvikelserna från "optimaltonkurvorna" kunde te sig lyssningsmässigt. Denna sista uppgift resulterade i att ytterligare

två uppsättningar tonkurvskaror togs fram. Dessa visade hur man kunde minimera de subjektiva förvrängningarna ur DYNAMISK respektive STATISK synpunkt, trots allt större inskränkningar i basåtergivningen rent mätmässigt.

I de fall man av en eller annan orsak önskar dimensionera ett högtalarsystem med en tonkurva i basregistret som avviker från de "ohörbara kurvorna" (t ex för att

vinna ljudstorlek, verkningsgrad eller effekttålighet) rekommenderar jag att man försöker väga in både de DYNAMISKA och de STATISKA egenskaperna. (Undantaget givetvis om man avstår från att dimensionera enligt "optimaltonkurvorna" av orsaken att man medvetet eftersträvar en färgning eller karaktär från högtalaren)

**Senare experiment** med ett stort urval människor har annars visat att "audiofiler" i viss utsträckning tycks prioritera de DYNAMISKA egenskaperna framför de STATISKA, under det att "vanliga människor" istället tycks lägga huvudvikten vid det STATISKA beteendet.

*(Låt mig här bara påpeka att det inte får underförstås några elakt menade värderingar i den här använda uppdelningen av människor i två kategorier. Det är givetvis en oerhörd förenkling, men en sådan som gjorde det lättare att se någon struktur på utfallet av reaktionerna från lyssnarna. Läsarna ombedes notera att dessa synpunkter inte bär vetenskapliga ambitioner, utan är bara reflexioner uppå de noterade resultaten.*

*"Audiofil" har jag inte använt synonymt med HiFi-intresserad, utan i audiofilgruppen har jag främst räknat in musikutentusiaster med anspråk på ljudkvaliten på sin musikanläggning. HiFi-intresserade (alla typer av apparatintresserade, idag betecknade som; rörfreaks, hornentusiaster, CD-hatare, stampa-takten-maffian, lödkolvsnissar, Beltare m fl, d v s alla de som äger fonogram för att kunna spela sin anläggning istället för tvärtom) har, hur otroligt det än kan verka, räknats in i gruppen "vanliga människor". /red)*

"Klassiskt" dimensionerade (~rak tonkurva ned till  $f_h$ , därefter 24 dB/oktav) basreflexlådor med undre gränshärfrekvens om 40 Hz (simulerade via de i studien använda "ohörbart dimensionerade" ref. monitorerna) har också visat sig gå hem bland "vanliga människor" och beskrivits som: "harmlös förändring av basen" eller liknande, under det att "audiofiler" tillika huvuddelen "levandemusikkonsumenterna" (d v s sådana människor som av och till lyssnar till levande akustisk musik (levande = icke återgiven)) oftast reagerat på de kraftigare avskärningarna med STATISK optimering såsom: "basen har blivit; burkig, trött, odynamisk, omusikalisk, bumlig, onaturlig o s v..."

Som kontrast kan nämnas att dessa kategorier "audiofila" samt "levandemusikkonsumenterna" människor däremot statistiskt reagerade påtagligt mindre av de kraftigare avskärningarna med DYNAMISK optimering. Någon eller några har t o m sagt: "luftigare, tydligare, renare (!) basåtergivning" om de hörbart beskurna men DYNAMISKT optimerade tonkurvorna! Samma tonkurvor som "vanliga människor" sagt: "Basen har tappat tyngden, blivit kylig, låter platt(?) o s v..." om.

*(Personligen skulle jag helst räkna mig till "levandemusiklyssnarna" och "audiofilerna" men tvingas erkänna att jag har ganska svårt för både klangliga (STATISKA) och transienta (DYNAMISKA) fel.)*

Här i texten kan det kanske vara värdefullt att påpeka att det hittills endast talats om linjära system, alltså odistorderade. I praktiken så svarar givetvis ofta distorsionsegenskaper (olinjäriteter) för stora delar av de förvrängningar som finns hos kommersiella hög-

talare. (Detta kommer att beröras senare i texten under rubriken "STATISKT optimerade slutna lådor")

#### **Krav som uppställdes för originalstudien (-81)**

För att på ett objektivt sätt kunna testa människans hörsleegenskaper i basregistret är det nödvändigt att ge försökspersonen en referens att jämföra olika förvrängningar (som skall värderas) med.

För att ge experimentutfallet optimala förutsättningar att bli värdefullt är det givetvis i audioåtergivningssammanhang väsentligt att referensen är så "sann" som möjligt. Av denna orsak ställdes följande krav:

1. All lyssning skulle ske i ekofri miljö. (Detta är inte nödvändigtvis optimalt vid "vanlig" lyssning till musik, men för att kunna utvärdera basregistret på ett användningsfritt sätt är det en förutsättning)
2. Referensanläggningen skulle ha en rak tonkurva ned till minst 12 Hz! Detta krav gäller hela kedjan sammantaget, från mikrofoner via bandspelare och förstärkare till monitorhögtalare.
3. Musik/ljudmaterialet som användes vid lyssningen skulle ha en stor karaktärspridning, från nästan helt STATISKA ljud (typ basregistren hos stora orglar i kyrko-repektive konserthusakustik), till nästan helt DYNAMISKA basljud (typ symfoniska bastrummor, dörrar som stängs till täta små rum och liknande). Sammantaget ~1 h material insamlades till och användes i studien.
4. Den "elektronikbox", d v s filterbox, som skulle simulera de olika avskärningarna skulle ha en fullständig flexibilitet att simulera SAMTLIGA MÖJLIGA DIMENSIONERINGAR av såväl basreflexlådor som slutna dito. Dessutom ställdes kravet om S/N bättre än 100 dB och distorsion < 0.1% 0-20 000 Hz.  
Det kan påpekas att det inte skall underförstås att dessa data är tillfyllest i alla HiFisammanhang, men inskränker man det, för studien, intressanta området till "basregistret" kan kraven sänkas. (Den verkliga elektronikboxen övertrumpfades de uppställda kraven med synnerligen stora marginaler.)

#### **Tillvägagångssättet**

- (1) Först skulle givetvis den ekofria miljön etableras. Detta kanske kan te sig som en lätt uppgift. Man tror ju att det kryllar av "ekofria rum" i det att man kan läsa om både televerkets, tekniska högskolans och statens provningsanstalts. Dessa rum är nog bra vart och ett på sitt sätt, men ingen av dem är tillnärmelsevis ekofritt i det register som var aktuellt för den förestående studien. Det är i själva verket vanligt att så k "ekofria rum" har högst betydande rumsbidrag redan uppe vid 200 Hz! Sen blir det bara värre och värre ju längre ned i frekvens man går.

Kravet jag ställde på mätmiljön var frekvensmässigt likartat det för resten av kedjan,

nämligen i stort sätt frifältsbetingelser ned till 10 Hz! 5-20 ggr längre ned än i ett "vanligt" ekofritt rum. Några 5-20 ggr större dylika rum (vilket skulle medföra önskade egenskaper) finns mig veterligt inte (och kommer med största sannolikhet heller aldrig att byggas). Alternativet som valdes blev därför — riktigt fritt fält!

Ett riktigt fritt fält kan man åstadkomma på flera sätt. Antingen sätter man sig på ett någotsånär högt hus' branta taknocke, eller också tar man sig tillräckligt högt upp i luften för att markreflexen skall kunna försummas. Det hjälper då att öka kvoten direkt/reflekterat ljud genom att själv befinna sig relativt nära själva ljudkällan. Valet föll av flera orsaker på att placera mig och nödvändig utrustning ~12 meter upp i ett träd (bl a eftersom jag inte tidigare lokaliserat några audiologiska studier till dylik trädmiljö, vilket jag tyckte var lite tråkigt).

Avståndet mellan ljudkälla och försöksperson fastställdes till 0,5-1 meter varvid reflexen från den kuperade marken under trädet uppmätts till mindre än en 700-del av "nyttoljudeffekten". Detta förhållande godkändes.

- (2) Därnäst skulle den högspecificerade referensanläggningen komponeras. Mikrofonerna var de minsta problemet.

Ett par mätmikrofoner användes (dessa mättes upp genom konstanttrycksalstring i en extremt väl tätad liten slutna lådas inre, och befanns ha en undre gränshörsfrekvens understigande 0,2 Hz).

Länk två i ref. anläggningen var mikrofonförstärkaren. Denna byggdes med diskreta komponenter och försågs med en AC-koppling om 0,1 Hz.

Steg 3 var bandspelare. Valet föll på en Technics rullbandspelare. Denna kunde på lägsta bandhastigheten, efter en mindre ombyggnad, nå ned rakt till ca 8 Hz. Registret 10 - 20 Hz försågs dessutom med ett mindre lyft.

Den använda effektförstärkaren var DC-kopplad.

Sista länken högtalarna återstod dock att konstrueras. Helt klart kan det konstateras att högtalare med undre gränshörsfrekvenser på 10 Hz icke växer på träd (jag kollade då jag inventerade den för studien utvalda platsen). Kraven på höga ljudtryck var emellertid måttliga, emedan lyssning skulle ske på så pass nära håll. En snabb koll av det för experimentet inspelade musik/ljud-materialet visade dessutom att man kunde nöja sig med måttlig effekttålighet i registret under 25 Hz ety detta register, även under de mera våldsamma ljuden, har betydligt mindre energi än de högre registren.

Det beslöts att högtalaren skulle förses med 6,5" baselement. För att erhålla de önskade

egenskaperna på enklast möjliga sätt (utan alltför mycket aktiv korrektion) ökades konmassan kraftigt, tillsammans med att en mindre ändring av elementets upphängning utfördes. Med dessa förändringar av elementet och negativ utimpedans från förstärkaren kunde de i 48 liters lådor prestera en undre gränshörsfrekvens på 10 Hz. Registret mellan 10 och 20 Hz uppvisade en svacka som förnämligt kompenserade bandspelarens förhöjning i motsvarande register (eller egentligen tvärtom).

Kedjan i sin helhet hade en tonkurva som låg inom  $\pm 1$  dB mellan 11 och 160 Hz. För att på bästa möjliga sätt uppfylla önskemålet om att referensen skulle var "sann" så försågs högtalarna med ett övre register som, utan att vara exceptionellt högkvalitativt, ändå låg inom  $\pm 2-3$  dB upp till 20 kHz (Sipe diskant användes). Högtalaren var dock långt ifrån optimal för normal musikåtergivning. Dels var den ju försedd med en i frifältsbetingelser rak tonkurva, dels var känsligheten sensationellt låg ( $\sim 74$  dB/W) utan att ha fått en korresponderande hög effekttålighet (denna låg på ca 100 W). Högre ljudtryck än 94 dB för en högtalare kunde således inte skapas. För experimentet var högtalarna dock optimala.

- (3) Musik/ljudmaterialet skulle så väljas, och spelas in. Inspelningarna gjordes med få undantag i naturliga akustiska miljöer, främst för att så väl som möjligt hålla referensen "sann", d v s någonting man uppe i trädet skulle känna igen från verkligheten då avspelning med rak tonkurva användes.

I stort sätt blev exempel på alla typer av basalstrande instrument inspelade, även de som hade sina grundtoner i det högre basregistret (t ex pukor).

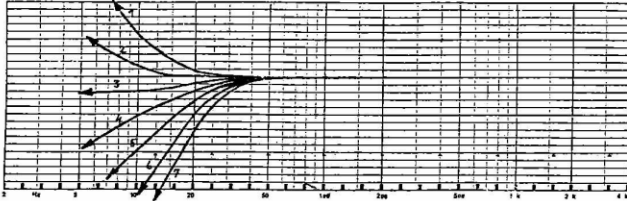
- (4) Elektronikboxen slutligen, finns det inte så mycket att säga om, annat än att den var försedd med inalles 4 st rattar som representerade polparens koordinater i pol-nollställediagrammet. Den försågs även med en trevägsomkopplare som användes till att koppla bort det ena polparet eller ersätta det med en singular nollpol (aperiodisk).

Genom förstnämnda kunde slutna lådor simuleras och genom bytet till den singulara nollpolen kunde även dipolhögtalare simuleras (åtminstone på ett användningsavstånd i taget).

## B. Lyssningen: "optimaltonkurvorna"

Från början var tanken med studien endast att få fram gränsvärden på "tillåtna" tonkurveavvikelser i basområdet. Redan efter en ganska kort lyssning framstod det dock klart att, även om det gick att hitta dessa gränsvärden så räckte det inte att hålla sig innanför dem! Nåja, så oväntat var det väl inte, det är ju ganska självklart att våldsamma kast inom gränserna kan åstadkomma likaledes våldsamma grupplöptidsfel. Att såpass små avvikelser krävdes för att hörseln skulle

protestera var dock en överaskning. Det visade sig att man var tvungen att ta fram en hel kurvskara, för att få ett rättvisande resultat av studien som skulle var användbart — 7 stycken kurvor sammanlagt. Genom att lägga sig på eller emellan dessa kurvor kunde man göra avskärningarna "ohörbara":



"OPTIMAL"-kurvor, i basområdet  
(STATISKT o DYNAMISKT OFÄRGADE)

Tillåtna avvikelser från  
ovanstående kurvor:  
(så länge man håller sig  
mellan kurvorna 1 o 7)

50 Hz	+ 1 / -0,5 dB
40 Hz	+ 1,5 / -1 dB
30 Hz	+ 1,5 / -2 dB
20 Hz	+ 1,5 / -5 dB
15 Hz	+ 2 / -10 dB
10 Hz	+ 3 / -15 dB
7 Hz	+ 5 / -25 dB

Upprepade experiment under hög koncentration visade emellertid att kurva 7 under avspelning av de mest utslagsgivande musikljuden gick att detektera med något bättre utfall än vid rena gissningar. Det finns dock ett skäl till att jag ändå valde att taga med denna kurva nummer 7 bland "optimaltonkurvorna", nämligen att det allra lågfrekventaste registret (under rumsresonanserna, ~ 20 Hz) faktiskt lyfts runt 10 dB i ett normalt lyssningsrum.

(Detta alltså utöver både det lyft som påverkar högtalaren frekvensoberoende under ~100 Hz p g a reflexen från golv och väggen bakom högtalaren, och även utöver det baslyft som örat kräver, och som lyssningsrummet bjuder, p g a att lyssningsrummet utgör den mot ljudbliden öppna "loge" som lyssnaren sitter i.)

Kontentan av att de flesta lyssningsrum faktiskt uppvisar ytterligare ca 10 dB lyft vid 20 Hz blir att kurva 7 inte bara bör accepteras, utan också, i rum, ligger mycket nära den idealkurva (för en högtalare som skall placeras i ett rum) som kurva 6 kan anses utgöra. Istället kan det bli tal om att underkänna kurva nummer 1! Om inte annat för att det är en helt oanvändbar dimensionering då den kräver enorma konrörelser, om den överhuvudtaget hade gått att realisera med rimliga övriga egenskaper (effektåtlighet, känslighet, ljudstorlek m m, m m).

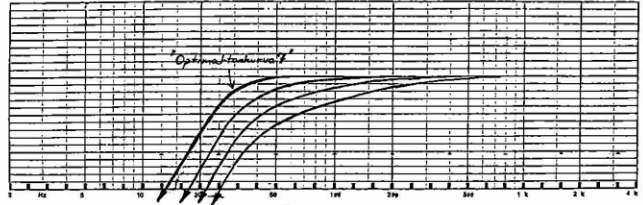
### C. Lyssningen; de semioptimerade kurvorna

Som steg 2 i lyssningen skulle undersökas om kurvorna ytterligare kunde skäras, om man minskade mångfalden insignaler som skulle hanteras.

Det visade sig snabbt att man kunde göra en uppdelning i två huvudgrupper av musik/ljudsignaler, som ställde helt olika krav på egenskaperna hos avspelningsanläggningens tonkurva, dels;

de **DYNAMISKA** signalerna (Bastrummor, stamp i trägolv, stängning av dörrar, pizzikatospel på kontrabas och liknande ljud). Dessa signaler blev gravt förvanskade av tvära språng i tonkurvan. Däremot spelade det

mindre roll om man lät hela nivån sjunka mjukt mot lägre frekvenser:

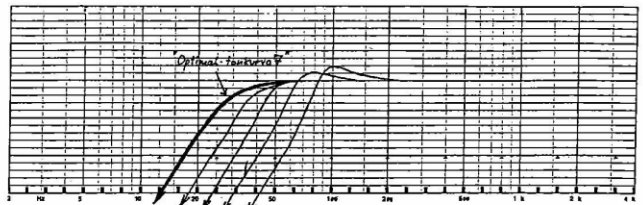


"OPTIMERADE" TONKURVOR I BASOMRÅDET

**DYNAMISKT OPTIMERADE** *kanin:* Den översta, tjockare, kurvan representerar brantast möjliga avskärning som fortfarande är acceptabel ur STATISKT som DYNAMISKT synpunkt.

Som motpol till de DYNAMISKA har vi;

de **STATISKA** signalerna (orgel, bastuba och liknande). Med dessa signaler blev det viktigast att hålla en korrekt balans mellan basregistret i sin helhet (20-150 Hz) och det övriga registret (150-20 000Hz). Det visade sig klangligt bättre att skära skapligt brant och kompensera den bortskurna basen med en överbetoning av den återstående (vilket även ger högre känslighet, effektåtlighet och/eller mindre låda jämfört med högtalare med "optimaltonkurva"):



"OPTIMERADE" TONKURVOR I BASOMRÅDET

**STATISKT OPTIMERADE** *kanin:* Den översta/tjockare, kurvan representerar brantast möjliga avskärning som fortfarande är acceptabel ur såväl STATISKT som DYNAMISKT synpunkt.

När avskärningsfrekvensen började närma sig 60 Hz fick man dock på köpet en något resonant och bumlig karaktär, framför allt på mansröster, när överbetoningen i det återstående basregistret avvägdes för att, för örat, kompensera det bortskurna lägre basregistret.

(Senare experiment (se under rubriken "STATISKT optimerade slutna lådor") har dock visat att detta problem, p g a olinjära egenskaper, är långt värre från slutna överbetonade lådor än från basreflexlådor, där överbetoningen alstras av helmholtzresonatorn. Detta framstår kanske som lite märkligt eftersom avskärningen under överbetoningen är så mycket brantare från sålunda dimensionerade basreflexlådor, men förklaringen kommer senare i texten, under rubriken "Slutna lådor")

De semioptimerade (ej att förväxla med optimala) kurvorna med olika avskärningsmängd är liksom "optimaltonkurvorna" presenterade i form av kurvskaror uppdelade på de **DYNAMISKT** optimerade och på de **STATISKT** optimerade. I båda fallen finns "optimalton-

kurva nummer 7 (d v s största avskärning utan vare sig hörbara STATISKA eller DYNAMISKA färgningar) med som jämförelseobjekt.

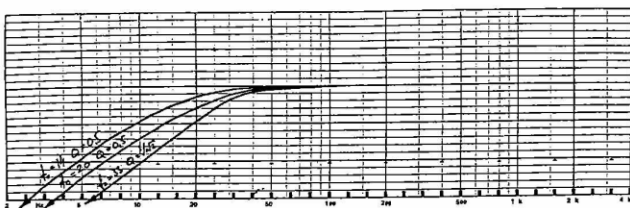
### Slutna lådor

#### Optimaltonkurvor och semioptimerade dito

Rubriken ovan lovar kanske lite för mycket. Jag har nämligen funnit det enklast att endast taga fram tre stycken "optimalkurvor" för slutna lådor. Skälet är enkelt; det är helt enkelt enklare att definiera de "semioptimerade" kurvorna rent matematiskt.

#### Optimaltonkurvor, slutna lådor

Här har jag alltså nöjt mig med tre kurvor som jag namngivit efter elementens mekaniska resonansfrekvens i lådorna, d v s; 14, 20 och 33:



EXEMPEL PÅ "OPTIMALKURVOR", REALISERADE MED SLUTNA LÅDOR

Kurva 33 är den som bäst motsvarar OPTIMALTONKURVA 7, d v s är en kurva som är väl avpassad i de flesta rum.

Kurva 20 är en kurva som avvägts för att så väl som möjligt passa in i ett 20 m<sup>2</sup> stort lyssningsrum. Med kurva 20 och ett helt tätt lyssningsrum blir tonkurvan rak ned till 0 Hz!

Kurva 14 är motsvarande dimensionering för ett 40 m<sup>2</sup> rum. Både sistnämnda kurvor är aperiodiskt dimensionerade, d v s de saknar helt inbyggda resonanser.

Svagheterna med slutna lådor för dessa dimensioneringar är att de kräver runt 4 ggr större elementarea, eller längre slaglängd, för att kunna alstra samma ljudtryck med samma låga distorsion som basreflexlådor (ett 8" element motsvaras ungefär av två stycken 12" eller ett 15").

#### DYNAMISKT optimerade slutna lådor

Här har jag lovat enkla "matematiska" dimensioneringsregler istället för tonkurvor.

I princip kan man säga att det räcker att hålla elementets Q (i lådan) på  $25/f_0$ . Vill man skära mer än med resonansfrekvens 50 Hz låter man Q fortsätta falla under 0,5.

Mot lite lägre resonansfrekvenser, när man närmar sig "optimaltonkurvorna", kan man låta Q närma sig  $1/\sqrt{2}$  (33 Hz), för att sen falla mot 0,5 igen.

#### STATISKT optimerade slutna lådor

Även här beskrivs lättast de optimerade kurvorna med lite matematik.

Om man valt att skära behövs klangligt en kompen-  
sation i form av en överbetoning av  
Lämplig överbetoning får man om  $m =$   
 $\cdot (f_0/33)^{0,65}$ .

Högre  $f_0$  än 85 Hz rekommenderas  
omständigheter. Redan vid  $f_0 = 85$   
betoning på ca 3 dB (vid ~100Hz) och h-  
på det som antytts flera ggr i texten tidigare, nämligen:

#### Olinjära egenskaper hos slutna lådor

Jag nämnde tidigare i texten att min personliga erfarenhet var att örat, i motsats till vad man kanske skulle kunna tro, tycks föredra den svaga överbetoning som kan finnas hos STATISKT optimerade basreflexlådor, framför samma överbetoning hos slutna lådor. Orsaken till detta är dock inte så svårfunnen.

Orsak 1: Slutna lådor har ett hastighetsmaximum hos konrörelsen i det betonade området. Basreflexlådor däremot har ett hastighetsminimum vid den betonade frekvensen (åtminstone om det är Helmholtzresonansen som utnyttjats för att åstadkomma betoningen). Detta medför att amplitud- och distorsionsmaxima sammanfaller på slutna lådor, under det att amplitudmaxima sammanfaller med distorsionsminima hos basreflexlådor, dimensionerade enligt "STATISKT optimerade tonkurvor".

Orsak 2: En överbetoning hos en slutna låda överdrivs (p g a termiska egenskaper) mer och mer ju högre man spelar. Hos ett basreflexsystem emellertid, minskar ofta överbetoningen ju högre det spelas (p g a termiska egenskaper och strömningsegenskaperna hos en basreflexport).

### D. Försök till "generella" optimeringar av basreflexlådor och slutna lådor

Låt mig först slå fast att vi nu helt har lämnat den objektiva vetenskapliga världen. Här handlar det främst om tycke och smak, min egen närmare bestämt. De följande dimensioneringarna har otvetydigt hörbara färgningar. Man kan dock fortfarande försöka "balansera" felen för att hitta "bästa möjliga" dimensionering, även för en stympad tonkurva, givet de eventuella övriga kraven om känslighet och lådstorlek, som omöjliggör dimensionering enligt "optimaltonkurvorna".

Min personliga erfarenhet är att semioptimerade basreflexlådor låter bäst om man utgår från en buterworthdimensionerad låda (4:e ordningen) och sen sänker  $f_0$  cirka 20-25 %.

Då det gäller slutna lådor är jag rädd att jag kommit fram till att den mest klassiska av alla dimensioneringar:  $Q = 1/\sqrt{2}$ , faktiskt ger den bästa kompromissen mellan DYNAMISKT och STATISKT beteende. Möjligen föredrar jag ett något lägre Q-värde, typ  $Q = 0,65$ .

Om möjligheten finns rekommenderar jag dock att alla försöker dimensionera äkta "optimaltonkurveförsedda" högtalare. De semi-optimerade (DYNAMISKT, STATISKT eller någonting mittemellan) ter sig i jämförelse därmed klangligt, dynamiskt och/eller musikaliskt stympade (i större eller mindre grad beroende på storleken av basområdet stympning) åtminstone för lyssnare med stora anspråk.

## E. Reservationer

De s k "optimaltonkurvorna" har flera gånger i texten anförts vara "ohörbart färgande" jämförbart med en helt rak tonkurva. Jag vill dock särskilt påpeka följande:

1. ■ För att basåtergivningen skall vara användningsfri krävs självklart att den skall sakna alla potentiella felbeteenden. D v s utöver att tonkurvan skall följa "optimaltonkurvorna" måste även t ex distorsionen ligga tryggt under de hörbara värdena vid de ljudtryck som skall spelas. I praktiken är inte distorsionsvärden på varken 10 eller 20% ovanliga hos kommersiella högtalare, vid ljudtryck som från en levande symfoniorkester.

2. ■ Ur strickt vetenskaplig synpunkt får man heller inte glömma att resultatet av ett experiment endast äger validitet under de förutsättningar som rådde under experimentet. Vad jag främst tänker på är då det promgrammaterial som valdes för studien. Det finns givetvis en möjlighet att det kan finnas programmaterial som skulle skärpa kraven på tonkurvan i basområdet ytterligare. Med tanke på det mycket stora spektrum av ljud som testades har jag dock tron och förhoppningen att det i så fall endast handlar om marginella justeringar av de presenterade kurvorna (t ex att kurva 1 och möjligen 2 bortfaller).

3. ■ Man får inte glömma att högtalare i de allra flesta fall används i lyssningsrum och inte i fritt fält. Detta medför att man i högtalarkonstruktioner måste taga hänsyn till fler egenskaper än de som kurvorna visar hos hörseln.

Främst är det två rumsegenskaper som bör räknas in i varje seriös högtalarkonstruktion, nämligen:

### Golvreflexens inverkan

Beroende på baselementets höjd över golvet kommer bidraget från golvet att vara i fas med elementets direktstrålning upp till en mer eller mindre hög frekvens. Några exempel:

Höjd: 70 cm → ca 250 Hz (1:a utsläckn. ca 500 Hz)

Höjd: 30 cm → ca 600 Hz (1:a utsläckn. ca 1200 Hz)

Höjd: 10 cm → ca 1800 Hz (1:a utsläckn. ca 3600 Hz)

Under denna frekvens kommer nivån att lyftas ca 2-6 dB relativt högre frekvenser.

(Skall man vara riktigt noga lyfts nivån 6 dB i registret då golvreflexen är i fas med direktljudet medan det lyfts i snitt 3 dB i de högre registren, då golvreflexen kommer i slumpartade faslägen.

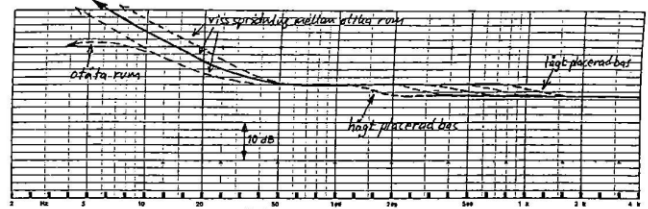
Både lyftet om 6 dB vid låga frekvenser och det om 3 dB vid högre kan emellertid vara föremål för försvagningar beroende på hur fjädrande golvet är (låga frekvenser) samt hur absorberande beläggning det har (höga frekvenser), därav intervallet om 2-6 dB)

Dessutom tillkommer;

### Rummets kavitetsverkan

Som antytts tidigare i texten så bidrar verkliga lyssningsrum med större bashöjningar än de gjort om de varit "lyssningsloger" — öppna

framåt. I praktiken förekommer det självklart variationer mellan olika lyssningsrum, men en "typisk-rumskurva" kan man dock skissa upp. Denna har jag fantasifullt namngivit "typisk rumskurva". Ur denna kan man även utläsa några typiska golvkorrektioner:



"TYPISK RUMSKURVA"

*Kommentar: I dessa kurvor finns inga inverkaner från stående vågor från rummet medtagna. Detta har flera skäl. För det första tillhör de lyssnarens "loge". För det andra kan man inte göra några "generella stående vågskurvor" för ett rum, då stående vågmönstret för ett lyssningsrum är lika unikt för rummet som ett fingeravtryck är för människan som bär det.*

*Det kanske också bör påpekas att en rumspanpassad högtalares frekvensgång skall korrigeras mot en invers av ovanstående kurvor. Man kan också utläsa att man faktiskt inte alls behöver bekymra sig om inverkan från golvreflexeffekten i övre basregistret om baselementet är lågt placerat, mellanregistret är högt placerat och delning sker mitt emellan respektive elements "golvkna". Dock måste givetvis verkningsgraden (känsligheten) hos elementen under frifältsbetingelser differentieras med 2-4 dB, det vill säga; basen skall ligga så mycket lägre i nivå utan golvreflexens inverkan.*

4. ■ Ytterligare en viktig reservation är att man inte skall tolka "OPTIMAL-tonkurvorna" som absoluta. T ex så har ju endast avskärningar som går att åstadkomma med slutna lådor och basreflexlådor (och dipoler) simulerats. Detta innebär att det är fullt möjligt att örat skulle acceptera avskärningar som är brantare än de visade. Kurvorna skall alltså inte tolkas som örats gränsvärden för avvikelser på tonkurvan. Istället handlar det om örats toleranser för tonkurveavvikelser från olika möjliga högtalar-dimensioneringar.

5. ■ Man får heller inte glömma att detaljer såsom fönster, skåpdörrar, tavlor, paneler och liknande kan ha en benägenhet att börja distordera (skallra) vid höga ljudtryck. I det fallet kommer självklart tonkurvan, åtminstone ned till 10-15 Hz att påverka det ljudande resultatet.

För neutralast möjliga klang, med största möjliga marginaler till hörbara klangförvrängningar, väljes kurva 4-7 i ett slutet rum, medan givetvis tonkurva 1-3 gäller under utomhusbetingelser. Under "äkta frifältsbetingelser" (vilket jag förvisso inte kan komma på något exempel på att det förekommer, annat än möjligen hos balongflygare med medhavd stereoanläggning) skall givetvis även golvreflexkompensationen, som behövs i alla verkliga rum, utgå.

## F. Senare experiment med större ljudtryck

Som kanske framgått har maximalt ljudtryck i den beskrivna studien varit mindre än 100 dB (ett par högtalare). För att uppnå högre ljudtryck har studien utökats med ytterligare lyssningar, dels på marknivå (+ 6 dB) och dels på marknivå mot stor vägg (+ 12 dB). Väggens storlek var dock begränsad, varför endast frekvenser över ~ 25 Hz kunde tillgodogöra sig hela de

sista 6 dB baslyft. Hänsyn togs dock till detta och lyssning skedde dessutom på så kort avstånd (~1 m) att den begränsade väggstorleken spelade mindre roll. Resultatet av dessa senare lyssningar har givit helt oförändrade kurvor jämfört med "trädexperimentet" - 81. Det enda riktigt signifikanta resultatet från de senare lyssningarna är att den lägre distorsionen (tack vara de högre möjliga ljudtrycken) visade sig medföra att tonkurveavvikelseerna faktiskt kunde tillåtas att öka något! Det gäller då hur mycket "bashöjning" man kunde tolerera i registret runt och under 10 Hz. Huvuddelen av de hörbara förändringarna, vid större baslyft än optimaltonkurva 1, hade alltså troligen varit av distorsionskaraktär i trädexperimentet.

### G. Om lågfrekventa poler

Av det presenterade kurvmaterialiet framgår det inte tydligt hur mänskliga örat reagerar på subsoniska poler (resonanser under ~30 Hz). De angivna "tillåtna avvikelserna" från "optimaltonkurvorna" antyder visserligen att det tycks vara tillåtet med vissa inte helt försumbara avvikelser, främst i form av minskad amplitud, då frekvensen är mycket låg. En enkel sammanfattning av ungefär vad man kan tillåta för Q-värden vid olika frekvenser kommer därför här.

#### Tillåtna Q-värden

Alldeles tydligt visades under "trädstudien" att inga Q-värden av dignitet var tillåtet över 30 Hz utan lätt hörbara färgningar.

Senare experiment har visat att det inte tycks handla om grupplöptids- eller löptidsdistorsion, utan främst handlar om för stor dominans från frekvenser runt polen. Felen yttrar sig dock kraftigast med transienta (DYNAMISKA) insignaler, trots att felet har delvis STATISKA — klangliga orsaker. Förklaringen skall sökas i att polens klangliga inverkan märks mest då polen som en "ton" kan titta fram ur en transients kontinuerliga spektrum.

Ovanstående resonemang förklarar också varför man kan acceptera mkt högre Q-värden från polen vid  $f_n$  i ett basreflexsystem (typ 3-4), än från  $f_o$ -polen i en sluten låda. I förstnämnda fallet hålls polen vid  $f_n$  tillbaka nivåmässigt p g a inverkan från den andra ( $f_o$ -)polen, som ju utgör ett HP-filter med markant dämpning vid  $f_n$ . Slutna lådor emellertid, har ju bara ett polpar, och amplitudöverdriften runt detta framstår helt omaskerad, trots betydligt lägre Q-värde (och lägre grupplöptidsfel).

I högre ordningens delningsfilter, som delar mot ett annat register (alltså ett filter mellan två element, inte filter i registrets ytterändar), kan man helt stringent tillåta ännu högre Q-värden, eftersom den tonkurvemässiga betoningen av polerna helt elimineras då de båda filterhalvorna får samverka.

(Termiska problem av passiva filter med höga Q-värden (d v s högre ordningens filter) och fasvridningarna som kan påverka svävningsförlopp i musiksignaler är dock problem som inte bör ignoreras hos delningsfilter).

I det subsoniska området (< 30 Hz) visade det emellertid sig att örat accepterade kraftigt ökade Q-värden. Detta gällde såväl vid dimensionering av slutna lådor som för basreflexlådor. Framför allt med slutna lådor kommer dock distorsion och krav på extrema konareor

och slaglängder som ett oundvikligt bihang till höga Q-värden vid extremt låga frekvenser. Åtminstone om man spelar fonogram som innehåller några ljud i det subsoniska området.

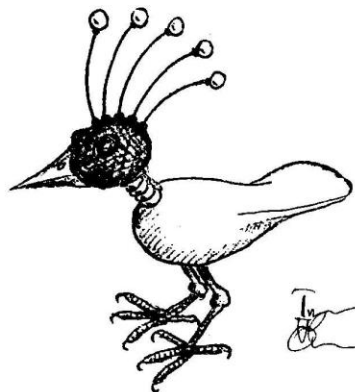
Av skäl som gått igenom (det är höga Q-värdens amplitudegenskaper, snarare än grupplöptidsegenskaper, som ställer till med hörbara färgningar), så kommer jag inte att presentera någon tabell med olika tillåtna Q-värden vid olika frekvenser, utan istället en tabell med tillåtna amplituder vid resonanstoppa vid olika frekvenser. Glöm dock inte bort att dimensioneringar enligt tabellen nedan med största sannolikhet kommer att ge onödigt hög distorsion hos en praktisk högtalare. Även om de inte bidrar med klangligt hörbara fel finns det alltså goda skäl att undvika dem.

Frekvens	Amplitud
30 Hz	+ 1,5 dB
25 Hz	+ 2,5 dB
20 Hz	+ 4 dB
16 Hz	+ 7 dB
13 Hz	+ 10 dB
10 Hz	+ 15 dB
7 Hz	+ 25 dB

Mycket annat finns säkert att säga i anknytning till "OPTIMAL-tonkurvorna", men just nu kommer jag inte på något mera.

SLUTA

I. Öhman, Audio Pürus ix



—Smaka på'ren här!

—Mmmm... Müsli!

—Müsli..?

—Ja, med dadlar och andra tropiska fåglar.

—Frukt heter det väl?



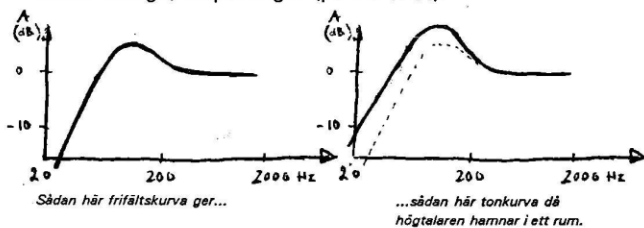
# DE TRADITIONELLA DIMENSIONERINGARNA

Här några ord om hur högtalare dimensionerats historiskt, och även i viss mån hur de fortfarande dimensioneras, med tragiska följder för modernt inspelad musik.

Dels har vi den gammel-gamla engelska skolan som sade att högtalare inte behöver någon djupbas alls, men skall ha en fet och svulstig mellanbas, gärna 5-10 dB för mycket i ekofri miljö (d v s 10-15 dB för mycket i ett verkligt rum!). Då låter det "fylligt och bra" på musik, fast det blir ju svårt att urskilja vad folk säger vid tal förstås...

*(Ni kommer väl ihåg alla gamla rörradiomottagare med tal/musik-omkopplare... Man ansåg att tonkurvan skulle anpassas till typen av programmaterial. Musik skulle vara fyllig, tal skulle vara tydligt...)*

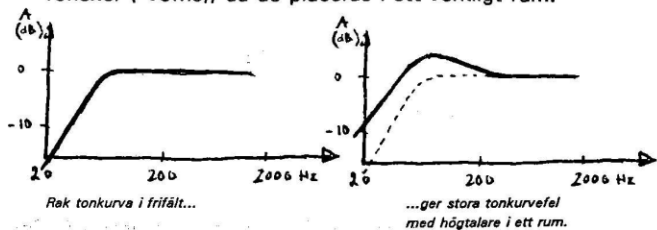
Man kan nog utan överdrift säga att den gammel-gamla engelska skolan inte var en på djupa tankar baserad dimensionering, utan snarare ett gammalt subjektivt klangideal. En dimensioneringstradition som överlevde alltför länge, till att börja med genom brister i basåtergivningen från använda pickuper/elektronik-kombinationer och begänsade mätmöjligheter, därefter fortlevde de genom alltför basfattiga och skrikiga (och alltför många) inspelningar (på 70-talet).



Den lite modernare engelska skolan säger att alla rum är olika, därför är det ingen idé att försöka räkna ut hur de beter sig, utan bättre att bara ignorera dem! Alltså dimensionerar man högtalare så att de mäter så rakt som möjligt i ekofritt rum.

När de sen kommer in i ett verkligt rum kommer de alla att bli bashöjda på grund av inverkan från golv och närliggande väggar (fast olika mycket i olika rum förstås, rum är ju olika) och de kommer att ha en onödigt svag återgivning i den verkligt djupa basen (alternativt vara onödigt tungdrivna). Det kostar djupbas att hålla nivån uppe i mellanbasområdet. För att minimera effekten av förstnämnda bör högtalarna placeras så långt från alla angränsningsytor som möjligt.

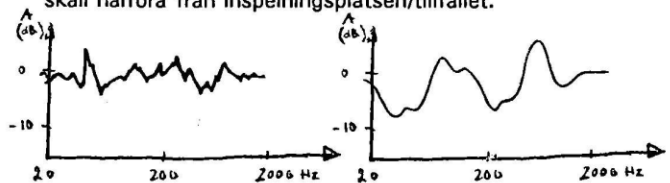
Oavsett placering av högtalarna i lyssningsrummet får även högtalare av den lite modernare engelska skolan, genom golvreflexen, en mindre överbetoning i övre basregistret för direkt ljudet (högtare + mkt tidiga reflexer (<5ms)) då de placeras i ett verkligt rum.



Ytterligare en skola finns det, skolan "rak tonkurva på lyssningsplats". Denna förfäktas mig veterligt inte av många högtalarkonstruktörer, men väl av ett flertal tillverkare av equalizers. Flera av dessa apparater har ju en liten medföljande mätmikrofon som skall placeras just på lyssningsplats, sen drar man igång den inbyggda "skårt brus-generatorn" och börjar titta förvirrat på den tillika inbyggda spektralanalysatorn (som består av ett antal staplar som berättar hur mycket ljud det finns vid de olika frekvenserna). Sen är det bara att börja ratta tills alla staplar visar tillräckligt lika mycket — rak tonkurva på lyssningsplats! I praktiken medför det att det ljud som når lyssnaren direkt från ljudbilden mellan och bakom högtalarna kommer att klinga för ljusst, eftersom tonkurvan blir rak först efter att rummets bashöjande effekt gjort sin inverkan.

Endast ett exempel på konstruktion där en rak energikurva inte går ut över direkt ljudet kan jag erindra mig, nämligen Stig Carlsson 80-tals modeller (50-serien) som dimensionerats så att total ljudet blir skapligt rakt, utan allvarigare inskränkningar på direkt ljudet, åtminstone i vissa rum.

Fortfarande ifrågasätter jag dock den raka tonkurvan vid lyssningsplats vid tvåkanalig stereofonisk lyssning, då den disharmonierar med det egna lyssningsrummets inverkan. Hade man suttit i sitt eget lyssningsrum, öppet mot en verklig orkester hade orkestern inte klingat med "rak frekvensgång" vid lyssningsplats. Varför skall man då mäta rak tonkurva vid lyssningsplats? (Se annars artikel på sid 45 i nya MoL nummer 3-93.) Vill man göra sig av med den klang det egna lyssningsrummet/logen ger, för att istället eftersträva illusionen att man sitter t ex på parkett i ett konserthus, måste man tillgripa ambiofoniska lösningar! Åtminstone om man vill att den bakifrån kommande delen akustik skall härröra från inspelningsplatsen/tillfället.



## SLUTSATS

Nå, hur skall det vara då? Ja alldeles trivialt är det ju inte, men det första man bör ta reda på torde ju ändå vara hur hörselupplevelsen av basområdet påverkas av den uppmätbara tonkurvan, d v s ställa sig frågan: Hur krokigt får det (eller kanske t o m bör det) vara, egentligen?

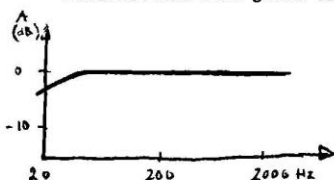
Vill man ha ett utförligt svar bör man bläddra tillbaka några sidor och läsa rapporten "Framtagning av "OPTIMALA TONKURVOR I BASOMRÅDET" -81".

Det korta svaret på samma fråga, som oxå får tjäna som slutsats till denna artikel, blir:

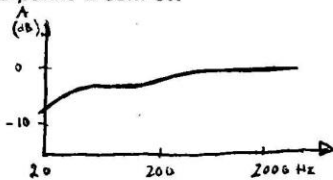
**1.** Högtalarens frifältstonkurva skall ligga några deciBel lågt under den frekvens vid vilken golvreflexen börjar komma i fas med direktljudet. *På så vis slipper man att golvreflexen tillför någon falsk värme till klangen.*

**2.** Tonkurvan hos högtalaren mätt i frifält skall börja falla vid den frekvens som ett helt slutet rum lyfter tonkurvan, jämfört med samma rum där det fattas en vägg (den väggen som illusoriskt skall ersättas med ljudbilden vid spisning). *På så vis blir klangen korrekt även i det mycket djupa basområdet. Påpekandet om att högtalarens tonkurva skall börja falla under denna frkvens skall dock inte missförstås som att de flesta högtalare skulle vara drabbade av att de inte faller av vid låga frekvenser. Tvärtom faller de flesta högtalare av redan vid alldeles för höga frekvenser!*

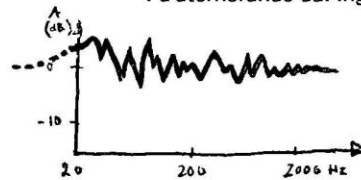
Däremot kan man gärna tolka punkt 2 som ett



Korrekt direktljud...



...kräver denna frifältstonkurva...



...och ger denna total ljudskurva vid lyssningsplats.

På återhörande då! Ingvar Ohman

*konstaterande att en högtalare med en för praktiskt bruk rak tonkurva, har en för låga frekvenser fallande tonkurva vid mätning under frifältsbetingelser.*

**3.** Rummets övriga tonkurvepåverkan kan vara nog så störande (rumsresonanser och annat elände) men om detta korrigeras från högtalarna eller tidigare i kedjan fås konsekvensen att direktljudet drabbas av samma fel som rummet hade från början, fast tvärtom!

Är rummets akustiska egenskaper störande (vilket förvisso är nog så vanligt) bör felen bekämpas med akustiska bekämpningsmedel i själva rummet, snarare än genom elektroniska korrekationer av programmaterial.

Sistnämnda bekämpningsmedel av rumsakustiska problem, och hur de bör användas, kommer jag att skriva om i nästa avsnitt av denna artikelserie om vardagsrumsakustik.

#### I artikeln använda definitioner:

■ **Frifältstonkurva** = tonkurva för en högtalare (i en riktning i taget) placerad i fritt fält, d v s utan några angränsningsytor i sin närhet. Frifältstonkurvan bör mätas med svept sinuston.

Frifältskurvan är karakteristisk för högtalaren.

■ **Direktljudtonkurva** = tonkurva från högtalaren placerad i tänkt närmiljö. I denna tonkurva ingår (förenklat) alla reflexer (från närliggande angränsningsytor) som anländer till lyssnaren mindre än 5 ms efter det från högtalarelementen. Direktljudtonkurvan bör mätas med svept sinuston, med förekommande närliggande angränsningsytor (dock ej i slutna rum med några motstående väggar).

Direktljudtonkurvan är karakteristisk för högtalaren, placerad på förekommande höjd över (dämpat) golv och avstånd till närliggande väggar. (Och är den, enligt undertecknad, mest signifikanta kurvan för hur högtalaren kommer att låta.)

■ **Tonkurva på lyssningsplats** = precis vad det låter som! Brukar vara en synnerligen ojämn kurva, som dessutom är starkt beroende av vald lyssningsplats. Detta skall man inte oroa sig för, då det är en naturlig konsekvens av att ens lyssningsrum utgör en loge med normalt beteende för en dylik. Lyssningsplatstonkurvan kan mätas med svept sinuston eller smalbandigt brus.

Tonkurvan på lyssningsplats är karakteristisk för högtalaren med förekommande placering i lyssningsrummet, det använda lyssningsrummet och lyssnarens placering i detsamma.

■ **Energikurva** = kurva för total utstrålad energi från en högtalare, placerad i rum. Olika metoder kan användas för att försöka mäta upp denna kurva, såsom cirklande mikrofoner, eller medelvärdet av många utspridda mikrofoner, placerade i samma efterklangskammare som högtalaren ställts i för mätningen. Smalbandigt brus används som mätsignal. (En kurva som är lätt att definiera men svår att mäta på ett repeterbart sätt...) Denna kurva ansågs en gång i tiden ge en god bild av hur högtalaren låt, vilket nog är så långt ifrån sanningen man kan komma...

Energikurvan är karakteristisk för högtalaren placerad på förekommande sätt, men svår att mäta exakt.

■ **Totalljudskurva** = Släkting till såväl "Tonkurva på lyssningsplats" som "Energikurva". I princip kan man säga att det är en medelvärdesbildning av tonkurvorna på ett antal lyssningsplatser inom en begränsad del av lyssningsrummet, nära lämplig lyssningsplats. Totalljudskurvan ser snyggare ut än en vanlig tonkurva uppmätt på lyssningsplats, emedan effekten av rumsresonanser och eventuella oegentlighet hos högtalarens spridningsmönster minskar som konsekvens av medelvärdesbildning av tonkurvorna från en stor yta i lyssningsrummet. Totalljudskurvan mäts med cirklande mikrofon i verkliga lyssningsrum, med brussignal.

Totalljudskurvan är karakteristisk för högtalaren med förekommande placering i lyssningsrummet, det använda lyssningsrummet och i viss mån den cirklande mikrofonens placering i detsamma.