

# 8. AUDIOJÄRJESTELMÄN HANKINTA

---

## 8.1 Yleistä

### 8.1.1 Suunnittelu lähtee tarpeista

Samat audiojärjestelmän osat ja samat audiolaitteet toistuvat tehtäväkohtaisessa jaossa useissa järjestelmissä. Audiojärjestelmä on yleensä tarvittavien tehtävien toteuttamiseksi integroitu eli yhdistetty kokonaisuus, jossa samaa laitetta pyritään käyttämään useaan käyttötarkoitukseen.

Kuitenkin jotkut laitteet eroavat eri käyttötarkoituksiin suunniteltuina ja sovellettuina niin merkittävästi toisistaan, että niitä on syytä varata kuhunkin käyttöön omansa, erityisesti kyseiseen käyttöön soveltuva laitteensa. Hyvin erilaisia mikrofoneja tarvitaan puhe- tai laulukäyttöön tai soitinten mikitykseen. Editointinauhurilta vaaditaan lisätoimintoja ulosajonauhuriin verrattuna. Kaiuttimet ovat ominaisuuksiltaan ja rakenteeltaan erilaisia PA-, tarkkailu- tai monitorikäyttöön suunniteltuina jne.

Keskeistä audiojärjestelmän suunnittelussa on tulevien käyttötarkoitusten kartoitus ja määrittely. Tämä tuntuu itsestään selvältä, mutta usein on vaikeaa saada selville tulevaa toimintaa, jota varten järjestelmä hankitaan. Sen sijaan, että he päätettäisiin, mitä uudessa kulttuuritilassa tullaan tekemään, vetäydytään fraasin "pitää varautua" taakse ja vaaditaan monitoimitilaa.

Tilan akustiikan kannalta ei ole olemassa monitoimitilaa. Erilainen äänimateriaali vaatii tilalta erilaisia akustisia ominaisuuksia: puhe, laulu, kamarimusiikki, sinfoniamusiikki, rockmusiikki vaativat soidakseen hyvin erilaista akustiikkaa.

Akustiikkaa voi jonkin verran muuntaa esimerkiksi käännettävien elementtien avulla, joiden toinen puoli on pehmeä, ääntä imevä, ja toinen puoli kova eli ääntä heijastava. Akustiikan muuntaminen on kuitenkin rajoitettua: jäähallista ei saa konserttisalia. Mitä tarkemmin tilan käyttö on määritelty ja rajoitettu tiettyyn ohjelmamuotoon, sen paremmat mahdollisuudet on saada tilan akustointi ja audiojärjestelmä sopimaan käyttöön.

Halutun käyttötarkoituksen ja laatutason määrittely on ratkaisevan tärkeää suunnittelun ja toteutuksen onnistumisen kannalta. Määrittely on välttämätöntä jo senkin takia, että osataan pyytää vertailukelpoisia tarjouksia järjestelmän suunnittelemisesta - toimittamisesta puhumattakaan.

Suunnittelussa on erotettavissa akustinen ja sähköinen osuus. Akustisessa osuudessa suunnitellaan järjestelmän liittyminen tilaan. Suunnittelun lähtökohdina ovat soinnilliset tavoitteet ja reunaehtoina akustinen tila. Tätä käsitellään erikseen kohdassa 8.4.

Sähköisessä osassa suunnitellaan järjestelmän toiminta ja sen osien kytkeminen toisiinsa. Suunnittelun lähtökohtina ovat toiminnalliset tarpeet ja rajoituksina voimavarat.

Myös käytettävissä olevat voimavarat (aika, varat, työvoima jne.) sekä jo olemassa olevat tilat, laitteet, ynnä muu pitää selvittää. Vastanaiden tietojen perusteella kannattaa edetä lohkokaaviotason järjestelmäsuunnitteluun ja suorittaa lopuksi yksittäiset laitevalinnat.

Varoittavia esimerkkejä on lukemattomia siitä, että eteneminen on tapahtunut päinvastaisessa järjestyksessä. On ensin ihastuttu tehokkaan mainonnan kautta tiettyihin audiolaitteisiin ja valittu ne. Vastan jälkeen on ihmetelty, minne ne saa mahtumaan, miten ne kytketään jne. Kun laitteisto lopulta on käyttövalmiina, huomataan, että upeat ja kalliit laitteet seisovat laitetelineissään pölyä keräämässä tarpeettomina, ja rahaa ei enää ole jäljellä tarpeellisiin laitteisiin.

### 8.1.2 Hankintamenettely

Hankintamenettelyyn on useampia malleja sekä suunnittelun että toteutuksen osalta. Audiojärjestelmän hankinnan suunnittelijana voi toimia:

- erityinen audioteknillinen konsultti tai audiotekniikkaan perehtynyt tele- tai sähkösuunnittelija/audiosuunnittelija
- käyttäjä (tilaajan/rakennuttajan edustaja)
- audiotekniikkaan perehtymätön sähkösuunnittelija
- laitetoimittaja tai urakoitsija/toimittaja

Yhteensovitus muun suunnittelun kanssa (arkkitehti-, rakenne-, sähkö-, LVI-, sisustus, jne.) on keskeistä. Audiosuunnittelijalla ja sähkösuunnittelijalla on yhteistyössä käyttäjän kanssa tähän yleensä parhaat edellytykset. Toimittaja tulee useimmiten mukaan suunnitteluun niin myöhäisessä vaiheessa, että mahdollisesti tarvittavia muutoksia on vaikeaa toteuttaa.

Näkemyksistä tarvittavasta audiotekniikasta on yleensä käyttäjän tarpeisiin paneutuvalla audiosuunnittelijalla paras ja laajin. Toimittaja saattaisi tuntea parhaiten tekniikan tai ainakin omat tuotteensa. Sähkösuunnittelijan audiotekniikan tuntemus on yleensä rajoittunutta laajasta työkentästä johtuen. Käyttäjä on yleensä tietoinen tarpeistaan, mutta tarvitsee toteutusmahdollisuuksien osalta konsultointia.

Taloudellisuudessa suunnittelukustannukset voidaan piilottaa hankittavien laitteiden hintaan, mikäli suunnittelijana toimii toimittaja. Suunnittelu maksaa aina, suorittakoot sen kuka hyvänsä. Hyvä suunnittelu maksaa itsensä takaisin useimmiten jo säästöinä hankinnassa, mutta merkittäviin säästöihin päästään myös käyttökulujen osalta.

Suurissa ja vaativissa hankinnoissa suositellaan käyttämään erityistä audiosuunnittelijaa, joka toimii yhteistyössä käyttäjän ja muiden suunnittelijoiden kanssa. Pienten laitteistojen ja yksittäisten laitteiden hankinnassa käyttäjä pystyy usein itsekin suunnittelemaan hankinnan laitetoimittajan avustuksella.

### 8.1.2.1 Toteutus

Audiojärjestelmän hankinta voidaan toteuttaa:

- erillisenä audioteknisenä urakkana (audiourakka)
- osana sähkö-, AV-, tele- tai muuta urakkaa
- tilaajan/rakennuttajan erillishankinnassa

Yhteensovitus muun urakoinnin kanssa (rakennus-, LVI-, sähkö-, kaluste-, jne.) on tärkeää: Erillinen audiourakka on selväpiirteinen urakkarajoiltaan. Hankinnassa osana muuta urakkaa valvonta saattaa olla hankalaa, sillä mikäli muu urakoitsija käyttää audioasennuksiin aliurakoitsijaa, niin neuvottelutie kulkee pääurakoitsijan kautta. Erillishankinnassa yhteensovitus jää usein tekemättä, sillä laitteet hankitaan vasta viime hetkessä tai muiun urakoinnin jo valmistuttua.

Parhaaseen toteutuksen laatuun yleensä päästään, kun laitteet toimitetaan ja asentaa erikoisliike. Mikäli hankinta on osana muuta urakkaa, niin urakoitsija saa valita toimitettavat "vastaavat" laitteet. Kiusauksena on tällöin suorittaa valinta kate laatua tärkeämpänä kriteerinä. Erikoisliikkeet ovat yleensä muita urakoitsijoita kiinnostuneempia pitämään mainettaan yllä myös laadun suhteen. Erillishankinnassa laitteiston laatu vaihtelee tilaajan asiantuntemuksesta, valvonnan tarkkuudesta ja toimittajan tasosta riippuen melkoisesti.

Toteutuksen aikaiset muutokset on joustavinta suorittaa, mikäli tilaajalla ja hänen edustajillaan on suorat yhteydet toimittajaan. Muutoksia on työlästä toteuttaa, jos neuvottelu tapahtuu muun urakoitsijan välityksellä aliurakoitsijalle.

Hankinnan taloudellisuuden kannalta on erillinen audiourakka yleensä edullisin ja muun urakan osana hankkiminen kallein vaihtoehto. Erillishankinnan kustannuksia verrattaessa tulee laitteiden hintaan lisätä kustannukset erikseen hankittavasta asennuksesta ja kytkennästä tarvikkeineen.

Jälkihoidon (käytönopastus, dokumentointi, huolto, muutokset, jne.) osalta erikoisurakoitsijat hoitavat yleensä vastuuntuntoisimmin urakan loppuun saakka. Muulla urakoitsijalla ja laitetoimittajalla on usein puutteita sekä taidon että mielenkiinnon suhteen. Varma keino pitää urakoitsijan mielenkiintoa yllä loppuun asti on jäädyttää riittävä osa urakkasummasta odottamaan viimeisenkin loppupiiirustuksen luovuttamista eli urakan lopullista vastaanottoa.

Yhteenvedona voidaan sanoa, että pienet järjestelmät sisältyvät usein alihankintoina sähköurakkaan. Tällöin niiden ohjelmallinen sisältö saattaa olla määritelty niin väljästi, että monasti jää laitetoimittajan hyvän tahdon varaan tehdä laitteistosta toimiva. Lisäksi urakoitsija ottaa välityspalkkion laitteiden toimittamisesta.

Mikäli halutaan päästä halvemmalla, voidaan järjestelmä hankkia suoraan laitetoimittajalta, jolloin päästään myös suoraan neuvottelemaan ja valvomaan hankintaa. Mikäli halutaan varmuudella toimiva järjestelmä, kannattaa se hankkia erillisurakkana ja käyttää audiosuunnittelijaa konsulttina. Konsultin käyttökustannus tulee useimmiten takaisin säästöinä järjestelmän hankintamenoissa. Pieniä laiteko-

konaisuuksia varten löytyy valmistajilta tyyppimallistot, joita käyttäen hankinnat saattaa onnistua ilman konsulttiakin.

Vaativampien järjestelmien osalla suositellaan, että hankinta suoritetaan erillisenä audioteknisenä urakkana ja käytetään erityistä audiosuunnittelijaa konsulttina. Tämän on todettu olevan luotettavin ja kokonaiskustannuksiltaan edullisin vaihtoehto. Tärkeää on myös akustikon mukanaolo suunnitteluryhmässä audiosuunnittelijan ja arkkitehdin tukena, vaikka kyseessä olisi järjestelmän hankinta jo olemassa olevaan tilaan.

Näihin järjestelmiin eivät yleensä sovellu laitevalmistajien tyyppiratkaisut sellaisenaan, vaan suunnittelussa on lähdettävä tavoite- ja vaatimustasosta. Hankinnoissa päästään yleensä parhaaseen lopputulokseen, jos laitevalmistaja valitaan tarjousten perusteella. Tätä varten tulee hankinnan laajuuden ja laadun olla tarkoin määritelty, jotta saadaan vertailukelpoisia ja perusteltuja tarjouksia, joissa toimittajaehdokkaat voivat vielä esittää vaihtoehtoja harkittaviksi. Tällainen hankintamenettely vaatii mahdollisuutta suoriin neuvotteluihin eli erillistä hankintaa ja konsulttia tilaajan tueksi.

### **8.1.2.2 Esimerkki hankintamenettelystä**

Hankintamenettely voi edetä esimerkiksi seuraavalla tavalla:

1. Tilaaja/rakennuttaja muodostaa audioteknisestä henkilöstöstään työryhmän kartoittamaan kohteen audioviestinnän tarpeet.
2. Audiosuunnittelija tekee edellisen perusteella luonnoksen hankintaohjelmasta ja karkean kustannusennusteen.
3. Audioteknillinen työryhmä ja audiosuunnittelija tarkentavat luonnoksen hankintaohjelmaksi.
4. Audiosuunnittelija tekee hankintaohjelman mukaisen hankintasuunnitelman: työselityksen laiteluetteloineen, periaate- ja johdotuskaaviot, toimintopiirroksot ja alustavat laitesijoittelupiirroksot yms.
5. Tarjouskyselyiden suorittaminen ja tarjouspyyntöjen lähettäminen.
6. Tarjousten arviointi ja vertailut sekä jatkoneuvottelut tarjoajien kanssa tarjousten saattamiseksi yhteismitallisiksi ja hankintaohjelman mukaisiksi.
7. Tekniset jatkoneuvottelut varteenotettavien tarjoajien kanssa hankinnan tarkentamiseksi ja muokkaamiseksi tarjoajien mahdollisesti esittämien ja käyttökelpoisiksi arvioitujen uusien toteutustapojen mukaisiksi
8. Tilaus (urakka- tai toimitussopimuksen solmiminen)
9. Laitetoimittaja/urakoitsija laatii työpiirustukset, sopii toimitus- ja asennusaikataulut ja muut urakoihin liittyvät seikat hyvissä ajoin ennen toteutusta muiden urakoitsijoiden/toimittajien kanssa
10. Toteutus (laitteiden toimitus, asennukset, johdotukset ja kytkennät) tilaajan ja hänen edustajanaan toimivan audiosuunnittelijan valvonnassa, jonka aikana voidaan tehdä tekniikan kehityksen mahdollistamia tai käytännön vaatimia muutoksia hankintaan.
11. Käyttöönotto, käyttöönottopastus, dokumentointi ja vastaanotto tarkastuksineen tilaajan ja audiosuunnittelijan valvonnassa.
12. Takuuaikana järjestelmän kokeilu luotettavuuden ja soveltuvuuden eri käyttötarkoituksiin selville saamiseksi sekä vastaavien korjausten ja muutoksien tekeminen järjestelmään.

### 8.1.3 Suunnittelusta

Vaikka suurempien audiojärjestelmien suunnittelussa käytettäisiin asiantuntijaa apuna, on käyttäjän kannalta tärkeää tuntea suunnittelun periaatteet. Konsultin on hyvin vaikeaa tietää mitä käyttäjä haluaa, ellei käyttäjä itse pysty sitä selkeästi yhteisellä kielellä esittämään.

Käyttäjillä on erilaisia näkemyksiä siitä, mitä audiotekniikalla yli-päättänsä tehdään. Käyttäjillä on myös erilaisia taiteellisia näkemyksiä, työtapoja ja mieltymyksiä. Tämä johtaa vastaavasti erilaisiin näkemyksiin toteutuksesta, laitevalinnoista ja vaikkapa laitesijoittelusta. Konsultti joutuu usein erotuomariksi eli sovitteluun yhteen ristiriitaisiakin vaatimuksia tilanteessa, jossa jokainen on tavallaan oikeassa, mutta järjestelmää ei voida toteuttaa kaikkien toivomuksia tyydyttävästi. Vastaan voivat tulla myös reunaehdot: akustinen tila, budjetti, aikataulu jne.

Yhteistyö päättäjien, asiantuntijoiden ja lopullisten käyttäjien välillä on elintärkeää niin järjestelmän suunnittelu- kuin toteutusvaiheessa-kin. Eikä yhteistyö onnistu ilman yhteistä kieltä, audiotekniikan perusteiden ja taloudellisen ajattelun alkeiden hallintaa.

Edellä on painotettu audiojärjestelmän järjestelmäluonnetta. Sen ymmärtäminen on tärkeää niin suunnittelu- kuin toteutusvaiheessa.

Suunnittelussa ajatuksen tulisi edetä johdonmukaisesti: mitä äänilähteitä on, miten niistä lähteviä signaaleja halutaan käsitellä, tallentaa ja niin edespäin. Tätä voisi kutsua audiosuunnittelun toiminnalliseksi vaiheeksi, koska tässä vaiheessa ovat toiminnalliset päämäärät ratkaisevia. Pääkysymys on: mitä halutaan ja miksi? Tässä vaiheessa ei saisi antaa käytännön rajoitusten lannistaa ja rajoittaa liikaa ajattelua.

Kun äänensiirtoketju on ajatuksellisesti selkeä, ryhdytään suunnittelemaan, mitä teknisiä apuvälineitä eli audiolaitteita toteutukseen tarvitaan, miten ne kytketään, minne sijoitetaan jne. Tätä puolestaan voisi kutsua suunnittelun tekniseksi vaiheeksi. Nyt unelmat kohtaavat karvaan todellisuuden. Tällöin heräävät vaikeat kysymykset, kuten miten, millä, millä ajalla ja kuka tekee työt.

Kerran esiteltiin erään musiikkiteatteriproduktion audioteknillistä järjestelmäkaaviota. Asiakas kysyi: "Mistä niitä kaavioita saa?" "Ikävä kyllä ei mistään", oli ja on vastaus. Jokaista produktiota varten on koko ajatustyö syytä tehdä uudestaan, jotta saataisiin juuri siihen sopiva systeemi aikaiseksi. Yleensä voidaan suunnitella ja hankkia jonkinlainen perusaudiojärjestelmä, mutta jokainen produktio vaatii jonkin verran poikkeavan audioteknisen toteutuksen ja sitä varten on tehtävä suunnittelutyötä.

Toteutusvaiheessa saadaan palkinto huolellisesti tehdystä suunnittelutyöstä. Järjestelmän palikat on huomattavasti nopeampaa, halvempaa ja helpompaa hankkia, sijoittaa, kytkeä ja tarkistaa, kun on selvä suunnitelma siitä, mitä ollaan tekemässä.

Suunnitelmien huolellisesta dokumentoinnista eli taltioinnista ja tietynlaisesta järjestelmäajattelusta on hyötyä etenkin vianhaussa. Kun on selkeä kuva siitä, miten signaali järjestelmässä kulkee, on helppompaa päätellä missä kohdin signaali ei enää kulje halutulla tavalla. Tällöin voidaan päättelemällä ja kokeilemalla rajoittaa vika-alue järjestelmässä askel askeleelta, kunnes viallinen laite, johto, liitin tai muu syyllinen löytyy. Umpimähkään vikaa ei pitäisi hakea.

Vanha sanonta "ketju on yhtä vahva kuin sen heikoin lenkki" pitää ikävän tarkkaan paikkansa myös audiojärjestelmien kohdalla. Jos ketjuun korkealuokkaisten ja kalliiden studiolaitteiden kanssa kytketään halpa ja huonolaatuinen puoliammattilaislaite, tulee järjestelmästä ulos heikkolaatuisimman laitteen tasoinen lopputulos.

Esimerkiksi laitteiston kohinan kannalta laatu määräytyy siirtoketjun alkupään mukaan. Koko ketjun kohina on vähintään ketjun kohisevimman laitteen tasoa. Jokainen laite ketjussa lisää signaaliin oman kohinansa. Kalleinkaan laite ketjun loppupäässä ei voi tilannetta enää parantaa, vaan korkeintaan estää enää huononemasta, jos ketjun alkupään laite toimii pääasiassa kohinageneraattorina.

Painotammekin tässä kohdassa sanaa äänensiirtoketju. On helppoa tajuta, ettei audiosignaali kulje, jos ketju on jostain kohdin poikki. Ennen hankintaa on syytä tarkistaa huolella järjestelmän eri laitteiden yhteensopivuus siirtotasojen, impedanssisovitusten ja kytkentöjen osalta ikävien yllätysten välttämiseksi.

## 8.2 Audiolaitteiden suoritusvaatimukset

### 8.2.1 Yleistä

Seuraavassa käsitellään audiotekniikalle asetettavia laatuvaatimuksia ja miten niiden toteutumista voidaan arvioida mittaamalla.

Asiaa vaikeuttaa se, että ääni-ilmiön kuvaaminen on vaikeaa. Ääntä voidaan kuvata fysikaalisesti ja matemaattisesti melkoisin rajoituksin, esimerkiksi esittämällä jaksollinen audiosignaali siniaaltokomponentteihinsa purettuna. Mutta mitä se kertoo äänen soinnista? Audiosignaalin ajallinen esitys (piirturin tai oskilloskoopin piirtämä käyrä, amplitudi ajan suhteen) näyttää piikkilangalta, jonka yhdistäminen musiikin toiston laatuun on kokemusta ja hahmotuskykyä vaativaa.

Soinnin kuvaaminen sanoin on lähes toivotonta, sillä samalle sanalle on eri vastaanottajilla eri sisältö. Todellisella hifi-kultakorvalla on parituhatta adjektiivia sanavarastossaan kuvaamaan sointia. Lopputulosta jokainen tulkitsee omalla tavallaan. "Alapää on ruvella" (säröinen bassotoisto). "Yläkerran akat on vihaisia" (säröinen diskantti-alue). "Kireä" - "metallinen" - "diskanttinen" (korostunut ylääänialue). "Tanakka botne" (kiinteä bassotoisto).

Audiotekniikan toimivuutta kuvaamaan on pyritty kehittämään erilaisia menetelmiä. Audiotekniikkaan liittyy useita parametreja, joiden vertailu on vaikeaa. Usein vertailu on suorastaan harhaanjohtavaa, elleivät mittaustavat ja tulosten esitysmuodot ole suoraan vertailukelpoisia.

Suomessa ei ole audiotekniikkaa koskevia yhtenäisiä standardeja, eikä sellaisia ole tiettävästi lähiaikoina tulossakaan, sillä eri laitevalmistajien näkemykset eroavat toisistaan ja koko tekniikan kentässä riittää muutakin standardoitavaa.

Kansainvälisiä toisistaan poikkeavia standardeja on käytössä lukuisia, kuten esimerkiksi DIN, EIA, IEC, NAB, RIIA. Viimeisimpiä yrityksiä on kansainvälisen audioinsinöörien järjestön AES:n (Audio Engineering Society) suositus kaiuttimien mittaustavoista. Nämä ovat eri yhteisöjen omia käyttötarkoituksiaan varten tekemiä vapaaehtoisia sopimuksia, joiden noudattamista ei vaadita laeissa. Standardien rikkomisesta ei seuraa taloudellista rangaistusta. Näin standardien noudattaminen jää yritysten omantunnon ja kaupallisten näkökohtien varaan. Toisaalta liian tiukkojen, esim. yleisradiokäyttöön sovitujen, normien noudattaminen nostaisi tuotteiden hinnan esimerkiksi harrastajamuusikoiden tavoittamattomiin.

Laite-esitteissä esitettyihin teknillisiin ominaisuuksiin ja laatuun kuvaaviin lukuarvoihin on syytä suhtautua varauksella. Suoria vertailuja eri valmistajien tuotteiden välillä tulee välttää, ellei mittaustapa ja esitystapa ole sama tai eri tapojen vastaavuus ole tiedossa. Esimerkiksi laitteen lähtötaso voidaan ilmoittaa yksiköissä dB, dBm, dBu, dBV, dBs, dBf ja dBW. Erot ovat ratkaisevia laitteiden yhteensopivuuden kannalta.

Mittaustapoja käsitellään perusteellisemmin luvussa 10, sähköakustisten muuntimien (mikrofonien ja kaiuttimien) ominaisuuksia taas edellä luvussa 4. Seuraavassa on kuitenkin perustietoutta eri laatukäsitteistä ja niiden merkityksistä audiojärjestelmäsuunnittelun kannalta.

## 8.2.2 Taajuustoisto

Laitteelle ilmoitetaan tavallisesti taajuusalue hertseinä (Hz, värähtelyjä sekunnissa), jolla taajuustoisto pysyy tasaisena tietyissä rajoissa ( $\pm$  dB, esim. 60 Hz ... 16 kHz  $\pm$  3 dB).

Vahvistinasteiden, tallentimien, muokkaimien ynnä muiden tulisi siirtää audiosignaali virheettä toistoketjussa (haluttuja säätöjä lukuun ottamatta). Taajuusvasteen tulee siis olla mahdollisimman laaja ja tasainen.

Mikrofonien ja kaiuttimien taajuustoistovaatimukset riippuvat käyttötarkoituksesta ja ovat usein makukysymyksiä: käytännössä haetaan "soundeja" eikä 1:1 luonnollista toistoa. Kiistanalaista on myös miten mitata kuulokuvaa vastaavalla tavalla kaiuttimien äänentoisto. Varmin mittari lienee oma kuulo, ja silloinhan mittaus on subjektiiv-

vista eli havainnoitsijasta riippuvaa. Kaiuttimien taajuustoistoa käsitellään lisää kohdassa 8.3.

### 8.2.3 Säröt

Audiotekniikassa esiintyviä säröjä ovat:

epälineaarisuussärö eli harmoninen eli amplitudisärö. Tavallisesti ilmoitetaan harmoninen kokonaissärö (Total Harmonic Distortion, THD)

- taajuussärö (frequency distortion)
- vaihesärö (phase shift distortion)
- keskeismodulaatiosärö (InterModulation Distortion, IMD)
- transienttisärö eli dynaaminen särö (tohtori Matti Ojalan esiin nostama Transient InterModulation distortion, TIM)

Säröt ovat vääristymiä eli siis epätoivottuja ääni-ilmiöitä. Laitteiden samalla tavoin mitattujen säröarvojen tulisi olla mahdollisimman pienet. Audiotekniikassa säröarvoista ilmoitetaan yleisemmin THD ja IMD. Poikkeuksen muodostavat tarkoitukselliset tehokeinoina käytetyt säröt, kuten kitaraputkivahvistimen "lämmin särö" ja särötämiseen yliohjauksella perustuvat efektit, kuten "overdrive" ja "fuzz".

Vahvistimissa säröarvot ovat yleensä pieniä, ellei vahvistinta yliohjataan. PA-kaiuttimissa sallitaan käytöstä riippuen melkoisiaakin, jopa korvin kuultavia säröjä Väitetään, ettei kaiuttimien alle kolmenprosentin harmonista kokonaissäröä edes kuule. Tärkeintä tällöin on saatava teho hintaan nähden, eikä luonnollinen äänentoisto.

Nauhurien kohdalla myös useat ääninauhalaadut kestävät melkoisiaakin yliohjauksia ilman korvin kuultavan haitallista säröytymistä. Magneettinauhassa yliohjautuminen (eli oikeammin tallennusmateriaalin magneettinen kyllästymisen) tapahtuu "pehmeästi". Useat äänittäjät tarkoituksella yliohjaavatkin äänittäessä. Tavoitteena on tällöin soinnin "rikastaminen" säröytymisessä syntyvillä ylä-äänillä. Digitaalitalentimilla tätä ei voi tehdä, sillä pienikin yliohjaaminen saa aikaan pahalta kuulostavan särön. Siksi useat äänittäjät kannattavat edelleen analogisia nauhureita.

### 8.2.4 Lähtöteho

Audiotekniikassa "teholla" tarkoitetaan useimmiten tehovahvistimen lähtötehoa, eli paljonko vahvistin pystyy syöttämään tehoa kaiuttimeen. Muita kiinnostavia tehoarvoja ovat mm. eri vahvistinasteiden lähtötehot, jolloin puhutaan lähtötasoista. Asia liittyy järjestelmän sähköiseen sovitukseen.

Tehovahvistimen eli pääteasteen tehonsyöttökyky ilmoitetaan ja sitä mitataan useilla tavoin. Puhutaan käsitteistä "nimellisteho" (rated power output), "jatkuva lähtöteho" (continuous power output), "te-



hollinen lähtöteho" (effective power output) ja "siniteho" (sine power output). Tehon yksikkönä on sentään useimmiten watti (W).

Hifi puolella yritetään yleistää lähtötehon kuvaamista kuulon logaritmisyyttä paremmin vastaavana lähtötasona, joka ilmoitetaan suhdelukuna eli desibeleinä (dB) verrattuna esimerkiksi wattiin, jolloin yksikkö on dBW.

Vahvistimen lähtöteho ilmoitetaan tyypillisesti esimerkiksi seuraavasti: 100 W/4 Ω. Tämä tarkoittaa, että vahvistin pystyy syöttämään 4 ohmin nimellisimpedanssin kaiuttimeen 100 watin sähkötehon. Tiedosta ei vielä ilmene esimerkiksi kauanko vahvistin pystyy täyttä tehoa syöttämään (ennen kuin sen päätetransistorit alkavat kuumeta liikaa ja tehon syöttö loppuu), miten säröytynyt signaali on mainitulla teholla, päteekö tehonsyöttökyky ainoastaan musiikilla (jossa on luonnostaan taukoja, hiljaisia kohtia ja voimakkaita huippuja) vai myös esimerkiksi jatkuvalla 1 kilohertsin sinisignaali. Usein vahvistimen teknillisissä tiedoissa kerrotaan myös miten tehonsyöttökyky riippuu kuormasta ja siitä, onko myös vahvistimen toinen kanava kuormitettu vai ei.

Ilmoitettu lähtöteho riippuu kuormasta, johon tehoa syötetään (kaiuttimen impedanssi?), kuormitusajasta (hetkellinen, jatkuva, kuinka kauan jatkuva?), sallitusta säröstä (THD 0%, 3%, 10 %?), mittaus-signaalista (sinimuotoinen, millä taajuudella, laajakaistaista kohinaa, musiikkia ?) jne. Siis ilmoitettaviin tehoarvoihin on syytä suhtautua varautuen, ellei mittaustapa yksikäsitteisesti käy ilmi.

### 8.2.5 Tehonkesto

Tehonkesto (power handling capacity) tarkoittaa audiotekniikassa yleensä kaiuttimen kykyä kestää jatkuvaa sähköistä syöttötehoa. Ilmoitetun arvon merkitys riippuu kuormitusajasta, sallitusta säröstä, mittaussignaalista jne. Tehonkeston yksikkönä käytetään wattia (W), mutta ilmoitetut watit eivät ole keskenään vertailukelpoisia, ellei mittaustapa ole täysin sama.

Jos kaiuttimelle ilmoitetaan 100 wattia jatkuvaa tehonkesto, sen pitäisi tarkoittaa sitä, että kaiutin kestää riittävän kauan jatkuvaa 100 watin syöttötehoa ilman että kaiuttimen puhekela lämpenee liikaa ja palaa poikki, syntyy kuultavaa säröä tai kaiuttimen kartio vahingoittuu.

Tunnolliset kaiutinvalmistajat ilmoittavat myös millä taajuusalueella kaiutin kuormituksen kestää. Jos siis "spekseissä" eli teknillisissä tiedoissa lukee selvästi, että kaiutin kestää esimerkiksi 100 wattia taajuusalueella 500 Hz ... 12 kHz ja kaiuttimeen ajetaan silti 100 wattia koko taajuusalueella, ja 50 hertsin bassoääni saa kartion "lentämään pihalle", niin vika on täysin käyttäjän itsensä.

## 8.2.6 Herkkyys

Audiotekniikassa herkkyys(sensitivity) tarkoittaa kaiuttimen hyötysuhdetta eli paljonko kaiuttimeen syötetyllä sähköisellä teholla saadaan aikaan akustista tehoa. Herkkyys ilmoitetaan tavallisesti äänenpaineentasona, joka on mitattu mainitulla etäisyydellä ja sijainnilla kaiuttimen akustiseen keskipisteeseen nähden ja ilmoitetulla sähköisellä syöttöteholla.

Tyypillisesti ilmoitetaan kaiuttimen teknillisissä tiedoissa esimerkiksi "96 dB/1 W/1 m (on-axis)". Silloin tarkoitetaan, että kaiuttimella saavutetaan 96 dB SPL:n äänenpainetaso mitattuna 1 metrin etäisyydellä kaiuttimen keskiakselilla 1 watin sähköisellä syöttöteholla.

## 8.2.7 Suuntaavuus

Mikrofonien suuntaavuus ilmaistaan karkeasti suuntakuviona, kuten esimerkiksi pallokuviainen eli suuntaamaton (omnidirectional), suuntaava (unidirectional), hertta eli kardioidi (cardioid), superkardioidi, hyperkardioidi tai kahdeksikko, tai tarkasti suuntaavuuskäyrästönä eri taajuuksilla mitaten. Mikrofonien suuntaavuuksista löytyy seikkaperäistä tietoa alan kirjallisuudessa sekä kappaleessa 4.

Kaiuttimien suuntaavuus (directivity, dispersion) tai kattavuus (coverage) ilmaisee mille alueelle ääni kaiuttimesta leviää ja on kaiuttimien sijoittelussa keskeinen tieto. Suuntaavuus voidaan ilmoittaa karkeasti kattavuuskulmina vaakaja pystytasossa esimerkiksi  $90^\circ \times 40^\circ$  H x V (Horizontal x Vertical eli vaakatasossa x pystytasossa). Koska kaiuttimet eivät ole mitään teoreettisia äänilähteitä, on luonnollista, että ääni leviää myös karkeasti ilmoitetun säteilykeilan ulkopuolelle. Siksi tulisi ilmoittaa myös missä rajoissa ( $\pm$  dB) ilmoitettu avaruuskuulma pitää paikkansa.

Sähköakustiikassa kaiuttimen suuntaavuus määritellään Q-arvona tai suuntaavuusindeksillä (Directivity Index, DI). Eräät kaiutinvalmistajat julkaisevat esitteissään kaiuttimen säteilykuvion mikrofonien suuntaavuuskäyrästöjen kaltaisena napakoordinaatistoesityksenä (polar pattern), joista selviää kaiuttimien kattavuus eri taajuuksilla mitattuna.

## 8.3 Toiston laatu

### 8.3.1 Yleistä

Edellä on käsitelty pelkästään tai myös yksittäisiä laitteita koskevia laatuvaatimuksia ja niiden ilmoitustapoja. Äänensiirtoketjun loppupäässä, jossa ääni toistetaan kaiuttimilla yleisölle, ollaan tarkastelupisteessä, jossa jokaisen kuulijan kuuloaisti toimii mittarina. Toiston

laatua on vaikeaa yksikäsitteisesti mitata tai kuvata teknisillä yksiköillä ihmisen kuulokokemusta.

Hyvää toistojärjestelmää on vaikeaa suunnitella ja teknillisesti toteuttaa pelkästään "korvakuulolla". Toistojärjestelmiä tutkii tieteenhaara nimeltään sähköakustiikka ja kuulemisilmiöitä taas psykoakustiikka. Näiden tulosten perusteella on kehitelty suunnittelussa ja toteuttamisessa käyttökelpoisia kuvaajia, jotka pitävät ainakin tilastollisesti paikkaansa. Tosin vaihtelu henkilökohtaisissa totumuksissa ja mieltymyksissä voi olla niin suuri, ettei ohjearvolla ole enää merkitystä.

Suunnittelussa on mukana useita matemaattisesti vaikeasti hallittavia toisistaan riippuvia tekijöitä, kuten akustinen tila (mittasuhteet, pintamateriaalit yms. tila-akustiikkaan liittyvää), yleisö (sen kuuntelutottumukset ja -mieltymykset, sijainti tilassa jne), ohjelmamateriaali (sen dynamiikka, taajuussisältö jne) ja sähköakustinen muunnin (kaiutin tai kuulokkeet) sitä syöttävine äänensiirtoketjuineen. Seuraavassa tarkastellaan eräitä käsitteitä, joilla toiston laatua voidaan kuvata.

Palatkaamme kuitenkin vielä hetkeksi aiemmin esitettyyn väitteeseen, että puhe ja musiikki käsitellään eri osassa aivoja ja siksi ne vaativat erilaisen toistojärjestelmänkin. Kautta linjan joudutaan seuraavassa nimittäin erikseen pohtimaan toiston laatua sen mukaan, onko toistettava ohjelma puhetta tai musiikkia. Tarkkaan ottaen on vielä tarkasteltava muunkinlaisten ääniohjelmien, kuten äänitehosteiden toistoa, ja eri musiikinlajitkin vaativat merkittävästi erilaista toistoa ja toistotilan akustiikkaa.

Usein kuulee väitettävän, että musiikin toistolle asetettavat laatuvaatimukset ovat paljon suuremmat kuin puheen toistolle asetettavat, ja siksi musiikin toistoon tarkoitettua järjestelmää voidaan aina käyttää myös puheen toistoon. Erillistä puheentoistojärjestelmää ei siis tarvita. Tämä ei kuitenkaan aina pidä paikkaansa.

Musiikin toisto edellyttää yleensä laajempaa taajuuskaistaa ja suurempia äänenpaineita. Tähän tarvitaan käytännössä useimmiten suurikokoisia kaiuttimia. Puheentoisto taas asettaa päähuomion toiston selvyyteen. Suurikokoisia musiikkikaiuttimia on usein vaikeaa sijoitella saliin niin, että myös puheentoiston selvyysvaatimukset täytetään.

Esimerkiksi erittäin kaiuntaisessa tilassa voidaan musiikintoiston selvyyden vaatimuksista selvittää vaikka parilla kaiutinpilarilla tai suuntaavista torvikaiuttimista muodostuvalla keskitetyllä kaiutinsijoittelulla eli kaiutinklusterilla. Puheentoistoon ei saada aina näinkään suuntaavilla kaiuttimilla tarpeeksi selvyttä. Niinpä esimerkiksi eräässä helsinkiläiskirkossa oli upotettava pelkästään puheentoistoa palvelevat pikkukaiuttimet jokaisen penkkirivin selkämykseen, jolloin saatiin kaiuttimet tarpeeksi lähelle kuulijoita ja siten tarpeeksi suoraa ääntä suhteessa kaiuntaiseen ääneen.

Toisaalta puhe- ja musiikkisignaalien tasoero on käytännössä suuri, usein jopa 30 desibeliä. Näin suuret tasoerot asettavat suuria vaatimuksia järjestelmän dynamiikalle: kovaäänisellä musiikillakaan tois-

to ei saisi säröytyä eli pelivaraa pitää löytyä, toisaalta hiljaisella puheella ei saisi järjestelmän häiriötaso (kohina yms. häiriöt) peittää puhetta. Tämän vuoksi saattaa olla kokonaistaloudellista ja käytön kannalta kätevää hankkia erikseen pienempitehoinen puheentoistojärjestelmä ja suurempitehoinen musiikintoistojärjestelmä. Järjestelmien yhdistämisellä ei aina voiteta mitään, vaan tuloksena saattaa olla kallis ja monimutkainen järjestelmä, mikä on huono kompromissi kumpaankin käyttöön.

### 8.3.2 Toistotarkkuus

Perinteinen tavoite audiojärjestelmille on ollut mahdollisimman hyvän toistotarkkuuden saavuttaminen, jolloin kuulijalle tulisi toistaa mahdollisimman tarkkaan alkuperäisen kaltainen signaali. Tästä johdettu käsite "hifi", joka tulee englanninkielisestä termistä "high fidelity" eli "korkea luotettavuus" tai "suuri toistotarkkuus". Hifistin tavoite on, että orkesteri kuulostaa juuri samalta kotona hifilaitteiston välityksellä kuin alunperin konsertissa, soittovirheineen ja soittotilan akustiikan vajaavaisuuksineen ja yleisön häiriöäänineen päivineen. Tärkeintä on toistotarkkuus.

Audiotekniikan kehityksen myötä ovat mahdollisuudet käsitellä ääntä laajentuneet. Mahdollisuuksia myös käytetään sekä soiton, soittimien, akustisen ympäristön ja muiden virheiden korjaamiseen että uusien, "luonnottomien" sointien tuottamiseen. Toistotarkkuuden arvioimisella ei ole tällöin enää vastaavaa merkitystä. On miksaajan ja esiintyjien välinen salaisuus kuulostiko soitto halutulta. Sitä ei yleisö voi tietää sähköisesti muokatun musiikin osalta samoin kuin akustisin soittimin soitetun osalta.

Yleensä äänen muokkaaja haluaa kuitenkin mahdollisimman puhtaan, tarkkaan toistavan audiojärjestelmän, jotta ääntä pelkäästään siirrettäessä se myös siirtyy sellaisenaan vääristymättä. Erityisesti äänentarkkailun tulee olla toistotarkkaa, jotta pystytään erottelemaan äänestä sen eri osatekijät ja havaitsemaan syntyneet virheet.

Audiojärjestelmän toistotarkkuutta on helpointa arvioida tarkastelemalla systeemiä mustana laatikkona, johon syötetään tunnettu signaali (vaikka tuttua musiikkia) sisään ja vertaillaan ulostulevaa signaalia alkuperäiseen. Tällöin puhutaan usein kaiutinten arvioimisesta, vaikka itse asiassa kuunnellaan koko audiojärjestelmää mukaan lukien kuuntelutilan vaikutus äänentoistoon. Toiston tarkkailusta ja korjaamisesta eli tasoittamisesta eli ekvalisoinnista puhutaan myöhemmin lisää.

Tärkeää on tietää mitä on mittaamassa ja minkälaisin rajoituksin, muuten voi päätyä harhaanjohtaviin tuloksiin, kuten edempänä käy ilmi. Mittaamisessa pitää muistaa, että viimeisin mittari on kuulija. Jos kuulijan mielestä systeemi kuulostaa pahalta, niin hän on oikeassa, vaikka mittarit näyttäisivät mitä tahansa. Sitäpaitsi kuulija on audiotekniikan hoitajalle "asiakas, joka on aina oikeassa", vaikka olisi väärässäkin.

Kannattaa luottaa kuuloonsa, jonka suorituskyvyn voi senkin melko helposti todeta. Jos korvat kertovat toista kuin mittarit, ovat korvat useimmiten oikeassa. Asiaa tarkasteltaessa paljastuu, että on mitattu väärin tai väärää asiaa tai mittarit on väärin kalibroitu.

Audiojärjestelmän toistotarkkuuden arvoimiseksi täytyy mittausten avulla selvittää taajuusvaste, vaihevaste ja mittausten koherenssi. Jos jokin näistä tiedoista ei ole käytettävissä kun yhteenvedo mittaauksista tehdään, täytyy puute ottaa tarkkaan huomioon mittauksen luotavuutta rajoittavana tekijänä.

### 8.3.2.1 Taajuusvaste

Usein joudutaan varsinkin "PA- puolella" tinkimään taajuustoiston laatuvaatimuksista taloudellisista ja käyttöteknillisistä syistä. Kierron rajoittamiseksi joudutaan joskus leikkaamaan alimmat bassot pois. Kohinan rajoittamiseksi leikataan ylimpiä ääniä. Riittävän voimakkaan ja tasaisesti koko yleisön kattavan toistoon ei yksinkertaisesti ole varaa.

Vertailukohtana toistettavalle taajuusalueelle on luonnollista pitää ihmisen kuulokykyä. Kuultava äänialue on kuulijan iästä ja kuulon kunnosta riippuen noin 16 Hz ... 20 kHz. Eräiden tutkimusten mukaan jopa 27 kilohertsiin asti äänet aistitaan, vaikkei niiden sävelkorkeutta hahmotetakaan.

Tarvittavan mittauskaistan kapeudesta kiistellään audiopiireissä. Joidenkin mielestä kolmasosaoktaavin kaista (joka ei vastaa musikaalista terssiä, vaikka usein terssistä puhutaankin) riittää vallan mainiosti. Tätä perustellaan sillä, etteivät kaiuttimien kapeakaistaiset taajuuskorostumat tai -vaimentumat kuulu, ja siksi niiden korjaamisella ei saada korvin kuultavaa parannusta. Ehkä tämä päteeikin puheentoiston suhteen.

Musiikintoistossa asia lienee kuitenkin toinen, perustuuhan länsimainen sävelasteikkokin 12 osaan jaettuun oktaaviin, eräiden kulttuurien sävelasteikoiden ollessa jaettu pienempiinkin osiin. Tämän perusteella voidaan päätellä, että audiojärjestelmän toiston korostukset tai vaimenemat, jotka ovat taajuuskaistaltaan vain 12- osaoktaavia tai jopa kapeampia, vaikuttavat sekä musiikin sointiin että äänenkorkeuksien tasapainoon.

Toinen todiste kapeakaistaisten taajuustoiston virheiden kuultavuudesta on R-DAT-nauhurijärjestelmään suunnitellun kopiaimisen es-tojärjestelmän hylkääminen. USA:n National Bureau of Standards (NBS) eli kansallinen standardisoimistoimisto hylkäsi CBS:n kehitetyn systeemin, joka perustui erittäin kapeakaistaisen kuopan leikkaamiseen myytävien valmiiden äänitteiden taajuusvasteeseen. R-DAT- nauhuri tunnistaisi tämän kuopan, eikä suostuisi äänittämään, jolloin äänitteitä ei voisi kopioida edes omaan käyttöön. Taajuusvasteen kuopan todettiin tutkimuksissa (joissa oli tilastollisesti riittävä määrä kuulijoita) kuuluvan musiikissa häiritsevästi.

Useiden audiotekniikan ammattilaisten pitkäaikaisen kokemuksen perusteella on nyrkkisäännöksi alalla muodostunut, että tarkan kuvan saamiseksi järjestelmän toistotarkkuudesta taajuuden suhteen tarvitaan matalien taajuuksien osalla vähintään 1 hertsin ja korkeiden taajuuksien (10 kHz:istä ylöspäin) osalla 50 hertsin erottelukyky.

Toinen ja ratkaisevampi lähtökohta taajuustoistovaatimukselle on toistettavan materiaalin taajuuskoostumus eli millä taajuuksilla on mitenkään tärkeää toistettavaa ja miten äänienergia on jakaantunut eri taajuusalueille. Energiajakautumisen tunteminen on tärkeää myös vahvistin- kaiutin- järjestelmän tehovaatimuksia mitoitettaessa, joista myöhemmin lisää.

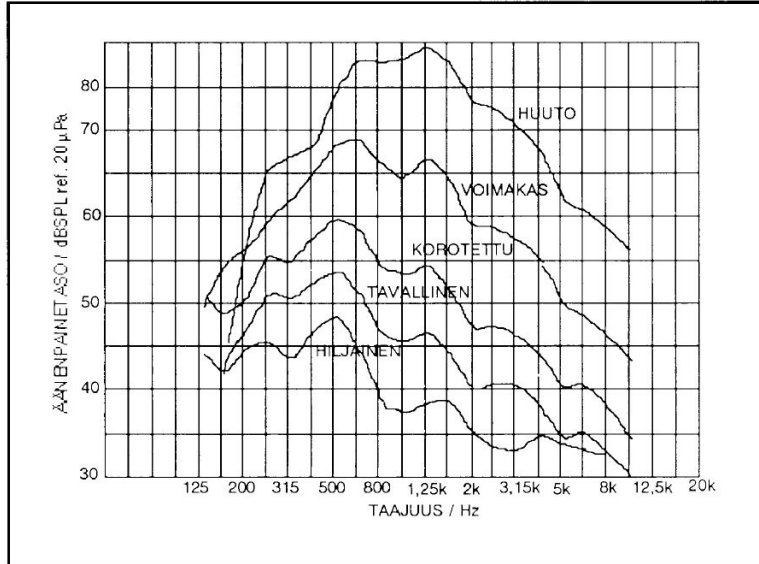
Esimerkiksi puheentoistossa ollaan kiinnostuneita puheen ymmärrettävyydestä eli viestin perillemenosta. Puheessa äänihuulten tuottaman perusäänen taajuus on miehillä noin 125 hertsiä ja naisilla noin 210 hertsiä. Koulutetuilla puhujilla, kuten näyttelijöillä (ja tunnekuohujen vallassa kouluttamattomillakin) tämä alue laajenee välille 125 Hz ... 250 Hz. Puheessa vokaalit sijaitsevat taajuusalueella 350 Hz ... 2 kHz ja konsonantit kaistalla 1,5 kHz ... 4 kHz. Eräät konsonantit, kuten s, sisältävät 7 kHz ... 8 kHz välille sijoituvia taajuuksia.

Tämän tarkastelun perusteella jopa kaista 350 Hz ... 4 kHz on riittävä ymmärrettävän puheen toistoon, jos tyydytään "puhelinsaundiin" (puhelinverkostossa vaadittava kaista on ainoastaan 350 Hz ... 3,5 kHz). Luonnollisemmalta kuulostavaan puheentoistoon riittää taajuusalue 60 Hz ... 10 kHz, jolloin pystytään toistamaan myös soinnin ja ymmärrettävyyden kannalta tärkeät kerrannaistaajuudet eli ala- ja ylä-äänisarjat, jotka puheen osalla sijaitsevat taajuuskaistalla 1 kHz ... 4 kHz.

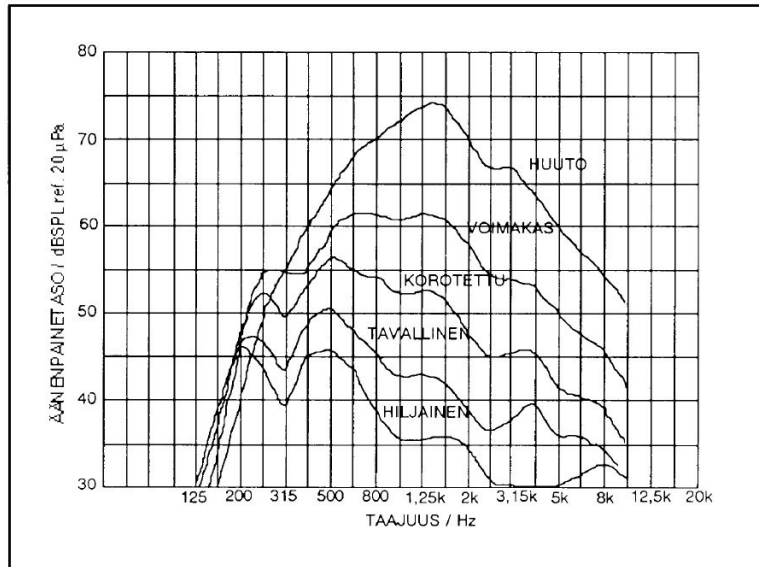
Erään tutkimuksen mukaan keskimäärin taajuusalueella 60 Hz ... 500 Hz on ihmisäänen energiasta 60 prosenttia, mutta vain 5 prosenttia informaatiosta. Kaistalla 500 Hz ... 1 kHz vastaavasti on 35 prosenttia energiasta ja 35 prosenttia tiedosta, ja alueella 1 kHz ... 8 kHz vain 5 prosenttia energiasta ja peräti 60 prosenttia tiedosta. Yksinkertaistaen siis "alapäässä" on energiaa ja "yläpäässä" tietoa. Rockmusiikissa on eräiden tietojen mukaan jopa 50 prosenttia energiasta alle 200 hertsin taajuuksilla, mutta onko "bassopotku" informaatiota on jo makukysymys.

Kun tutkitaan ulkoilmatilaisuuksien puheentoistoon suunniteltuja torvikaiuttimia, havaitaan, että hifistin kriteerein näiden "peltitorvien" taajuustoisto on aivan hirveä: kapea kaista (esim. 300 Hz ... 8 kHz), lisäksi paha kuoppa keskialueella ja voimakas korostuma yläpäässä. Nämä puhutorvikaiuttimet ovatkin suunniteltuja toistamaan tehokkaasti vain tiedon perille menon kannalta välttämättömät taajuudet. Miksi pitäisikään toistaa matalia ääniä, jotka ovat pelkkää jyrinää ja kuminaa ja muuta häiriötä, ja korkeita ääniä, jotka ovat pelkkää kohinaa? Järkevämpää on leikata jyrkästi pois kaistat, joilla ei ole tarpeellista tietoa ja keskittyä toistamaan tiedon välittymisen kannalta tärkeät taajuusalueet.

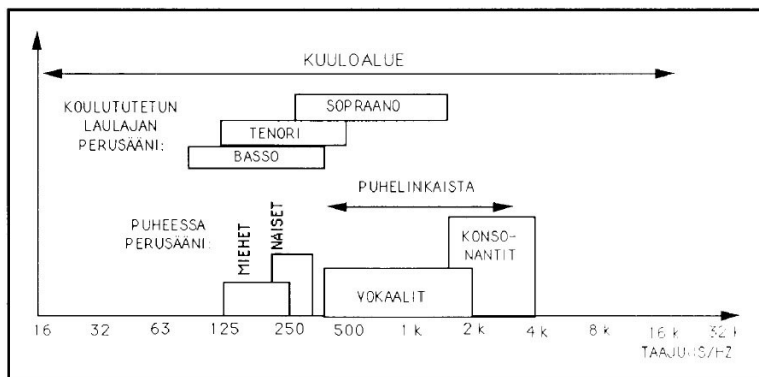
**Kuva 8.1** Miehen puheäänien spektri



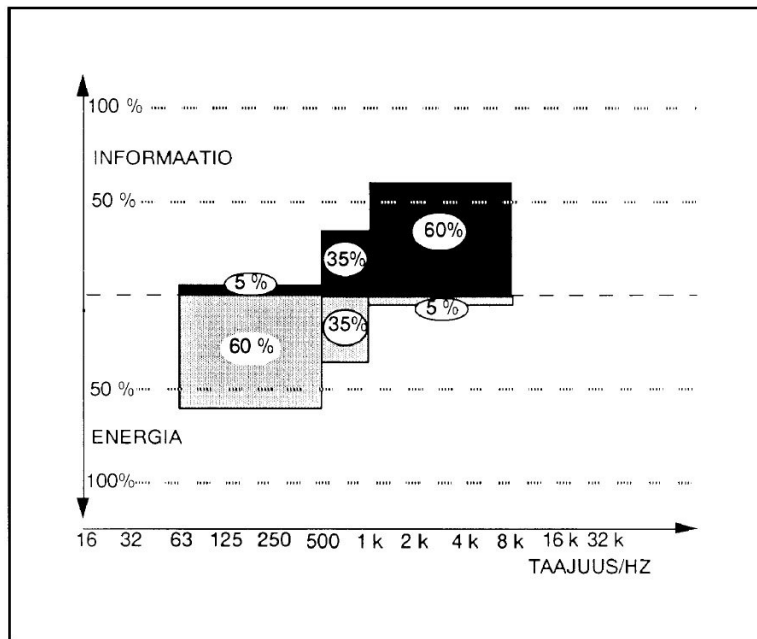
**Kuva 8.2** Naisen puheäänien spektri



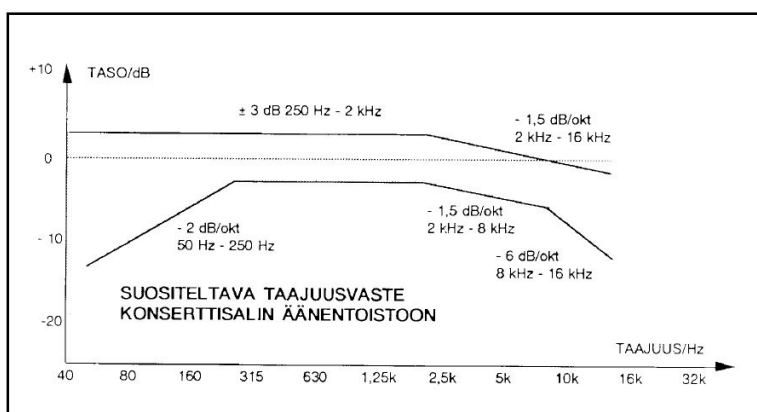
**Kuva 8.3** Ihmisäänen taajuusalueet



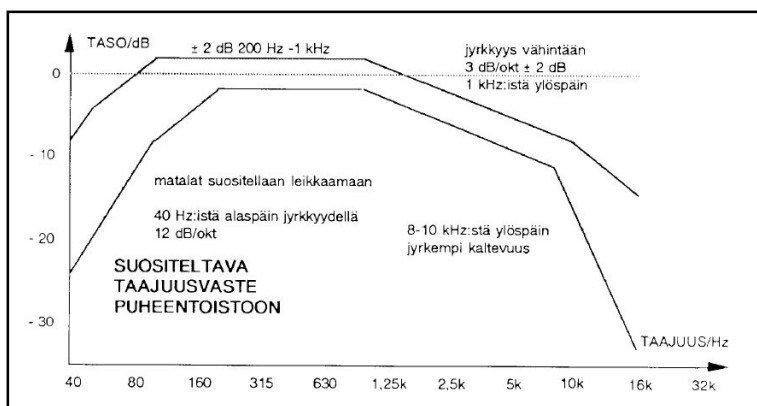
**Kuva 8.4** Energian ja informaation jakautuminen puheessa



**Kuva 8.5a** Suositeltava taajuusvaste konserttisalin äänentoistoon erään amerikkalaisen lähteen mukaan

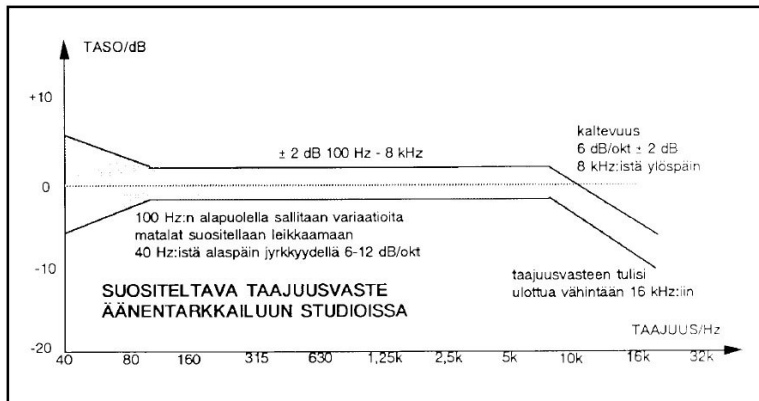


**Kuva 8.5b** Suositeltava taajuusvaste puheentoistoon erään amerikkalaisen lähteen mukaan

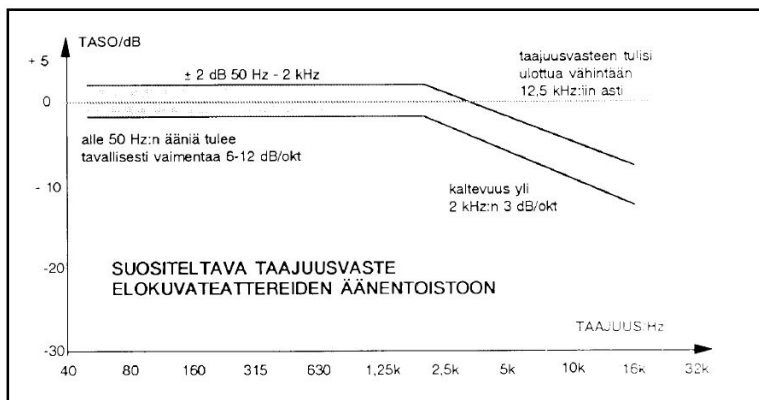




**Kuva 8.5c Suositeltava taajuusvaste äänitarkkailuun studiossa erään amerikkalaisen lähteen mukaan. Pohjoismainen yleisradiotekninen suositus (N 12) on esitetty kuvassa 9.11**



**Kuva 8.5d Suositeltava taajuusvaste elokuvateattereiden äänentoistoon erään amerikkalaisen lähteen mukaan**



Laulun ja muun musiikin toistossa alkavat päteä jälleen normaalit hi-fi-vaatimukset: koko kuultava äänialue halutaan toistaa virheettömästi. Kannattaa kuitenkin punnita hifistisiä vaatimuksia ja taloudellisia mahdollisuuksia ja panostaa tärkeimpään taajuusalueeseen. On esimerkiksi järjetöntä asettaa kaiuttimille hifitoistovaatimus 20 Hz ... 20 kHz  $\pm$  3 dB, jos sen toteuttaminen maksaa enemmän kuin muu audiojärjestelmä yhteensä, ja hyödyllinen toistettava äänimateriaali on pääasiassa alueella 60 Hz ... 12 kHz ja valtaosa muusta äänimateriaalista on hurinaa, kuminaa, kohinaa ynnä muuta häiriötä.

### 8.3.2.2 Vaihevaste

Edellä esitetty taajuusvasteen tarkastelu on tuttua useimmille audio-tekniikan ammattilaisille ja sen merkitystä ei juuri vähätellä. Audiojärjestelmän vaihevasteominaisuuksia taas pidetään taajuusvasteesta erillisenä ja vähemmän tärkeänä asiana. Usein keskustellaan siitä, onko vaiheen epälinearisuus eli vääristyminen edes kuultavissa. Kuitenkin, kun puhutaan taajuudesta ja vaiheesta, puhutaan itse asiassa saman asian kahdesta eri esitystavasta. Molempia tarvitaan, jotta asiasta saisi kokonaiskuvan.

Selventäköön seuraava esimerkki asiaa: Oletetaan, että on audiojärjestelmä, joka toistaa äärimmäisen tarkkaan sisään syötetyn signaalin, mutta kääntää esityksen ajallisesti nurinpäin (ajetaan esimerkiksi ääninauha takaperin). Tarkasteltaessa järjestelmän taajuusvastetta vaikka spektrianalysointilla, näyttää taajuusvaste virheettömän ta-

saiselta, sillä analysaattori kertoo ainoastaan äänenpainetason taajuusalueittain mittaushetkellä.

Tai kuvitellaan 2-tiekaiutin, jonka bassoyksikkö on metrin päässä mittausmikrofonista ja diskanttiyksikkö kilometrin päässä. Mikäli diskanttiyksiköstä riittää tehoa, voidaan kaiutinsysteemi ekvalisoida analysaattorin näyttämän mukaan tasaiseksi. Systeemistä toistettava musiikki vain kuulostaisi kummalliselta, sillä tulisivathan ylä-äännet kuulijalle noin kolme sekuntia bassoja myöhemmin.

Tieto systeemin vaihevasteesta on tärkeä. Usein toiston taajuusvasteessa näkyvä vääristymä johtuu kaiuttimien epäsynkronista eli siitä, ettei ääni lähde kaiuttimista samanaikaisesti. Asia on mahdollista useimmiten korjata kaiutinten keskinäistä sijoittelua tai jakosuodinta muuttamalla, mutta mahdotonta ekvalisoimalla, josta lisää kohdassa 8.3.3.

### 8.3.2.3 Mittausten koherenssi

Koherenssitekijä (coherence factor) lienee outo audiojärjestelmän toistotarkkuuden tarkastelussa, vaikka se on yhtä tärkeä kuin taajuusvaste tai vaihevastekin. Koherenssitekijä ilmaisee miten tarkkaan järjestelmän lähtösignaali vastaa testisignaalia. Tätä yhteensopivuutta vähentää kaikenlainen testisignaalin muuttuminen mittauksen aikana.

Mitattavaan signaaliin voi summautua häiriöitä (kohinaa, taustamelua, kytkentä-ääniä tms.) sekä taajuussärön tai vaihesärön tuloksena järjestelmässä syntyneitä uusia taajuuskomponentteja. Nämä vaikuttavat suoraan mittausten luotettavuuteen. Harmonisen särön tuloksena syntyneet korkeataajuiset taajuuskomponentit saavat joissakin tapauksissa järjestelmän taajuusvasteen näyttämään korkeiden taajuuksien toiston todellista parempana. Koska tätä äänienergiaa ei ole testisignaalissa, vaan sen on aiheuttanut itse järjestelmä, ei ekvalisointi vaikuta siihen. Ellei mittaussysteemi poista jollakin tavoin tällaisia vaikutuksia, ei mittaustuloksiin voi luottaa.

### 8.3.3 Äänenvoimakkuus

Äänenvoimakkuus voidaan mitata äänenpainetasona (Sound Pressure Level, SPL, yksikkönä desibeli, dB) tilan eri pisteissä. Tämä on absoluuttinen suhteellisen helposti mitattava arvo, joten sitä voidaan käyttää laatuvaatimuksena audiojärjestelmän voimakkuudelle. Vaadittavaa äänenpainetasoa mitoitettaessa täytyy ottaa huomioon taustamelutaso, toistettava ohjelmamateriaali ja sen dynamiikka.

Voimakkuusvaatimusten mitoituksessa on lähdettävä liikkeelle taustamelun tasosta, josta löytyy tilastollista tietoa kirjallisuudesta tai se voidaan arvioida mittaamalla tilassa. Toisaalta melun häiritsevyyden luokittelukriteerioina käytetään rakennusakustiikassa meluarvo- eli NC-käyriä (Noise Criteria, NC).

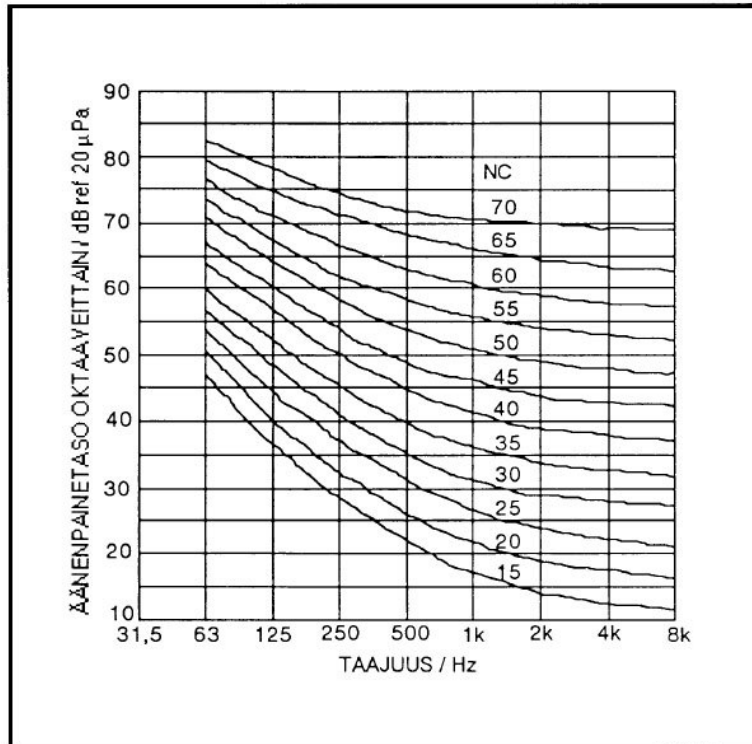
Suosittelvat käyrät ovat tilatyypeittäin seuraavat:

<i>Tilan tyyppi</i>	<i>Suosittelava käyrä</i>
Äänitysstudiot	NC 15...20
Teatteri- ja konserttisalit	NC 20...25
Musiikki- ja luokkahuone	NC 25...35
Televisiostudio	NC 20...25
Kirkot ja oikeussalit (ei äänenvahvistusta)	NC 25...30
Asunnot (makuu- ja olohuoneet) ja hotellihuoneet	NC 20...30
Kokoustilat (joissa äänenvahvistuslaitteisto)	NC 25...35
Elokuvateatterit ja luentosalit	NC 25...30
Sairaalat ja kirjastot	NC 20...45
Toimistot	NC 25...45
Ravintolat, yökerhot, tavaratalot, kahvilat yms.	NC 35...45
Urheilu- ja uimahallit	NC 40...50
Varastot, autotallit ja työpajat	NC 46...65

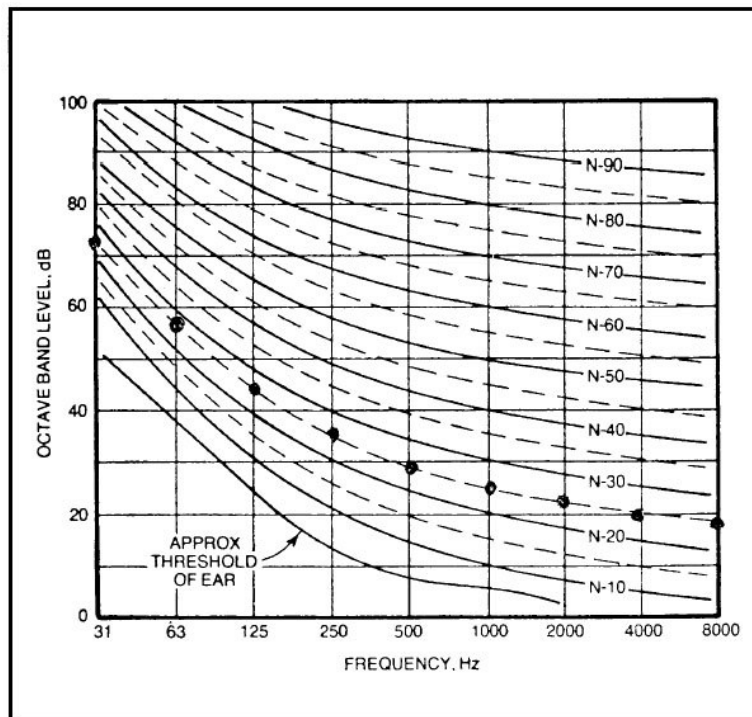
Rakennusakustiikassa pyritään alittamaan tilojen käyttötarkoitukselta riippuvat NC-käyrinä esitetyt häiriöäänentasot eli meluarvot, joten näitä voidaan pitää lähtökohtina taustamelua selvittäessä.

Toinen tapa määrittää sallitut rajat taustamelulle on ilmoittaa meluluku N. Tällöin arvot voidaan lukea vastaavista melulukukäyristä eli N-käyristä. Kansainvälisesti tätä ISO-normin mukaista käyrästä kutsutaan myös NR-käyrästä (Noise Rating Numbers). Esimerkiksi teattereita varten tämä määrittäminen on N-25. Käyrässä on huomioitu melun erilainen häiritsevyys ja kuuloaistimuksen erilaisuus eri taajuuksilla. N-25 käyrästä voidaan lukea oktaaveittain seuraavat melun sallitut enimmäistasot teatteritiloissa (yksikköinä on dB SPL): 72 dB/31 Hz, 57 dB/ 63 Hz, 45 dB/125 Hz, 35 dB/250 Hz, 29 dB/500 Hz, 24 dB/1 kHz, 22 dB/2 kHz, 20 dB/4 kHz ja 18 dB/8 kHz.

Kuva 8.6a NC- eli meluarvo-  
käyriä

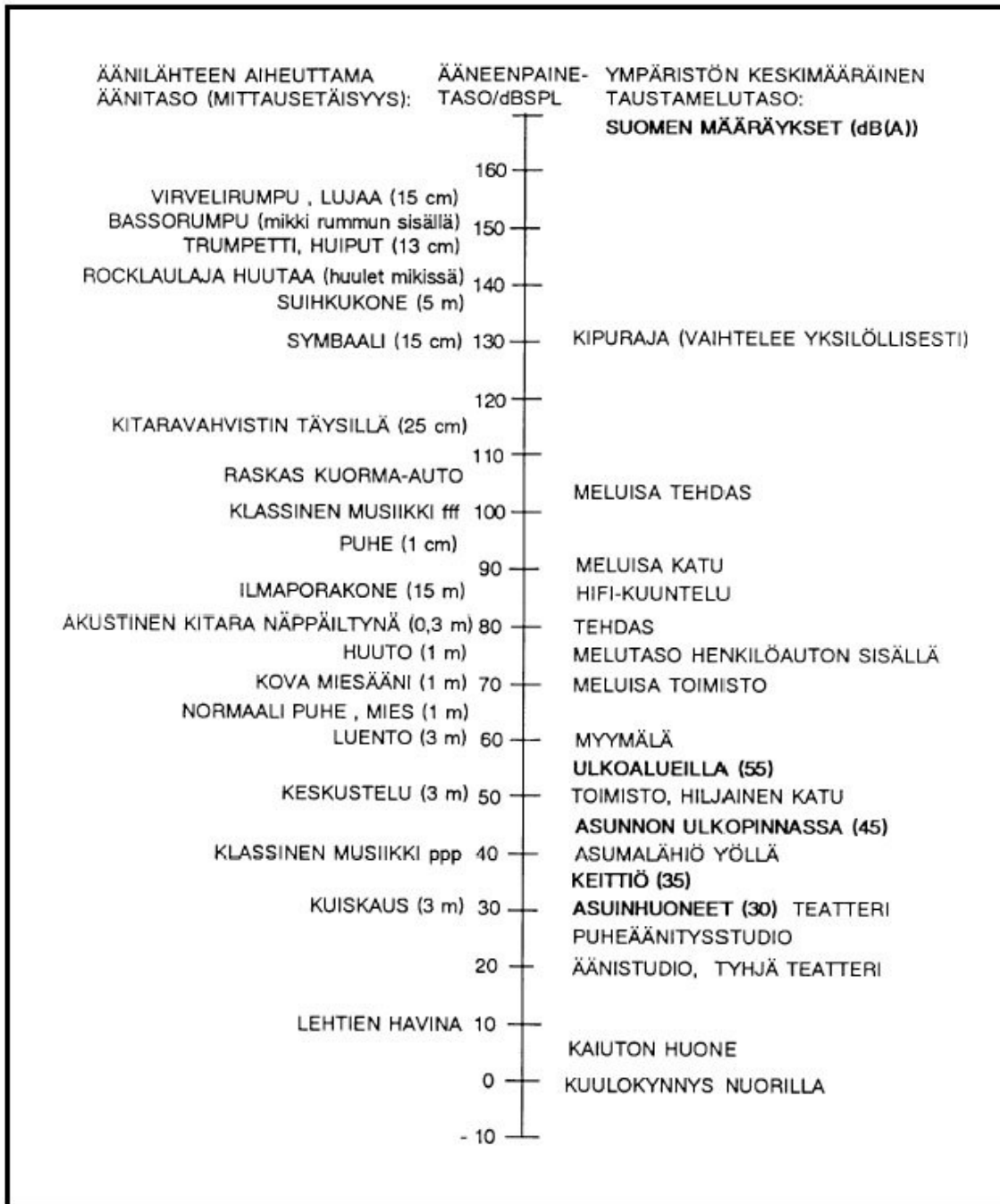


Kuva 8.6b ISO-standardin  
mukainen N- eli NR-käyrästä



Äänitystudioissa pyritään nykyisin alentamaan taustamelutasoa jopa arvoon 10 dBSPL. Ennen vähäteltiin ilmastoinnin ja studioon ulkoa tulevan melun merkitystä, sillä peittyihän se (kohtuullisena) analogianauhan nauhakohinan alle. Nyt ovat kehittyneet kohinanvaimennusmenetelmät (kuten Dolby SR) ja digitaalitalennus pudottanut talenteen pohjakohinatasoa. Vastaavasti halutaan laskea taustamelutasoa studiossa ja tarkkaamossa, jopa nauhurit yms. meluisat laitteet sijoitetaan omaan äänieristettyyn tilaansa.

Kuva 8.7 Äänenpainetasoja. Yksikkönä dBSPL (ref. 20N/m<sup>2</sup>)



Melun rajoittamisesta säädetään ääneneristysmääräysten avulla, joita ovat lääkintähallituksen yleiskirje N:o 1676 (melun terveydelliset ohjeet, mittaamisohjeet ja asioiden käsittely), sisäasiainministeriön päätös 867/75 (rakennusten ääneneristys) ja Rakentamismääräyskoelma osa C1 (rakennusten sisäinen ääneneristys ja rakennuksen omista teknisistä laitteista aiheutuva melu).

Suurin sallittu melutaso Suomessa saa määräysten mukaan olla:

- ulkoalueilla 40 dB(A) ... 55 dB(A) riipuen alueen käyttötarkoituksesta
- asuntoalueille 45 dB(A)
- asunnon ulkopinnassa 45 dB(A)
- asuinhuoneissa 30 dB(A)
- keittiössä 35 dB(A)

Jos melu sisältää impulssiääniä tai selvästi erottuvia ääneksiä, on mittaustulokseen lisättävä 5 dB.

Toistovoimakkuuden tulee keskitaajuuksilla olla puheentoistossa vähintään 25 desibeliä voimakkaampi kuin taustamelu, jotta hyötysignaali erottuisi melusta. Tätä on vaikeaa saavuttaa esim. rockmusiikissa, jossa musiikin voimakkuudeksi on konserteissa mitattu lähellä kipurajaa (noin 130 dB SPL) olevia arvoja. Laulua on vaikeaa nostaa esiin, niin että laulun sanoista saisi selvää, jos soitinten vahvistettu ääni pauhaa sietokyvyn rajoilla.

Näin esimerkiksi taajuudella 1 kHz, jolloin taustamelutaso saa teatterissa olla enintään noin 24 dB, pitää puheen toistossa voimakkuuden olla heikoimmillaankin 49 dB, jotta puheesta saa sen voimakkuuden puolesta selvää. Matalimmilla puhetaajuuksilla, esimerkiksi 125 Hz:llä, melurajoitus on 48 dB ja vastaavasti puheen toistovoimakkuuden tulisi olla tällä taajuudella vähintään 73 dB.

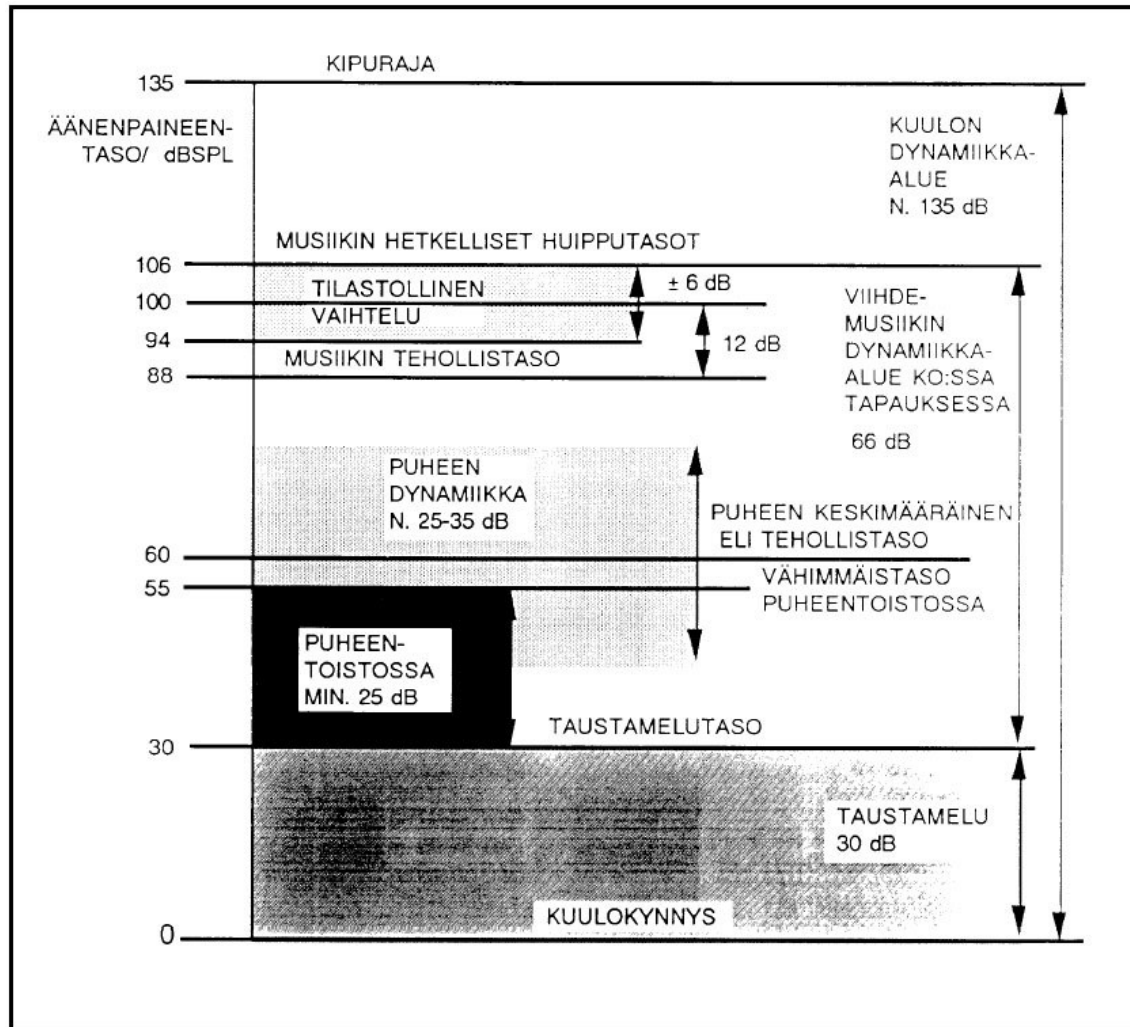
Seuraavaksi täytyy huomioida ohjelmamateriaalin haluttu voimakkuustaso (jolla sen halutaan kuuluvan) ja sen vaihtelu eli dynamiikka. Sinfoniakonsertissa esimerkiksi äänenpainetaso vaihtelee tyypillisesti piano pianissimon (ppp) 40 dB:stä forte fortissimon (fff) 100 dB:n äänenpainetasoon. Metrin etäisyydeltä miespuhujasta saadaan mitattua erään tutkimuksen mukaan normaaliäänellä noin 63 dB:n, kovalla äänellä 70 dB:n ja huudolla 76 dB:n äänenpainetaso. Yleisesti puheen dynamiikka-alueeksi varataan 25 dB ... 35 dB.

Halutun keskimääräisen kuunteluvoimakkuuden lisäksi kannattaa varata vielä riittävästi pelivaraa (headroom), jotta saataisiin dynamiikan huippukohdissakin särötön toisto. Tällainen keskimääräistä tasoa kuvaavan tehollistason ja hetkellisen huipputaso välillä on huomattava: sinfoniamusiikissa  $14 \pm 6$  dB, viihdemusiikissa ja puheessa  $12 \pm 6$  dB, monimikrofoniteknikalla äänitetyssä musiikissa  $9 \pm 6$  dB ja kompressoitussa taustamusiikissa ja puheessa  $6 \pm 3$  dB.

Tyypillinen äänitaso ja dynamiikka vaihtelevat ääniohjelman laadusta riippuen seuraavaan tapaan:

Ääniohjelman laatu	Äänitaso, dB SPL	Huiput	Dynam.alue/Dynamiikka
Vahvistettu puhe	55 ... 70	12 ± 6	... 88/ 30
Puhe	45 ... 70	12 ± 6	... 88/ 25...35
Kompressoitu puhe	55 ... 70	6 ± 3	... 89
<b>Kuulutus ja komento</b>	<b>... 95</b>	<b>9 ± 6</b>	<b>... 110</b>
<b>Kompressoitu taustamus.</b>	<b>50 ... 75</b>	<b>6 ± 3</b>	<b>... 84</b>
<b>Äänitetty rockmusiikki</b>	<b>80 ... 85</b>	<b>9 ± 6</b>	<b>... 100</b>
<b>Tanssimusiikki</b>	<b>85 ... 95</b>	<b>12 ± 6</b>	<b>... 110</b>
<b>Diskomusiikki</b>	<b>85 ... 105</b>	<b>9 ± 6</b>	<b>... 120</b>
<b>Teatteritehosteet</b>			<b>... 120</b>
<b>Sinfoniamusiikki</b>	<b>40 ... 100</b>	<b>14 ± 6</b>	<b>20 ... 120/ 100</b>
<b>Viihdeorkesteri</b>	<b>80 ... 85</b>	<b>12 ± 6</b>	<b>... 103</b>

Kuva 8.8 Äänentoistojärjestelmän dynamiikka



Dynamiikka eri tallentimissa on puolestaan seuraava (dB):

Elokuvat, optinen ääni	n. 45
Äänilevy	45 ... 50
C-kasetti	50 ... 60
Elokuvat, magneettinen ääni	n. 55

Elokuvat, Dolby-ääni	n. 60
2-raitanauhuri, 38 cm/s	65 ... 70
2-raitanauhuri,	
Dolby SR - kohinanvaimennus	90 ... 95
C-levy (CD, laserlevy)	90 ... 100
16-bittinen muunnos (teoriassa)	96
24-bittinen muunnos (teoriassa)	144
Ihmisen kuulo (vertailun vuoksi)	n. 120

Edellisen esimerkin mukaisesti pitää puheentoistoon varata halutun voimakkuustason (joka on vähintään 10 dB taustamelutasoa voimakkaampi) eli esimerkiksi 80 dB:n, päälle vielä 3 dB ... 9 dB keskimääräisen tason ja huippujen vaihtelua varten eli yhteensä 13 ... 19 dB. Siksi kehoitetaan yleensä puheentoistossa varamaan taustamelutason päälle vähintään 25 dB, jos mahdollista. Säröytymättömän toistovoimakkuuden tulisi esimerkissämme olla siis vähintään 105 dB.

### 8.3.4 Peitto

Peitto tai kattavuus ilmoittaa missä rajoissa tilassa edellä käsitelty äänenpaineentaso SPL vaihtelee. Kattavuutta voidaan siis tutkia mitaamalla SPL tilan eri pisteissä, esimerkiksi katsomossa. Näin sitä voidaan käyttää laatuvaatimuksena. Vaaditaan esimerkiksi, että teatterin koko katsomossa SPL tulee olla vähintään  $90 \text{ dB SPL} \pm 3 \text{ dB}$  eli äänenpainetaso ei saa vaihdella yli 3 desibeliä kuuntelualueella.

### 8.3.5 Selvyys

Selvyys on olennainen laatutekijä etenkin puheentoistossa, jossa päätaivoitteena on sanoman perillemeno, mutta myös musiikissa sen sointiin liittyvänä laatutekijänä. Puheen kohdalla selvydestä käytetään usein termiä ymmärrettävyys, jolla painotetaan informaation perille menoa. Musiikin kohdalla käytetään soinnin laatuun paremmin sopivaa termiä selkeys.

Ymmärrettävyys ilmoittaa miten hyvin tieto välittyy. Ymmärrettävyyttä on aiemmin voitu mitata vain kokeellisesti subjektiivisin menetelmin. Näitä tilastollisia mittaustapoja on useita. Voidaan esimerkiksi puhua standardoituja ääniteitä toistojärjestelmän kautta, jolloin kuuntelutilassa istuva tilastollisesti tarpeeksi laaja joukko koehenkilöitä kirjaa kuulemansa. Tuloksista voidaan laskea perille menneen ja toistossa kadonneen tiedon suhteet.

Tällainen on muun muassa tavuymmärrettävyysluku (laatuna prosentti, %), joka ilmoittaa oikein kuultujen tavujen prosentuaalisen osuuden luetuista tavuista. Loogisen puheen ymmärrettävyys on luonnollisesti suurempi kuin yksittäisten merkityksettömien tavujen, joten yli 75 prosentin tavuymmärrettävyyslukuja pidetään yleensä riittävinä.



Selvyyteen vaikuttavia tärkeimpiä tekijöitä ovat häiriöäänät (kuten taustamelu) ja tilan kaiuntaisuus.

Puheen tauoissa on suuri osa tiedosta. Kun ei sanota mitään, välitetään tärkeää tietoa. Hiljaisuus on tietoa, sillä tauoilla erotetaan äänneet toisistaan. Mikäli kaiuntaisuus pidentää äänteen loppua siten, että se kuuluu vielä seuraavan äänteen alkaessa, yhtyvät äänneet tajuttomaksi äänimatoksi. Siksi papit saarnaavat niin hitaaseen tahtiin kaiuntaisissa kirkoissa. Musiikin kohdalla pitkä kaiunta saattaa taas olla edullista - ajatellaanpa vaikka urkukonserttia kaiuntaisessa kirkosalissa.

Taustamelu alentaa puheen ymmärrettävyyttä peittäessään hyötysignaalia. Yleensä pyritään siihen, että toistovoimakkuuden tulisi olla vähintään 10 desibeliä, puheen kohdalla 25 desibeliä voimakkaampi kuin taustamelu, jotta hyötysignaali erottuisi melusta. Signaalikohinasuhteen (S/N) tulee olla vähintään 10 dB ... 25 dB. Mikäli S/N on pienempi, peittyy signaali kohinaan. Jos taas S/N on suurempi kuin noin 35 dB, on taustamelun peittovaikutus olematon.

Konsonantit (b, c, d, f, g, h, j, k, l, m, n, p, q, r, s, t, v, x, z) ovat puheen ymmärrettävyyden kannalta tärkeimpiä kuin vokaalit (a, e, i, o, u, y, å, ä, ö). Vokaaleja heikoimpina ja lyhyempinä äänteinä konsonantit jäävät helpommin tilan kaiuntaisuuden tai taustamelun peittämiksi. Yleisin ymmärrettävyyden määrittelytapa nykyisin onkin konsonantihäviöiden määrä (Articulation Loss of Consonants, AL-Cons, ALC, laatuna prosentti, %). Se ilmaisee toistossa kuulumatta jäävien konsonanttien prosentuaalisen osuuden.

Toiston ymmärrettävyys voidaan arvioida konsonantihäviöiden avulla seuraavasti:

- 10 prosenttia pienemmällä konsonantihäviöillä puheen ymmärrettävyys on erittäin hyvä
- 10 ... 15 prosentin konsonantihäviöillä ymmärrettävyys on hyvä, mutta jos puheen sisältö on kuulijoille vaikeatajuista ja/tai puhujan äänenkäyttö (artikulointi) ei ole hyvä, saattaa ymmärrettävyys olla riittämätön.
- 15 prosenttia suuremmilla konsonantihäviöillä ymmärrettävyys on riittävä ainoastaan yksinkertaisia sanomia välitettävissä.

Häviöitä voidaan vähentää lisäämällä suoran äänen osuutta kaiuntaiseen ääneen suhteen. Tähän päästään käyttämällä suuntaavaa kaiutinta keskitetyssä kaiutinsijoituksessa tai sijoittamalla kaiuttimet lähemmäksi kuulijoita hajautetussa kaiutinsijoituksessa. Käytännön kokemus on osoittanut, että kaiutinjärjestelmän asentaminen puheentoistoon ei ole enää mielekäästä, mikäli laskettu konsonantihäviömäärä ylittää 30 prosenttia. Tällöin täytyy konsonantihäviöitä vähentää lyhentämällä tilan jälkikaiunta-aikaa akustoinnilla.

Konsonantihäviöiden määrä riippuu myös kuulijoista. Erään tutkimuksen mukaan ero häviöiden määrässä saattaa olla eri kuulijoiden kesken jopa 15 prosenttia, joka asettaa rajoituksia edellä esitettyjen arviointiperusteiden käytölle. Jos laskettujen konsonantihäviöiden määräksi saadaan 10 prosenttia (eli erittäin hyvä ymmärrettävyys),

saattaa huonosti kuulevan kuulijan osalta todellisempi arvo olla 25 prosenttia (eli erittäin huono ymmärrettävyys).

Edellä esitetyt menetelmät ovat hankalia mitata, koska ovat kokeellisia ja subjektiivisia (kuulijakohtaisia). Laskennallisina menetelminä ne ovat työläisiä ja epäluotettavia. Siksi on kehitetty parempia tapoja, jolloin tavoitteena on ollut kehittää ymmärrettävyyttä kuvaavia lukuja, jotka voidaan helposti laskea ja/tai mitata.

Viime aikoina ovat modulaatiosirtofunktioon (Modular Transfer Function, MTF) perustuvat menetelmät olleet huomion kohteena pyrittäessä määrittelemään toiston selvyyttä. MTF voidaan mitata syötämällä tilaan amplitudimoduloitua kohinaa mittaussignaalina. MTF:lla tarkoitetaan moduloinnin alenemista järjestelmässä eri modulaatiotaajuuksilla (noin 0,5 Hz ... 12 Hz), joka johtuu esimerkiksi taustamelusta sekä kaiuntaisuudesta ja merkitsee selvyuden huononemista.

Useammalla taajuuskaistalla mitatuista modulaatiosirtofunktioista voidaan määrätä erilaisia puheen ymmärrettävyyttä kuvaavia tunnuslukuja, kuten STI (Speech Transmission Index) tai RASTI (Rapid Speech Transmission Index). Näiden mittaukseen on saatavilla laitteistoja ja mittausmenetelmiä on standardisoitu.

### 8.3.6 Äänikuva

Paikantumisella (localization) tarkoitetaan äänilähteen oikeaa paikantumista kaiutinjärjestelmällä toistetussa äänikuvassa. Ihminen erottaa vaakatasossa melko tarkkaan äänen tulosuunnan eli paikantaa äänilähteen. Pystysuunnassa erottelukyky äänen tulosuunnan suhteen on paljon heikompi. Ratkaisevinta joka tapauksessa on näköaistin antama tieto: jos äänilähteen nähdään olevan tietyssä suunnassa, kuuluaan äänen tulevankin siitä suunnasta, vaikka ääni tosiasiansa tuleekin eri suunnasta.

Laatuvaatimusten asettaminen paikantumiselle on vaikeaa, sillä asetettujen vaatimusten toteutumisen tarkistaminen mittaamalla on hankalaa, kallista ja vakiintuneita mittaamistapoja ei ole. Vaatimukset on kuitenkin pidettävä mielessä järjestelmää suunniteltaessa paikantumisenkin suhteen ja tiedettävä siihen vaikuttavat seikat, jotta päästäisiin hyvään lopputulokseen.

Paikantumisen suhteen on syytä saliaänenetoistossa unohtaa hifistereoajattelu. Kotikuuntelussahan pystytään järjestämään stereofonisen äänikuvan välittyminen kaiutinparin ajatellulle keskiakselille.

Saliaänenetoistossa varsinkin leveässä salissa stereokuva rajoittuu kaapealle miksauspyödyän taakse.

Voimakas äänilähteiden (soittimien, laulajien jne) panorointi eli levittäminen äänikuvassa miksausksessa saa useimmiten aikaan sen, että ainoastaan keskisalissa kuullaan tämä tasapainoinen äänikuva. Salin laidoilla jää kuulematta osa ääniohjelmasta, erityisesti voimak-

kaasti vastakkaiseen laitaan panoroidut äänilähteet. Olisi erotettava toisistaan pyrkimykset paikantumiseen luonnollisessa äänikuvassa ja tarkoitukselliset paikantumistehosteet eli panorointiefektit.

Musiikin osalta lienee tärkeintä, että kaikki soittimet ja laulajat toistuvat tasapainossa, vaikka selkeyden vuoksi olisi "palattava moon". Äänitehosteiden ulosajossa taas äänen oikea paikantuminen, "äänen liike tilassa" saattaa olla tärkein tavoite.

## 8.4 Kaiutinjärjestelmän hankinta

### 8.4.1 Yleistä

Seuraavassa tarkastellaan vielä lyhyesti miten kaiutinjärjestelmän suunnittelussa ja toteutuksessa täytyy ottaa huomioon edellä mainittuja tekijöitä. Kaiuttimista yleisölle tulevan äänen laatuun vaikuttaa luonnollisesti kaiuttimeen syötetyn signaalin laatu: säröttömyys, laaja toistoalue, kohinattomuus, häiriöttömyys ja niin edespäin, jotka määräytyvät koko kaiutinta edeltävän äänensiirtoketjun laadusta.

Järjestelmältä vaadittavat ominaisuudet saattavat riippua ratkaisevasti niillä toistettavan ääniohjelman luonteesta. Ohjelma voidaan jakaa karkeasti vaikka seuraaviin kolmeen luokkaan:

- äänitehosteet ja kovaääninen musiikki (esim. rock)
- musiikki yleensä
- puhe ja laulu

Kaiutinjärjestelmältä vaaditaan hyvinkin erilaista suorituskykyä eri ohjelmatyypien osalta äänenvoimakkuuden, taajuusvasteen, säröarvojen ja suoran äänen osuuden suhteen. Siksi tulee myös tietää ohjelman luonne, jota varten toistojärjestelmä hankitaan. Toimivin ja taloudellisin ratkaisu voi nimittäin jopa olla oma järjestelmä kunkin ohjelmatyypin tai käyttötarkoituksen mukaan. Yleispätevää kaikkeen sopivaa järjestelmää ei yleensä ikävä kyllä ole.

Akustisesta kierrosta on syytä erikseen varoittaa kaiutinjärjestelmiä suunniteltaessa. Sen lisäksi, että se "irti ryöstäytyneenä" suorastaan keskeyttää esityksen, mutta jo pienikin, tuskin erikseen havaittava kierto vaikuttaa merkittävästi varsinkin puheen ymmärrettävyyteen.

### 8.4.2 Tehomitoitus

Sanotaan, että kaiuttimien mitoittamisessa tehon suhteen on kolme tajunnan tasoa: wattitaso, desibelitaso ja kattavuustaso.

Tieto kaiuttimen tehonkestosta (watit) ei äänentoiston suunnittelussa kerro vielä paljon mitään. Saattaahan ääritapauksessa kaiuttimessa olla itse kaiutinelementin rinnalle kytkettynä tehovastus muuttamassa sähköä lämmöksi (tositapaus). Tällä kyllä täytetään tehonkesto-vaatimus, mutta se ei anna mitään kuvaa siitä, paljonko kaiuttimesta

saadaan äänienergiaa yleisön kuultavaksi. Tehonkestojen määrittely (esim. "100 W:n kaiutin") ei siis vielä riitä ja kaiuttimien vertailu pelkästään tehonkestojen perusteella on taitamatonta. (Näin määrittelyn voisi keittolevyn tulkita 1000 W:n kaiuttimeksi.)

Kun otetaan huomioon lisäksi kaiuttimen herkkyys ja lasketaan kaiuttimista tehonkeston mukaisella sähkösyötöllä saatava enimmäisäänepainetaso tietyllä etäisyydellä (desibelit), ollaan jo lähempänä todellista tulosta. Yksittäisten kaiutinten vertailu niistä saatavien äänenpainetaso- eli dBSPL- arvojen perusteella antaa jo kuvan niiden tehokkuuksien eroista. Tarvitaan pienempitehoinen vahvistin syöttämään tehoa herkempään kaiuttimeen, tai vastaavasti harvempia herkempiä kaiuttimia saman äänenpaineen aikaansaamiseen, kuin epäherkkien kaiuttimien ollessa kyseessä. Ero on merkittävä sekä markoissa että vahvistimien ja kaiuttimien vaatimaan tilaan nähden.

Vaatus tarvittavasta enimmäisäänepainetasosta riippuu merkittävästi kyseessä olevasta ääniohjelmasta. Äänitehosteiden ja rockmusiikin toistossa vaatimus 120 dBSPL ei ole useinkaan ylimitoitettu, kun muistetaan, että kipuraja on noin 130 dBSPL. Yleisesti musiikin toistoon saattaa riittää hyvin 105 dBSPL ja puheen toistoon jopa vain 90 dBSPL. Taajuusalue, millä edellä mainittu äänenpainetaso tarvitaan, riippuu myös ohjelman luonteesta. Esimerkiksi puheenvahvistuksessa saattaa matalien äänien alueella eli bassossa riittää hyvin alarajaksi 100 hertsiä. Musiikin kohdalla vaaditaan äänenpainetta aina alas 40 hertsiin asti, mikä on kallis vaatimus toteuttaa.

Kun vielä otetaan huomioon kaiuttimien suuntaavuus ja tilan akustiikka, ollaan jo laskelmissa pääsemässä lähelle yleisön kokemaa äänenvoimakkuutta: pystytään arvioimaan miten voimakkaasti ja tasaisesti kaiutinjärjestelmällä pystytään kattamaan kuuntelutila. Tarkastelussa ollaan siis kattavuustasolla.

Sähköakustiikan ja tila-akustiikan kirjallisuudessa audiojärjestelmän suunnittelua tila-akustiikan mukaisesti käsitellään perusteellisesti. Todettakoon kuitenkin tässäkin yhteydessä, ettei kaiuttimista lähtevä ääni suljetussa tilassa katoa avaruuteen, kuten ulkotilassa. Äänienergiaa tosin muuttuu lämmöksi ilman hiukkasissa ja ääntä absorboivissa pehmeissä materiaaleissa ja sitä esimerkiksi vuotaa tilasta ulos.

Osa äänienergiasta tulee suoraan kuulijoille suorana äänenä. Osa äänialloista kimpoilee tilaa rajoittavista pinnoista kuulijoille sekä lyhyinä hyödyllisinä kaikuina että selvyyttä häiritsevänä, selvästi erottuvina kaikuina. Nämä lyhyet hyödylliset kaiut summautuvat suoraan ääneen ja lisäävät halutun kuulovaikutelman voimakkuutta. Ne ikään kuin vahvistavat ääntä. Siksi puhutaankin "huonevahvistuksesta" (room gain).

Jos kaiuttimet mitoitetaan ulkotilojen laskentakaavan mukaan ottamatta mukaan tilan vahvistavaa vaikutusta, ylimitoitetaan kaiutinjärjestelmä kalliilla tavalla. Yleensä äänitaso laskee ensin jyrkästi kaiutimesta etäännyttäessä, mutta sisätiloissa kaikukentän syntyminen vakioi äänitason jopa vain parin metrin päässä kaiuttimesta.

Jos kaiuttimet tulevat edellä käsitellystä syystä (tila-akustiikka huomioimatta eli "nyrkkisäännöllä" laskettuna) helposti ylimitoitettua voimakkuusvaatimusten suhteen, niin toinen aiemmin käsitellyn seikan vaikutus on päinvastainen, joten nämä usein kumoavat toisensa. Haluttua voimakkuustasoa valittaessa ei useinkaan riittävästi oteta huomioon taustamelua, kuulijoiden kuuntelutottumusta (joka on kaupunkimietelin kasvusta ja kovaaäänisen musiikin kuuntelusta johdun muuttumassa yhä kuurompien kuulijoiden suuntaan) ja ennen kaikkea ohjelmamateriaalin dynamiikkaa. Ohjelmamateriaali, kuten aiemmin todettiin, saattaa sisältää melkoihiakin hetkellisiä tehuuipuja (esim. tykinlaukaustehoste). Siksi on turvallista varata jopa 10 desibelin yliohjausvara, jotta ei vaurioitettaisi kaiutinelementtejä eikä syntyisi epämiellyttävää säröä.

### 8.4.3 Sijoittelu ja suuntaaminen

Kaiutinjärjestelmien suunnittelussa käytetään nykyisin apuna erityisesti tähän käyttöön kehitettyjä tietokoneohjelmia. Suunnittelu on käsinlaskennalla aivan liian suuritöistä, koska liikutaan kolmiulotteisessa tilassa ja on otettava huomioon lukuisia taajuudesta riippuvia muuttujia. Syöttötietoina tarvitaan tilan akustiset tiedot, yleisön sijoittuminen tilaan, käyttöolosuhteet ja laatuvaatimukset. Tuloksena saadaan tiedot kaiuttimilta edellytettävistä teknillisistä ominaisuuksista (kuten suuntaavuus ja akustinen lähtöteho), kaiuttimien sijoittelusta ja suuntauksesta.

Kuitenkin terveellä maalaisjärjellä päätelemällä voidaan monta virhettä välttää kaiuttimia hankittaessa ja asennettaessa niitä paikoilleen. Aiheesta on seikkaperäistä tietoa jälleen sähköakustiikkaa tai kaiuttimia käsittelevässä kirjallisuudessa. Seuraavassa kuitenkin alkeistietoutta lyhyesti.

Jos tila on kaikuisa, tulisi käyttää mahdollisimman suuntaavia kaiuttimia. Tällöin saadaan suoraan kuulijoille tulevan eli suoran äänen osuutta lisättyä, ja haitallisten pitkien kaikujen osuutta vähennettyä eli selkeyttä parannettua. Kaiuttimet on luonnollisesti suunnattava kohti kuulijoita. Tätä varten olisi tiedettävä minne kaiutin ääntä säteilee eli kaiuttimen suuntakuvio. Tämä ei ole itsestään selvää varsinkin torvikaiutinrakenteiden kohdalla. Usein näkeekin väärin suunnattuja torvikaiuttimia.

Kaiutinryhmän suuntaavuus on myös erilainen kuin yksittäisen kaiuttimen. Pinottaessa kaiuttimia päällekkäin muuttuu koko pinon eli "stäkin" (stack) suuntaavuus pystytasossa kapeakeilaisemmaksi eli suuntaavammaksi. Tätä ilmiötä hyödynnetään pilarikaiuttimissa. Rinnan vaakatasoon asennetut kaiuttimet muuttuvat vastaavasti kokonaisuutena vaakatasossa suuntaavaksi kaiutinryhmäksi. Useimmiten yleisö sijaitsee salissa vaakatasossa leveästi ja pystytasossa kapeasti, minkä vuoksi kaiuttimet pinotaan pystysuoraan pinoon eli muodostetaan kaiutinpilari.

Kaiuttimet suositellaan myös aina asentamaan akustisten keskipisteidensä suhteen pystysuoraan riviin kuulijoihin nähden kaiutinten

keskinäisten välimatkaerojen aiheuttamien ongelmien minimoimiseksi. Ongelmana suuntaavien kaiutinryhmien rakentamisessa pinoamalla kaiuttimia on suuntakuvion liuskoittuminen: suuntakuvios- ta muodostuu tällöin epätasainen. Laadukkaat suuntaavat kaiuttimet ovatkin yleensä huolellisesti suunniteltuja torvikaiutinrakenteita, kuten viime vuosina yleistyneet vakiosuuntaavuustorvet (constant directivity/ coverage horns).

Äänitasoeroja lähimmän ja kauimmaisimman kuulijan välillä saadaan tasoitettua sijoittamalla kaiuttimet näyttämön yläpuolelle ja suuntaamalla kaiuttimet alaviistoon kohti yleisöä. Usean kaiuttimen suuntaaminen siten, että niillä katetaan tasaisesti koko kuuntelualue, on suuritöinen ja taitoa vaativa työ, johon tarvitaan mittarien lisäksi taitoa ja käytännön kokemusta. Usein kaiuttimet joudutaan sijoittaman tilan puutteen ja esteettisten seikkojen vuoksi kauaskin niiden ihanteellisesta sijaintipaikasta.

On myös varottava kaiutinten sijoittamista liian kauas toisistaan. Ääni etenee ilmassa noin 340 metriä sekunnissa ja johdossa lähes valon nopeudella. Jos toinen kaiutin on vieressä, tulee siitä ääntä käytännössä välittömästi, kun ääntä syötetään vahvistimesta kaiutinjohtoon. Näin tapahtuu, vaikka johtoa olisi satojakin metrejä. Jos taas toinen kaiutin, johon syötetään samanaikaisesti samaa ohjelmaa, on kuulijasta huomattavasti kauempana, tilanne on toinen. Siitä kuuluu ääni paitsi vaimenneena, niin myös ajallisesti niin paljon viivästyneenä, että ääni kuuluu selvästi erottuvana kaikuna.

Käytännössä nyrkkisääntönä pidetään Haas'n ilmiön mukaisesti yli 35 ...50 millisekunnin kulkuajakaerojen välttämistä. Tämä vastaa 12 ...17 metrin etäisyyseroa kaiutinten välillä. Luonnollisesti viivästynyt ääni ei häiritse, ellei se kuulu eli jos se on vaimentunut riittävästi. Silti viivästynyt vaimeakin ääni saattaa häiritä sointia, sillä se summautuu lähempää kuuluvaan äänen erivaiheisena. Edellä esitetty seikka puoltaa taas osaltaan keskitettyä kaiutinsysteemiä eli klusteria hajautettuun sijoitteluun verrattuna.

"Suuntava kaiutin" on suuntaava vain keski- ja ylä-äänialueilla. Se toistaa (varsinkin matalia ääniä) myös taaksepäin, joten kaiuttimen sijoitusetäisyys sen takana ja yleensä lähellä oleviin pintoihin nähden vaikuttaa taajuustoistoon. Esimerkiksi nurkkaan sijoitettu kaiutin matalia taajuuksia. Kotona voi esimerkiksi hifikaiuttimen sijoittaa huoneen nurkkaan, jolloin saa mahtavan - tosin kapeakaistaisen - "diskobassopotkun" aikaiseksi.

Edellä kerrottiin jo äänen paikantamisesta, ja todettiin, että selkeyden kannalta vanha kunnan monoäänentoisto on paras ratkaisu. Ymmärrettävyyden kannalta olisi parasta sijoittaa kaiuttimet yhteen pisteeseen, esimerkiksi näyttämön yläpuolelle keskelle. Panorointitehosteita varten voidaan tarvittaessa sijoitella pienempitehoisia tehos- tekaiuttimia sopiviin paikkoihin ympäri salia.

Mallia voisi ottaa elokuvateattereiden Dolby-stereo-järjestelmästä. Siinä on perusmallissa neljä kaiutinryhmää: Kaiutin, johon ajetaan monosummasignaali, sijoitetaan valkokankaan taakse keskelle. Vasenta ja oikeaa kanavaa toistavat "stereokaiuttimet" sijoitetaan keski-

kaiuttimen molemmin puolin valkokankaan taakse. Neljäs ryhmä kaiuttimia, johon ajetaan omaa, stereo-ohjelmasta riippumatonta tehosteohjelmaa, sijoitellaan pitkin salia.

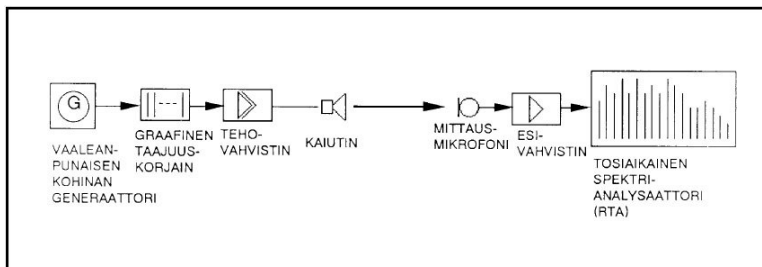
#### 8.4.4 Toiston tarkkailu ja korjaaminen (ekvalisointi)

Kaiutinten taajuusvaste riippuu myös tarkastelusuunnasta. Kaiutin on suhteellisen helppo saada suuntaavaksi korkeilla taajuuksilla, jolloin äänen aallonpituus on pieni verrattuna kaiuttimen mittoihin. Matalilla taajuuksilla aallonpituudet ovat vastaavasti pitkiä verrattuna kaiuttimen kokoon, jolloin kaiuttimista tulee väkisinkin ympäriseiteleviä. Matalia ääniä eli pieniä taajuuksia vuotaa kaiuttimesta taaksepäin ja sivuille. Korkeat äänet eli suuret taajuudet suuntautuvat suoraan kuulijalle. Siksi kaiutin syöttää matalilla äänillä akustisen tilan kaiutakenttää voimakkaammin kuin korkeilla äänillä.

##### 8.4.4.1 Tosi aikainen spektrianalysaattori ja vaalean punainen kohina

Tavallisin tapa tarkkailla mittauslaitteiden avulla äänentoistoa viime vuosina on ollut tosiaikaisen spektrianalysaattorin (Real-Time Analyzer, RTA) käyttäminen. Analysaattorin erottelukyky taajuuden suhteen eli mittaускаista on useimmiten 1/3- oktaavi ja taajuusalue eli mittausalue 16 Hz ... 16 kHz tai 20 Hz...20 kHz, jolloin näytössä on 31 kaistaa.

Kuva 8.9 Toiston tarkkailu RTA:n avulla



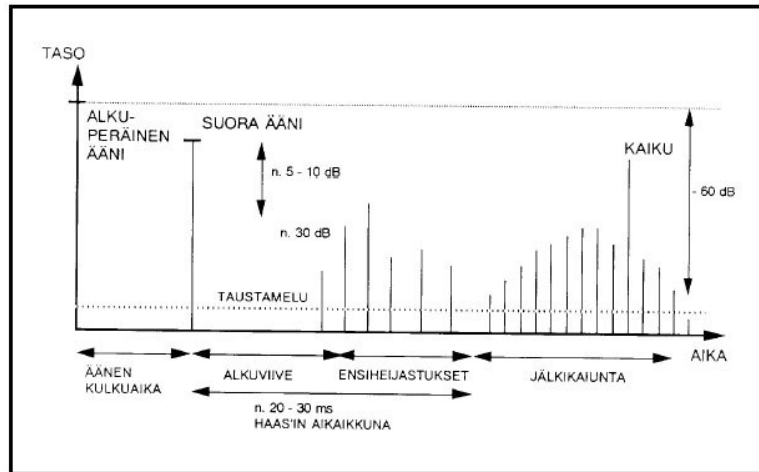
Suosittelvat mittaustaajuudet on määritelty SFS 3086- standardissa, joka on täysin yhtäpitävä ISO 266-1975 kanssa seuraavasti (1/3-oktaavijaotuksella, joka on seuraavassa lihavoitu, yksikkönä Hz): **16**; 20; 25; **31,5**; 40; 50; **63**; 80; 100; **125**; 160; 200; **250**; 315; 400; **500**; 630; 800; **1 k**; 1,25 k; 1,6 k; **2 k**; 2,5 k; 3,15 k; **4 k**; 5 k; 6,3 k; **8 k**; 10 k; 12,5 k ja **16 k**. Korostettakoon, ettei tämä standardi koske musiikkitaajuuksia.

Dynamiikan suhteen erottelukyky on usein valittavissa näyttöön askelin 1 dB, 2 dB tai 3 dB, ja näyttöikkunan kohta (nollataso, dB SPL) on valittavissa. Näytössä näkyvä dynamiikka-alue riippuu valitusta erottelukyvystä ja mittarista. Huokeimmissa analysaattoreissa mittauskaistan leveys on oktaavi, jolloin näytössä on 8 tai 10 kaistaa.

Tässä menetelmässä syötetään audiojärjestelmään mittaus signaalina vaalean punaista kohinaa. Audiojärjestelmän toistama kohina poimitaan erityisellä tarkalla mittausmikrofonilla analysaattoriin. Vaalean punainen kohina sisältää kuuloalueen 16 Hz ... 20 kHz taajuuksia

painotettuna siten, että RTA näyttää vaakasuoraa käyrää, mikäli järjestelmä toistaa kaikkia taajuuskaistoja yhtä voimakkaana.

Kuva 8.10 Äänikentän syntyminen



Kaiutinjärjestelmän staattinen eli tilaan jatkuvalla signaalilla herätetty vakiintuva taajuusvaste mitattuna RTA:lla tyypillisestä kuuntelupaikasta osoittaa vasteen laskemista taajuuden noustessa. Järjestelmä näyttää toistavan voimakkaammin matalia kuin korkeita ääniä. Tämä johtuu siitä, että mittausmikrofoni poimii suoraan kaiuttimesta tulevan suoran äänen (jossa on tasaisesti kaikkia taajuuksia, mikäli järjestelmä toimii odotetusti) lisäksi eri reittejä pitkin heijastuneita ääniaaltoja eli kaiuntaista ääntä, jossa on matalien äänien alue korostuneena.

Ihmisen kuulo tajuaa kuitenkin äänitapahtuman dynaamisena eli ajan mukana muuttuvana ilmiönä: Yhdistämme suoraan ääneen osan heijastuksista eli ensiheijastukset. Myöhemmin korviin tulevat heijastuneet äänet tajuaamme erillisiksi kaiuiksi, mikäli ne ovat riittävän voimakkaita, tai kaiuntaääneksi, mikäli ne jakautuvat tasaisesti. Tätä kutsutaan Haasin ilmiöksi tai aikaikkunaksi, joka kuvaa sitä, että kuulon ikkuna on auki tietyn ajan vastaanottaen suoran äänen jälkeen heijastuvia ääniä sulkeutuen hetken (noin 20 ... 35 ms) kuluttua.

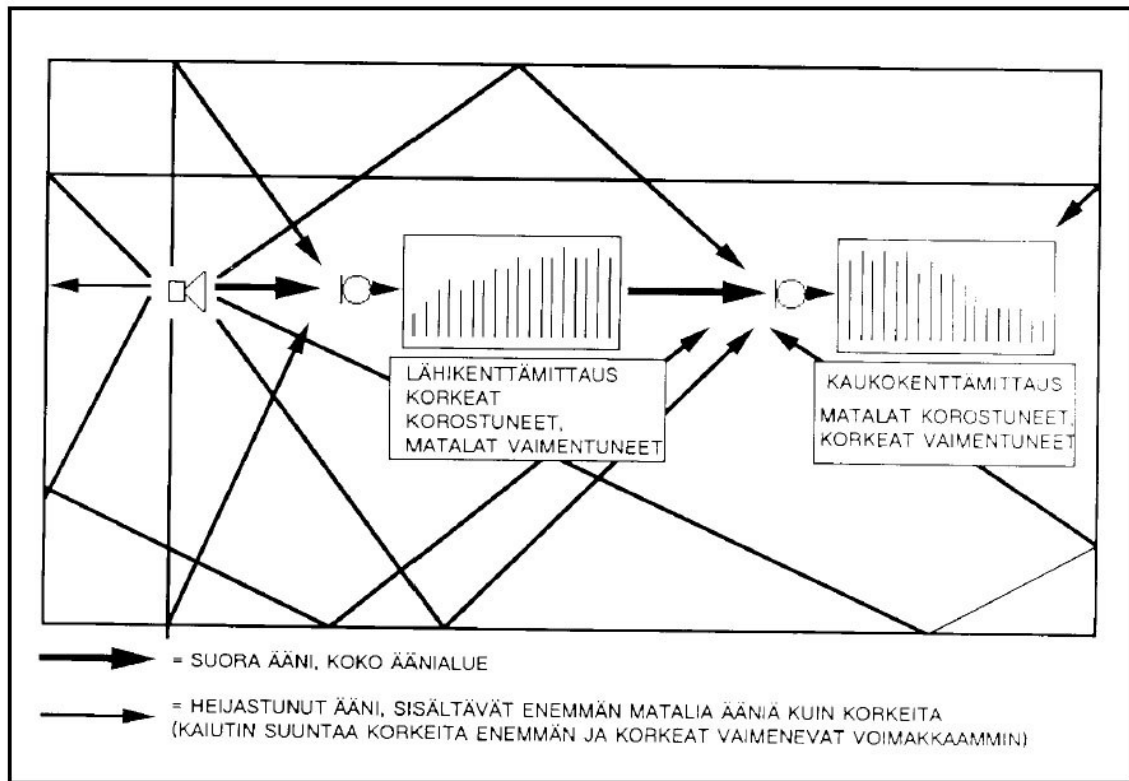
Vaikka Haasin ikkunan kesto riippuukin ensiheijastusten voimakkuudesta ja ajoittumisesta jonkin verran, on se aina kuitenkin paljon lyhyempi kuin aika, jona staattisessa taajuusvasteen mittauksessa otetaan ääntä mukaan mittaukseen. Siksi ihmisen kuulema dynaaminen taajuusvaste katsomossa eroaa merkittävästi RTA:n näyttämästä staattisesta taajuusvasteesta. Näin sekä kaukokentässä, jossa RTA:n näytössä matalat korostuvat, että lähikentässä järjestelmän suorasta vasteesta, jossa RTA:ssa korkeat äänet korostuvat.

Jos järjestelmän taajuustoisto ekvalisoidaan kaukokentässä staattisen RTA:lla mitatun vasteen perusteella suoraksi, on lopputulos liian kirkas eli toisto korostaa korkeita ääniä. Lähikentästä RTA:lla mitaamalla ekvalisoidaan taas toisto liian bassovoittoiseksi, eli matalia ääniä ylikorostetaan. Jotta saataisiin taajuuden suhteen tasainen toisto pitää mitata ja ekvalisoida suoran ja Haas'in ikkunassa heijastu-



neen äänen painoitettu yhdistelmä. Tämä onnistuu vain mittauslaitella, joka suorittaa jonkinlaista aikaikkunointia.

Kuva 8.11 RTA:n näyttämän virheellisyys



RTA:kin on useimmille audiotekniikan käyttäjäpiireille kallis mitta-laitte, joten sillä on yritettävä tulla toimeen. Lähi- ja kaukokentän mittausten eroa pyritään ottamaan huomioon siten, että suoritetaan mittauksia eri puolilla salia ja tehdään ekvalisointi jonkinlaisen keskimääräisen vasteen mukaan.

Ekvalisoinnissa pyritään mieluummin tekemään liian pieniä korjauksia kuin liian suuria, sillä taajuuskorjaimet usein lisäävät toistoon omia vaihevirheitään, jotka eivät näy amplitudivasteessa. Muistettavaa on myös, että taajuuskorjaimia ei ole tarkoitus käyttää vahvistimina. Korjaus tehdään i vaimentavana tai nollassa molemmin puolin.

On parempi pyrkiä vaimentamaan korostumia kuin nostamaan kuoppia. Jos joudutaan korjaamaan stereoparia, on huolehdittava siitä, ettei vasemman ja oikean kanavan korjaus poikkea paljoa toisistaan. Käytännön nyrkkisääntö on tehdä ekvalisointi RTA:lla tarkkailien, sitten vetää korjausta viivoittimella kasaan kohti nollassa ja lopulta hienosäätää korjaus korvien avulla tuttua musiikkia kuunnellen salissa laajalti liikkuen.

Yleensä analysointi tapahtuu kolmasosaoktaavin taajuuskaistan tarkkuudella. Havaitut korostumat eli piikit ja vaimentumat eli kuopat tasoitetaan eli ekvalisoidaan sitten 1/3- tai jopa 1/6-oktaavin graafisilla taajuuskorjaimilla. Valitettavasti vain monet matalataajuiset jyrinät

ja keskialueen soivat kaiut johtuvat hyvin kapeataajuisista resonansseista, jotka eivät näy 1/3- oktaavin analysoinnissa. Niitä ei pystytä myöskään korjaamaan kiinteäkeskitaajuuksisilla laajakaistaisilla taajuuskorjaimilla. Niinpä usein tällaisten kapeakaistaisen ongelmien korjaamiseen otetaan käyttöön parametriset taajuuskorjaimet, joissa voi säätää sekä keskitaajuutta että taajuuskaistan leveyttä tavanomaisen vahvistuksen ja vaimennuksen säätämisen lisäksi. Kiertoherkkien taajuuksien korjaamista on käsitelty tarkemmin muualla tässä luvussa ja äänenmuokkausta luvussa 6.

RTA-systeemillä ekvalisoinnin toinen rajoitus on se, että vaalean punainen kohina on ikävää kuunneltavaa - sitä ei voi soittaa yleisölle. Tilan akustiikka kuitenkin muuttuu, kun se täyttyy kuulijoilla. Ihmiset heijastavat ja imevät ääntä, mikä muuttaa äänen jakaantumista, kaiuntaisuutta ja kuuntelualueen heijastamista tilassa. Yleisö tuottaa taustamelua. Ihmiset ja myös esitysten valaistus lämmittävät ilmaa ja lisäävät sen kosteutta, mikä vaikuttaa yllättävän paljon äänen etene- miseen ilmassa, varsinkin korkeiden äänien osalla, jota tarkastellaan seuraavassa tarkemmin. Usein vielä ilmastointia täytyy lisätä täydelle katsomolle, mikä lisää taustamelua ja muuttaa melun taajuusvas- tetta. Näin tyhjällä salilla ekvalisoitu hyvän kuuloinen toisto voi mennä aivan pilalle kun täysi katsomo on kotiutunut saliin.

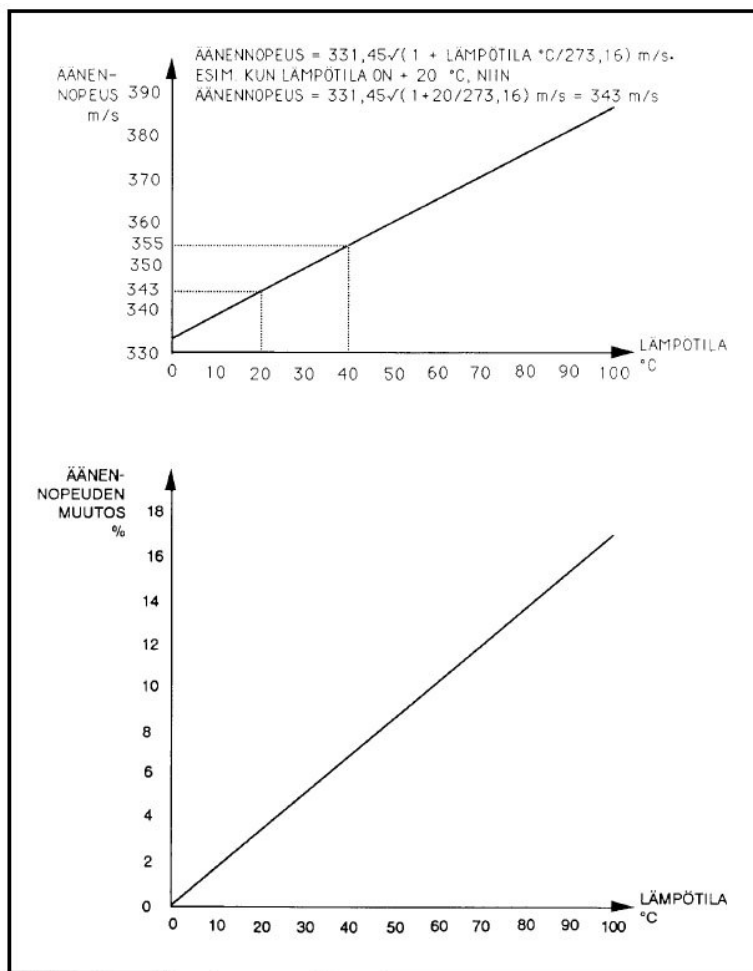
#### **8.4.4.2 Lämpötilan ja kosteuden vaikutus taajuustoistoon**

Monet audiotekniikkaa tuntevat tietävät, että äänennopeus ilmassa riippuu ilman lämpötilasta, ilmanpaineesta, suhteellisesta korkeudesta, korkeudesta merenpinnasta ja muun muassa ilman kaasuseoksen koostumuksesta. Näiden merkitystä taajuustoistoon on vain totuttu pitämään niin vähäisinä, että ne on voitu jättää huomioimatta. Kuitenkin korvat kertovat, että ekvalisoinnin jälkeen sointi muuttuu eri iltojen välillä, jopa illan mittaan.

Viime aikoina on käyttöön tullut tarkat mittausten menetelmät, joilla voidaan toistoa mitata vaikka kesken esityksen. Näillä mitattuna on paljastunut, että korvat ovat oikeassa: toisto saattaa tosiaan muuttua rajustikin esityksen aikana tai eri esitysten välillä. Toisaalta uusien mittarien sekä kehittyneiden taajuuskorjaimien ja viivelaiteiden avulla voidaan toistoa korjata hyvinkin tarkkaan. Tältä tarkkuudelta vain putoaa pohja pois, jos ilman lämpötilan ja kosteuden muutokset vaikuttavat toistoon ratkaisevasti, eikä niitä huomioida.

Tarkastellaan esimerkin valossa ilman lämpötilan ja kosteuden muutoksen vaikutusta äänentoistoon. Kuvitellaan, että salissa on kuulija, joka istuu 32 metrin päässä kaiuttimesta. Suora ääni kulkee siis 32 metriä kaiuttimesta kuulijalle. Samaan kuuntelupisteeseen tulee kaiuttimesta ääntä myös seinän kautta heijastuen siten, että tämän heijastuneen äänen kulkumatka kaiuttimesta kuulijalle on 116 metriä. Rajoitetaan tarkastelu pelkästään näihin kahteen äänikentän osaan: suoraan ääneen ja yhteen heijastuneeseen ääneen. Nämä äänet saapuvat kuulijalle tietystä vaihesuhteesta, joka riippuu äänen kulke- masta matkasta, äänen taajuudesta ja nopeudesta.

Kuva 8.12 Lämpötilan vaikutus äänen nopeuteen



Oletetaan, että salin lämpötila  $t_1$  on aluksi + 20 °C ja ilman suhteellinen kosteus RH1 on 30 %. Kuvan 8.12 ylemmästä kuvaajasta näemme, että äänennopeus  $c_1$  on noin 343 m, kun ilman lämpötila  $t_1$  on 20 °C.

Voimme myös laskea äänennopeuden:

$$\begin{aligned} c &= 331,45\sqrt{(1 + t_1/273,16)} \text{ m/s} \\ &= 331,45\sqrt{(1 + 20^\circ\text{C}/273,16)} \text{ m/s} \\ &= 343,37 \text{ m/s.} \end{aligned}$$

Alemmasta kuvaajasta voimme katsoa, että äänennopeus kasvaa noin 3,6 prosenttia, kun lämpötila nousee 0 °C:sta + 20°C:een ( $343,37 \text{ m/s} - 331,45 \text{ m/s} = 11,92 \text{ m/s}$ ,  $11,92 \text{ m/s}/331,45 \text{ m/s} \times 100 = 3,6 \%$ ).

Tarkastellaanpa vaikka 10 kilohertsin taajuutta (eli sellaista testisinaaltoa joka äänipöydässä sopivasti on). Taajuus  $f$  on siis 10 000 hertsiä. Äänennopeuden perusteella saamme laskettua aallonpituuden  $w_1$ :

$$\begin{aligned} \text{aallonpituus } w_1 &= \text{äänennopeus } c_1 / \text{taajuus } f = 343,37 \\ &\text{ m/s} / 10000 \text{ 1/s} = 0,03434 \text{ m} \end{aligned}$$

Aallonpituuden avulla saamme laskettua audiosignaalin vaiheen kuuntelupisteessä. Suoran äänen osalta kulkumatka  $d_1d$  oli 32 m. Tällöin:

$$\begin{aligned} \text{jaksoja} &= \text{kulkumatka } d_1d / \text{aallonpituus } w_1 \\ &= 32 \text{ m} / 0,03434 \text{ m} \\ &= 931,86. \end{aligned}$$

Siis 931 täyttä jaksoa ja 0,86 seuraavaa. Signaalin vaihe  $p_1d$  on  $360^\circ \times 0,36 = \text{noin } 310^\circ$

Heijastuneen äänen vaihe kuuntelupisteessä on puolestaan:

$$\begin{aligned} d_{1r}/w_1 &= 116 \text{ m} / 0,03434 \text{ m} = 3377,98 \\ \text{eli } p_{1r} &= 360^\circ \times 0,98 = \text{noin } 345^\circ. \end{aligned}$$

Käytännössä suora ja heijastunut ääni ovat 10 kilohertsin taajuudella tässä kuuntelupisteessä siis samanvaiheiset ( $310^\circ$  ja  $345^\circ$ ) ja summautuvat yhteen. Tästä aiheutuu pieni korostuma taajuusvasteeseen, jonka saa helposti ekvalisoitua taajuuskorjaimella. Ekvalisoituun toistoon ollaan tyytyväisiä ja kaikki on valmista illan esitykseen.

Illan esitykseen tulee kuitenkin "tupa täyteen" ja lämpötila nousee samalla kosteuden lisääntyessä. Uudet olosuhteet ovat  $t_2 = 30^\circ\text{C}$  ja  $\text{RH}_2 = 80\%$ .

Tällöin äänen nopeus  $c_2$  on:

$$c_2 = 331,45 \text{ v} (1 + 30^\circ\text{C} / 273,16) \text{ m/s} = 349,18 \text{ m/s},$$

eli äänennopeus  $c_2$  on kasvanut 1,7 prosenttia  $20^\circ\text{C}$ -arvosta  $c_1$  ja 5,3 prosenttia  $0^\circ\text{C}$ -arvosta.

Vastaava aallonpituus on:

$$a_2 = 349,18 \text{ m/s} / 100001/\text{s} = 0.03492 \text{ m}.$$

Tällöin suoran äänen vaihe  $p_2d$  kuuntelupisteessä on:

$$\begin{aligned} 32 \text{ m} / 0,03492 \text{ m} &= \\ 916,38 \text{ eli } p_{2d} &= \\ 360^\circ \times 0,38 &= \text{n. } 137^\circ \end{aligned}$$

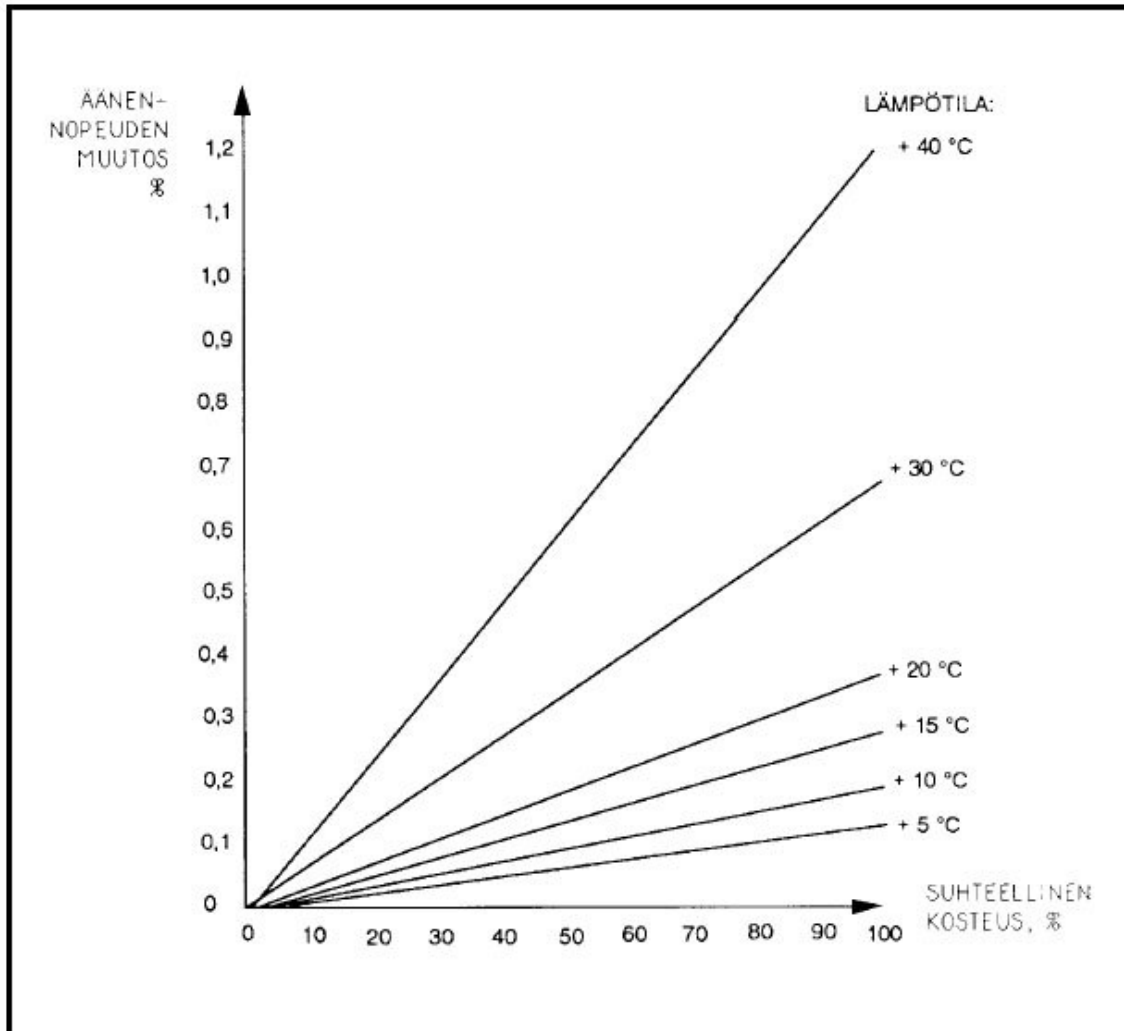
ja heijastuneen äänen vaihe on:

$$\begin{aligned} 116 \text{ m} / 0,03492 \text{ m} &= \\ 3321,88 \text{ eli } p_{2r} &= \\ 360^\circ \times 0,88 &= \text{n}316^\circ \end{aligned}$$

Signaaleilla on siis vaihe-eroa  $316^\circ - 137^\circ = 179^\circ$ . Käytännössä signaalit ovat vastavaiheessa (=  $180^\circ$ ) ja kumoavat toisensa kyseisellä taajuudella. Tällöin taajuusvasteeseen syntyy kuoppa 10 kilohertsin kohdalle, kun aiemmin syntyi korostuma. Tämä korostuma korjattiin vaimentamalla toistoa 10 kilohertsin keskitaajuudella, mikä siis olosuhteiden muututtua vain pahentaa uutta tilannetta.

Edellä jätettiin vielä ilman suhteellisen kosteuden RH vaikutus ottamatta huomioon. Kuvasta 8.13 voimme katsoa, että arvoilla RH1 = 30 % ja t1 = 20° C äänennopeuden muutos dc vertailuarvoon (0% ja 0°C) nähden dc1 = 0,2 %. Uudessa tilanteessa RH2 = 80 % ja t2 = 30° C äänennopeuden muutos dc2 = 0,54 %. Äänennopeuden muutos tilanteiden välillä oli siis dc = dc2 - dc1 = 0,54 % - 0,2 % = n. 0.34 %. Edellä laskettiin, että suhteellisen kosteuden vaikutus pois jättäen äänennopeus muuttui olosuhteiden muutosten myötä c2 - c1 = 349,18 m/s - 343,37 m/s = 5,81 m/s eli 1,7 %. Suhteellisen kosteuden muutoksen vaikutus huomioiden äänennopeuden kokonaismuutos olisi siis 1,7 % + 0,34 % = noin 2 %. Sama tulos on myös luettavissa seuraavasta taulukosta, johon on laskettu lämpötilan ja suhteellisen kosteuden yhteisvaikutus äänen nopeuteen.

Kuva 8.13 Ilman suhteellisen kosteuden ja lämpötilan vaikutus äänen nopeuden muutokseen



Äänennopeuden kokonaismuutos ilmassa prosentteina lämpötilan ja suhteellisen kosteuden muutosten vaikutuksesta (vertailuolosuhteet  $t = 0^{\circ}\text{C}$  ja  $\text{RH} = 0\%$ ):

Lämpötila °C	Ilman suhteellinen kosteus RH,%t					
	0	30	40	50	80	100
5	0,91	0,952	0,966	0,980	1,02	1,05
10	1,81	1,87	1,89	1,91	1,97	2,01
15	2,71	2,79	2,82	2,85	2,93	2,98
20	3,60	3,71	3,75	3,79	3,90	3,98
30	5,35	5,55	5,62	5,69	5,90	6,03
40	7,07	7,43	7,54	7,66	8,03	8,27

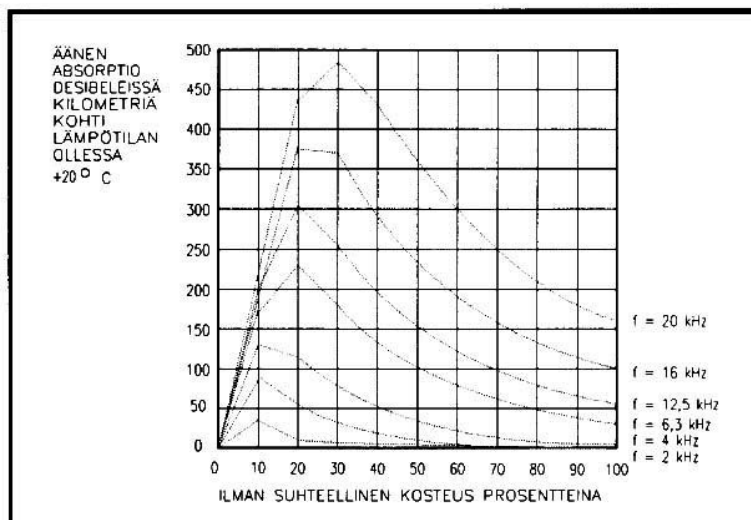
Tärkeämpi vaikutus suhteellisen kosteuden muutoksilla on kuitenkin äänen vaimenemiseen ilmassa kulkiessaan. Seuraavasta kuvaajasta näemme, että suhteellisen kosteuden RH kasvu  $\text{RH1} = 30\%$ :sta  $\text{RH2} = 80\%$ :iin aiheuttaa 10 kilohertsin taajuudella vaimenemisen muutoksen noin 180 dB ( $\text{RH} = 30\%$ ) - n. 45 dB ( $\text{RH} = 80\%$ ) = 135 dB kilometrin matkalla. Arvot pätevät lämpötilan ollessa  $20^{\circ}\text{C}$ . Kuuntelupisteemme oli 32 metrin päässä kaiuttimesta, joten matkalla sinne ääni vaimenee illalla sali täynnä noin  $135\text{ dB} \times (32\text{m}/1000\text{ m}) =$  noin 4 dB vähemmän kuin päivällä tyhjällä, kuivemmissä olosuhteissa.

Ilman kosteuden kasvaminen edistää äänen etenemistä varsinkin suurilla taajuuksilla. Voimakkain muutos on suhteellisen kosteuden lukemien 0 % (täysin kuiva ilma) ja 10 %:n välillä alle 6,3 kilohertsin taajuuksilla ja 0 %:n ja 20 %:n välillä sitä suuremmilla taajuuksilla. Tällä alueella vaimennus lisääntyy voimakkaasti kosteuden lisääntyessä. Esimerkiksi 20 %:n muutos (0 %:ista 20 %:iin) aiheuttaa 20 kilohertsin taajuudella noin 440 desibelin lisäyksen vaimennukseen kilometrin matkalla eli lähes desibelin kahdessa metrissä. Kun huippu on saavutettu, alkaa vaimennus vähetä kosteuden kasvaessa taajuudesta riippuen (alkaen arvosta 10%...30% )kosteampaan päin. Matalilla taajuuksilla ilman kosteuden merkitys vaimenemiseen on mitätön. Siksi alle 2 kilohertsin taajuuksilla ei ole merkitty käyriä kuvaan 8.14.

Vaimenemisen kasvu suurilla taajuuksilla aiheuttaa merkittävän jälkikaiun lyhenemisen kaikuisissa tiloissa, joissa on vähän ääntä imevää pehmeää ainetta pinnoissa. Hyvin suurissa halleissa, joissa on paljon kovia heijastavia pintoja, tämä suurien taajuuksien vaimeneminen voi olla toiston soinnin kannalta ratkaiseva ilmiö: suhteellinen kosteus määrää soiko salissa kirkkaasti vai sameasti.

Pienissä tiloissa äänen vaimenemisen muutos ei vaikuta merkittävästi suoraan ääneen. Heijastuneet äänet kulkevat kuitenkin moninkertaisia matkoja suoraan ääneen verrattuna. Siksi suhteellisen kosteuden muutokset vaikuttavat merkittävästi kaiuntaan pienissäkin tiloissa.

Kuva 8.14 Suhteellisen kosteuden vaikutus äänen vaimenemiseen ilmassa eri taajuuksilla lämpötilan ollessa + 20 °C



Seuraavassa taulukossa on lukijaa helpottamaan laskettu äänen vaimenemisen kasvaminen (dB/km) suhteellisen kosteuden mukaan eri taajuuksilla. Olosuhteiden muuttuessa siis 10 kilohertsin ääni ei pelkästään käänny kuuntelupisteessä vastavaiheeseen, vaan lisäksi sen voimakkuus kasvaa lähes 4 desibeliä. Se on jo suurillakin äänenpaineilla kuultava ero ja vastaa noin toistojärjestelmän tehon kaksinkertaistamista.

Äänen vaimenemisen lisäys (dB/km) ilmassa suhteellisen kosteuden mukaan eri taajuuksilla vakio­lämpötilassa (t = 20 °C)											
taajuus	Suhteellinen kosteus Rh, %										
f, Hz	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
2 k	45,7	34,1	13,3	6,76	4,20	3,00	2,41	2,14	2,05	2,07	2,15
4 k	65,6	93,2	53,5	30,1	19,2	13,4	9,86	7,76	6,36	5,36	4,76
6,3 k	71,2	139	120	75,7	50,7	36,4	27,6	21,8	17,8	14,9	12,8
10 k	74,7	176	235	179	129	96,7	75,7	61,0	50,7	43,0	37,2
12,5 k	77,2	188	302	258	196	151	120	98,2	82,2	70,2	60,8
16 k	79,8	198	376	371	303	242	196	162	137	118	103
20 k	84,6	206	436	489	433	360	299	251	214	186	163

Esimerkki toivottavasti selvitti, että pienikin muutos äänennopeudessa vaikuttaa varsinkin suurilla taajuuksilla eli lyhyillä aallonpituuksilla toistoon aiheuttaen eri taajuuksilla vaimenemia ja korostumia kulkumatkasta ja äänennopeudesta riippuen. Muutos ilman suhteellisessa kosteudessa vaikuttaa äänen vaimenemiseen ilmassa varsinkin suurilla taajuuksilla. Kaiken kaikkiaan tällaiset olosuhteiden muutokset värittävät toistoa hyvinkin kuultavasti ja vielä eri kuuntelupisteissä eri tavoin.

#### 8.4.4.3 Siniaaltopyyhkäisy

Käytössä on jo ennen RTA:ta ollut mittaustapa, jossa pyyhkäistiin läpi eri kuuloalueen taajuudet siniaaltogeneraattorilla ja mitattiin kullakin taajuudella amplitudin tehollisarvo. Kun käyrä piirretään piirturilla saadaan esiin havainnollinen ja tarkka taajuusvaste.

Ongelmana menetelmässä on se, että systeemi mittaa kaiken mittaushetkellä mikrofoniin osuneen äänen, myös taustametelin ja kaiun-

taäätet. Teoriassa tällä menetelmällä voidaan mitata myös vaihevas- te, mutta käytännössä se on hyvin hankalaa. Sinaaltopyyhkäisyä käytetäänkin nykyisin pääasiassa vain laboratorioden kaiuttomissa huoneissa, joissa kaiunta ja taustamelu on eliminoitu.

#### **8.4.4.4 TDS ja TEF**

Kuten edellä todettiin, on RTA-tekniikassa puutteena huono erotte- lukyky taajuuden suhteen ja se, ettei saada mitattua vaihevastetta. Vasta viivästetty spektrimittaus (Time Delay Spectrometry, TDS) ja sen perillinen aika -energia -taajuus -mittaus (Time-Energy- Frequency, TEF) ovat ensimmäiset käytännölliset menetelmät, joilla kaiutinjärjestelmän toistotarkkuutta voidaan mitata tarkasti.

Richard Heyser'in kehittämä TEF käyttää mittaussignaalina siniaal- topyyhkäisyä ja ilmaisinta ennen kytkettyä pyyhkäisyä seuraavaa kaistanpäästösuodinta. Äänen kulun kaiuttimesta mittaussmikrofoniin aiheuttaman kuluaikaviiveen vaikutus on kompensoitu siten, että suotimen pyyhkäisy on viivästetty mittaussignaalin pyyhkäisystä kulkuajan verran. Samalla on saatu aikaan aikaikkunointi ja poistet- tua mittauksesta taustamelun vaikutus.

TEF kerää sekä taajuus- että vaihetiedot hyvin suurella erottelulla. Erottelukyky riippuu kuitenkin sieppausajasta eli mittaussikkunan au- kioloajasta, joten todella tarkkaan erotteluun pääsyyn vaaditaan hy- vin hidas pyyhkäisy. Menetelmällä kestää aina hetkisen saada vasteet näkyviin, sillä laitteiston prosessori joutuu laskemaan ne mitatuista tiedoista.

#### **8.4.4.5 FFT**

Tuoreimpia apuvälineitä audiomittauksiin on kaksikanavainen nope- aa Fourier- muunnosta (Fast Fourier Transform, FFT) hyödyntävä analyysi. Menetelmässä vertaillaan järjestelmään syötettyä mittauss-ignaalia järjestelmän toistamaan signaaliin matemaattisen siirto- funktion avulla. Mittaussignaalina käytetään tavallisesti satunnaisko- hinaa tai impulsseja. Myös siniaaltopyyhkäisyn käyttö on mahdollis- ta. Menetelmässä saadaan arviot vasteista halutussa aikaikkunassa FFT-algoritmilla derivoiden.

FFT:llä saadaan erittäin hyvä erottelu amplitudin suhteen ja helposti koottua vaihetietoa. Tosin prosessorilta vaaditaan melkoinen lasken- tateho. Mittauksen vastustuskykyä kohinan suhteen saadaan paran- nettua huomattavasti käyttämällä aikakeskiarvoistamista, joka vas- taavasti pidentää tarvittavaa sieppausaika eli hidastaa mittausta. Mikäli taustamelutaso on alhainen, saadaan sekunnin sieppausajalla 1 hertsin erottelukyky koko kuuloalueella. Mittausnopeutta ei voi tästä kasvattaa edes teoriassa.

#### **8.4.4.6 SIM**

John Meyer'in kehittämä äänilähteestä riippumaton mittaus (Source - Independent Measurement, SIM) on laajennus edelliseen kaksi- kanavaiseen FFT- analyysiin. SIM'in etu on se, että mittaussignaali- na voi käyttää itse ääniohjelmaa eli siis puhetta tai vaikka musiikkia. Tällaisessa signaalissa on harvoin kaikkia taajuuksia tasaisesti lyhy-



ellä aikavälillä kuten mittauskohinassa. Tästä ongelmasta selvittää kuitenkin laskennan avulla ja keräämällä aineistoa pidempään (esimerkiksi musiikkia mittaussignaalina käytettäessä mittausjakso kestää noin kaksi minuuttia). Kohinalla tai impulsseilla mitattaessa päästään 1 hertsin erottelukykyyyn sekunnin mittausjaksolla. Tällöin saadaan esiin kapeakaistaiset haitallisesti korostuvat kiertoherkät taajuusalueet.

Analysaattori ottaa näytteitä ja keskiarvoistaa ne sekä mittaussignaalista että mitatusta signaalista. Vertailemalla näiden kahden signaalin taajuusspektriä saa analysaattori laskettua järjestelmän taajuusvas-teen, vaihevasteen ja muut ominaisuudet. Koska analysaattori käyttää mittaussignaalia vertailutietona laskennassa, on järjestelmä riippu-maton mittaussignaalin muodosta ja taustamelun vaikutus voidaan eliminoida. Siksi kaikenlaista ääntä, jopa musiikkia, voidaan käyttää mittaussignaalina.

SIM-tekniikan suurin etu on, että audiojärjestelmä voidaan mitata sen toimiessa tositilanteessa - vaikka kesken konsertin. Sali voidaan ekvalisoida tavanomaiseen tapaan ennen tilaisuutta tyhjänä. Laitteis-to kytketään kuvan 8.15 mukaisesti. Mittausignaalina voidaan käyt-tää vaikka musiikkia kasettinauhurilta. Ensimmäisen mittauksen avulla saadaan selville kaiutinten ja mittausmikrofonin välinen kul-kuu-aikaviive. Seuraavaksi systeemin aikaikkuna viivästetään kohdal-leen analysaattorin sisäisen viivelaitteen avulla kulku-aikaviivettä vastaavasti.

Toistoa pystytään mittaamaan ja ekvalisoimaan yleisön huomaamat-ta esityksen aikana muuttuneiden olosuhteiden mukaiseksi. Nämä muutokset ovat usein merkittäviä, kuten edellä todettiin. Yleisön re-aktiot ja muu satunnainen melu pyrkii pilaamaan mittaukset. Siksi analysaattori tarkkailee signaalien vastaavuutta ja keskimääräistä-mällä pienentää satunnaisen kohinan vaikutusta. Silti on syytä tehdä useampia mittauksia tilastollisesti varmemman tuloksen saamiseksi.

Kun analysaattori kytketään ohjaamaan vielä taajuuskorjaimia, ol-laan vihdoin päästy systeemiin, jolla äänentoistoa voidaan automaatisesti korjata akustisen tilan, kaiutinjärjestelmän, yleisön ynnä mui-den vaikutusten mukaan. Tällöin äänitarkkailijalta säästyy mittailuun ja ekvalisoimiseen sekä järjestelmän nollaamiseen paikan ja olosuh-teiden mukaiseksi menevä aika, ja hän voi keskittyä varsinaiseen työhönsä eli sointien miksaamiseen.

Kuva 8.15 SIM-analysaattori

