

4. SÄHKÖAKUSTIIKAA

Sähköakustiikalla tarkoitetaan ilmassa tai muussa väliaineessa (esim. puussa kitaraan asennettavan kontaktimikrofonin tapauksessa) etenevän äänen muuntamista sähköiseen muotoon, sen sähköistä käsittelyä ja jälleenmuuntamista kuultavaan muotoon. Ketjun ääripäissä toimivat mikrofonit ja kaiuttimet tai kuulokkeet, joiden toiminnot ovat toisilleen vastakkaiset.

4.1. Mikrofoni

Mikrofoni on akustosähköinen muunnin, joka muuttaa paineen tai ilman hiukkasnopeuden vaihtelut jännitteen vaihteluiksi. Tällöin tietty paine vastaa tiettyä jännitettä. Mikrofonin herkkyys ilmoitetaan lukuna, jonka yksikkö on mV/Pa tai mV/ μ b (Pa = Pascal, μ b = mikrobaari, molemmat paineen yksiköitä). 1 Pa = 10 μ b. Herkkien kondensaattorimikrofonien herkkyys saattaa olla luokkaa 10 mV/Pa, epäherkempien dynaamisten mikrofonien n. 1 mV ... 2 mV/Pa.

Mikrofonista saatavan signaalin taso on joka tapauksessa hyvin pieni, n. -60 dBu ... -30 dBu, eli jännitteinä n. 1 mV ... 30 mV. Taso nousee yleensä ainoastaan hetkellisesti volttiluokkaan.

Siirrettäessä signaalia näin pienillä tasoilla on ongelmana herkkyys häiriöille. Tästä syystä mikrofonilinjojen pituus pyritään aina rajoittamaan mahdollisimman lyhyeksi. Balansoitu, matalaohminen syöttö mahdollistaa tosin jopa parin sadan metrin vedot, mutta pitkiä välimatkoja signaali pyritään aina siirtämään linjatasoisena, taso > 0 dBu.

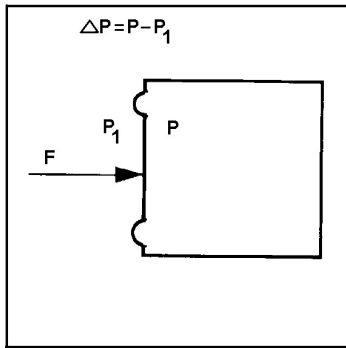
Mikrofonin syöttöimpedanssi on nykyään lähes aina matala, korkeintaan muutamia satoja ohmeja. Matalaimpedanssiseen mikrofoniin voidaan liittää pitkähkö johto ilman, että häiriöetäisyys sanottavasti huononee. Nykyaikaisille matalaohmisille mikrofoneille suositellaan yleensä kuormitusimpedanssia, joka on muutamia kertoja syöttöimpedanssia suurempi. Näin esim. 200 ohmin mikrofoni voidaan mainiosti kytkeä liitäntään, jonka tuloimpedanssi on 600 ohmia.

4.1.1. Paine- ja painegradienttimikrofoni

Kaikille mikrofoneille, tyypistä riippumatta on yhteistä jonkin tyyppinen kalvo.

Kuva 4.1.1 esittää ns. painemikrofonin (pressure microphone) periaatetta. Kalvon takana on suljettu tila. Kun ilmanpaine kapselin ulkopuolella on suurempi kuin sisällä, vaikuttaa kalvoon voima F , joka saa sen liikkumaan sisäänpäin. Jos ulkopuolisen ilman paine on pienempi, liikkuu kalvo vastaavasti taaksepäin. Jos mikrofoni on tyypil-

tään dynaaminen, kiinnitetään kalvoon kela, joka sijoitetaan magneettikenttään. Tällöin kelaan syntyy jännite kelan liikkua.



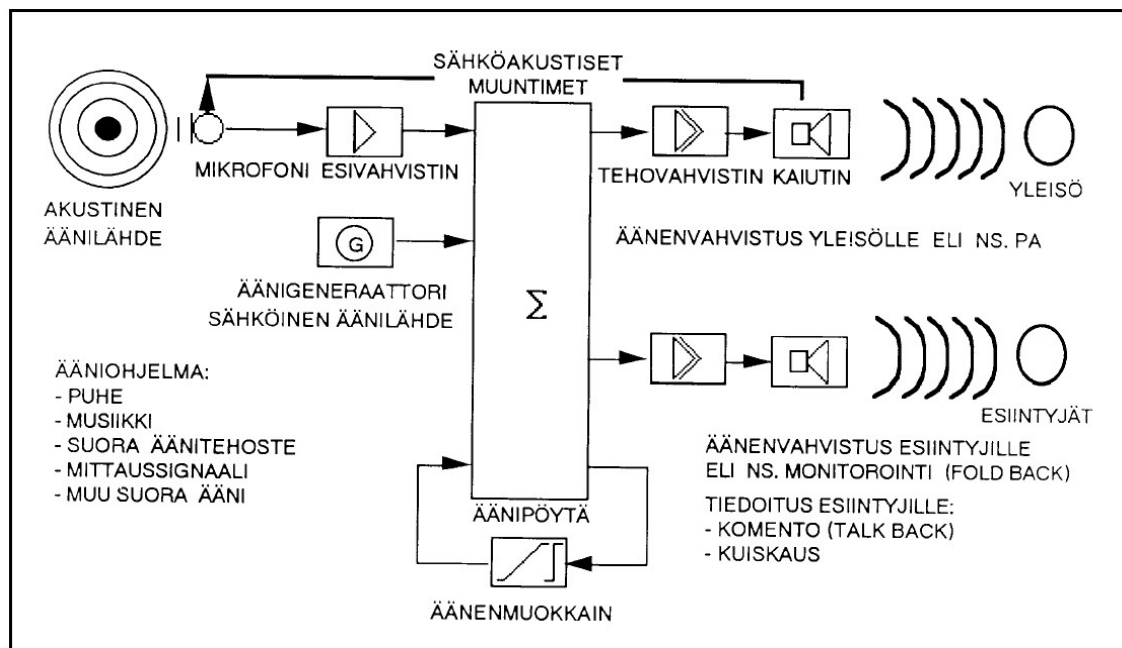
Kuva 4.1 Painemikrofoni. Paine-ero ΔP aiheuttaa kalvoon kohdistuvan voiman F . Tällöin $F = A \cdot \Delta P$, jossa $A =$ kalvon pinta-ala.

Jos kuvatonlainen mikrofoni on äänen aallonpituuksiin nähden riittävästi pieni, kuten yleensä on, toimii mikrofoni pyöreällä suuntakuviolla. Mikäli painemikrofonista poistetaan takakammio, muuttuu mikrofoni suuntaherkäksi. Suoraan sivulta päin saapuva paineaalto ei aiheuta erisuuruisia ilmanpaineita kalvon etu- ja takapuolille. Kalvo ei liiku. Mikrofoni muuttuu painegradientiksi. Vain edestä- ja takapäin tulevat paineaallot aiheuttavat kalvon liikkeen, ja suuntakuviot ovat kahdeksikon muotoiset.

Yllä kuvattuja periaatteita voidaan yhdistellä eri tavoin. Mekaanisesti näin voidaan tehdä sijoittamalla erilaisia aukotettuja kappaleita kalvon etu- ja takapuolelle ja sähköisesti vastaavasti käyttämällä kahta kalvoa eri tavoin vaiheistettuna ja summattuna. Summaamalla kahdeksikko ja pallo syntyy kardioidi- ja herttakuvio. Kahdeksikkomikrofonissa kalvon eri puolilta saapuvat paineaallot aiheuttavat eri suuntiin tapahtuvan liikkeen ja näin ollen erisuuntaisen jännitteen. Tällöin suoraan takaa tulevan ääniaallon aiheuttama jännite kumoutuu.

Perussuuntakuvioiden (pallo, hertta, kahdeksikko) lisäksi on kehitetty monia erikoiskuviota, jotka nekin saadaan muodostettua pallon ja kahdeksikon erilaisista kombinaatioista. Korkeampien kertalukujen suuntakuviot ovat monimutkaisempia, ja vaativat enemmän kuin kaksi elementtiä. Myös näitä kuvioita voi toteuttaa mekaanisesti (vrt. ns. haulikkomikrofonit). Erilaisia suuntakuviota on esitetty kuvassa 4.2.

Kuva 4.2: Mikrofonin suuntakuviota.



4.1.2. Mikrofonin taajuusvaste ja lähiäänivaikutus

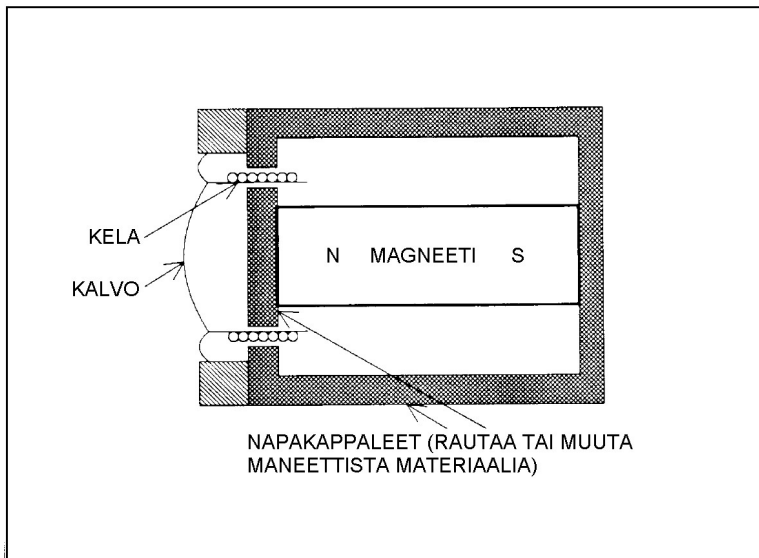
Mikrofonien taajuusvasteet ilmoitetaan yleensä samoin kuin muidenkin laitteiden, joko käyränä tai taajuusalueena desibelirajoinen. Taajuusvasteen luonne riippuu käyttötarkoituksesta: Solistikrofoneissa suositaan ylempällä keskialueella (n. 4 - 8 kHz) ns. presenskorostusta. Monissa mikrofoneissa on lisäksi säädettävä bassoleikuri matalien häiriöäänten vaimentamiseksi.

Suuntaaville mikrofoneille on usein tyypillistä se, että bassopäässä taajuusvaste on riippuvainen äänilähteen etäisyydestä mikrofonin nähden. Tällöin matalat äänet korostuvat lähikäytössä. Ilmiötä kutsutaan lähiäänivaikutukseksi (proximity effect). Ilmiöstä saattaa olla hyötyä esim. taitavan vokalistin käytössä, mutta se aiheuttaa helposti ongelmia mm. poimittaessa akustisten soittimien ääntä mikrofonin lähisijoituksella. Toisaalta ilmiötä voi käyttää hyväksi: Mikrofoni, jonka taajuusvaste kaukoetäisyydeltä näyttää bassoköyhältä, voi hyvinkin toimia esim. sähköbasson äänittämisessä suoraan instrumenttivahvistimen kaiuttimen edestä.

4.1.3. Dynaaminen mikrofoni

Dynaaminen liikkuvakelainen mikrofoni (moving coil mic) toimii periaatteessa samalla tavalla kuin dynaaminen kaiutin, mutta päinvastaiseen suuntaan. Kuva 4.1.3. esittää dynaamisen mikrofonin toimintaperiaatetta. Dynaamisten mikrofonien herkkyys on pääsääntöisesti pienekkö. Tästä syystä ne sopivat kohteisiin, joissa voidaan käyttää lähimikrofonitekniikkaa.

Kuva 4.3: Dynaaminen mikrofoni



Dynaaminen mikrofoni on perusrakenteeltaan varsin yksinkertainen, eikä se edellytä aktiivisten rakenneosien, kuten transistoreiden, käyttöä. Niinpä se on helppo rakentaa vahvaksi. Kovaan lavakäyttöön tarkoitetut mikrofonit kuuluvatkin yleensä tähän ryhmään. Dynaami-

nen mikrofoni on monissa tapauksissa myös hinnaltaan halvempi kuin kondensaattorimikrofoni.

Dynaamisia mikrofoneja valmistetaan monenlaisina versioina eri käyttötarkoituksiin. Valintakriteerit voivat olla mm. seuraavia:

- käsittelyäänivaimennus
- lähiiäänivaikutus
- poksahdusäänien vaimennus varsinkin puhe- ja laulukäytössä (tätä ominaisuutta parannetaan erityisellä vaimentimella, "pop filterillä")
- kiertoalttius saliaäänikäytössä (riippuu mm. suuntakuviosta)
- pääasiallinen käyttötarkoitus; tuleeko mikrofoni yleiskäyttöön vai käytetäänkö sitä jollekin määrätulle äänilähteelle.

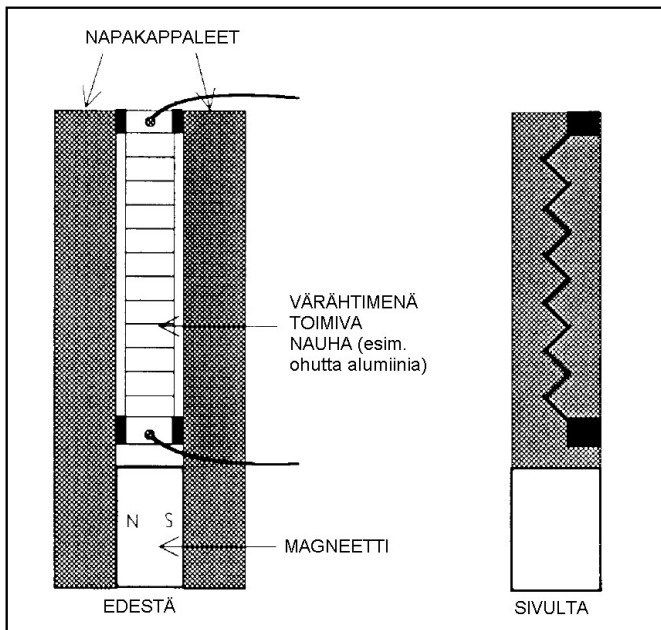
Dynaamisista mikrofoneista löytyy lähes kaikkia suuntakuviövaihtoehtoja kahdeksikon ollessa kuitenkin harvinainen. Saliaäänikäytössä kardioidi- superkardioidi ja hyperkardioidimikrofonit ovat yleisimpiä.

4.1.4. Nauhamikrofoni

Nauhamikrofonit (ribbon microphone) ovat periaatteessa erikoisella tavalla toteutettuja dynaamisia mikrofoneja. Nauhamikrofonissa kalvona toimii voimakkaaseen magneettikenttään ripustettu ohut metallinauha, jonka päihin jännite muodostuu. Nauhan impedanssi ja muodostuva jännite ovat hyvin pieniä, josta syystä rakenteeseen liittyy yleensä muuntaja.

Ominaisuuksiltaan ja käytöltään nauhamikrofonit sijoittuvat dynaamisten- ja kondensaattorimikrofonien välimaastoon. Suuntakuviot ovat joko erilaisia kardioidia tai kahdeksikkoja. Kuva 4.1.4 esittää nauhamikrofonin rakennetta.

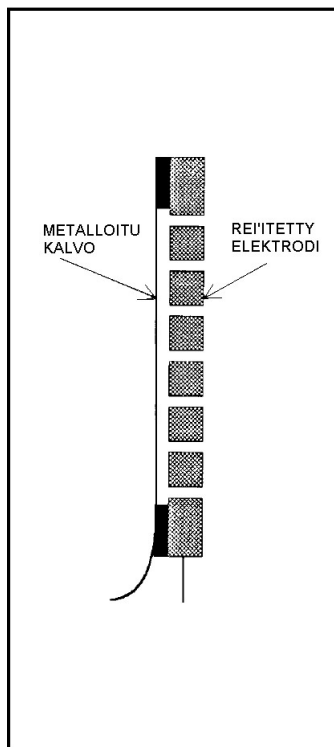
Kuva 4.4: Nauhamikrofoni



4.1.5. Kondensaattorimikrofoni

Kondensaattorimikrofonissa (condenser microphone) kalvona toimii ohut, metallista valmistettu tai metalloitu folio. Tämä muodostaa yhdessä kalvon välittömään läheisyyteen sijoitetun elektrodin kanssa kondensaattorin, jonka kapasitanssi vaihtelee kalvon ja elektrodin välisen etäisyyden mukaan. Tämä ei sinänsä vielä tee laitteesta mikrofonia, mutta jos napojen välille tuodaan tasajännite (ns. polarisatiojännite) vastusten kautta, saadaan äänisignaali "ratsastamaan" tasajännitteen päällä. Mainitusta syystä kondensaattorimikrofoni tarvitsee aina ulkopuolisen jännitelähteen.

Kuva 4.5: Kondensaattorimikrofoni



Kondensaattorimikrofonin antama signaali on tasoltaan ja impedanssiltaan sopimaton tavallisille mikrofoni vahvistimille. Tästä syystä mikrofoniin yhteyteen, yleensä sen runkoon, rakennetaan aina etuvahvistin, joka tekee liitännän esim. äänipöytään mahdolliseksi. Etuvahvistin toteutetaan nykyään useimmiten ns. kanavatransistoreilla eli FET:eillä (Field Effect Transistor), mutta myös perinteisiä putkivahvistimia käytetään yhä, onpa viime vuosina tullut markkinoille muutamia täysin uusia putkisovelluksia.

Sekä itse mikrofoni että sen vahvistin tarvitsevat siis ulkopuolista jännitettä, joka järjestetään yleensä ns. keinojohto eli phantomjännitteenä. Phantom-jännite on standardoitu 48 V:iin, mutta muitakin jännitteitä saattaa esiintyä. Kuva 4.1.5/1 esittää kondensaattorimikrofonin periaatetta.

Useimmissa ammattikäyttöön tarkoitetuissa äänipöydissä phantomvitalähde on valmiina. Tapauksissa, joissa näin ei ole, voidaan käyttää erillistä virtalähdettä.

Kondensaattorimikrofonin suuntakuvio on mahdollista tehdä säädettäväksi käyttämällä kahta kalvoa rei'itetyn elektrodin molemmilla puolilla. Tällöin suuntakuvio voidaan määrätä sekoittamalla kalvoista saatavia signaaleja eri suhteissa ja vaiheissa. Kuvassa 4.1.5/2 on esitetty erään tällaisen mikrofoniin yksinkertaistettu rakenne ja kytkentä.

4.1.5.1 Kondensaattorimikrofonien käyttö

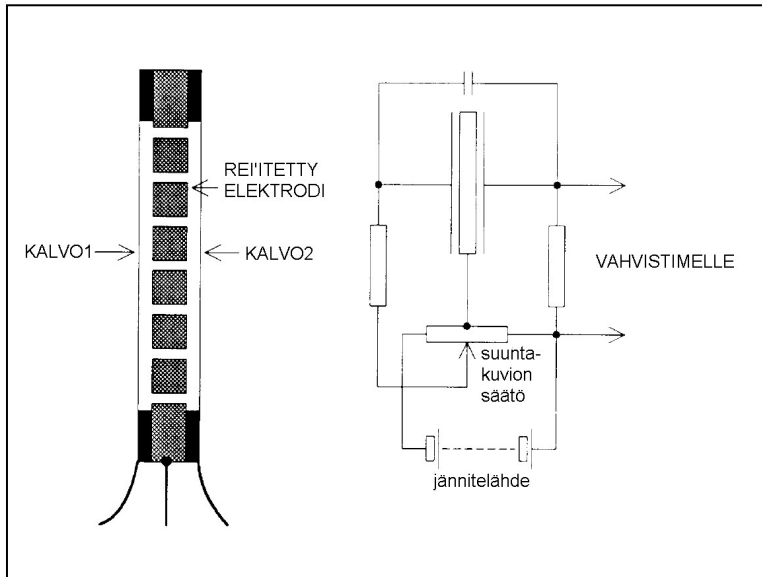
Kondensaattorimikrofoneille ovat luonteenomaisia ominaisuuksia erittäin hyvä äänenlaatu ja monipuoliset käyttömahdollisuudet. Ne ovat usein oikeita valintoja vaativiin äänitys- ja saliaänisovelluksiin. Mikrofonien herkkyys on korkea, mikä tekee mahdolliseksi myös kauempana äänilähteestä tapahtuvan tallennuksen.

Mikrofoniryhmästä löytyy erilaisia versioita lähes kaikkiin käyttötarkoituksiin. Viime vuosina eräät kondensaattorimikrofonit ovat rai-vanneet tietään myös dynaamisten mikrofonien perinteiselle kentälle raskaaseen lavakäyttöön. Ne mikrofonityypit, joita ei tähän ole tar-

koitettu, saattavat kuitenkin olla arkoja kosteudelle ja raa'alle käsittelylle.

Kondensaattorimikrofoni (varsinkaan herkkä) ei aina siedä yhtä suuria äänenpaineita kuin dynaaminen mikrofoni. Asia kannattaa tarkastaa varsinkin silloin, kun mikrofonia aiotaan käyttää voimakkaan äänilähteen kuten kitaravahvistimen läheisyydessä.

Kuva 4.6 :
Suuntakuvoiltaan säädettävä kondensaattorimikrofoni.



4.1.6 Elektreettimikrofoni

Elektreettimikrofoni (electret condenser microphone) on oikeastaan kondensaattorimikrofonin erikoistyyppi, joka ei tarvitse polarisaatiojännitettä, koska kapseli on valmistettu pysyvästi polarisoidusta materiaalista. Mikrofonin liittyvän etuvahvistimen vuoksi käyttöjännite kuitenkin tarvitaan, mutta se voi olla paljon pienempi kuin 48 V, ja jännitelähteenä voidaan käyttää esim. paristoa.

Elektreettimikrofoni kehitettiin alunperin harrastuskäyttöä ajatellen laitteisiin, joista ei ollut saatavilla suurta käyttöjännitettä (esim. kannettavat radionauhurit), mutta joissa mikrofoneilta edellytettiin suurempaa herkkyyttä ja parempaa äänenlaatua, kuin mitä halvimmilla dynaamisilla mikrofoneilla voitiin odottaa.

Harrastajakäyttöön tarkoitetuille erillisille elektreettimikrofoneille on tyypillistä se, että ne tarvitsevat toimiakseen mikrofoniin sisään sijoitetun pienen pariston. Toteutustavan huono puoli on tietysti se, että paristo pitää muistaa vaihtaa ajoittain.

Elektreettiperiaatteella on mahdollista rakentaa suhteellisen hyvälaatuisia, pienikokoisia mikrofoneja. Niinpä nämä mikrofonit ovat löytäneet tiensä myös ammattikäyttöön; monet pienoismikrofonit (ns. lavalier- eli kaulamikrofonit) ja levymikrofonit (PZM ym) toimivat

tällä periaatteella. Pieni virrankulutus on tärkeää varsinkin paristoilla toimivissa laitteissa, mm. langattomien järjestelmien lähettimissä. Ammattikäyttöön tarkoitetut levy mikrofonit on kuitenkin sovitettu toimimaan normaalilla phantom- jännitteellä.

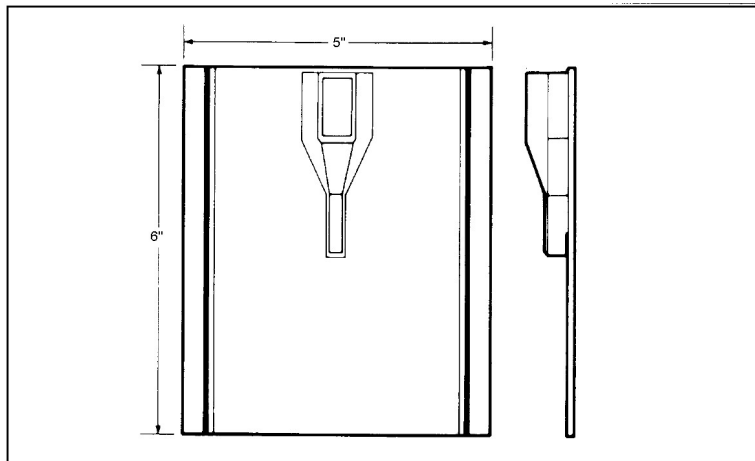
4.1.7 Levymikrofoni

Levymikrofoni eli painevyöhykemikrofoni (PZM, Pressure Zone Microphone) on alun perin amerikkalaisen Crown - yhtymän kehittämä mikrofonityyppi, jota nykyään valmistaa moni muukin valmistaja. Mikrofoni on levyäinen, ja se on tarkoitettu käytettäväksi suurehkoilla pinnalla. Tällainen pinta voi olla esim. pöytä, seinä, lattia, tai katto. Suuntakuvio on puolipallon muotoinen muutamia erikoistyyppisiä lukuun ottamatta.

Toimintaperiaate antaa muutamia etuja:

- Mikrofoni poimii äänen aivan suurehkon pinnan välittömästä läheisyydestä. Tällöin ei ko. pinnan aiheuttama heijastuma pääse summautumaan erivaiheisena alkuperäiseen signaaliin joka värittäisi ääntä.
- Kapselin sijaintipaikassa sekä suoraan mikrofoniin saapuva että pinnasta heijastuva ääni ovat samassa vaiheessa. Tämä "painevyöhyke" siis vahvistaa tasoa ja parantaa signaali/kohinasuhdetta 6 dB.
- Suuntakuvio mahdollistaa laajahkon alueen kattamisen pienellä mikrofoni määrällä. Ominaisuutta voi käyttää hyväksi esim. paneelikeskustelujen tallennuksessa tai teattereiden seuranta-järjestelmissä.

Kuva 4.7:
Erään levymikrofonin rakenne.



4.1.8 Kontaktimikrofoni

Kontaktimikrofoni poikkeaa tavanomaisesta mikrofoniasta siinä, että se kiinnitetään suoraan värähtelevään kappaleeseen kuten kitaran kanteen. Tämantyyppisillä mikrofoneilla saavutetaan usein tavallista

parempi kiertoetäisyys; onhan muunnin niin lähellä äänilähdettä kuin mahdollista.

Takavuosina kontaktimikrofonit olivat lähes poikkeuksetta tarkoitettu käytettäväksi muusikoiden omien soitinvahvistimien yhteydessä. Mikrofonit toimivat dynaamisella - tai jopa kidemikrofonin - periaatteella. Niiden lähtöimpedanssi oli suurehko ja kytkentä epäsymmetrinen, eivätkä ne näistä syistä sopineet käytettäväksi tavanomaisten mikrofonien tavoin pitkän kaapelin välityksellä äänipöytään kytkettynä.

Yllämainitun tyyppisiä kontaktimikrofoneja on vieläkin saatavilla, mutta jo 70-luvulta lähtien on saatavissa ollut vaativaan ammattikäyttöön sopivia, symmetrisellä ja matalaohmisella syötöllä varustettuja tyyppisiä. Näistä tunnetuin lienee C-Ducer, nauhamainen kontaktimikrofoni, joka liimataan kaksipuolisella teipillä soittimeen. Mikrofonin toimii eräänlaisella kondensaattoriperiaatteella ja vaatii toimiakseen oman etuvahvistinyksikkönsä, joka saa käyttöjännitteensä joko paristoista tai phantom-syötöstä. Nauhoja on saatavilla eripituisina eri soittimia varten.

Kuten mainittiin, on kontaktimikrofonin ehdoton etu sen epäherkkyys kierrolle, mikä tekee siitä sopivan nimenomaan salivahvistuskäyttöön. Äänenlaadullisesti se ei välttämättä ole ongelmaton. Soittimen ääni syntyy kokonaisuutena, johon vaikuttavat eri osien, esim. kielten ja rungon, värähtelyt. Näiden kaikkien poimiminen kontaktimikrofonilla ei aina ole mahdollista. Toinen ongelma on se, että muusikko ei välttämättä ole hyvillään kun kalliin instrumentin kanteen liimataan teippiä. Kontaktimikrofonia käytettäessä välittyvät soittimen käsittelyäännet helposti kuuluville.

4.2. Mikrofonietuvahvistin

Kuten edellä tuli mainittua, on mikrofonista saatavan signaalin taso hyvin matala. Jotta mikrofonista saatavaa signaalia voitaisiin muokata ja siirtää eteenpäin, tulee sitä vahvistaa huomattavasti. Tätä tarkoitusta varten käytetään mikrofonietuvahvistinta, joka usein sisältyy äänipöytään mutta voi olla myös erillinen laite.

Mikrofonin syöttämän signaalin taso vaihtelee laajoissa rajoissa riippuen käytetyn mikrofonin tyyppistä, sen sijoituksesta äänilähteeseen nähden ja tietysti itse äänilähteestä. Tästä syystä etuvahvistimen vahvistus (gain) on yleensä säädettävissä, esim. 0 dB...60 dB.

Mikrofonietuvahvistin voidaan toteuttaa monella tavalla. Aikaisempiin kytkentöihin liittyi lähes aina muuntaja. Viime vuosina muuntajattomat rakenteet ovat yleistyneet huomattavasti.

4.3. Tehovahvistin

Toiminnallisesti kaiutin ja kuuloke on mikrofonin vastakohta, sähköakustinen muunnin. Sen avulla pyritään muuttamaan sähköistä tehoa akustiseksi tehoksi.

Normaaleissa audiolinjoissa siirrettävät tehot ja tasot ovat niin pieniä, ettei niillä sellaisenaan voida ohjata kaiuttimia varsinkaan, kun tämän muuntimen hyötysuhde on hyvin pieni. Tästä syystä ennen kaiutinta tarvitaan teho- eli päätevahvistin (power amplifier), joka muuttaa linjatasoisen signaalin kaiuttimelle sopivaksi ja syöttää kaiuttimeen riittävän tehon.

Nykyään useimpien dynaamisten kaiuttimien nimellisimpedanssi on 4 ... 16 ohmia. Sähköinen tehonkesto vaihtelee muutamasta watista aina kilowattiin asti.

Päätevahvistimen syöttämän tehon, jännitteen ja kuorman impedanssin välillä pätee vanha kunnan Ohmin laki:

$$P = \frac{U^2}{Z}$$

jossa P = teho, U = jännite ja Z = kuorman impedanssi.

Jos esim. 8 ohmin kuormaan halutaan syöttää 100 W tehoa, tarvitaan 28 V:n jännite, koska $P = (28 \text{ V})^2/8 \text{ ohm} = 100 \text{ W}$.

Kaiuttimen läpi kulkevan virran suhteen pätee:

$$P = I^2 Z, \quad I = \sqrt{\frac{P}{Z}}$$

jossa I = virta.

Tämän yhtälön mukaan 100 W:n teho 8 ohmin kuormaan syntyy n. 3,5 ampeerin virralla, koska $P = (3,5 \text{ A})^2 \times 8 \text{ ohm} = 100 \text{ W}$.

Nykyään ei ole harvinaista, että käytetään useiden satojen wattien päätevahvistimia. Vahvistimen tehon ilmoittaminen hevosvoimissa ei oikeastaan olisikaan aivan mahdoton ajatus, sillä noin 800W vastaa yhtä hevosvoimaa.

4.3.1 Tehovahvistimeen liittyvää termistöä

Koska tarvittavat tehot, virrat ja jännitteet ovat kuvattua suuruusluokkaa, on luotettavan päätevahvistimen rakentaminen melko vaativa tehtävä. Lisäksi on huomattava, että kaiuttimen aiheuttama kuorma käytännössä vaihtelee taajuuden, tehon, lämpötilan ja jopa sig-

naalin aaltomuodon mukaan. Päätevahvistimen on siis kyettävä syöttämään tulosignaalia orjallisesti seuraavaa jännitettä jatkuvasti vaihtelevaan kuormaan.

4.3.1.1 Hyötysuhde

Konventionaalisesti toteutetut päätevahvistimet toimivat n. 50 % ... 75 % hyötysuhteella. Ne siis ottavat sähköverkosta tehoa enemmän, kuin mitä ne syöttävät kaiuttimeen. Loppu energia muuttuu lämmöksi, ja se saattaa suurissa päätevahvistimissa olla jopa satojen wattien luokkaa. Tästä johtuen päätevahvistin kuumenee, ja siksi se on varustettava kunnollisella jäähdytyksellä.

4.3.1.2 Lähtö- eli syöttöimpedanssi ja vaimennuskerroin

On edullista, että vahvistimen lähtöimpedanssi on mahdollisimman pieni. Jos syöttöimpedanssi on suuri, näkyy kaiuttimen impedanssivaste koko yhdistelmän taajuusvasteessa. Äänenlaadullisia ongelmia seuraa varsinkin bassoalueella, jossa korkea syöttöimpedanssi saattaa muuttaa kaiuttimen ns. Q-arvoa.

Päätevahvistimen lähtöimpedanssia sellaisenaan ei yleensä ilmoiteta, sen sijaan kerrotaan vaimennuskerroin (damping factor, DF). Se saadaan jakamalla nimellinen kuormitusimpedanssi syöttöimpedanssilla. Nykyaikaisissa laitteissa DF on 100 tai enemmän, mikä riittää mainiosti. Syöttöimpedanssi on silloin pienempi kuin 80 milliohmia.

Pienin vahvistimille sallittu kuormitusimpedanssi vaihtelee kahdeksasta ohmista jopa yhteen ohmiin tavallisimman arvon ollessa neljä ohmia. Periaatteessa puolitetuun impedanssiin saadaan kaksinkertainen teho, mutta käytännössä näin ei aina ole. Vahvistimien virtalähteet "menevät polvilleen", eli eivät pysty syöttämään vahvistimille täyttä jännitettä suurilla tehoilla ja pienillä kuormitusimpedansseilla.

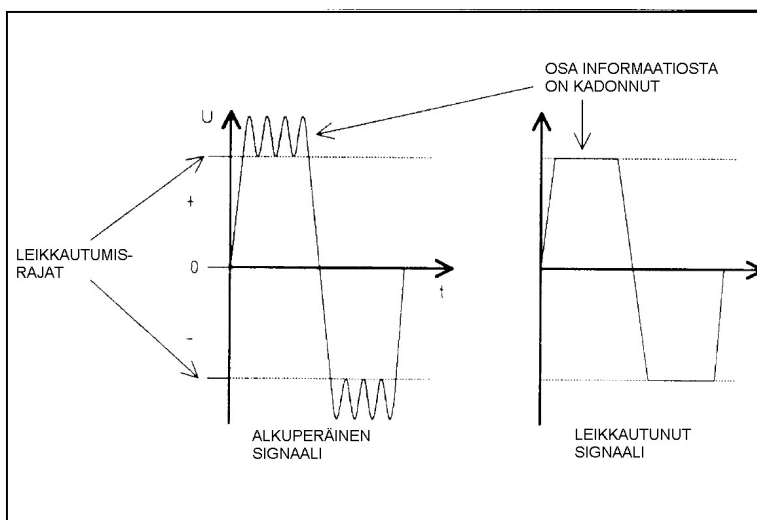
4.3.1.3 Leikkautuminen ja dynaaminen teho

Kaikilla vahvistimilla on signaalitason raja, jota ei voi ylittää. Tämä raja riippuu käyttöjännitteestä, virtalähteen laadusta ja vahvistimen sähköisestä rakenteesta. Jos signaalin tasoa yritetään nostaa tämän rajan yläpuolelle, signaali leikkautuu.

Leikkautumisella tarkoitetaan kuvan 4.8 mukaista signaalimuodon voimakasta vääristymistä. Sen yhteydessä syntyy korkeataajuisia särökomponentteja. Lisäksi voimakkaassa leikkautumisessa saattaa esiintyä huomattavaa informaatiokatoa.

Leikkautumisen aikana ääni kuulostaa epämiellyttävästi säröytyneeltä ja esim. puheen ymmärrettävyys voi täysin kadota. Jos vahvistimeen on kytketty passiivinen monitiekaiutin (esim. normaali hifikaiutin), siirtyvät korkeataajuiset särökomponentit diskanttikaiuttimeen ja saattavat ylikuormittaa ja tuhota sen.

Kuva 4.8: Leikkautuminen ja informaatiokato.



Vahvistimen jatkuvalla teholla tarkoitetaan sitä tehoa, jonka se pysyy täysin leikkautumatta (särölle annetaan yläraja, esim. 0,1 %) syöttämään ilmoitetun suuruiseen (tavallisesti 4 tai 8 ohmin) kuormaan. Tällöin mittauksissa käytetty kuorma on resistiivinen, mitä taas kaiutin ei ole. Kaiuttimen todellinen impedanssi saattaa hetimitäisesti joillain taajuuksilla olla huomattavasti nimellistä pienempi. Erään nimellisimpedanssiltaan 8 ohmisen kaiuttimen impedanssin on havaittu laskevan lähelle kahta ohmia. Tällöin päätevahvistin, joka on mitoitettu vain ihanteellista kuormaa silmälläpitäen, ei toimi parhaalla mahdollisella tavalla, vaan signaali saattaa leikkautua jo huomattavasti alle nimellistehoa vastaavalla lähtöjännitteellä.

Monet vahvistimet pystyvät hetkellisesti tuottamaan nimelliskuormaan jatkuvaa tehoa suuremman tehon. Tätä tehoeroa kutsutaan usein "dynaamiseksi yliohejuusvaraksi" (dynamic headroom). Desibeleissä ilmaistuna se harvoin on suurempi kuin 1 dB ... 2 dB.

Kaiuttimen epäedullisesta impedanssikäyttäytymisestä sen sijaan johtuu se, että valmistajat ovat alkaneet kiinnittää huomiota vahvistimen käyttäytymiseen ääritilanteissa. Asiaa kuvaamaan käytetään usein dynaamisen tehon mittausta (dynamic power). Tällöin tutkitaan, miten suuren hetkellisen tehon esim. 10 millisekunnin ajan vahvistin pystyy antamaan pieniohmiseen kuormaan, esim. 2 ohmiin. Jos vahvistimen rakenne on asiallinen, on kahden ohmin kuormaan syötetyn hetkellisen tehon oltava ainakin kaksinkertainen jatkuvaan, neljän ohmin kuormalla mitattuun tehoon nähden. Muussa tapauksessa signaali saattaa tehuippujen aikana säröytyä.

4.3.1.4 70 voltin ja 100 voltin linja

Koska päätevahvistimesta otetaan suurehko virta pieneen kuormitusimpedanssiin, vaikuttaa siirtojohtojen mahdollinen impedanssi melko voimakkaasti. Jos siirtojohdot ovat pitkiä, saattaa niiden vastus olla jo useiden ohmien luokkaa. Tällöin tehohäviöt saattavat muodostua merkityksellisiksi, josta syystä pitkissä siirtolinjoissa käytetään usein 70 tai 100 voltin siirtojännitetasoa. Asiaa käsitellään tarkemmin tämän kirjan luvussa 7.

4.3.2 Päätevahvistimen rakenteesta

Päätevahvistin rakentuu toisaalta mekaanisista osista ja toisaalta elektroniikasta. Nykyaikana vahvistimen hinta muodostuu suurelta osin virtalähteestä, jäähdytyksestä ja mekaanisesta rakenteesta, jonka tulee olla suurehkon painon takia tukeva. Itse elektroniikka edustaa vain hinnan murto-osaa.

4.3.2.1 Virtalähde

Suuritehoinen, konventionaalisella tekniikalla rakennettu päätevahvistin painaa helposti kymmeniä kiloja. Pääsyyllinen tähän on virtalähde, joka useimmissa tapauksissa koostuu suurikokoisesta verkkomuuntajasta, tasasuuntaajasta ja jännitteensuodatuskondensaattoreista.

Verkkomuuntajalla on kaksi toimintatarkoitusta. Aluksi verkon jännite pitää muuttua vahvistimelle sopivaksi. Toiseksi muuntajan avulla vahvistimen piirit erotetaan galvaanisesti verkosta, mikä on välttämätöntä sähköturvallisuussyistä. Verkkomuuntajalta saatava vaihtojännite tasasuunnataan, ja lopuksi se suodatetaan tasaiseksi jännitteensuodatuskondensaattoreilla.

Virtalähteen laatu vaikuttaa merkittävästi vahvistimen äänenlaatuun. Jos virtalähde (muuntaja ja kondensaattorit) on alimitoitettu, on vahvistin vaikeuksissa, jos kaiuttimen muodostama kuorma on hankala. Edempänä mainittujen ominaisuuksien, hyvän dynaamisen yliohjusvaran ja dynaamisen tehon, saavuttaminen riippuu ennen kaikkea virtalähteen rakenteesta. Heikkolaatuinen virtalähde voi myös aiheuttaa hurinaa.

4.3.2.2 Lämpöhäviöt

Kuten aiemmin mainittiin, on päätevahvistimen hyötysuhde yleensä huomattavasti alle 100 %. Osa häviötehosta (lämmöstä) syntyy jo virtalähteessä ja valtaosa päätetransistoreissa. Häviöteho saattaa suuressa vahvistimessa olla satojen wattien luokkaa. Jäähdytys voidaan järjestää joko riittävän suurien jäähdytysriipojen tai tuulettimen avulla. Käytännössä tuuletin aiheuttaa mekaanista ääntä, mikä tulee ottaa huomioon, jos vahvistin sijoitetaan esitystilaan.

Koska lämpötehot saattavat olla huomattavia, on laittilan ilmanvaihdoista huolehdittava varsinkin useita vahvistimia sisältävissä keskuksissa.

4.3.2.3 Päätetransistorit

Vahvistinelektroniikka voidaan toteuttaa monella tavalla. Varsinaiset päätetransistorit voivat olla tyypiltään perinteisiä, bipolaarisia tai kanavatransistoreja eli FET:tejä (Field Effect Transistor). Molemmilla tavoilla voidaan rakentaa äänenlaadultaan hyviä laitteita. FET on kuitenkin viime vuosina jonkin verran yleistynyt. Tämä perustuu ainakin osittain sen lämpötilakäyttäytymiseen; FET "jarruttaa itse itseään" lämpötilan noustessa.

Tavanomainen transistori käyttäytyy päinvastoin. Tästä syystä FET:eillä toteutettu päätevahvistin saadaan kestävämpään oikosulkuti-

lanteita ilman varsinaisia suojauspiirejä, jollaiset bipolaaritransistoreilla varustettuun vahvistimeen pitää rakentaa. Näin vahvistimen sähköistä rakennetta voidaan yksinkertaistaa.

4.3.3 Tehovahvistimen kohinasta ja säröstä

Nykyaikaisella tekniikalla toteutetuissa päätevahvistimissa on "perinteisen" harmonisen särön esiintyminen harvinaista. Tämä särötyyppi jää useimmiten alle prosentin kymmenesosan vahvistimen käyttökelteisellä tehoalueella. Samoin on kohinan laita. Usein päästään yli 100 dB:n kokonaisdynamiikka-alueeseen. Eroja esiintyy laitemerkeittäin.

1970-luvulla Matti Ojala esitteli maailmalle TIM (Transient Inter-Modulation) - säröä koskevat tutkimuksensa. TIM-särö oli varsinkin silloisten päätevahvistimien ongelma. Samassa yhteydessä Ojala esitti myös ne rakenteelliset seikat, jotka vahvistimissa edesauttavat ko. särötyypin syntymistä.

Nykyään useimmat laadukkaiden, ammattikäyttöön tarkoitettujen vahvistimien valmistajat ovat ottaneet Ojalasta oppia, eikä käyttäjän yleensä tarvitse murehtia TIM-särön esiintymistä. Tilanne oli toisensalainen 1960 - 1970 lukujen vaihteessa, jolloin ongelmana oli jo riittävän laadukkaiden puolijohdekomponenttien saanti.

Päätevahvistimen äänenlaadullisia ominaisuuksia koskeva polemisointi laantui huomattavasti Ojalan tutkimusten tultua julkisuuteen, mutta aiheen ympärille rakennetaan vieläkin eräänlaista "audiomytologiaa", johon ei tässä yhteydessä tarkemmin puututa.

Säröjä käsitellään enemmän 10. luvussa.

4.3.4 Tehovahvistimen kaistanleveys ja reaktiivinen kuormitus

Transienttisärön kannalta pidetään edullisena, jos päätevahvistin pysyy toistamaan huomattavasti audiotaajuuksia suurempia taajuuksia. Tätä käytetään varsinkin hifi-vahvistimien myyntivalttina, taajuusvasteeksi voidaan ilmoittaa esim. 0 Hz ... 200 kHz \pm 1 dB. Nykyaikaisella elektroniikalla taajuusvaste voidaankin ulottaa jopa megahertzeihin asti.

Ammattikäytössä laajaan taajuusvasteeseen liittyy kuitenkin muutamia vaaroja. Vahvistin voidaan joutua kytkemään pitkähkään kaiutinkaapeliin, jolloin itse kaapeli saattaa näkyä kapasitiivisena poikittaiskuormana vahvistimen lähdössä. Tällöin kuuloalueen yläpuolella oleva, kuulumaton häiriösignaali pääsee esteittä vahvistimen läpi, ja kapasitiivinen kuorma näkyy vahvistimen lähdössä oikosulkuna. Tämänäyttöinen häiriösignaali saattaa syntyä ketjuun aikaisemmin kytketyssä, viallisessa laitteessa tai se voi olla liittyy järjestelmän asennusvirheisiin. Seurauksena voi olla vahvistimen vioittuminen. Näiden riskien välttämiseksi ammattikäyttöön tarkoitettujen päätevahvistimien ylärajataajuus rajoitetaan yleensä välille 30 kHz ...

50 kHz. Rajoitus voidaan toteuttaa siten, että se ei sanottavasti huononna transienttisäröominaisuuksia.

Eräs, joskus korkeaan ylärajataajuuteen liittyvä, haitallinen ominaisuus on vahvistimen epästabiilisuus reaktiivisilla kuormilla. Se ilmenee vahvistimen omana värähtelynä, jos kuorma on epäedullinen. Värähtelytaajuus on usein kuuloalueen yläpuolella, ja käytännössä se saattaa aiheuttaa mm. seuraavia ilmiöitä:

- Vahvistin lämpenee voimakkaasti, vaikka signaalia ei syötetä tuloliitintään.
- Diskanttikaiuttimet vaurioituvat, vaikka mitään ääntä ei kuulu.
- Signaali tuntuu vahvistimessa säröytyvän (leikkautuvan) liian aikaisin, mikä onkin luonnollista, koska vahvistin koko ajan syöttää kuuloalueen yläpuolella olevaa signaalia hyötysignaalin lisäksi.

Monet nykyaikaiset vahvistimet selviytyvät kunnialla kapasitiivisesta kuormasta. Asiaan kannattaa kuitenkin kiinnittää huomiota varsinkin silloin, kun joudutaan käyttämään pitkiä kaiutinkaapeleita.

4.3.5 Tasasähkösuojaus

Samoin kuin ylärajataajuutta, käytetään joskus laatukriteerinä myös alarajataajuutta. Vahvistin voidaan rakentaa ns. kokonaan dc-kytketyksi. Tällöin matalin toistettava taajuus on 0 Hz, siis tasavirtaa. Kytkeväntavalla väitetään olevan vaikutusta äänenlaatuun.

Tällainen kytkentä on käyttövarmuuden kannalta huono. Järjestelmään päätevahvistinta ennen kytketyn laitteiden vikatilanteessa saattaa sen lähtöön syntyä tasajännite, jonka tehovahvistin vahvistaa ja siirtää kaiuttimeen. Seurauksena on useimmissa tapauksissa kaiuttimen tuhoutuminen.

Lähes kaikki nykyaikaiset, ammattikäyttöön tarkoitetut päätevahvistimet ovat lähtöasteensa osalta dc-kytkettyjä. Tämä onkin hyvin perusteltua, koska muunlainen rakenne nostaisi vahvistimen hintaa ja saattaisi kiistattomasti huonontaa äänenlaadullisia ominaisuuksia. Tulopiireissä alarajataajuus on rajoitettu esim. 10 Hz:iin, eikä vahvistimen tuloliitintään kytketty tasajännite pääse eteenpäin. Lähtöasteessa päätetransistoreiden ja kaiuttimen välillä ei kuitenkaan ole kondensaattoria, joka estää tasavirran pääsyn kaiuttimeen, jos sitä syntyy itse tehovahvistimessa.

Tasajännitteen syntyminen tehovahvistimen lähtöön on hyvin yleinen ilmiö vahvistimen päätetransistoreiden vioittuessa. Kaiuttimen vioittuminen voidaan estää erityisellä vahvistimeen rakennetulla suojapiirillä, joka tarkkailee kaiutinliitännän jännitettä, ja havaitessaan siellä tasasähköä katkaisee syötön kaiuttimeen. Ammattikäyttöön tarkoitetulta vahvistimelta voidaan edellyttää tällaista piiriä, muussa tapauksessa vahvistin vioittuessaan rikkoo lähes aina myös kaiuttimen.

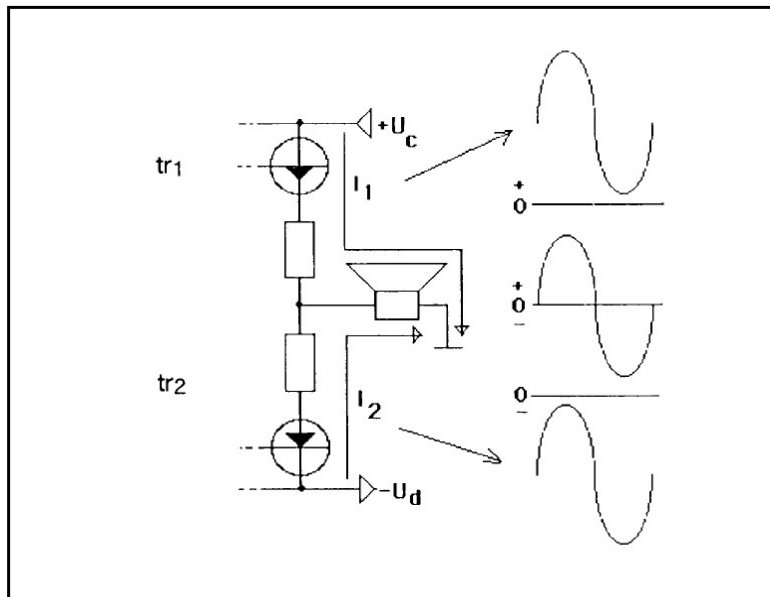
4.3.6 Tehovahvistimien luokitus

Pätevahvistimet jaetaan sähköisen toimintatapsansa mukaisesti luokkiin. Näistä käytännön kannalta merkittäviä ovat A-, AB-, B- ja D-luokat, joista AB on ehdottomasti yleisin. Kuvissa 4.9 ja 4.10 esitetään A- ja B-luokan vahvistimien toimintaa.

A-luokan vahvistin on äänenlaadultaan periaatteessa B-luokan vahvistinta parempi, koska siinä ei esiinny ylimenosäröä (kuva 4.11). Ylimenosäröä syntyy B-luokan vahvistimessa aina signaalin ylittäessä nollakohdan. Särön prosentuaalinen osuus kasvaa tason pienetessä, ja vahvistimen ääni saattaa pienillä äänenvoimakkuuksilla olla "karhea"

A-luokan vahvistimen ongelma on kuitenkin huono hyötysuhde. Jos äänisignaalia ei ole lainkaan, muuttuu vahvistimen koko nimellisteho (ja käytännössä vähän enemmänkin) lämmöksi. Ainoastaan soitetessa vahvistinta täydellä teholla on lämmönmuodostuminen kohtuullista.

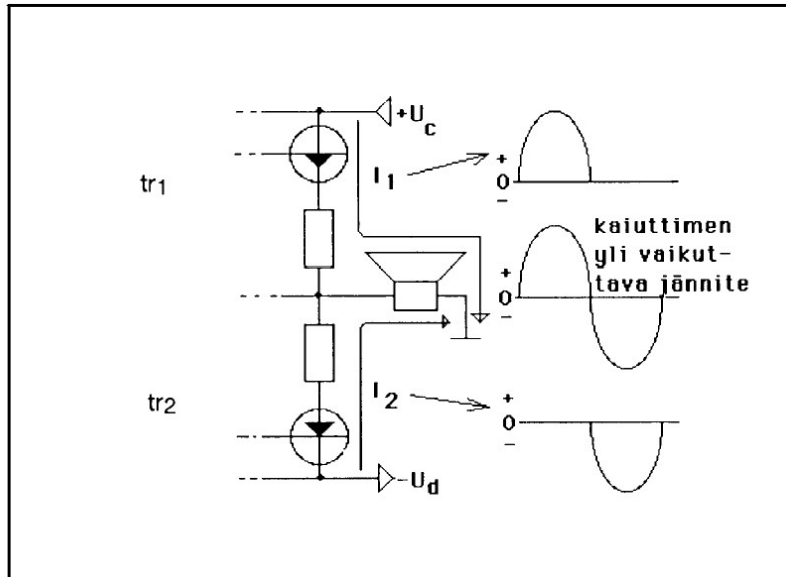
Kuva 4.9. A-luokan vahvistin. Transistorit johtavat jatkuvasti. Signaalin 0-kohdassa virta kulkee pelkästään transistorien läpi. Signaalin poiketessa nollassa ovat transistorien tr_1 ja tr_2 läpikulkevat virrat (ja niiden yli vaikuttavat jännitteet) eri suuruisia, jolloin virta kulkee myös kaiuttimen läpi.



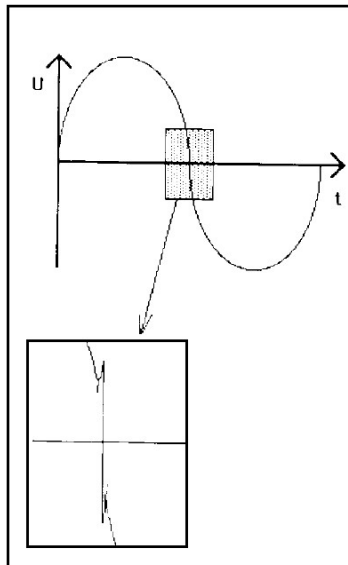
Käytännön äänisignaaleissa huippu- ja keskimääräisen tehon suhde on kuitenkin n. 8...12 dB:n luokkaa, ja voidaankin sanoa, että A-luokan vahvistin on käytännössä vähintään nimellistehonsa kokoinen lämpöpatteri. Tästä johtuen tehokkaan vahvistimen koko, paino ja hinta muodostuu suuren jäähdystarpeen takia kohtuuttomaksi. Tästä huolimatta maailmalla rakennetaan joitakin keski- ja pienitehoisia (ja huippuhintaisia) A-luokan vahvistimia ns. audiofiilikäyttöön.

B-luokassa hyötysuhde paranee, koska päättransistorien kautta kulkeva virta on verrannollinen signaaliin. Käytännössä lämpöä syntyy vain murto-osa nimellistehosta. Koska vahvistimessa kuitenkin esiinny ylimenosäröä, on A- ja B-luokan toimintoja yhdistetty AB-luokaksi, jossa molempien toimintatapojen hyvät puolet pyritään yhdistämään.

Kuva 4.10. B-luokan vahvistin. Transistorit johtavat vuorotellen. Signaalin ollessa negatiivinen kulkee transistorin tr_2 läpi virta I_2 . Kaiuttimen yli muodostuu jännite molemmissa tapauksissa.



Kuva 4.11: Ylimenosärö



AB – luokan vahvistin toimii pienellä teholla A – luokassa. Tämä tarkoittaa sitä, että päätetransistorien läpi kulkee aina hieman virtaa. Tätä kutsutaan bias- eli esivirraksi. Tähän liittyy päätevahvistimissa useimmiten esiintyvä huolto: esijännitteen säätö. Vasta suuremmilla signaalitasoilla laite pystyy toimimaan B – luokan vahvistimen tavoin, eli signaalin puoliaalto kerrallaan. AB – luokan vahvistimessa saadaan ylimenosärön prosentuaalinen osuus pudotettua huomattavasti B – luokkaa alemmaksi, minkä takia se onkin nykyään suosituin vahvistimen rakenne. Huonona puolena voidaan mainita B – luokkaa hieman suurempi lämmönmuodostus: kun vahvistinta ei käytetä laitteen biasvirta muuttuu lämmöksi. Käytännössä lämmönmuodostus on kuitenkin hallittavissa.

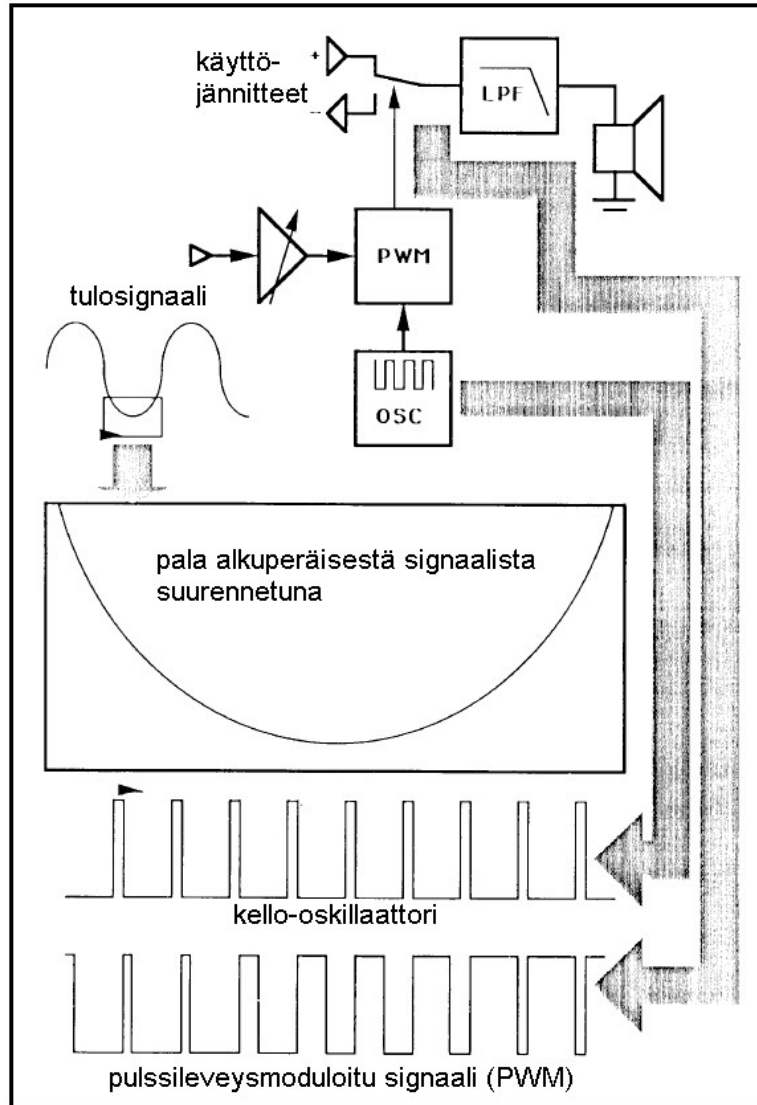
D-luokka edustaa uusinta vahvistimien rakennetapaa. Kuva 4.12 esittää D-luokan vahvistimen toimintaperiaatetta. Laitteen tärkein toiminta-ajatus on se, että lämpöä muodostuu mahdollisimman vähän, kun päätetransistorit (kytkin) ovat aina joko täysin kiinni (tehoa ei synny) tai täysin auki (kaikki teho siirtyy kuormaan).

Tämäntyyppisen vahvistimen hyötysuhde voi teoriassa olla lähellä sataa prosenttia. Tällöin virtalähde voidaan mitoittaa pienemmäksi ja jäähdytyksen tarve on mitätön, jolloin vahvistin voi ulkomitoiltaan ja kooltaan olla huomattavasti tavanomaista pienempi. Jos virtalähde vielä toteutetaan ns. switching-mode- eli hakkuriperiaatteella, on periaatteessa mahdollista valmistaa vaikkapa kilowatin päätevahvistin, joka painaa vain pari kiloa.

D-luokan vahvistimeen liittyy kuitenkin muutamia teknisiä seikkoja, joiden hallitseminen vielä tätä kirjoitettaessa on hyvin vaikeaa. Vahvistimeen liittyvä, ennen kaiutinta sijaitseva alipäästösuodatin on hyvin vaikeaa mitoittaa siten, että se toimii kunnolla erilaisilla kaiutinkuormilla. Tästä syystä D-luokan vahvistin voisikin ehkä olla tulevaisuuden aktiivikaiuttimen tehollinen lähde, siinäpä vahvistin aina syöt-

tää yhtä ja samaa kaiutinta. Toinen ongelma on se, että laitteessa tarvittavat, erittäin nopeat tehopuolijohteet ovat yhäkin kalliita ja vaikeasti saatavissa. Nämä lienevät syynä siihen, että D-luokan vahvistin ei ole vakiintunut ammattikäytössä. Vain muutamat valmistajat ovat tuoneet markkinoille laitteitaan, usein vetääkseen ne lyhyehkön ajan kuluttua takaisin.

Kuva 4.12: D luokan vahvistin.



4.3.7. Rakenteiden keventämisestä

Koska vahvistimen painavin osa on virtalähde, tuntuu loogiselta etsiä rakenneratkaisuja, jotka keventävät sitä. Eräs viime vuosina yleistynyt menetelmä on hakkurivirtalähteen käyttö.

Hakkurivirtalähde voi olla ns. ensiö- tai toisiotyypin. Toisiohakkureita käytetään jännitestabilointiin mm. vaativassa teollisuuselektro-

niikassa, kun halutaan hyvin stabiilia ja häiriöistä vapaata jännitesyöttöä.

Tehovahvistimissa käytetään ensiö hakkureita. Tällöin verkkojännite tasasuunnataan ja suodatetaan jo ennen verkkomuuntajaa. Hakkurin avulla vaihtojännitteen taajuus nostetaan korkeaksi, muutamiin kymmeneen kilohertzeihin. Kun taajuus on riittävän korkea, voidaan käyttää huomattavasti tavanomaista pienikokoisempaa muuntajaa, ja käytännössä saavutetaan olennainen painon ja koon pieneneminen.

Toinen tapa keventää rakennetta on pyrkiä pienempiin lämpöhäviöihin ja tämän kautta kevyempiin jäähdytyslaitteisiin. Tätä varten eräät valmistajat ovat kehittäneet erilaisia monijännitevahvistimia, jotka käyttävät useita käyttöjännitteitä. Ideana on, että suurempi käyttöjännite kytkeytyy vain signaalin huippukohdissa ja näin varsinkin tyhjäkäyntitehoa saadaan rajoitettua. Eri valmistajat nimittävät toimintatapoja eri tavoin, muun muassa H-luokka – ilmaisua on käytetty.

4.4 Kaiutin

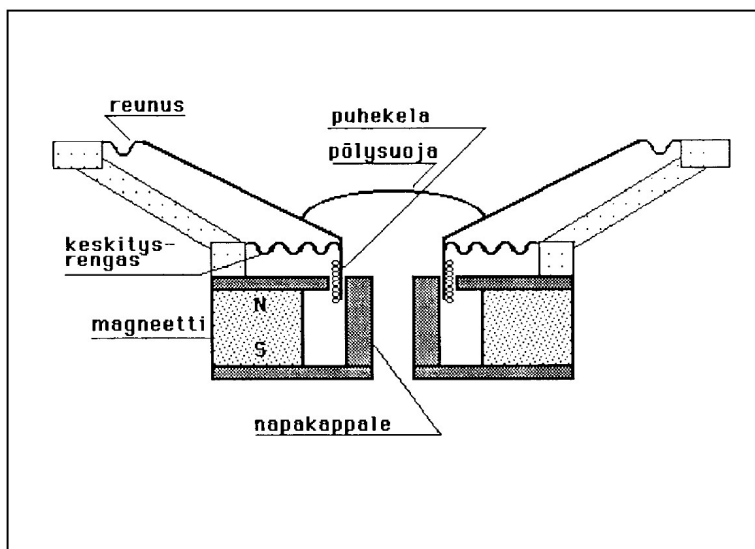
Lähes kaikki nykyään käytössä olevat kaiuttimet (loudspeaker) ovat toimintaperiaatteeltaan dynaamisia (dynamic). Tämän lisäksi tunnetaan muitakin kaiuttimien toimintaperiaatteita kuten sähköstaattinen kaiutin ja "ionisaattorikaiutin", joiden merkitys käytännössä on olematon. Niinpä tässä keskitytään dynaamiseen kaiuttimeen eri variaatioineen.

Puhuttaessa kaiuttimesta tarkoitetaan yleensä valmiiksi koottua järjestelmää koteloineen ja mahdollisine jakosuotimineen. Tällainen yksikkö voi sisältää useampia kaiutinelementtejä. Irtonaista, kotelomatonta yksikköä nimitetäänkin usein elementiksi tai ohjaimeksi (driver).

Kaiutinelementin rakentaminen siten, että se toistaa hyvälaatuisesti kaikkia audiotajuuksia, on käytännössä mahdotonta. Jos äänenlaadulle (nimenomaan taajuuskaistan leveydelle) ei aseteta kovin suuria vaatimuksia, voi kaiutin sisältää vain yhden elementin. Tähän syötetään toistettavan äänen koko taajuuskaista. Näin menetellään usein esimerkiksi pääasiassa puhekäyttöön tarkoitettujen kaiuttimien kohdalla.

Haluttaessa laajakaistaisempaa toistoa suurilla äänenpaineilla, esimerkiksi musiikkiaudiojärjestelmissä, joudutaan turvautumaan monitiejärjestelmiin. Tällöin audiosignaali jaetaan jakosuotimessa useampaan taajuuskaistaan, jotka toistetaan omien erikoisten kaiutinelementtiensä kautta.

Kuva 4.13: Dynaamisen kaiutinelementin rakenne



4.4.1. Dynaaminen kaiutin

Kuva 4.13 esittää dynaamisen kartiokaiutinelementin rakennetta. Siinä äänisignaali tuodaan voimakkaaseen magneettikenttään sijoitetulle puhekylle (voice coil), joka on kiinnitetty varsinaiseen värähtimeen (diaphragm). Värähdin voi olla muodoltaan monenlainen. Useimmiten se on kartio (cone), mutta joskus myös kalotti (dome), käänteinen kalotti (convex dome) tai taso (plane).

Puhekelalle tuotu sähköinen signaali aiheuttaa kartion edestakaisen liikkeen, jonka pituus riippuu signaalin voimakkuudesta ja taajuudesta. Jos ihanteellinen kaiutinelementti ajatellaan kiinnitetyksi äärettömän suureen levyyn, riippuu värähtimen liikepoikkeama eli iskunpituus X taajuudesta siten, että X kasvaa neliöllisesti taajuuden madaltuessa, kun äänenvoimakkuus pysyy vakiona.

Iskunpituuden ja kartion pinta-alan tulo on iskutilavuus. Normaalissa olosuhteissa, kun aallonpituus on kaiuttimen ulkomitoja huomattavasti suurempi, tiettyä äänenvoimakkuutta tietyllä taajuudella vastaa aina tietty iskutilavuus. Mitä korkeampi on taajuus, sen pienempi iskutilavuus riittää määrätyn äänenpaineen saavuttamiseksi. Tämä on yksi syy siihen, että pelkästään korkeita ääniä toistavaksi tarkoitettu kaiutin voi mitoiltaan olla paljon bassoelementtiä pienempi.

Matalille taajuuksille tarkoitettujen kartioelementtien mitat noudattavat tavallisesti perinteistä tuumajakoa: Suurille äänenpaineille tarkoitettut yksiköt ovat halkaisijaltaan 15" tai 18", keskisuurille äänenpaineille tarkoitettut 10" tai 12". Pienempiä yksiköitä käytetään lähinnä lähitarkkailu- ja hifikaiuttimissa.

Jos tavallinen kaiutinelementti saa olla vapaassa ilmatilassa, kumoavat kaiuttimen edestä ja takaa lähtevät vastakkaisvaiheiset ääniaallot toisensa sitä tehokkaammin, mitä pidempi on aallonpituus ja siis matalampi taajuus. Ilmiötä kutsutaan akustiseksi oikosuluksi. Kun aallonpituus on huomattavasti kartion halkaisijaa pienempi, ei kumou-

tumaa suoraan edestä mitattuna enää havaita. Akustisesta oikosulusta johtuen on varsinkin matalia taajuuksia toistamaan tarkoitettu kaiutin syytä tavalla tai toisella koteloida. Kotelointitapoihin perehdytään tarkemmin myöhemmin tässä luvussa.

Dynaamiselle kaiuttimelle on tyypillistä, että sillä pystytään muuttamaan sähköisestä tehosta vain murto-osa akustiseksi tehoksi. Hyötysuhde vaihtelee prosentoin sadasosista muutama prosenttiin. Poikkeuksen muodostavat vain eräät torvikaiuttimet, joiden hyötysuhde saattaa olla kymmenien prosenttien luokassa.

Huonolle hyötysuhteelle on syynsä. Dynaamisessa kaiuttimessa voidaan ajatella tapahtuvaksi kaksi energiamuunnosta. Ensinnäkin sähköinen energia muutetaan liike-energiaksi, kartion edestakaiseksi liikkeeksi. Toiseksi liike-energia muutetaan akustiseksi energiaksi, äänenä kuuluttavaksi paineaaltojen etenemiseksi. Varsinkin toinen muunnos on huono: Kaiuttimen akustinen lähtöimpedanssi on ympäröivän ilman impedanssiin nähden sopimaton. Kalvo ei liikkeessaan tee sitä työtä minkä se voisi tehdä, jos sitä kuormitettaisiin paremmin. Tähän seikkaan pyritään joskus vaikuttamaan torvikuormituksen avulla.

4.4.2. Kaiuttimen tehonkesto

Huonosta hyötysuhteesta seuraa se, että valtaosa kaiuttimeen syötetystä tehosta muuttuu puhekelassa lämmöksi. Joissakin tapauksissa puhekelan lämpötila saattaa olla useita satoja asteita. Kun sähköinen teho on liian suuri, palaa puhekela tai sen liitosjohto poikki. Suurinta sähköistä tehoa, jolla tästä ilmiöstä ei ole vaaraa, nimitetään termiseksi tehonkestoksi. Se riippuu mm. seuraavista seikoista:

- puhekelan koko (käämilangan määrä)
- käytettyjen materiaalien lämpötilansietokyky
- rakenteen kyky siirtää ylimääräistä lämpöenergiaa ympäristöön (jäähdytys)

Toinen sähköistä tehonkesto rajoittava tekijä on värähtimen liikepoikkeama. Siihen vaikuttaa elementtiin syötetyn signaalin teho, taajuus ja kaiuttimen kotelointitapa. Kuten edellä mainittiin, on liikepoikkeaman neliö kääntäen verrannollinen taajuuteen. Kun kalvon lineaarinen liikepoikkeama (X_{\max}) ylitetään, lisääntyy särö huomattavasti. Tämän jälkeen on vaarana kalvon tai sen ripustuksen mekaaninen vaurioituminen, esim. repeytyminen. Jotkut valmistajat ilmoittavat elementteilleen myös ehdottomasti suurimman sallitun liikepoikkeaman (X_{dam} , excursion before damage).

Kaiutinelementin tehonkestolla valmistajat tarkoittavat yleensä nimenomaan termistä tehonkesto. Monissa tapauksissa, varsinkin basokaiuttimien ollessa kyseessä, liikepoikkeamarajoitteinen tehonkesto on huomattavasti termistä tehonkesto pienempi. Nykyisillä materiaaleilla saattaa 12" ... 18" kartioelementtien jatkuva terminen tehonkesto olla jopa 500 W ... 1 kW. Liikepoikkeamarajoitteisen tehonkeston määrää elementti-koteloyhdistelmä. Aivan matalilla taajuuksilla se on joskus isollakin kaiuttimella vain muutamia kymmeniä watteja.

Kaiutinelementin tehonkeston yhteydessä käyttävät eri valmistajat toisistaan poikkeavia mittaustapoja ja määritelmiä. Näitä ovat mm:

- Siniaaltopyyhkäisyllä annetuissa taajuusrajoissa ja joissakin tapauksissa määritellyssä kotelossa mitattu tehonkesto (RMS sine wave).
- IEC-normin mukainen tehonesto, jossa testisignaalinä käytetään kaistasuodatettua vaaleanpunaista kohinaa, jonka huippu-kerroin eli huippu- ja tehollisarvojen suhde (crest factor) on rajattu 6 dB:iin. Suodattimen alarajataajuuden voi elementin valmistaja määrätä käyttötarkoituksen mukaan, eihän esim. keskitaajuusalueelle tarkoitettua elementtiä ole tarkoituksenmukaista kuormittaa matalilla taajuuksilla.
- Varsinkin hifi-käyttöön tarkoitettujen keskiääni- ja diskanttikaiuttimien yhteydessä DIN-normin mukainen tehonkesto, jolloin teho määritellään ennen jakosuodinta vaikuttavan laaja-kaistaisen kohinajännitteen mukaan. Tällöin esim. diskanttikaiutin, jonka tehonkestoksi ilmoitetaan 100 W (DIN), saattaa todellisuudessa kestää vain n. 5 W:n sähköisen tehon, joka vastaa sitä taajuuskaistan osaa kokonaistehosta, jolla kaiuttimen on ajateltu toimivan.
- Ns. huipputehonkesto (peak power), jolloin mittauksessa käytetyn kohinasignaalin huippuarvo ilmoitetaan. Kannattaa muistaa, että sinimuotoisen signaalin huipputeho on n. 3 dB tehollisarvoa suurempi. Siten esim. tehollisarvoltaan 100 W:n sinimuotoisen signaalin huippuarvo on n. 200 W.

Kokoäänialueelle tarkoitettujen kaiuttimien yhteydessä, varsinkin hifi-kaiuttimissa, käytetään määrättyllä tavalla suodatetulla kohinalla mitattua tehonkestoä. Suodatus perustuu musiikin keskimääräiseen taajuussisältöön. On havaittu, että orkesterimusiikin kaikesta energiasta noin puolet sijoittuu 330 Hz:n alapuolelle, eli energia hieman painottuu bassopäähän (väli 20 Hz ... 330 Hz edustaa noin neljää oktaavia koko audiokaistan kymmenestä oktaavista). Kun jakotaajuus diskanttikaiuttimien ja alempia alueita toistavien kaiuttimien välillä on yleensä huomattavasti 330 Hz:n yläpuolella, ei diskanttikaiuttimelle normaalilla musiikilla jakaudu energiaa kuin murto-osa siitä, mitä bassokaiutin joutuu käsittelemään.

Ammattiaudiotekniikan alueella yllämainittuun taajuusjakautumaan ei voida luottaa kuin harvoissa tapauksissa. Studiomonitoreilla voidaan kuunnella suurella voimakkuudella instrumentteja, joiden äänen taajuussisältö poikkeaa olennaisesti mainitusta "normaalimusiikista". Samoin on tilanne esim. pienimuotoisessa bändi-PA:ssa ("laulukamoissa"): Laitteilla vahvistetaan laulua ja joitain instrumentteja. Matalia ääniä tuottavia soittimia, kuten sähköbassoa ja bassorumpua, ei toisteta PA:n kautta. Tällöin taajuusjakautuma painottuu tavallista ylempille taajuuksille.

Tärkeänä esimerkkinä voidaan vielä mainita teatteritehostekaiuttimet. Teknisin perustein ei voi määrätä sitä, millainen taajuusjakautuma on ulosajettavassa tehosteessa, se riippuu taiteellisesta tarkoituksenmukaisuudesta. Tavallinen seuraus passiivisten, hifi-käyttöön rakennettujen kaiuttimien soveltamisesta ammattimaisen äänitekniikan alueille onkin diskanttielementtien tuhoutuminen yllämainituista

syistä. Tämä voi tapahtua, vaikka suositeltua vahvistintehoa ei ylitettäisi tai signaalia vahvistimessa päästettäisi leikkautumaan.

Signaalin leikkautuminen vaarantaa aina passiivisen kaiuttimen diskanttielementin. Siihen voi päästä vaarallisen paljon tehoa, vaikka tehovahvistin olisi huomattavasti kaiuttimen nimellistä tehonkestoaa pienempi. Itse asiassa diskanttikaiuttimen tuhoaminen alitehoisella vahvistimella onkin helpompaa kuin suuritehoisella; signaalihan leikkautuu aikaisemmin.

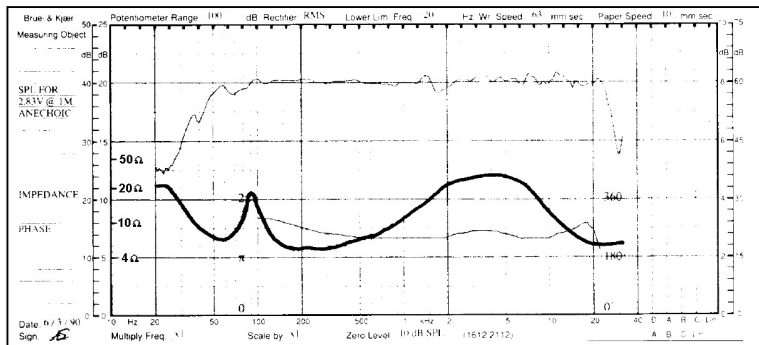
4.4.3. Kaiuttimen impedanssi

Kaiuttimille ja kaiuttimelementeille määritellään aina ns. nimellisimpedanssi, joka on useimmiten 4, 8 tai 16 ohmia.

Käytännön kaiutin ei kuitenkaan edusta ihanteellista, resitiivistä kuormaa, vaan se muodostuu vastuksen (resistanssi) lisäksi kondensaattoreista (kapasitanssi) ja keloista (induktanssi). Tällaista kuormaa sanotaan reaktiiviseksi (joskus myös kompleksiseksi liittyen aiheen matemaattiseen käsittelyyn).

Reaktiiviselle kuormalle on luonteenomaista sen riippuminen taajuudesta. Kuva 4.14 esittää erään kaiuttimien impedanssikäyriä. Tavanomaisen, koteloimattoman bassoelementin impedanssikäyrässä on maksimi resonanssitaajuuden kohdalla. Tämän jälkeen impedanssi laskee minimiarvoonsa, joka on usein pienempi, kuin nimellisimpedanssi. Minimien jälkeen impedanssi jälleen nousee, johtuen puhekelan induktanssista.

Kuva 4.14: Erään kaiuttimen impedanssikäyrä sekä taajuus- ja vaihevasteet



Kaiuttimen kotelointitapa näkyy aina myös impedanssissa. Bassorefleksikotelolle on ominainen kaksihuippuinen käyrä. Torvikuormitus vaikuttaa myös voimakkaasti, sama kaiuttimelementti antaa erilaisissa torvissa erilaisen impedanssikäyrän.

Kaiuttimen puhekela lämpenee, kun siihen syötetään tehoa. Lämpenemisen yhteydessä nousee myös impedanssi, jopa useita kymmeniä prosentteja. Ilmiö aiheuttaa mm. ns. tehokompressiota: Äänenpaine ei nouse lineaarisesti kaiuttimeen syötetyn jännitteen noustessa, koska lämmenneen puhekelan impedanssi on kohonnut rajoittaen sen läpi kulkevaa virtaa.

4.4.4. Kaiutinkaapeleiden merkitys

Mitä pidempi on vahvistimen ja kaiuttimen välinen kaapeli, sitä enemmän siinä on resistiivisiä häviöitä. Vahvistinteolla siis lämmitetään myös kaapelia.

Tehohäviön lisäksi kaapeleiden resistanssi saattaa vaikuttaa äänenlaatuun. Tämä johtuu kaiuttimen impedanssista, joka riippuu taajuudesta. Tällöin myös kaapelin aiheuttama vaimennus riippuu taajuudesta. Mitä pidempi ja/tai ohuempi kaapeli on, sitä enemmän kaiuttimen impedanssikäyrä alkaa näkyä myös taajuusvasteessa.

Kaapeloinnin aiheuttamia haittoja voidaan pienentää sijoittamalla päätevahvistimet mahdollisimman lähelle kaiuttimia. Vaativassa, suuritehoisessa käytössä on pyrittävä korkeintaan n. 30 metrin kaapeleihin, ja tällöinkin on syytä käyttää poikkipinta-alaltaan n. 2 x 4 mm² kaapelia vahvistinkanavaa kohden. Lyhyemmätkin kaapelit on suositeltavaa tehdä vähintään 2 x 2,5 mm² kaapelista.

Markkinoilla on joitakin "superkaiutinkaapeleita", joiden väitetään parantavan äänentoistoa olennaisesti. Näiden kaapelien valmistusaineena on käytetty eksoottisia aineita, kuten "hapetonta kuparia" tai "kullattua kuparia". Erääseen kaapeliin on jopa merkitty signaalin kulkusuunta. (Mielenkiintoista, kaapelissahan kulkee vaihtovirtaa, jolloin virran kulkusuunta kuitenkin vaihtelee äänisignaalin tahdisa.) Näille kaapeleille on yhteistä lähinnä korkea hinta. Ammattikäytössä riittää, kun pidetään huoli siitä, että kaapelin poikkipinta-ala on riittävä ja kaapeli on mekaanisesti sopivaa kulloiseenkin käyttötaroitukseen.

4.4.5. Kaiuttimen suuntaavuus

Kaiuttimen suuntaavuus (directivity) on pääsääntöisesti sitä suurempi, mitä suuremmat ovat säteilijän mitat toistettavan äänen aallonpituuteen nähden. Normaali kaiuttimelementti muuttuu siis sitä suuntaavammaksi, mitä korkeampi on taajuus. Muutos tapahtuu suurella elementillä matalammalla taajuudella kuin pienellä.

Ilmatilassa etenevään ääniaaltoon pätee yhtälö:

$$\text{aallonpituus } \lambda = \frac{f}{c}$$

jossa c = äänen nopeus (n. 341 m/s) ja f = taajuus.

Yhtälön avulla on seuraavassa laskettu muutamia aallonpituuksia eri taajuuksilla:

taajuus/Hz	aallonpituus/m
50	6,8
100	3,4
500	0,7
1000	0,34
5000	0,07
10 000	0,034

Jos siis halutaan rakentaa toimintaperiaatteeltaan perinteinen kaiutin, joka on suuntaava esim. 50 Hz:n taajuudella, pitää sen ulkomittojen olla vähintään 6,8 metrin luokkaa.

Kaiuttimen suuntaavuutta voidaan kuvata monilla eri tavoilla:

- Ilmoitetaan ne kulmapisteet asteissa, joiden kohdalla äänenpaine on laskenut 6 dB (joskus 10 dB) suoraan edestä päin mitattuun verrattuna, esim. 60 x 40 astetta. Koska tulos yleensä riippuu taajuudesta, annetaan se eri taajuuksilla tai ilmoitetaan keskimääräinen, ns. nimellisuuntakuvio.
- Ilmoitetaan suuntaavuusindeksi (directivity index, DI), joka voidaan määritellä seuraavasti: DI on ero vapaassa kentässä suoraan edestä päin mitatun äänenpaineen ja sen teoreettisen äänenpaineen välillä, jonka kaiutin samalla hyötysuhteella antaisi, jos sen suuntakuvio olisi pallomainen. DI ilmoitetaan desibeleissä ja se riippuu yleensä taajuudesta.
- Ilmoitetaan ns. Q-luku (älä sekoita tätä Q-arvoon!!). Q-luku kuvaa sitä, miten suureen avaruuden osaan kaiutin säteilee. Täysin ympärisäteilevän kaiuttimen Q-luku olisi 1, puolipallon muotoiseen avaruuteen säteilevän 2, jne.

Q ja DI eivät välttämättä kerro suuntakuvion luonteesta mitään, mutta ne ovat käyttökelpoisia apuvälineitä sähköakustisissa laskelmissa.

Kaiuttimen suuntakuvio on ammattimaisessa käytössä monestakin syystä kiinnostava. Kaikuisissa tiloissa saadaan toistettu ääni ymmärrettävämmäksi ja selkeämmäksi, jos kaiutin toistaa äänen yleisöä eikä seiniä päin. Suuntaavilla kaiuttimilla voidaan usein parantaa myös kiertoherkkyyttä. Jos suuntakuvio on taajuuden suhteen kovin vaihteleva, muodostuu helposti äänenlaadultaan erilaisia vyöhykkeitä yleisön keskuuteen.

4.4.6. Kaiuttimen teho ja taajuusvaste

Vapaakenttätaajuusvasteella (free field frequency response) tarkoitetaan kaiuttomassa huoneessa siniaaltopyyhkäisyllä suoraan kaiuttimen edestä (tai ilmoitetusta kulmasta) mitattua toistokäyrää.

Tehovaste (power response) sen sijaan mitataan kaiuntahuoneessa useilla eri puolille sijoitetuilla mikrofoneilla (tai useasta pisteestä), ja ilmoitetaan yleensä tersseittäin tai oktaaveittain. Tehovaste siis antaa

kuvan kaiuttimen kaikkiin suuntiin säteilemästä kokonaistehosta, ja sitä kautta myös suuntaavuudesta. Jos käytössä on sekä teho- että taajuusvaste, voidaan DI määrätä taajuuden funktiona.

Vähäkaikuisessa tilassa kaiutin, jonka taajuusvaste on hyvä, mutta tehovaste voimakkaasti vaihteleva, saattaa kuulostaa hyvältä. Tilanne muuttuu toiseksi, kun kaiutin viedään normaaliin, kaiuntaiseen tilaan. Tällöin tehovasteen muoto vaikuttaa taajuusvastetta merkittävämmiin kuullun äänen tasapainoon.

Dynaamisen kaiutinelementin taajuusvaste on mahdollista saada verraten laajaksi, mutta tehovasteesta tulee väkisin voimakkaasti laskeva tietyn kulmataajuuden jälkeen. Tämä on yksi syy siihen, että vaativimmissa sovellutuksissa taajuuskaista yleensä jaetaan useampien elementtien kesken.

4.4.7. Herkkyys, hyötysuhde ja äänenpaine

Kaiuttimen herkkyydellä (sensitivity) tarkoitetaan sitä äänenpainetta, minkä kaiutin pystyy tuottamaan tietyllä teholla määrätyltä etäisyydeltä mitattuna. Yleensä tämä tarkoittaa vapaassa kentässä (kaiuton huone) 1 watin teholla 1 metrin päässä mitattua äänenpainetta jota merkitään usein SPL/1 W/1 m.

Hyötysuhde (efficiency) tarkoittaa kaiuttimeen syötetyn sähköisen tehon ja siitä saatavan akustisen tehon suhdetta. Kaksi saman herkkyyden omaavaa kaiutinta voivat olla hyötysuhteeltaan erilaisia riippuen siitä, miten suuntaavia ne ovat.

Jos kaiuttimen herkkyys ja sähköinen tehonkesto tunnetaan, voidaan laskea kaiuttimen teoriassa antama enimmäisäänepaine. Käytännön äänenpaine on usein hieman teoreettista pienempi syistä, joihin palataan edempänä.

Lasku voidaan suorittaa kaavalla:

$$\text{SPL}_{\text{max}} = \text{SPL}_1 + 10 \lg P_E,$$

jossa SPL_{max} = saatavilla oleva äänenpaine 1 m:n päässä/dB, SPL_1 = kaiuttimen herkkyys (1 W/1 m) ja P_E = sähköinen teho/W.

Jos kaiuttimen herkkyys on esim. 100 dB/W 1m:n päässä ja suurin teho 100 W, on saatavilla oleva äänenpaine 120 dB.

Hyvä hyötysuhde ja herkkyys ovat fyysikaalisesti vastakkaisia ominaisuuksia pienien ulkomittojen ja hyvän bassotoiston kanssa. Asiaa voidaan valaista muutamien yleisesti ottaen tosien väittämien avulla:

- Jos herkkyyttä halutaan korottaa, ei ulkomittoja voi pienentää.
- Jos taajuusvasteen halutaan ulottuvan alemmaksi, pienenee hyötysuhde ja herkkyys.
- Jos ulkomittoja pienennetään, ja taajuusvasteen on silti ulottava matalille taajuuksille, on pakko tinkiä herkkyydestä ja hyötysuhteesta.

Monet kaiuttimen "hyvistä ominaisuuksista" ovat fysiikan kannalta toisilleen vastakkaisia. Tästä syystä kaiuttimet ovat aina kompromisseja eri ominaisuuksien välillä.

Eri käyttötarkoituksiin valmistettujen kaiuttimien aikaansaamia äänenpaineita ja herkkyksiä on seuraavassa verrattu suuntaa antavasti. Esimerkkiherkkydet ja -äänenpaineet ovat kutakuinkin päteviä yksiköille, joissa yhtä taajuusaluetta toistaa vain yksi elementti.

- Kotikäyttöön tarkoitetut hifi-kaiuttimet: SPL/1 W/1 m = 80 dB ... 94 dB, SPL_{max} = 90 dB ... 114 dB
- Ammattikäyttöön tarkoitetut saliaänikaiuttimet (suorat säteilijät): SPL/1 W/1 m = 90 dB ... 100 dB, SPL_{max} = 110 dB ... 126
- Torvikuormitetut kaiuttimet: SPL/1 W/1 m = 100 dB...114 dB, SPL_{max} = 110 dB...140 dB

Torvityyppisillä kaiuttimilla on mahdollista päästä suurempiin herkkyksiin ja äänenpaineesiin, mutta ko. kaiutinten erikoisluonteen takia ne käsitellään omassa luvussaan.

4.4.8. Äänenpaine ja etäisyys

Ns. käänteisestä neliölaista (square inverse law) seuraa: Kun välimatka äänilähteeseen kaksinkertaistuu, laskee äänenpaine n. 6 dB vapaassa kentässä. Matemaattisesti asia voidaan ilmaista seuraavasti:

$SPL = SPL_1 - 20 \lg(x/x_1)$, jossa SPL = saatu äänenpaine, SPL₁ = tunnettu äänenpaine etäisyydellä x₁ äänilähteestä ja x = etäisyys äänilähteestä.

Tästä voidaan laskea, että jos kaiutin pystyy esim. tuottamaan 1 metrin etäisyydelle 120 dB:n äänenpaineen, pystyy se tuottamaan 20 metrin etäisyydelle 94 dB:n äänenpaineen. Edellä mainittu pätee kaiuttomassa tilassa ja perinteisille kaiuttimille, joiden säteilemä aaltorintama on pallomainen (ei linjasäteilijä eikä tasosäteilijä).

Käytännön saleissa syntyy aina jonkin verran kaiuntaa. Tällöin suoraan kaiuttimesta tulevaan ns. suoraan ääneen (direct sound) yhtyy pinnoista heijastunut ääni (reflected sound). Tietyn välimatkan päässä kaiuttimesta äänenpaine lakkaa vähenemästä. Silloin suoran äänen taso on laskenut yhtä suureksi kuin heijastuneen äänen taso. Tätä etäisyyttä nimitetään kaiuntasäteeksi (reverberation radius, room radius).

Kaiuttimien äänenpaineet ja herkkydet ilmoitetaan useimmissa tapauksissa vapaassa kentässä, 1 metrin etäisyydeltä mitattuna.

4.4.9 Kaiutin tasopintojen lähellä

Jos kaiutin ripustetaan siten, että sen lähellä ei millään suunnalla ole heijastavia tasopintoja, voidaan sen sanoa säteilevän koko avaruuteen ja säteilykulma on 4π steradiaania. Mikäli kaiutin sijoitetaan kiinni esim. lattiaan tai kattoon, puolittuu avaruus ja säteilykulma on 2π steradiaania. Vastaavasti sijoitus seinän ja lattian kulmaan aiheuttaa avaruuden pienenemisen neljännekseen (säteilykulma = π steradiaani) ja nurkkaan kahdeksasosaan ($\pi/2$ steradiaania).

Jos sijoitettava kaiutin olisi kooltaan differentiaalisen eli olemattoman pieni ja siten ympärisäteilevä ($Q=1$) kaikilla taajuuksilla, kasvaisi sen tuottama äänenpaine sen mukaan, mitä pienempään avaruuskulmaan sen pitäisi säteillä. Näin siksi, että sama akustinen teho jaettaisiin pienemmälle pinta-alalle. Tällöin äänenvoimakkuuden nousu 2π - tapauksessa olisi n. 3 dB, π - tapauksessa n. 6 dB ja $\pi/2$ - tapauksessa n. 9 dB.

Käytännön kaiuttimet eivät koskaan täytä yllämainittuja ehtoja. Ne ovat toistettavan äänen aallonpituuteen nähden pieniä - ja ympärisäteileviä - vain matalilla taajuuksilla. Tästä johtuen nimenomaan bassoäänillä on taipumus korostua, jos vapaassa kentässä suoran taajuusvasteen omaava kaiutin sijoitetaan rajapinnan lähelle. Vaikutus on voimakkain nurkkasijoituksessa ja saattaa aiheuttaa voimakkaasti kumisevan tai jymisevän bassotoiston.

Ilmiötä voi tietysti käyttää hyväksikin. Näin tehdään sijoitettaessa erillisiä matalataajuuskaiuttimia, "subwoofereita", esim. diskoihin tai teattereihin.

4.5. Kaiutinrakenteita

Kaiutinkotelon erilaisia rakennetapoja ovat mm. suljettu kotelo (sealed box), bassorefleksikotelo (bass reflex, vented box), torvi (horn), jne. Tämän lisäksi yksiköitä, jotka noudattavat jotain edellä mainituista rakennetavoista, voidaan ryhmitellä eri tavoin, esim. pilariksi (column) tai rypäleeksi (cluster).

Eri rakennustapa saattaa monitiekaiuttimen eri taajuusalueilla olla perusteltua. Ammattikäytössä hyvin yleisessä yhdistelmässä bassoalueella käytetään refleksikotelo ja ylä-äänialueella torvea. Eräissä arvostetuissa 3-tiehifikaiuttimissa käytetään bassoalueella refleksikotelo, keskialueella dipolikaiutinta ja diskantialueella pilaria. Ammattikäytössä on sellaisiakin yhdistelmiä, joissa matalat ja korkeat taajuudet toistetaan torvien avulla ja keskitaajuudet suorasäteilijällä.

Kaiutinelementin ja kotelon muodostama yhdistelmä, jossa elementin eteen tai taakse ei ole asetettu torvea, sanotaan suoraan säteileväksi kaiuttimeksi. Matalilla taajuuksilla suoraan säteilevä kaiutin voi olla bassoreflesi- tai suljetun kotelon periaatteella toimiva. Kes-

ki- ja ylätaajuuksilla toimiviksi tarkoitettut suorasäteilijät koteloidaan muutamia erikoistapauksia lukuun ottamatta suljettuina.

4.5.1. Suljettu kotelo

Kaiutinelementin yksinkertaisin kotelointitapa on suljettu kotelo. Kaiuttimen bassotoisto on mahdollista sopivilla elementtikoteloyhdistelmillä saada varsin hyväksi, mutta suljettuun koteloon liittyy tekijöitä, joiden vuoksi se on ammattikäytössä matalilla taajuuksilla melko harvinainen.

Mitä tahansa elementtiä ei menestyksellä voi sijoittaa mihin tahansa koteloon. Kaiuttimen toimivuus riippuu kaikissa kotelotyypeissä kaiuttimen ja kotelon keskinäisestä sovituksesta. Kaikille kotelotyypeille, siis myös suljetulle, on tyypillistä se, että mitä matalampi taajuusalue halutaan päästä, sitä suurempi kotelo tarvitaan. Koteloa voidaan kuitenkin pienentää, jos akustisesta tehosta voidaan tinkiä.

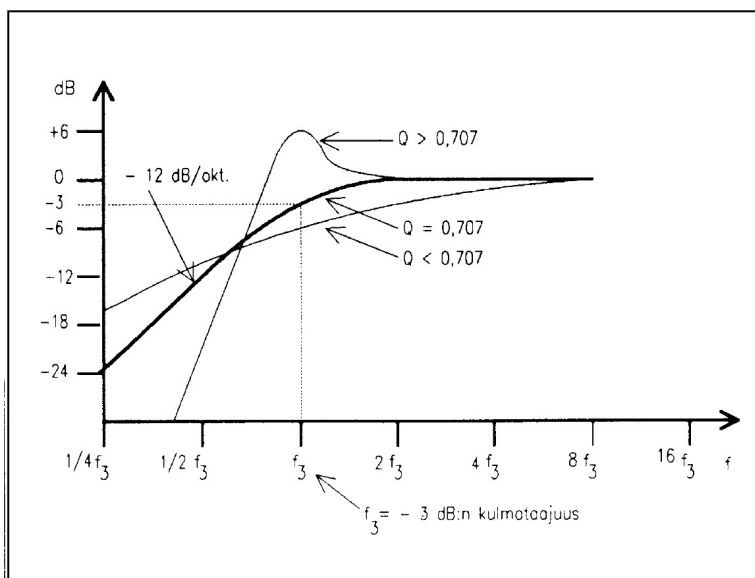
Matalilla taajuuksilla suurin ennen merkittävää säröytymistä saatavilla oleva äänenpaine riippuu kaiutinelementin iskutilavuudesta. Jokaisella elementillä on tietty kartion liikepoikkeama, jonka ylittäminen aiheuttaa voimakkaasti lisääntyvää säröä ja jopa elementin tuhoutumisen. Suljetussa kotelossa kaiuttimen liikerata kasvaa neliöllisesti taajuuden laskiessa, jos äänenpaine pidetään vakiona.

Kaiuttimia voidaan teoreettisesti käsitellä ylipäästösuodattimina. Suljettu kotelo on tällöin toisen asteen ylipäästösuodatin. Erilaisilla sähköisillä apusuotimilla astelukua voidaan korottaa. Toisen asteen suotimella tarkoitetaan sitä, että "ihanteellisesti" viritetyllä kotelolla taajuusvaste laskee kulmataajuuden alapuolella 12 dB/oktaavi (asteluvun lisääntyminen tai vähentyminen yhdellä lisää tai vähentää jyrkkyyttä 6 dB, esim neljännen asteen suotimen jyrkkyyks on 24 dB/oktaavi).

Kotelon tilavuus vaikuttaa alarajataajuuteen. Tilavuus vaikuttaa myös kaiutin/koteloyhdistelmän ns. Q-arvoon ja sitä kautta taajuusvasteen muotoon (kts. kuva 4.5.2/1). Tässä tapauksessa Q-arvo eli hyvyysluku vastaa täysin sähköisten suodinten vastaavaa termiä. Sitä ei pidä sekoittaa Q-lukuun, joka liittyy suuntaavuuteen.

Ihanteellisen eli laakalatvaisen taajuusvasteen tuottaa Q-arvo 0,71 (= $\sqrt{2}/2$). Myös tästä hieman poikkeavat arvot ovat joskus käyttökelpoisia. Käytännössä tämä tarkoittaa kuitenkin sitä, että tietyille kaiutinelementeille voidaan rakentaa vain tilavuudeltaan tietyntyyppinen suljettu kotelo, jos taajuusvaste halutaan pitää laakalatvaisena. Tilavuuden suurentaminen laskee periaatteessa alarajataajuutta, mutta samalla myös Q-arvoa. Tällöin tulos voi bassotoiston kannalta olla alkuperäistä huonompi. Pienentämällä koteloa ihanteellisesta nousee alarajataajuus ja myös Q-arvo, jolloin taajuusvasteesta tulee tiettyä aluetta korostava, "piikittävä". Tämän tyyppiset bassovasteet olivat varsinkin takavuosina muotia diskoissa.

Kuva 4.15: Suljetun kaiuttimen Q - arvo.



4.5.2. Bassorefleksikotelo

Lisäämällä suljettuun koteloon sopivasti mitoitettu aukko, kasvaa ajatellun suotimen asteluku aina neljanteen asti. Tästä päästään sähköisillä apusuotimilla suurempiin astelukuihin, kuudennen asteen viritys on verrattain suosittu aktiivikaiuttimissa.

Tavallisin bassorefleksikotelon viritys on neljännen asteen Butterworth, jolle tyypillisiä taajuusvasteita "ohiviritettyine" Q-arvoineen esittää kuva 4.16. Kuvasta voidaan havaita, että ihanteellisesti viritetyt kotelon taajuusvaste laskee kulmataajuuden alapuolella 24 dB/oktaavi, niin kuin neljännen asteen ylipäästösuodattimella pitääkin.

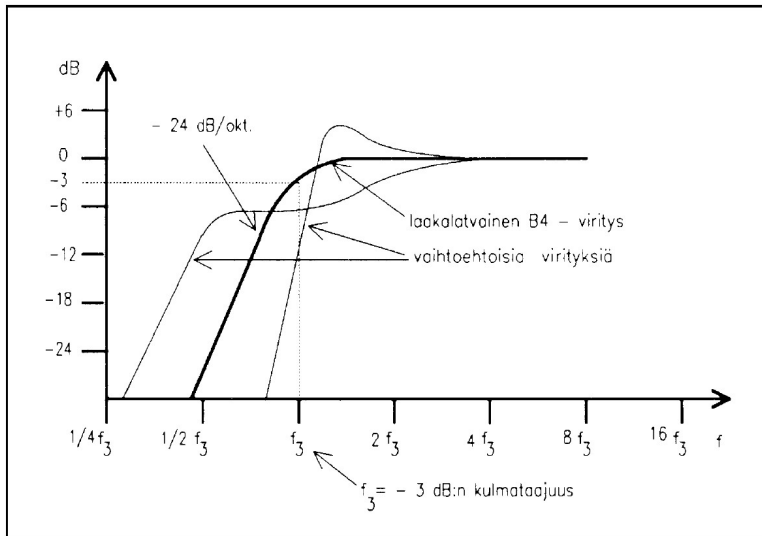
Bassorefleksikotelo poikkeaa olennaisesti suljetusta kotelosta liikepoikkeaman suhteen. Kotelon viritystaajuuden kohdalla bassorefleksikotelossa esiintyy liikepoikkeamaminimi. Tällä taajuudella valtaosa äänienergiasta kulkee viritysaukon kautta. Vastaavassa suljetussa kotelossa liikepoikkeama kasvaisi neliöllisesti taajuuden laskiessa. Viritystaajuus asetetaan käytännössä lähelle alarajataajuutta. Sen lähellä on liikepoikkeama (ja särö) bassorefleksikotelossa vastaavaa suljettua koteloa pienempi.

Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että jos mitoiltaan ja iskunpituudeltaan vastaavat kaiuttimelementit sijoitetaan suljettuun koteloon ja bassorefleksikoteloon, toimii refleksikotelo todennäköisesti pienemmällä säröllä kuin suljettu kotelo, ja refleksikotelosta voidaan matalilla taajuuksilla saada suurempia äänenpaineita kuin suljetusta kotelosta.

Yllämainituista syistä johtuen bassorefleksikotelo on ammattikäytössä matalilla taajuuksilla muita kotelotyyppejä yleisempi. On kuitenkin monia sovellutuksia, joissa suljettu kotelo puolustaa paikkaansa.

Joissakin tapauksissa voi mm. loivasti laskeva taajuusvaste olla edullinen.

Kuva 4.16: Bassorefleksikotelon Q-arvo.



4.5.3. Torvikaiutin

Dynaamisen kaiuttimen huonohko hyötysuhde johtuu pääosiltaan siitä, että akustinen sovitus kalvon ja ympäröivän ilman välillä on huono. Seurauksena on parhaimmillaankin vain muutamia prosentteihin nouseva hyötysuhde. Juuri tämän ongelman ratkaisuun on tähdätty torvikuormitetulla kaiuttimella.

Melko usein puhutaan eksponentiaalitorvista. Tällä viitataan takavuosisina yleisesti käytettyyn matemaattiseen funktioon, jota torven aukon pinta-alan laajeneminen seurasi. Mahdollisia funktioita on muitakin, ja varsinkaan nykyaikaisissa ylä-äänitorvissa ei enää välttämättä pyritä eksponentiaalisuuden orjalliseen seuraamiseen.

Ylemmillä taajuuksilla torvi useimmiten yhdistetään tarkoitusta varten erityisesti tehtyyn kaiuttimelementtiin, painekammio-ohjaimen (compression driver). Kaikkein korkeimmille taajuuksille tarkoitettujen ohjain/torvilyhdistelmät ovat usein kiinteästi yhteen rakennettuja "superweetereitä". Matalilla taajuuksilla torvien ohjaimina käytetään yleensä tavanomaisia kartiokaiuttimia.

Koska ilman kompressio ei ole lineaarista, syntyy tavanomaisissa torvikaiuttimissa jonkin verran tästä johtuvaa harmonista säröä. Kertaluvultaan matalia, harmonisia särökomponentteja pidetään kuitenkin kuulovaikutelman kannalta vähemmän merkityksellisinä kuin korkeamman kertaluvun särökomponentteja.

Torvi vaikuttaa myös kaiuttimen suuntaavuuteen. Suoraan säteilevä elementti saattaa joskus olla säteilykuvioltaan liian laaja. Tällöin on torvirakenteen avulla mahdollista lisätä suuntaavuutta ja sitä kautta myös herkkyyttä, koska sama akustinen teho suunnataan pienempään avaruuden osaan.

Torvikaiutinta on perinteisesti pidetty suurten äänenpaineiden tuottamiseen tarkoitettuna raakana työkaluna, joka ei kelpaa esim. klassisen musiikin vaativaan toistoon. Sen käyttö on, pyrittäessä suuntaavuuden hallintaan, viime vuosina yleistynyt myös arvostetuissa hifi- ja tarkkailumonitorikaiuttimissa. Tällöin käytetyt torvet ovat yleensä verrattain "lieviä". Niiden pituus on lyhyehkö ja torven pinta-ala laajenee nopeasti siirryttäessä värähtelijästä ulospäin.

4.5.3.1 Torvikaiuttimen historiasta

Erilaisia torvia on käytetty puheen ja laulun vahvistukseen jo menneillä vuosisadoilla. Tällöin kaiutinelementtinä käytettiin puhujan tai laulajan omaa suuta, jonka eteen tuotiin esim. pellistä valmistettu torvi, megafoni. Saavutettu suuntaavuuden ja siitä seurannut äänenpainainen lisäys ilmeisesti auttoi informaation perillemenossa.

Myöhemmin siirryttiin sähköisiin äänijärjestelmiin. Aluksi suuritehoisten vahvistimien rakentaminen oli kuitenkin teknisesti mahdollista tai ainakin hyvin kallista. Suuritehoisia kuulutusjärjestelmiä varten kehitettiin torvikuormitettuja dynaamisia kaiuttimia, joiden avulla kyettiin muutamien wattien vahvistinteholla kattamaan suuriakin tiloja. Mainituntyyppisillä torvilla ei pyrittykään kovin hyvään äänenlaatuun, tärkeintä oli puheen ymmärrettävyys. Kapeakaistaiset puhetorvet täyttivät tämän vaatimuksen varsin hyvin. Niiden avulla hoidetaan usein nykyäänkin kuulutukset urheilukentillä ja julkisissa tiloissa.

Äänielokuvan tuleminen toi suunnittelijoille uudentyyppisen ongelman: Suuriin tiloihin piti tuottaa laadultaan verrattain hyvää ääntä. Alettiin rakentaa suurikokoisia 2-tiejärjestelmiä, joissa molemmat äänialueet toistettiin torvikuormitetuilla dynaamisilla kaiutinelementeillä. Nämä, alunperin kymmeniä vuosia vanhat ratkaisut ovat yhäkin yleisessä käytössä elokuvateattereissa, tosin materiaaleiltaan ja yksityiskohdiltaan kehittyneinä.

"Desibelivallankumous" oli seurausta rock-musiikin läpilyönnistä. Suurten konserttien ja ulkoilmafestivaalien yleistyessä kaiutintekniikka lainattiin sieltä, mistä se oli mahdollista: Kuulutus ja elokuvaäänijärjestelmistä. Nämä - suunnittelultaan vuosikymmeniä vanhat - ratkaisut ovat olleet yleisessä käytössä aivan viime vuosiin asti.

4.5.3.2 Torvikaiutin bassokäytössä

Mitä matalampiin taajuuksiin halutaan päästä, sen pidempi ja hitaammin aukeava torvi tarvitaan. Torven suuaukon mitat vaikuttavat matalimpaan toistettavaan taajuuteen. Suuaukon tulee mitoiltaan olla samaa suuruusluokkaa kuin toistettavan äänen aallonpituus. Aallonpituus esim. 40 Hz:n taajuudella on kahdeksan metrin luokkaa. Näistä syistä johtuen ihanteellinen bassotorvi muodostuisi mitoiltaan epäkäytännöllisen suureksi.

Torvikaiuttimia on kuitenkin käytetty, ja käytetään yhä myös bassoalueella. Torven suuren ulkoaukon vaatimus täyttyy pinoamalla kaiuttimia riittävän suuri määrä vierekkäin ja päällekkäin - ja näinhän joka tapauksessa tehdään ainakin suuremmilla ulkoilmafestivaaleilla.

Bassotorvikaiuttimen ulkomittoja voi rajoittaa laskostamalla torvi (folded horn). Torven heikkouksia bassoalueella voidaan paikata myös sijoittamalla kaiutin lattialle tai jopa nurkkaan. Monet rakenteen eduista ovat kuitenkin kyseenalaisia haittoihin verrattuna, josta syystä muut rakennetavat - varsinkin bassorefleksikotelo - ovat ainakin alimmalla taajuusalueella viime vuosina syrjäyttäneet torven.

4.5.4 Torven ja refleksikotelon yhdistelmä

Useimmat perinteisistä elokuvakaiuttimista toimivat siten, että torvi alkaa kuormittaa kartioelementtiä vasta 100 Hz:n ... 200 Hz:n taajuuden yläpuolella. Tämän taajuuden alapuolella kaiutin toimii kuten bassorefleksikotelo. Taajuusvasteessa on tavallisesti n. 6 dB:n nousu mainitulla taajuudella ja sen yläpuolella. Rakenteen avulla on voitu nostaa herkkyyttä ja suuntaavuutta alemmilla keskitaajuuksilla lisäämättä kuitenkaan radikaalisti kaiuttimen kokoa. Monien tämän tyyppisten kaiuttimien (esim JBL 4550, Altec 816) ulkomitat ovat kuitenkin "rantasaunaluokkaa", eikä alimmalla bassoalueella silti saavuteta etuja suorasäteilijöihin verrattuna.

4.5.5 Torvella kuormitettu kaiutin keskitaajuusalueella

Torvirakenteen edut pääsevät melko hyvin oikeuksiinsa, jos taajuusalueen alarajaksi riittää n. 200 Hz. Tällöin yksiköstä ei välttämättä tule kooltaan aivan kohtuutonta.

Ongelmana suuritehoisessa käytössä on se, että olemassa olevat, halkaisijaltaan 10" tai 12" kartiokaiuttimet eivät torveen yhdistettynä pysty tasaisella taajuusvasteella ulottumaan kovin korkeisiin taajuuksiin, erittäin harvoin yli 1,5 kHz:n. Tällöin tätä ylempillä taajuuksilla joka tapauksessa joudutaan käyttämään järeätä ja kallista painekammio-ohjain/torviyhdistelmää.

Suurille äänenpaineille mitoitetuissa musiikki-PA-järjestelmissä torvikuormitettua alempien keskitaajuuksien yksikköä kuitenkin käytetään melko yleisesti. Jos yksikkö on hyvin suunniteltu, on etuna verrattain matalille taajuuksille ulottuva, hallittu suuntaavuus.

4.5.6 Paineammio-ohjain

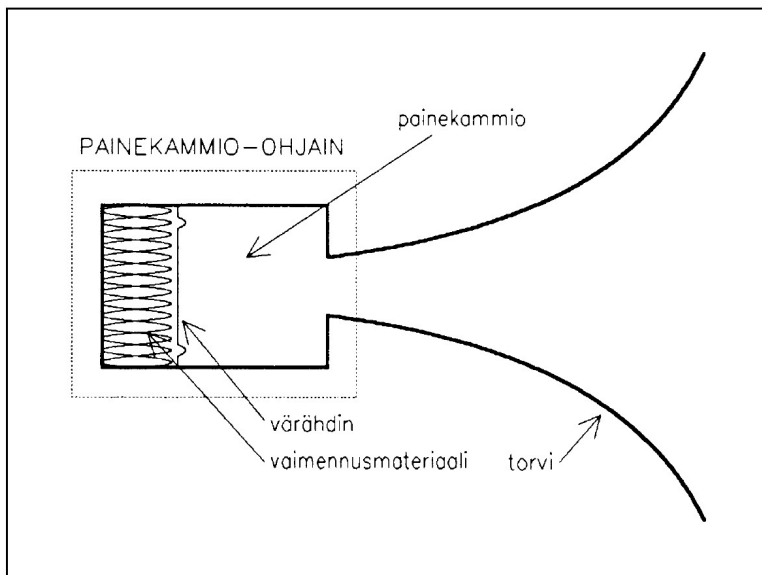
Suljettua koteloa nimitettiin vielä 1970-luvulla yleisesti "paineammio-kaiuttimeksi". Nimitys oli virheellinen, painekammio-ohjaimella (compression driver) tarkoitetaan erityisesti torvikäyttöön tarkoitettua kaiutinelementtiä. Nimi viittaa sen rakenteeseen: Värähtelijä on pinta-alaltaan torven kurkkua suurempi, jolloin kalvon liikuttamaa ilmaa puristetaan kokoon eli kompressoidaan.

Puhealueelle tarkoitetut torvikaiuttimet, joita tapaa mm. rautatie- asemilla ja stadioneilla, edustavat usein tätä kaiutintyyppiä. Vaativammissa sovelluksissa niitä käytetään hyvin yleisesti suuritehoisten monitiekaiuttimien keski- ja ylätaajuusalueella. Rakenne onkin lähes ainoa mahdollisuus toteuttaa suuriin äänenpaineisiin (n. 115 dB 1 metrin päässä tai enemmän) kykeneviä ylä-äänikaiuttimia.

Painekammio-ohjaimet ja torvet ovat useimmissa tapauksissa erillisiä. Näin samantyyppiseen ohjaimen voidaan yhdistää erilaisia torvia haluttujen ominaisuuksien, usein nimenomaan suuntakuvion, mukaan. Koska torvien kurkkujen mitat ovat suurelta osaltaan standardoituja, voidaan haluttaessa yhdistää yhden valmistajan ohjain toisen valmistajan torveen.

Pelkästään korkeimmille taajuuksille (n. 5 kHz ja yli) tarkoitetut yksiköt ovat useimmissa tapauksissa yhdysrakenteisia "supertweeteriä". Nämä ovat saaneet monia lempinimiä ulkomuotonsa mukaan, esim. JBL 075: "bullet" (luoti).

Kuva 4.17: painekammio-ohjain



Keski- ja ylä-äänikäyttöön (n. 600 Hz ja yli) tarkoitettujen erillisten painekammio-ohjainten kurkun halkaisija on nykykäytännön mukaan joko n. 25 mm (1") tai n. 50 mm (2"). Värehtelijän halkaisijat ovat vastaavasti n. 32 mm ... 50 mm (1" kurkku) ja n. 50 mm ... 100 mm (2" kurkku). Joidenkin pelkästään keskiaänialueelle tarkoitettujen yksiköiden kurkun halkaisija on 4 ". Näistä mitoista poikkeavia elementtejä valmistetaan jonkin verran, mutta uusia, poikkeavan standardin mukaisia yksiköitä ei juurikaan enää tule markkinoille.

Värehtelijän liikepoikkeaman suhteen painekammio-ohjaimiin pätevät samat lait kuin muihinkin dynaamisiin kaiuttimiin: Liikepoikkeama kasvaa neliöllisesti taajuuden laskiessa. Seurauksena liikepoikkeaman ylityksestä saattaa olla yksikön tuhoutuminen. Tästä syystä monien painekammio-ohjainten tehonkesto riippuu osittain jakotaajuudesta: Mitä korkeampi jakotaajuus sen suurempi tehonkesto.

Painekammio-ohjaimissa, kuten kaikissa dynaamisissa kaiutinelementeissä, esiintyy kalvoresonansseja, jotka näkyvät taajuusvasteen epätasaisuuksina, kasvavana särönä ja näistä johtuvana värittyneenä äänenlaatuna. Elementtien valmistajat pyrkivät vaimentamaan resonanssit mahdollisimman tehokkaasti ja varsinkin keski/ylääänialueelle tarkoitetuissa yksiköissä siirtämään ne mahdollisimman korkeille taajuuksille, mieluiten kuuloalueen ulkopuolelle.

1" painekammio-ohjaimia käytetään joidenkin tarkkailukaiuttimien ja monien keskiraskaiden saliaäänikaiuttimien yläääniyksikkönä 2-tieratkaisuissa. Niitä käytetään jonkin verran myös raskaiden 3- ja 4-tieratkaisujen ylimmällä tai toiseksi ylimmällä taajuusalueella. Alin jakotaajuus on tavallisesti 800 Hz ...1 kHz, suurilla tehoilla käytetään mielellään korkeampia jakotaajuuksia.

1" yksiköillä saavutetaan parhaimmillaan verrattain tasainen, aina audiokaistan ylimpiin taajuuksiin asti ulottuva taajuusvaste. Kalvoresonanssien aiheuttamat epätasaisuudet ovat hyvälaatuisissa 1" ohjaimissa kuuloalueen ylärajalla (n. 20 kHz) tai sen yläpuolella. 1" painekammio-ohjaimilla päästään normaaleissa torvissa n. 122 dB ... 126 dB:n äänenpaineisiin 1 metrin päässä mitattuna.

2" ohjaimia käytetään tavallisesti raskaiden saliaäänikaiuttimien yläääniyksikkönä 2- ja 3-tieratkaisuissa. Aina 2" yksiköillä ei pyritä kattamaan aivan ylimpiä taajuuksia, vaan ne hoidetaan erillisillä "superweetereillä". Tällöin järjestelmän "tiemäärä" nousee kolmeen tai neljään, joskus ylikin.

2" yksiköiden alin jakotaajuus on tavallisesti n. 500 Hz ... 600 Hz. Samoin kuin pienemmilläkin yksiköillä, pyritään jakotaajuutta nostamaan suuritehoisimmissa sovelluksissa. Ryhmään kuuluu myös joi-takin yksiköitä, jotka on tarkoitettu yksinään toistamaan koko puhekaistaa (300 Hz ... 3 kHz).

Suuremmasta kalvon halkaisijasta johtuen kalvoresonanssit ovat usein kuuloalueella, n. 10 kHz:n ympäristössä. Vain ani harvoilla rakenteilla päästään ylemmäksi, lähelle 20 kHz:iä. Resonansseista johtuvat taajuusvasteen epätasaisuudet saattavat värittää diskanttitoistoa jonkin verran, nykyaikaisimmilla rakenteilla haittaa pidetään kuitenkin vähäisenä. Yksiköt ovat joka tapauksessa 1" yksiköitä tehokkaampia, normaaleissa torvissa päästään n. 126 dB ... 132 dB:n äänenpaineisiin 1 metrin päässä mitattuna.

4.5.7. Vakiosuuntaava torvi

Torvi on mahdollista mitoittaa siten, että suuntaavuus taajuuden funktiona pysyy lähellä vakiota. Tällöin kaiuttimen suuntaavuus ei riipu taajuudesta yhtä voimakkaasti kuin muilla rakenneratkaisuilla, ja suoraan edestä päin mitattu taajuusvaste ei poikkea kovin paljoa eri kulmissa mitatuista, kun pysytään torven säteilykeilassa. Tällaisia rakenteita voidaan käyttää vain keski- ja ylätaajuusalueella, sillä muuten kaiuttimen ulkomitat kasvaisivat kohtuuttomiksi. Nykyään useilla ammattikäyttöön tarkoitettuja kaiutinkomponentteja valmis-

tavilla yrityksillä on omat tavaramerkkinsä, joilla tarkoitetaan juuri tämäntyyppisiä vakiosuuntaavia torvia: Constant coverage, Biradial, Constant directivity jne.

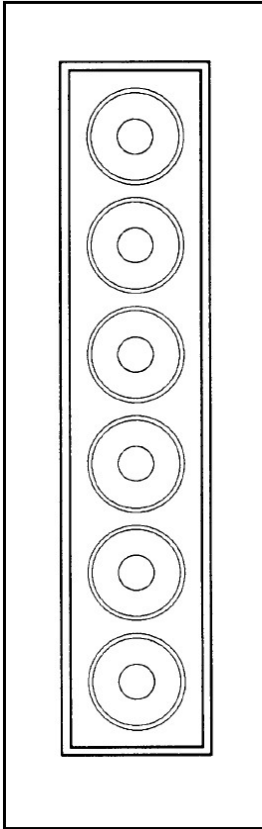
Vakiosuuntaavat torvet ovat nykyaikaisissa saliaänisovelluksissa hyvin yleisesti käytettyjä komponentteja. Niiden avulla voidaan yleisö saattaa mahdollisimman tasa-arvoiseen asemaan, kun äänenlaatu vaihtelee istumapaikasta riippuen mahdollisimman vähän. Niiden taajuusvasteeseen liittyy kuitenkin eräs piirre, joka johtuu painekammio-ohjaimen toiminnasta.

Käytännöllisesti katsoen kaikkien ohjaimien tehovaste alkaa laskea noin 6 dB/oktaavi noin 4...5 kHz:n taajuuden yläpuolella. Perinteisen torven suuntaavuus taas kasvaa suunnilleen samalla nopeudella tämän taajuuden yläpuolella, jolloin kaiuttimen säteilykeila siis kapeenee. Näin suoraan kaiuttimen edestä mitattu taajuusvaste voi olla hyvinkin suora, koska taajuuden noustessa äänienergia levitetään yhä pienempään avaruuskulmaan.

Tilanne muuttuu, kun ohjaimeen liitetään vakiosuuntaava torvi: torven suuntaavuus pysyy lähellä vakiota taajuuden noustessa ja äänienergia levitetään taajuudesta riippumatta suunnilleen samansuuruisen avaruuskulmaan. Tällöin suoraan edestä mitattu taajuusvaste noudattaa tehovasteen muotoa, ja on siis laskeva. Tästä syystä, mikäli myös korkeat äänet halutaan kunnolla kuuluviin, tulee vakiosuuntaavalla torvella varustetussa järjestelmässä aina olla ketjun jossakin osassa taajuuskorjain, jonka avulla laskeva vaste kompensoidaan.

4.5.8 Pilarikaiutin

Kuva 4.18: Pilarikaiutin.



Kuten edellä todettiin, kasvaa kaiuttimen suuntaavuus kun värähtelijän ulkomittoja kasvatetaan. Lisääntynyt suuntaavuus on monissa tapauksissa toivottua, mm. kaikuisan akustiikan takia.

Kun useita kartioelementtejä asetetaan päällekkäin, saadaan aikaan kaiutin, joka on suuntaava pystytasossa. Vaakatasossa kaiuttimen suuntakuvio on laajempi. Näistä ominaisuuksista johtuen pilarikaiutinta käytetään paljon mm. kirkoissa, asemahalleissa ym. kaikuisissa tiloissa.

Tavanomaisesti toteutetun pilarikaiuttimen huonona puolena on pidettävä sitä, että suuntaavuus on voimakkaasti taajuudesta riippuvainen, se kasvaa taajuuden noustessa. Lisäksi suuntakuvio liuskoittuu voimakkaasti ylätaajuuksilla. Asiaan voi vaikuttaa rakentamalla pilari "taajuuden noustessa lyheneväksi" kuten jotkut valmistajat ovat tehneet, jolloin taajuuden kasvaessa kaiutinelementtejä kytkeytyy pois. Lisäksi pilarirakenteeseen on mahdollista yhdistää esim. erillinen ylä-ääniyksikkö.

Pilarikaiuttimella on huono maine joidenkin alan harrastajien ja ammattilaisten keskuudessa johtuen perinteisten ratkaisujen puutteista ja joidenkin yleisesti käytettyjen kaiuttimien huonosta toteutuksesta. Hyvin toteutettuna sillä on kuitenkin ominaisuuksia, jotka tekevät siitä varteenotettavan ratkaisun keskitehoisiin järjestelmiin kaikuisissa tiloissa. Pilarirakennetta voidaan myös käyttää yhdistettynä muihin kotelointitapoihin.

4.5.9 Dipolikaiutin

Tavallinen, koteloinaton kartioelementti toimii periaatteessa dipolin tavoin: Suuntakuvio on kahdeksikon muotoinen ja signaalin vaihe kaiuttimen etu- ja takapuolilla on vastakkainen. Rakenne on joissakin tapauksissa käyttökelpoinen sellaisenaan.

USA:ssa käytetään melko yleisesti päällekkäin sijoitettuja, kotelointimattomia 15" kaiutinelementtejä basso- ja keskitaajuusalueella muodoltaan pitkissä ja akustiikaltaan kaikuisissa tiloissa. Tällöin itse asiassa yhdistetään pilari ja dipolikaiutin, ylätaajuusalueella lisäksi torvi. Rakenteella ei akustisesta oikosulusta johtuen päästä kovin mataliin taajuuksiin, mutta puhealueella bassotoisto on riittävä.

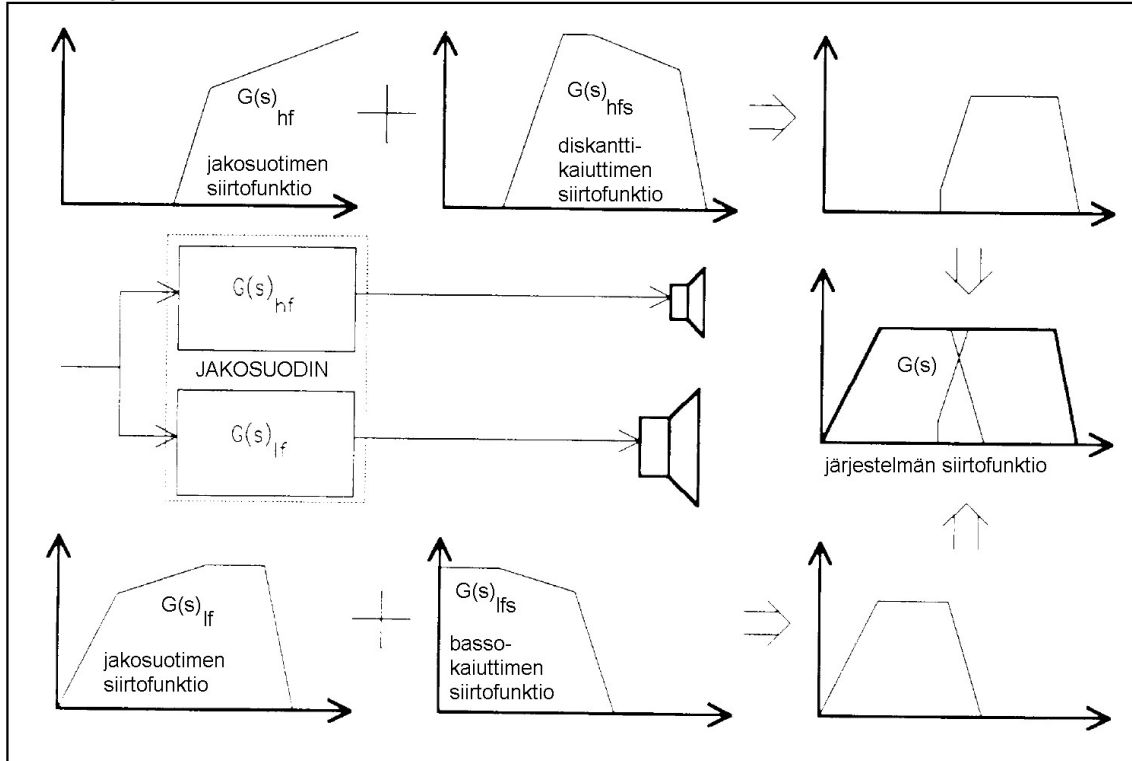
4.6 Jakosuodattimet

Kaiutinelementti on mahdotonta rakentaa siten, että se toistaisi koko audiokaistan. Tästä syystä audiokaista joudutaan vaativassa käytössä jakamaan useampien elementtien kesken. Tällainen monitiekaiutin

muodostaa järjestelmän, jossa jakosuotimen vaikutus äänenlaatuun on vähintään yhtä suuri kuin muidenkin komponenttien.

Jakosuotimen suunnittelu perustuu siirtofunktioiden määrittelyyn sen jälkeen, kun kaiutinelementit on valittu (kuva 4.19). Tavoitteena on yleensä aikaansaada laakalatvaisia ylipäästö- (diskanttikaiutin), alipäästö- (bassokaiutin) ja kaistanpäästösuotimia (keskiäänikaiutin), jotka yhdistettynä muodostavat halutun kokonaisuuden. Kaiutinelementtien ja kotelon ominaisuudet yhdessä jakosuodattimen kanssa määräävät akustisen lopputuloksen.

Kuva 4.19: Siirtofunktioiden määrittely.



Passiivisten kaiuttimien kohdalla jakosuotimen rakenne ja komponenttivalinnat määräytyvät paitsi halutusta siirtofunktiosta, myös kaiutinelementin impedanssikäyttäytymisestä. Nämä tekijät aiheuttavat sen, että hyvälaatuista, "yleiskäyttöistä" jakosuodatinta ei voi suunnitella. Kukin kaiutinyhdistelmä vaatii oman jakosuotimensa toimiakseen parhaalla mahdollisella tavalla. Tämä on yksi tärkeä syy siihen, miksi ammattikäytössä ovat yleistyneet erilaiset "prosessoriohjatut" järjestelmät ja aktiivikaiuttimet.

Hyvälaatuisen monitiejärjestelmän suunnittelu on (nimenomaan jakosuotimen osalta) vaikeata. Jakotaajuudelle ja sen ympäristöön syntyy lähes väistämättä joitakin äänenlaatuun vaikuttavia virheitä, joista seuraavassa esimerkkejä:

- korostuma ja/tai vaimentuma taajuusvasteessa, varsinkin säteilykuvion pääakselin ulkopuolella
- suuntakuvion liuskoittuminen
- signaalin kulkuaikavirhe

Näiden ongelmien vuoksi pitäisi tulla toimeen mahdollisimman vähillä jakotaajuuksilla. Varsinkin tärkeimmällä puheäänialueella (300 Hz ... 3 kHz) niitä tulisi välttää, jotta puheen ymmärrettävyys ei kärsisi. Käytännön syistä alueelle yleensä kuitenkin joudutaan asettamaan yksi jakotaajuus.

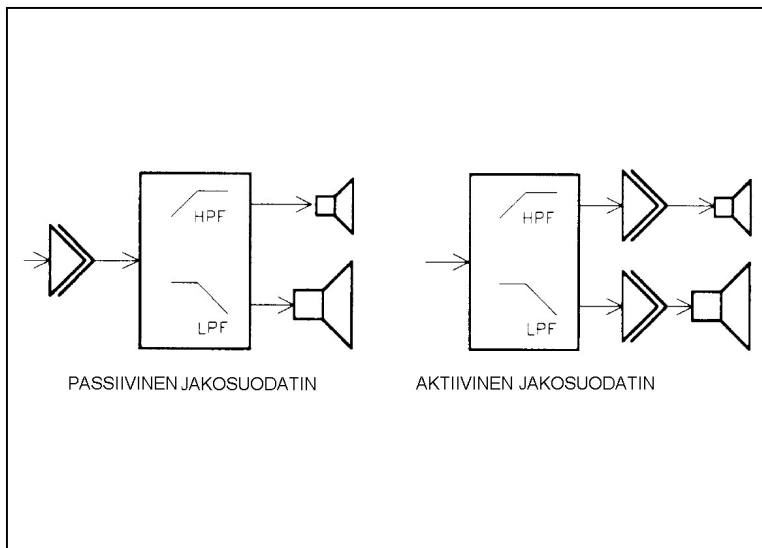
Nykyasuuntauksen mukaiset saliaäänikaiuttimet ovat usein 2-tieratkaisuja, joita joskus tuetaan verrattain matalalla jakotaajuudella toimivalla alaaäänikaiuttimella eli subwooferilla.

4.6.1 Passiivinen ja aktiivinen jakosuodin

Kuva 4.20 havainnollistaa passiivista ja aktiivista jakosuodinta. Passiivisen rakenteen hyvänä puolena on se, että vahvistinkanavia tarvitaan vain yksi ja järjestelmä on yksinkertainen. Huonoja puolia on useita:

- Suuritehoisesta jakosuotimesta tulee helposti kallis.
- Matalien jakotaajuuksien toteuttaminen johtaa mekaaniselta kooltaan, painoltaan ja hinnaltaan suuriin komponentteihin.
- Kaiutinelementtien taajuusvasteen korjailu on hankalaa ja voi tapahtua vain vaimentavana, siis hyötysuhteen kustannuksella.
- Passiivisessa jakosuotimessa on aina jonkin verran tehohäviötä.
- Vahvistintehon epätaloudellinen käyttö.
- Jakosuotimen toiminta riippuu puhekelojen lämpötiloista ja siten käytetystä tehosta.

Kuva 4.20: Passiivinen ja aktiivinen jakosuodin.



Aktiivisen taajuusjaon kohdalla passiivisen järjestelmän haitat muuttuvat eduiksi:

- Vahvistintehojen korottaminen ei tee aktiivista jakosuodinta kalliimmaksi.
- Jakotaajuuksien valinta ei vaikuta rakenteen kokoon eikä hintaan.

- Kaiutinelementtien taajuusvasteen korjailuun on varsin hyvät mahdollisuudet, eikä se alenna itse elementin hyötysuhdetta.
- Vahvistinteho käytetään hyväksi taloudellisesti.
- Jakosuotimen toiminta ei riipu puhekelojen lämpötiloista.

Aktiivisessa taajuusjaossa on oikeastaan vain yksi huono puoli: Tarvittavien tehovahvistinkanavien määrä.

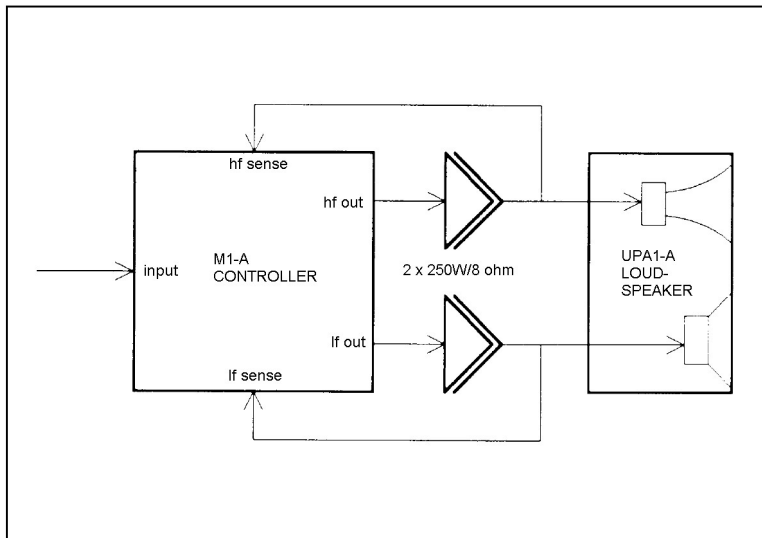
Saliäänikäytössä aktiivinen taajuusjako on todennäköisesti passiivista edullisempi, jos tarvittava akustinen teho on riittävän suuri. Pienemmällä teholla ratkaisevana tekijänä saattavat olla aktiivisen järjestelmän äänenlaadulliset ominaisuudet, josta syystä se on hyvin suosittu vaativien äänistudioiden tarkkailukaiuttimissa.

4.7. Prosessoriohjatut kaiutinjärjestelmät

Takavuosina suuritehoisten saliäänijärjestelmien yleinen toteutustapa oli se, että valittiin erikseen mahdollisimman tarkoituksenmukaiset kaiutinkomponentit ja suoritettiin taajuusjako niiden välillä jollakin aktiivisella standardijakosuotimella. Tällöin jakosuotimessa ei tietenkään voitu aikaansaada ihanteellista suotimien ja elementtien yhteensopivuutta.

1980 - luvun alusta alkaen ovat järjestelmät, joissa aktiivinen jakosuodin on suunniteltu nimenomaan kyseistä kaiutinjärjestelmää varten, yleistyneet. Tällaisessa järjestelmässä elementit voidaan valita tehokkuuden ja säröominaisuuksien perusteella, kun kohtuulliset taajuusvasteen virheet voidaan korjata sähköisesti. Joskus myös kaiutinkotelon ulkomittojen pientäminen on mahdollista, kun matalien taajuuksien toistoa voidaan korjata elektroniikan avulla.

Kuva 4.21 Erään prosessoriohjatun kaiutinjärjestelmän lohkokaavio



Jakosuotimen yhteyteen voidaan rakentaa myös suojapiirit, kuten rajoittimet eli limiterit, joiden avulla kaiutinelementtien tahaton yliohjaus estetään. Tämä mahdollistaa "viimeistenkin desibelien purista-

misen", kun vahvistimien mitoituksessa ei tarvitse huomioida turvamarginaalia. Limitteri joko rajoittaa päätevahvistimeen menevän signaalin tasoa tai vaihtoehtoisesti taajuuskaistaa. Joidenkin laitteiden ylä-ääniyksikön suojaus on järjestetty siten, että yliohjaustilanteessa jakotaajuutta liu'utetaan ylöspäin, jolloin ylä-ääniyksikön ottama kokonaisteho laskee.

Ohjaus suojapiireille voidaan järjestää suoraan päätevahvistimen lähdeistä, jolloin laite "tietää" aina todellisen tilanteen. Tämän tyyppisiä yhdistelmälaitteita kutsutaan yleisesti "kaiutinprosessoreiksi". Amerikkalainen Meyer Sound Laboratories oli eräs ensimmäisistä tämän tyyppisten saliaäänijärjestelmien toteuttajista, nykyään järjestelmiä on markkinoilla useita. Kuvassa 4.21 on erään järjestelmän lohkoakaavio.

4.8 Aktiivikaiutin

Aktiivikaiuttimella tarkoitetaan pääsääntöisesti yhdistelmää, jossa kaiutinelementit, tehovahvistimet ja jakosuodattimet on rakennettu samoihin kuoriin. Jos järjestelmä on hyvin järeä, on vahvistimet joskus pakko rakentaa erilliseen yksikköön paino-, jäähdytys, tms. syistä. Nimitystä aktiivikaiutin voitaneen kuitenkin käyttää, kun tehovahvistimet sisältävä elektroniikkayksikkö on suunniteltu käytettäväksi vain ja ainoastaan tietyn kaiuttimen yhteydessä.

Jakosuodatin voi myös aktiivikaiuttimessa olla toimintaperiaatettaan passiivinen.

Aktiivikaiutin voi toiminnallisesti noudattaa edellä selostettuja periaatteita, jolloin tietysti kaikki niiden edut ovat voimassa. Tämän lisäksi saavutetaan lisäetuja:

- Kaapelointi kaiuttimen ja vahvistimen välillä on mahdollisimman lyhyt.
- Tehovahvistin voidaan suunnitella ihanteelliseksi käytetyn kaiutinelementin kannalta.
- Tiloissa, joissa käytetään aktiivikaiuttimia, voidaan koko signaalin siirto järjestää linjatasoisena. Tämä yksinkertaistaa asennusta.
- Käyttöönotto on nopeaa, koska kaapeliliitännät on mahdollisimman vähän.

Huonona puolena voidaan mainita se, että kaiuttimen lähelle pitää aina järjestää myös sähköpiste.

Viime vuosina aktiivikaiuttimet ovat yleistyneet varsinkin äänistudioiden tarkkailukaiuttimina.