

TEKNILLINEN KORKEAKOULU  
Sähkö- ja tietoliikennetekniikan osasto

Panu Maijala

BINAURAALINEN ÄÄNENLAADUN  
ARVIOINTIJÄRJESTELMÄ

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä  
tarkastettavaksi diplomi-insinöörin tutkintoa varten  
Espoossa \_\_\_\_\_.\_\_\_\_.\_\_\_\_\_.

Työn valvoja: Professori Matti Karjalainen

<b>Tekijä:</b>	Panu Maijala		
<b>Työn nimi:</b>	Binauraalinen äänenlaadun arviointijärjestelmä		
<b>Päivämäärä:</b>	4.12.1997	<b>Sivumäärä:</b>	101
<b>Osasto:</b>	Sähkö- ja tietoliikennetekniikan osasto		
<b>Professuuri:</b>	Akustiikka ja äänenkäsittelytekniikka koodi: S-89		
<b>Työn valvoja:</b>	Professori Matti Karjalainen		
<p>Tässä diplomityössä on evaluoitu ja dokumentoitu Teknillisen Korkeakoulun akustiikan ja äänenkäsittelytekniikan laboratoriossa äänenlaadun arviointiin kehitetty laitteisto. Laitteisto perustuu binauraaliseen äänitys- ja toistotekniikkaan. Se käsittää välineet ja menetelmät, joilla ääninäyte tallennetaan, muokataan digitaalisen signaalinkäsittelyn keinoin ja esitetään samanaikaisesti usealle koehenkilölle. Eri osien evaluointi tapahtuu sekä perinteisin mittausmenetelmin että kuuntelukokein.</p> <p>Lisäksi työssä on kehitetty tosipäätekniikkaa, jolloin binauraalisia äänityksiä tehdään koehenkilöiden korviin sijoitetuilla mikrofoneilla. Tosipää- ja keinopää-äänitystekniikoita on verrattu keskenään.</p>			
<b>Avainsanat:</b>	binauraalinen, keinopää, kuuntelukoe, lokalisointi, psykoakustiikka, tosipää, tuoteäänenlaatu, äänenlaatu, äänentoisto, äänitystekniikka		

<b>Author:</b>	Panu Maijala		
<b>Name of the Thesis:</b>	Binaural system for evaluation of sound quality		
<b>Date:</b>	4.12.1997	<b>Number of pages:</b>	101
<b>Faculty:</b>	Department of Electrical and Communications Engineering		
<b>Professorship:</b>	S-89 Acoustics and audio signal processing		
<b>Supervisor:</b>	Professor Matti Karjalainen		
<p>A binaural system for the evaluation of sound quality is evaluated and documented in this thesis. The system was developed in the Acoustics Laboratory of the Helsinki University of Technology and it is based on binaural techniques. It consists of tools and methods on how to record, edit using digital signal processing, and present sound samples binaurally to many subjects simultaneously. The tools are evaluated using conventional measurement methods and by listening tests.</p> <p>Also, a technique was developed in this thesis using real (human) heads to make binaural recordings. This is compared to artificial head techniques.</p>			
<b>Keywords:</b>	artificial head, binaural, listening test, localization, product sound quality, psychoacoustics, real head, recording techniques, sound quality		

# ALKULAUSE

*Tuoteäänenlaatu on tulossa tärkeäksi tekijäksi kovassa kilpailussa monella teollisuudenalalla - etenkin autoteollisuudessa. Tämä diplomityö pohjautuu Työsuojelurahaston ja kolmen suomalaisen työkonvalmistajan (Tamrock Oy Turuntehdas, Timberjack Oy ja Valtra Oy Ab) rahoittamaan projektiin työkonoiden ohjaamomelun häiritsevyyden vähentämiseksi. Projekti sai alkunsa lähes tyhjältä pöydältä. Teknillisen korkeakoulun akustiikan laboratorio oli hieman aikaisemmin tehnyt tutkimuksen rikotusvasaroiden äänipainetason sekä häiritsevyyden vähentämiseksi, mutta perinteisemmin menetelmin. Tarvittavaa laitteistoa tämän vaativan työkonemelumprojektin suorittamiseksi ei ollut.*

*Olen esittänyt osan tutkimuksestani inter-noise 97 -konferenssissa Budapestissa. Siellä sain solmittua useita kontakteja eri puolelle maailmaa ja kävin monia bedelmällisiä keskusteluja koskien tutkimuksiani. Keskustelut Southamptonin yliopiston (Institute of sound and vibration research) Takashi Takeuchin sekä Neutrik Cortex Instruments:n Peter Danielin kanssa herättivät uusia ideoita ja osa niistä on huomioitu tässäkin työssä.*

*Olen kiitollinen useille ihmisille heidän tuestaan, kommenteista ja avusta. Erityisesti haluan kiittää tieteellisestä kontribuutiosta tekniikan lisensiaatti Jyri Huopaniemeä ja VTT:n perinteisen meluntorjunnan ammattilaisia, DI Jukka Tanttaria sekä DI Kari Saarista. Diplomityöni ohjaaja professori Matti Karjalainen oli aina käytettävissä ja hän teki käytännössä koko Lisp-ohjelmoinnin. Tekniikan lisensiaatti Toomas Altsaar oli myös korvaamaton apu Lisp-kielen kiemuroita pohtiesä sekä positiivisen asenteen luomisessa.*

*Lopuksi rakkaalle vaimolleni Miralle kiitos kärsivällisyydestä ja ymmärryksestä työpäivieni venyessä ajoittain useammaksikin vuorokaudeksi. Lapsiani haluan kiittää aikaisten aamuberätysten työskentelyyn tuomien lisätuntien lisäksi loppumattomana ilon lähteenä olemisesta.*

*Espoossa 4.12.1997*

*Panu Maijala*

# SISÄLLYSLUETTELO

ETUSIVU	i
DIPLOMITYÖN TIIVISTELMÄ	ii
ABSTRACT OF THE MASTER'S THESIS	iii
ALKULAUSE	iv
SISÄLLYSLUETTELO	v
LUETTELO KUVISTA, KAAVIOISTA JA TAULUKOISTA	vii
SYMBOLILUETTELO	ix
1 JOHDANTO	1
2 BINAURAAALISEN TEKNIIKAN PERUSTEITA	4
2.1 Käsitteitä	5
2.1.1 Keinopää	5
2.1.2 HRTF	6
2.1.3 Tilakuuleminen	6
2.1.4 Äänenlaatu ja psykoakustiset tunnusluvut	6
2.1.5 Binauraaliset psykoakustiset tunnusluvut	7
2.1.6 Binauraalinen signaalien ehostaminen	7
2.1.7 Binauraalinen mittaustekniikka	8
2.1.8 Transauraalisuus	8
2.1.9 Kuuloketerminologiaa	9
2.2 Binauraalinen kuuleminen	9
2.2.1 Binauraalisen kuulemisen akustiikkaa	9
2.2.2 Binauraalisen kuulemisen psykologiaa	10
2.2.3 Binauraalisen tekniikan tarpeellisuus	11
2.3 Kuuntelukokeet	12
2.3.1 Kuuntelukokeiden suunnittelu ja toteutus	13
2.4 Binauraalinen äänitys- ja toistotekniikka	16
2.4.1 Laitteisto	16
2.4.2 Äänitys tosipäällä	19
2.4.3 Äänitys keinopäällä	21
2.4.4 Ekvalisoinnit	21
2.4.5 Toistotekniikka	25

3	JÄRJESTELMÄN SUUNNITTELU	28
3.1	Mikrofonikapseli	28
3.2	Mikrofonietuvahvistin	29
3.2.1	Lähtöarvojen määrittäminen	30
3.2.2	Sähköinen rakenne	30
3.3	Äänityslaitteisto	32
3.4	Kuuntelukoelaitteisto	33
3.4.1	Kuulokkeet ja kuulokevahvistin	33
3.4.2	Vastausten kirjaaminen	34
3.4.3	Ohjelmisto	35
3.5	Näytteiden ekvalisointi	36
3.5.1	Ekvalisointiohjelma	38
3.6	Tilastolliset työkalut	39
3.6.1	Tilastolliset mittavälineet ja analyysimenetelmät	39
3.6.2	Tilastolliset ohjelmistot	43
3.7	Audiometri	43
3.7.1	Kalibrointi	44
4	EVALUOINNIT	45
4.1	Äänityslaitteisto	45
4.1.1	Sähköinen vaste	45
4.1.2	Vapaakenttävaste	46
4.1.3	Kanavien välinen ylikuuluminen	46
4.2	Kuulokevahvistin	47
4.3	Kuulokkeet ja ekvalisoinnit	48
4.4	Keinopää-tosipää vertailu	53
4.4.1	Kuuntelukokeen tulokset	54
5	DISKUSSIO	57
5.1	Järjestelmän rajoituksia ja ongelmia	57
5.2	Järjestelmän jatkokehitys	58
5.3	Binauraalisen tekniikan muita sovelluksia	59
5.4	Vastaavat kaupalliset järjestelmät ja alan yritykset	60
6	YHTEENVETO	61
7	LÄHTEET JA VIITTAUKSET	62
8	KIRJALLISUUSVIITTEITÄ	66
9	LIITTEET	75

## Kuvaluettelo

- Kuva 1.1** Diplomityössä äänenlaadun arviointiin kehitetty laitteisto perustuu binauraaliseen äänitys- ja toistotekniikkaan. Tutkittavat ääninäytteet tallennetaan binauraalisesti (1) DAT-nauhalle. Ääninäytteitä muokataan digitaalisen signaalinkäsittelyn keinoin (2) esimerkiksi poistamalla joitakin taajuuskomponentteja tai lisäämällä kohinaa niiden peittämiseksi. Ääninäytteistä kompensoidaan toistotilanteessa käytettävien kuulokkeiden epäideaalisuudet pois. Laitteistolla voidaan esittää käsitelty äänimateriaali samanaikaisesti usealle koehenkilölle (3). Koehenkilöt antavat vastauksensa tietokonehiiriä käyttäen. Tutkittava äänenlaatuongelma ratkaistaan kuuntelukokeen tuloksista tilastollisin menetelmin. 3
- Kuva 2.1** Neumann KU-100 on hyvin pelkistetty ja edullinen keinopää. Sitä käytetään paljon musiikki- ja luontoäänitteisiin. 5
- Kuva 2.2** Yksityiskohta: useat keinopäävalmistajat jäljittelevät ihmiskorvaa myös materiaalin osalta. Silikoniseoksista voidaan valmistaa korva, jonka akustiset ja fysikaaliset ominaisuudet ovat samat kuin keskimääräisellä ihmiskorvalla. 5
- Kuva 2.3** Erään keinopään (Cortex Manikin MK2) vasemman korvan HRTF (elevaatio 0° ja kulma 0°) ilman ikkunointia ja pehmennystä. Ainoastaan mittauslaitteiston vaikutus (lähinnä äänilähteenä toimineen kaiuttimen epäideaalisuudet) on kompensoitu pois. 6
- Kuva 2.4** Yksi suurimmista binauraalisen tutkimuksen rahoittajista on autoteollisuus. Äänen häiritsevyyden ja laatu on nousemassa tärkeimmäksi tutkimuksen kohteeksi. 16
- Kuva 2.5** Binauraalinen äänitys sondimikrofonin avulla tosipäästä. Sama henkilö kuuntelee äänityksen, joten tarvitaan vain kuulokkeiden epäideaalisuudet korjaava ekvalisointi. 17
- Kuva 2.6** Binauraalinen äänitys keinopäällä. Pää- (1) ja kuulokekorjain (2). 18
- Kuva 2.7** Keinopääjärjestelmä signaalinkäsittely- ja analysointimahdollisuuksilla. 18
- Kuva 2.8** Mikrofonin jää korvakäytävän aukon tasalle. Korvakäytävä suljetaan tulppalla. 20
- Kuva 2.9** Tosipää-äänityksissä käytetty Sennheiserin painemikrofonikapseli korvatulpassa. 21
- Kuva 2.10** Suunnittelemani PVC-muovista sorvattu adapteri tosipää-mikrofonin kalibrointiin Brüel&Kjær:n kalibraattorille 4230. 26
- Kuva 3.1** Mikrofonin pysyy hyvin paikoillaan korvan taakse menevän sangan ansiosta. Sankojen vaikutus äänikenttään äänenlaadun arvioinnin kannalta kiinnostavalla taajuusalueella on useimmissa tapauksissa merkityksetön. 29
- Kuva 3.2** Mikrofonietuvahvistin on rakennettu pieneen ja kevyeen vyölle kiinnitettävään koteloon. 30
- Kuva 3.3** Mikrofonietuvahvistimen a) painopiirilevy ja b) komponenttien sijoittelu piirilevyllä. 32
- Kuva 3.4** Vastaukset kerättiin PC-hiirillä. Nuihin integroitiin lisäksi pieni LED-merkkivalo, joka näkyy kuvassa johdon sisäänmenon vasemmalla puolella. Valolla voi antaa palautetta koehenkilölle esimerkiksi virheestä. 34
- Kuva 3.5** Kuuntelukoejärjestelmää varten muunneltu Apple® Extended Keyboard. Hiiret liitetään näppäimistön taakse lisättyyn liitinterfeysiin. Näppäimistö on edelleen ketjutettavissa Macintosh® Desktop Bus:in kautta (aukko näppäimistön päädyssä). Mikäli hiirien LED-merkkivaloja halutaan ohjata, täytyy näppäimistöön liittää ulkoinen virtalähde. 35
- Kuva 3.6** Esimerkki kuuntelukoeohjelman dialogi-ikkunoista. Ohjelmalla voi tarkistaa hiirien toimintakunnon sekä kalibroida kuulokkeiden tasot. Kuuntelukokeen valvoja seuraa näyttöltä kokeen edistymistä ja mikäli joku koehenkilöistä jättää vastaamatta, koe pysähtyy ja näytölle tulostuu "Not all choices made!". Koe jatkuu, kun kaikki vastaukset on saatu. 35
- Kuva 3.7** Kuuntelukokeiden näytteiden äänityksessä käytetyn henkilön kuulokevasteita saman merkkisillä kuulokkeilla (Sennheiser HD-580), a) vasen korva b) oikea korva. Kuulokkeet asetettiin koehenkilön päähän mahdollisimman tarkkaan samalle paikalle. 37
- Kuva 3.8** Kuuntelukokeiden näytteiden äänityksessä käytetyn keinopään kuulokevasteita saman merkkisillä kuulokkeilla (Sennheiser HD-580), a) vasen korva b) oikea korva. Kuulokkeet asetettiin keinopäähän mahdollisimman tarkkaan samalle paikalle. 38
- Kuva 3.9** Kuuntelukokeita varten suunnitellut ekvalisointisuodattimet. a) keinopäänäytteille b) tosipäänäytteille. Kummassakin tapauksessa alle 100 Hz:n taajuuksia korostettiin huomattavasti, sillä pienet taajuudet siirtyivät kokeisiin valituista kuulokkeista heikosti korviin. 39
- Kuva 4.1** Mikrofonietuvahvistimen sähköinen vaste a) vasen kanava b) oikea kanava. Ylipäästösuodattimen -3dB piste on 67 Hz. 46

<b>Kuva 4.2</b> Mikrofonietuvahvistimen vapaakenttäväaste mitattuna mikrofonikapselin kanssa, -3dB piste on 60 Hz, ylipäästö noin -6dB / oktaavi a j vasen kanava b j oikea kanava.	46
<b>Kuva 4.3</b> Mikrofonietuvahvistimen kanavien välinen ylikuuluminen. Asteikko ilmaisee absoluuttisen eron desibeleinä.	47
<b>Kuva 4.4</b> Kuulokevahvistimen kuormittamaton ulostulojännite vahvistuksen funktiona. Herätteenä on 100 mV <sub>RMS</sub> sinisignaali. Vahvistin yliohjautui pää- ja kanavasäätimien ollessa ääriaseteissaan.	47
<b>Kuva 4.5</b> Kuulokevahvistimen särön kasvu kuormituksen funktiona. Mittaus on tehty kanavalla 1, muut kanavat eivät olleet käytössä. Vaaka-akselilla kuormituksen olevien kuulokkeiden lukumäärä.	48
<b>Kuva 4.6</b> Kuulokevahvistimen särö taajuuden funktiona. Kuormituksenä 15 kuuloketta.	48
<b>Kuva 4.7</b> Kuulokkeiden induktanssi (mH) a j vasen ja b j oikea kuuloke sekä impedanssi ( $\Omega$ ) c j vasen ja d j oikea kuuloke 1 kHz:n taajuudella. Kuvaajissa harmaa alue osoittaa mille alueelle 95 % lukuarvoista sijoittui, harmaan alueen sisällä lukuarvojen keskiarvo (paksu viiva) sekä kaikkien lukuarvojen rajat.	49
<b>Kuva 4.8</b> Kuulokkeiden impedanssien ja induktanssien tilastollisia tunnuslukuja. L_LEFT on vasemman kuulokkeen induktanssi ja R_LEFT vasemman kuulokkeen impedanssi 1 kHz:n taajuudella. L_RIGHT ja R_RIGHT ovat vastaavat arvot oikean puoleisille kuulokkeille.	49
<b>Kuva 4.9</b> Äänityksessä käytetyn henkilön kuulokevasteet: a j vasen korva ja b j oikea korva.	50
<b>Kuva 4.10</b> Kuulokevasteet keinopäälle (Cortex Manikin MK2) a j vasen korva, b j oikea korva.	50
<b>Kuva 4.11</b> Keinopään vasen korva tosipää-äänityksissä käytetyllä laitteistolla mitattuna. Samoilla kuulokkeilla, sisäänrakennetuilla mikrofoneilla, vaste poikkeaa desibelin verran resonanssipaikeissa. Alempi käyrä sisäänrakennetuilla mikrofoneilla.	51
<b>Kuva 4.12</b> Painettaessa kumpaakin kuuloketta noin 10 N:n voimalla korvia vasten taso nousee noin 5 dB matalilla taajuuksilla. Kuvassa vahvempi viiva on vaste painettaessa ja ohuempi vaste ennen painamista a j vasen ja b j oikea korva. Kuuloketta painettiin sormilla reunoista, joten F C-ominaisuudet eivät muuttuneet merkittävästi.	52
<b>Kuva 4.13</b> Toteutunut lopullinen vaste a j keinopää-äänitteille b j tosipää-äänitteille. Vasteen poikkeamat optimoidulla alueella ovat alle desibelin keskiarvosta.	52
<b>Kuva 4.14</b> Äänitysasetelma kuuntelukokeiden herätteitä varten. Äänitettäessä "edestä taakse"- ja "takaa eteen"- näytteet päätetään käännettiin katsomaan polun suuntaisesti.	53
<b>Kuva 4.15</b> Näytteiden koemenestys. Näytteet on nimetty siten, että pieni "s"-kirjain tarkoittaa ekvalisoitua (suodatettu) näytettä. Pieni "t" tarkoittaa tosipää-äänitystä ja "k" vastaavasti keinopää-äänitystä. "T" vastaa "takaa eteen" ja " T" "edestä taakse".	54
<b>Kuva 4.16</b> Yksittäisten koehenkilöiden virheiden lukumäärä. Kuvassa on horisontaali-akselilla näytteiden tyypit (katso edellisen kuvan selostus), vaaka-akselilla virheiden tyypit (0 - 3 kertaa väärin vastannut) ja pystyakselilla virhetyyppien lukumäärä. esimerkiksi näytteeseen skT ei kukaan vastannut 3 kertaa väärin ja 7 henkilöä vastasi jokaisella kerralla oikein.	55
<b>Kuva 5.1</b> Mr Keino Suuntoon soveltaa binauraalista tekniikkaa tiedekeskus Heurekaassa.	59
<b>Kuva 9.1</b> Mikrofonialustaan on lovettu ura mikrofonin sankaa varten.	76
<b>Kuva 9.2</b> Mikrofonin asetettuna alustaan.	76
<b>Kuva 9.3</b> -A-R korvatulppa mikrofonin päällä.	76
<b>Kuva 9.4</b> Sovittimen työntökappale paikoilleen asetettuna.	77
<b>Kuva 9.5</b> Sovitin on suunniteltu Brüel&Kjær:n kalibraattoriin tyyppiä 4230.	77
<b>Kuva 9.6</b> Kalibroitaessa sovitinta puristetaan kevyesti kalibraattoria vasten.	77

## Kaavioluettelo

<b>Kaavio 2.1</b> Psykologisen kuuntelukokeen kaavio. Havainto, kuten myös sen kognitiivinen käsittely muuntuvat reaktiota muokkaavien tekijöiden vaikutuksesta.	12
<b>Kaavio 2.2</b> Kaavio yhtälöstä (2.18) signaalinkäsittelyn keinoin. Kuvassa $E_{vasen}$ ja $E_{oikea}$ ovat kaiuttimille menevät signaalit ja $P_{vasen}$ sekä $P_{oikea}$ äänitetyt äänipaineet korvista. $M_1$ on äänitystilanteessa vallinneen äänipainetason toistamiseksi tarvittava vahvistuskerroin.	27
<b>Kaavio 3.1</b> Etuvahvistimen piirikaavio.	31
<b>Kaavio 4.1</b> Tilastolliseen analyysiin valitut faktorit	55
<b>Kuva 5.1</b> Mr Keino Suuntoon soveltaa binauraalista tekniikkaa tiedekeskus Heurekaassa.	59

## SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Symboli	Nimitys	Yksikkö
$C$	kapasitanssi	F
$E$	jännite taajuustasossa	V
$E_{kuuloke}$	kuulokeliitännän jännite taajuustasossa	V
$E_{kaiutin}$	kaiutinliitännän jännite taajuustasossa	V
$E_{mikrofoni}$	mikrofoniliitännän jännite taajuustasossa	V
$F$	tilastollinen frekvenssi	-
$F$	äänien vaihteluvoimakkuus	vacil
$G$	siirtofunktio, kompensatiokerroin	-
$L$	induktanssi	H
$L$	äänipainetaso	dB
$M$	vahvistuskerroin, siirtofunktio	-
$Md$	otosmediaani	-
$N$	äänien äänekkyys	soni
$P$	äänipaine taajuustasossa, äänen sensorinen miellyttävyys	-
$P_{korva}, P_{äänitys}$	äänipaine taajuustasossa ilmoitetussa pisteessä korvakäytävällä	Pa
$P_{toisto}$	äänipaine taajuustasossa ilmoitetussa pisteessä kuulijan korvakäytävällä toistotilanteessa	Pa
$P$	Pearsonin vinousmitta	-
$R$	tilastollisen otoksen vaihteluväli	-
$R$	resistanssi	$\Omega$
$R$	äänien karheus	asper
$S$	äänien terävyys	acum
$T$	äänien tonaalisuus	-
$U$	tasa- tai vaihtojännite	V
$Z$	impedanssi	$\Omega$
$Z_{korvakäytävä}$	korvakäytävään saapuvan ääniaallon kohtaama (näkemä) korvakäytävän akustinen impedanssi	$\Omega$
$Z_{kuuloke}$	korvakäytävästä ulospäin etenevän ääniaallon kohtaama (näkemä) akustinen impedanssi, kun kuuloke peittää korvan.	$\Omega$

$Z_{säteily}$	korvakäytävästä ulospäin etenevän ääniaallon kohtaama (näkemä) akustinen impedanssi	$\Omega$
$c$	äänen nopeus	m/s
$f$	taajuus	Hz
$g$	vahvistuskerroin (gain)	-
$l$	pituus	m
$p$	äänipaine aikatasossa	Pa
$p_{korva}$	äänipaine aikatasossa ilmoitetussa pisteessä korvakäytävällä	Pa
$p$	tilastollinen merkitsevyystaso, riskitaso (significance)	-
$s$	otoskeskihajonta	-
$\bar{x}$	otoskeskiarvo	-
$\chi^2$	khiin neliötesti	-
$\varphi$	lineaarinen korrelaatiokerroin	-
$\mu$	normaalijakauman odotusarvo	-
$\sigma^2$	normaalijakauman varianssi	-
<i>engl.</i>	englannin kielessä	-
<i>AIFF</i>	audio interchange file format	-
<i>CLOS</i>	Common Lisp Object System	-
<i>DFT</i>	discrete Fourier transform	-
<i>DSP</i>	digital signal processing	-
<i>FEC</i>	free-air equivalent coupling	-
<i>FFT</i>	fast Fourier transform	-
<i>FIR</i>	finite-impulse response digital filter	-
<i>GUI</i>	graphical user interface	-
<i>ITF</i>	interaural transfer function	-
<i>HRTF</i>	head-related transfer function	-
<i>IACC</i>	inter-aural cross correlation	-
<i>IIR</i>	infite-impulse response digital filter	-
<i>ITD</i>	interaural time delay (or difference)	-
<i>MLS</i>	maximum-length sequence	-
<i>MLSSA</i>	maximum-length sequence system analyzer	-
<i>OOP</i>	object-oriented programming	-
<i>UTP</i>	unshielded twisted pair	-

# 1 Johdanto

Lähes kaikki ihmisen valmistamat laitteet ja kulkuneuvot tuottavat ääntä. Usein ääni on niissä ei-toivottu sivutuote, jolloin sitä kutsutaan meluksi. Ensimmäinen keino pyrkiä vähentämään melua on äänilähteen muuttaminen ja eristäminen ympäristöstä fysikaalisin keinoin. Mitä jos tämä ei riitä? Entä jos ääni muuttuukin *häiritsevämmäksi* vaikka sen taso saadaan laskemaan?

Uuden tuotteen markkinoinnin kannalta on yhä tärkeämpää sen ääni. Ostajat haluavat laadukkaita tuotteita ja samanlainen tekijä kuin kestävyys ja turvallisuus on *äänenlaatu*. Useat valmistajat - etenkin autoteollisuudessa - sijoittavat merkittävän osan valmistuskustannuksista tuotteensa äänenlaadun parantamiseksi ja muuttamiseksi kohdeasiakkaan mieltymysten mukaiseksi. Tästä on syntynyt käsite *tuoteäänenlaatu*.

Ääntä voidaan arvioida monin eri keinoin. Perinteinen fysikaalinen mittaluku, A-painotettu äänitaso kertoo vain vähän esimerkiksi äänen *häiritsevyydestä*. Äänitasomittarin lukeman perusteella hiljaisempi ääni voi kuitenkin häiritä kuulijaa enemmän kuin toinen voimakkaampi ääni. Esimerkiksi traktorissa kuljettajalle kuuluvan moottorin äänen vaimentaminen saattaa tuoda vaihteiston ääntä niin paljon esille, että ajoääni muuttuukin häiritsevämmäksi kuin ennen vaimentamista, vaikka äänitaso laskee. Tässä tapauksessa vaihteiston ääni koetaan häiritsevämpänä kuin moottorin ääni. Yksi keino tuotteen ääntä suunnitellessa on pyrkiä *peittämään* häiritsevempi ääni vähemmän häiritsevällä äänellä, mikäli ääntä ei saada vaimennettua fysikaalisin keinoin ja kohtuullisin kustannuksin.

Tärkein ja luotettavin menetelmä häiritsevyyden määrittämiseksi on *kuuntelukokeiden* järjestäminen. Kuuntelukokeet ovat yksi psykoakustiikan keinoista tutkia aistimuksia eli kuulijan subjektiivisia reaktioita ärsykkeisiin, objektiivisesti mitattaviin fysikaalisiin ääniherätteisiin ja niihin liittyviin ympäristötekijöihin.

Äänen häiritsevyyttä voidaan myös määrittää esimerkiksi sen *terävyydellä* ja *vaihteluvoimakkuudella*. Näillä *psykoakustisilla tunnusluvuilla* pyritään ilmaisemaan äänen subjektiivisesti vaikuttavia ominaisuuksia objektiivisesti ja ne on määritelty kuuntelukokeiden tulosten perusteella. Äänekkyyys on standardoitu ja standardointi on meneillään mm. karheuden, terävyyden, vaihteluvoimakkuuden, tonaalisuuden sekä äänenkorkeuden osalta. Kaikki psykoakustiset tunnusluvut on kuitenkin määritelty *monauraaliseksi* tunnusluvuiksi, mikä tarkoittaa, että ne lasketaan samanaikaisesti kummallekin korvalle

riippumatta vastakkaiseen korvaan tulevasta äänestä. Kuitenkin kuulojärjestelmä yhdistää signaalit kummastakin korvasta siten, että *binauraaliset* tunnusluvut saattavat merkittävästi erota monauraalisista tunnusluvuista (Bodden, 1993). Binauraaliset ääninäytteet ovatkin nykyisin tärkeitä kuuntelukokeiden herätesignaaleja.

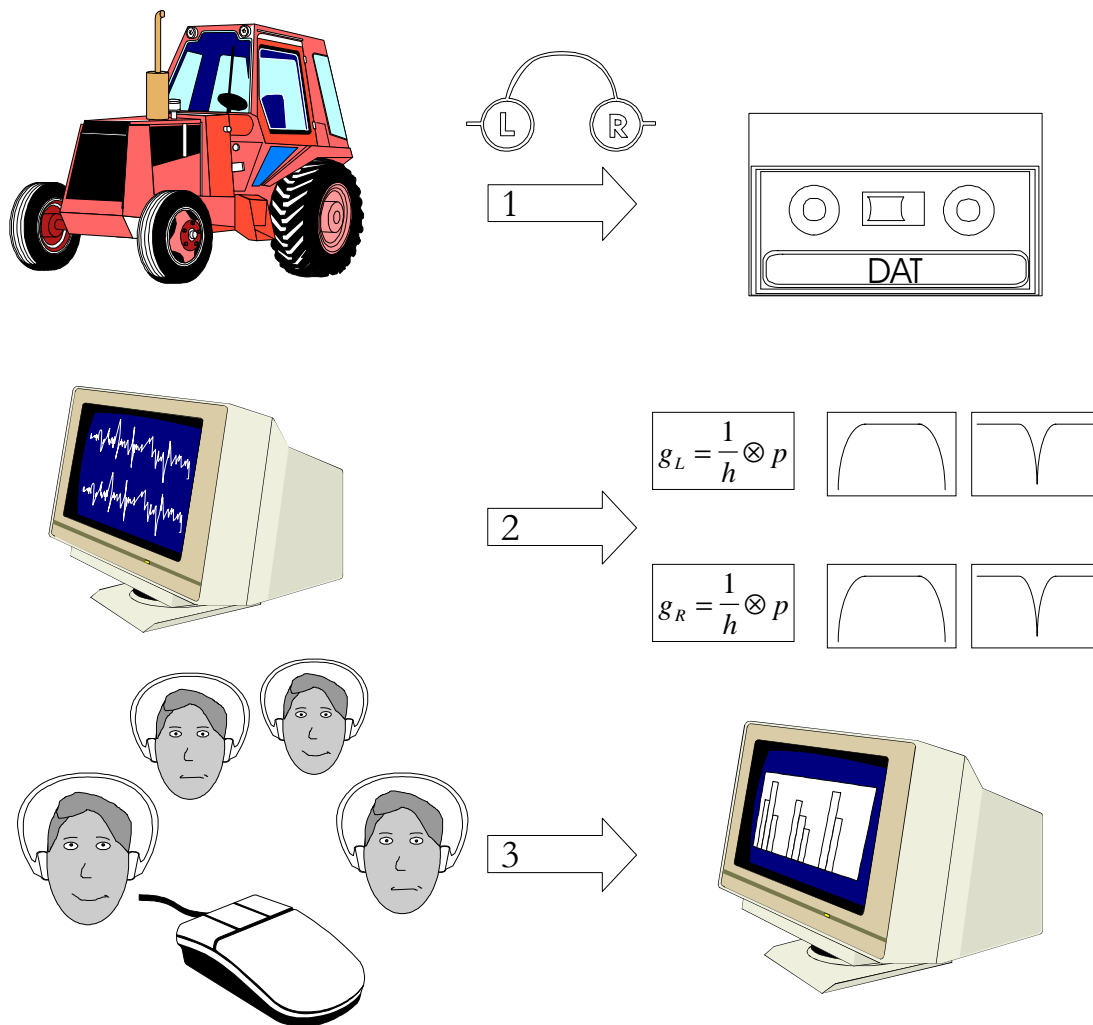
Yhdistelemällä psykoakustisia tunnuslukuja voidaan määritellä monimutkaisempia, yleisemmin ääntä kuvaavia arviointiasteikkoja. Zwicker on määrittänyt kuuntelukokeiden pohjalta laskentamallin mm. *sensoriselle miellyttävyydelle* (engl. sensory pleasantness) (Zwicker, 1990).

Vastakohtana yleisille äänenlaatuva kuvaaville tunnusluvuille ovat tiettyä sovellusta varten kehitetyt tunnusluvut. Niillä saadaan luotettavempia tuloksia, sillä ne määritellään kyseisen sovelluksen kohderyhmän antamien tulosten perusteella. Jos esimerkiksi tehtävänä on arvioida yksittäisen äänen, kuten vaihteiston ulina, vaikutusta traktorin sisätilan äänenlaatuun, voidaan kehittää menetelmä (engl. instrumental tools) sen mittaamiseksi vertaamalla signaalianalyysijä kyseisen ajoneuvon ostajaryhmälle tehtyjen kuuntelukokeiden tuloksiin.

Tämä diplomityö pohjautuu Työsuojelurahaston ja kolmen suomalaisen työkonevalmistajan (Tamrock Oy Turuntehdas, Timberjack Oy ja Valtra Oy Ab) rahoittamaan projektiin *työkoneiden ohjaamomelun häiritsevyyden vähentämiseksi*. Markkinoilla on äänenlaadun arviointiin suunniteltuja järjestelmiä, mutta ne eivät soveltuneet projektin käyttöön hintansa ja puutteidensa vuoksi. Työkoneiden ohjaamomelua oli tarkoitus tutkia myös koneen työskennellessä normaalissa käyttöympäristössään ja kaupalliset järjestelmät oli suunniteltu laboratoriotutkimusta ajatellen. Suunnittelimme äänitysjärjestelmän, joka ei vaikeuta koneen käyttämistä ja tallentaa alkuperäisen ääniympäristön mahdollisimman autenttisenä.

Yleensä binauraaliseen äänitykseen käytetään *keinopäätä*, jolloin konetta ei voida operoida ilman erillistä kauko-ohjausta. Valitsimme menetelmäksi äänisignaalin tallentamisen koehenkilön *suljetun korvakäytävän suulta*. Tätä menetelmää nimitetään tässä työssä yleistäen jo vakiintuneella termillä *tosipäätekniikka* (engl. real head technique). Suljetun korvakäytävän suulta tallentamiseen sisältyy vähiten subjektiivista informaatiota eri tosipäätekniikoista ja se soveltuu parhaiten näistä kenttämittauksiin.

Kuuntelukokeiden tulosten luotettavuus kasvaa, kun käytetään riittävän monta koehenkilöä. Suunnittelimme myös laitteiston, jolla voidaan tehdä kuuntelukoe usealle koehenkilölle samanaikaisesti.



**Kuva 1.1** Diplomityössä äänenlaadun arviointiin kehitetty laitteisto perustuu binauraaliseen äänitys- ja toistotekniikkaan. Tutkittavat ääninäytteet tallennetaan binauraalisesti (1) DAT-nauhalle. Ääninäytteitä muokataan digitaalisen signaalinkäsittelyn keinoin (2) esimerkiksi poistamalla joitakin taajuuskomponentteja tai lisäämällä kohinaa niiden peittämiseksi. Ääninäytteistä kompensoidaan toistotilanteessa käytettävien kuulokkeiden epäideaalisuudet pois. Laitteistolla voidaan esittää käsitelty äänimateriaali samanaikaisesti usealle koehenkilölle (3). Koehenkilöt antavat vastauksensa tietokonehiiriä käyttäen. Tutkittava äänenlaatuongelma ratkaistaan kuuntelukokeen tuloksista tilastollisin menetelmin.

*Tutkimustehtäväksi* formuloitiin saada aikaiseksi laitteisto, jolla voidaan tuottaa kuuntelukomemateriaalia äänen häiritsevyyden arviointimenetelmien kehittämiseen. Tämä diplomityö esittää laitteiston eri osien teoriataustan (2. luku), suunnittelukriteerit ja käytännön toteutuksen (3. luku). Lisäksi komponentit evaluoidaan perinteisin mittausmenetelmin ja kuuntelukokein (4. luku).

## 2 Binauraalisen tekniikan perusteita

Tieteellisessä tutkimuksessa kokeiden toistettavuus on tärkeä tekijä. Yleensä tällainen tilanne on järjestettävissä vain laboratorio-olosuhteissa. Psykoakustiikan tutkimuksen tarvitsemat hyvin hallitut ja tunnetut (mitattavissa olevat) äänitapahtumat ovat helposti toteutettavissa synteettisesti. Joskus on tarvetta toistaa myös todellisia, reaali maailman kuulotapahtumia, kuten puhetta, luonnonääniä, musiikkia tai melua.

Tavanomaisesti mikrofoniilla tai stereomikrofoniparilla äänitetyn signaalin toistaminen ei enää useimmiten kelpaa kriittiselle tutkimukselle, sillä tiedetään, ettei sellaisen signaalin kuuleminen hyvälläkään laitteistolla vastaa täysin todellista kuulotapahtumaa. Aidon kuuloillusion toistaminen on mahdotonta toteuttaa, sillä kuulemisaistimukseen vaikuttavat oleellisesti myös muiden aistien tuottamat ärsykkeet. Kuulotapahtuman tunnetilan toistaminen ei ole mahdollista tekniikan keinoin.

Yksi lähestymistapa täydelliseen toistoon on pyrkimys toistaa todellisessa tilanteessa tärykalvoilla vallinneet äänipainesignaalit kuuntelutilanteessa täsmälleen samoina. *Binauraalinen äänitys- ja toistotekniikka* mahdollistavat tämän.

Binauraalinen tekniikka on paljon vanhempaa kuin stereotekniikka, sillä se tunnettiin jo neljä vuotta gramofonin keksimisen jälkeen (Sunear, 1996). Sitä käytettiin ensimmäisen kerran oopperan äänittämisessä Pariisin oopperatalon lavalta 1881. Keksijä Clement Ader käytti näyttämön poikki asetettuja hiilimikrofonipareja. Signaalit hän miksasi kahteen erilliseen puhelinlinjaan, jotka menivät kuulijoiden koteihin. Kuuntelijoilla piti olla kaksi puhelinta kullakin ja heidän piti pistää kummankin kuulokkeet korviinsa. Yhdysvaltojen ilmavoimat käyttivät hyperbinauraalisia kuulotorvia ensimmäisessä maailmansodassa vihollisen lentokoneiden paikallistamisessa. Vuonna 1920 kokeiltiin ensimmäisen kerran binauraalisia radiolähetyskäyttöä, jotka käyttivät kahta taajuutta. Kuulijat virittivät kaksi kidevastaanotinta niiden taajuuksille. Vuoden 1939 World's Fair -tapahtuman kiinnostavin näyttelyesine oli keinopää "Oscar". Ihmiset saivat kuunnella kuulokkeilla, mitä tapahtui huoneessa, jossa Oscar oli.

Binauraalinen tekniikka pohjautuu perusoletukseen, jonka mukaan äänipainesignaalit kummallakin tärykalvolla ovat fysiologisesti riittävä heräte auditoriselle järjestelmälle. Ne on hyväksytty kaiken kuulotutkimuksen peruseränteiksi, sekä fysikaalisessa että auditorisessa mielessä (Blauert et al., 1993).

Lokalisaatioinformaatio muodostuu oikeaan sekä vasempaan korvaan tulevan äänen amplitudin ja vaiheen eroista. Mikäli signaalia ei muokata, binauraalinen äänitys vaatii toistovälineeksi stereokuulokkeet. Mikäli halutaan toistaa binauraalisella äänitystekniikalla tehty äänite stereokaiuttimilla, puhutaan usein *transauraalisesta* toistosta. Äänitetty signaali prosessoidaan kompensoimaan kaiuttimien ja kuulokkeiden väliset erot, kuten korvien välinen ylikuuluminen ja taajuusvasteen epäideaalisuudet.

## 2.1 Käsitteitä

### 2.1.1 Keinopää

Useimmat binauraaliset äänitykset tehdään keinopäällä (dummy head, artificial head, head simulator, Kunstkopf), joka on tehty täysikasvuisen aikuisen pään keskimääräisten mittojen mukaan (Kuva 2.1). Keinopään rakenteessa pyritään toistamaan mittojen ja yksityiskohtien lisäksi ihon pehmeys ja luun kovuus.



**Kuva 2.1** Neumann KU-100 on hyvin pelkistetty ja edullinen keinopää. Sitä käytetään paljon musiikki- ja luontoäänitteisiin.

Jopa oikeita ihmisen pääkalloja käytettiin tutkimusmielessä (Sunear, 1996), mutta lopulta päädyttiin synteettisiin materiaaleihin niiden helpomman työstettävyyden vuoksi. Monilla keinopäillä on mukana olkapäät ja joillakin on hiukset (esim. Head Acoustics HMS1). Kaikilla yksityiskohtilla on vaikutusta mikrofoneihin saapuvaan ääneen. Moniin keinopäihin on saatavana ihmiskorvan akustista impedanssia jäljittelevät silikoniseoksesta valmistetut korvat (Kuva 2.2).

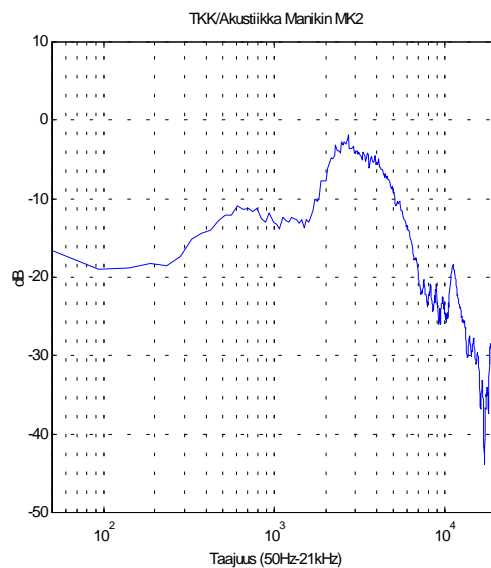


**Kuva 2.2** Yksityiskohta: useat keinopäävalmistajat jäljittelevät ihmiskorvaa myös materiaalin osalta. Silikoniseoksista voidaan valmistaa korva, jonka akustiset ja fysikaaliset ominaisuudet ovat samat kuin keskimääräisellä ihmiskorvalla.

Mikrofonit ovat yleensä pienet suuntaamattomat kondensaattorimikrofonit sijoitettuna korvakäytävän suulle tai lähelle. Joissakin malleissa mikrofonit on sijoitettu tärykalvon paikalle korvakäytäviin. Kalleimmista malleista mikrofonisignaaleille tehdään ekvalisointi korjaamaan äänen kaksinkertainen siirtyminen korvakäytävän läpi - ensin äänitetäessä ja sitten toistettaessa. Kaikissa tapauksissa tavoitteena on säilyttää ihmisen kuuloaistin vaatimuksia vastaava lokalisatioinformaatio.

### 2.1.2 HRTF

HRTF (engl. head-related transfer function) on vapaan kentän siirtofunktio tietystä pisteestä korvaan. HRTF:ien ansiosta - riippuen tulevan äänen suunnasta - aivoille tulee signaali, joka muuttuu voimakkuudeltaan sekä taajuussisällöltään (Kuva 2.3, erään keinopään HRTF yhdestä suunnasta). Korvalehden harjanteet sekä kaikki muutkin pään ja olkapäiden fyysiset ominaisuudet toimivat taajuusriippuvina suotimina, joiden vaste muuttuu äänen tulokulman funktiona niin sivusuunnassa kuin pystysuunnassakin. Aivot pystyvät paikallistamaan tulevan äänen pienestäkin muutoksesta äänen spektrisisällössä, vaiheessa tai voimakkuudessa.



**Kuva 2.3** Erään keinopään (Cortex Manikin MK2) vasemman korvan HRTF (elevaatio 0° ja kulma 0°) ilman ikkunointia ja pehmenystä. Ainoastaan mittauslaitteiston vaikutus (lähinnä äänilähteenä toimineen kaiuttimen epäideaalisuudet) on kompensoitu pois.

### 2.1.3 Tilakuuleminen

Binauraalisista äänitteistä voidaan rekonstruoida äänitystapahtuman akustinen tilanne (Soulodre, 1993). Niistä saadaan selville äänittävän pään asento ja suhde äänilähteisiin. Sopivilla herätteillä saaduilla vasteilla voidaan mallintaa koko tila. Tyypillisiä sovelluksia ovat äänilähteen paikan ilmaisimet, työkalut huoneakustiikan arviointiin ja äänijärjestelmiin kuten tilavuusmittarit, kaiunilmaisimet, Haasin efekti -ilmaisimet sekä väli- neet psykoakustiikan tutkimukseen. Esimerkiksi tilantuntua arvioidaan korvien välisen ristikorrelaation (IACC) avulla. Lisäksi merkittävä työkenttä on tuotteen äänen suunnittelu. Tähän arviointiin käytetään *binauraalisia psykoakustisia tunnuslukuja*.

### 2.1.4 Äänenlaatu ja psykoakustiset tunnusluvut

*Tuoteäänienlaatu* on tärkeä kilpailu- ja markkinointikeino. Rajatapauksessa asiakas valitsee kahden eri valmistajan tuotteista sen, joka *miellyttää ääneltään* eniten. Tuotteen ääni ei saa olla liian häiritsevä, mutta sen pitää luoda illuusio kestävästä, voimakkaasta ja turvallisesta koneesta. Käyttökelpoisuuteen kuuluu myös äänenlaatu.

Melua eli ääntä, joka on häiriötekijä, on perinteisesti mitattu *äänitasomittarilla*. Mittarin ilmaisema A-painotettu äänitaso pyrkii kuvaamaan, miten *voimakkaana* ihminen aistii äänen. Voimakkaampi ääni ei kuitenkaan ole aina häiritsevempi. Sirinä auton tuuletinlaitteessa häiritsee enemmän kuin mittarin mukaan paljon voimakkaampi auton moottorin käyntiääni.

*Psykoakustiset tunnusluvut* ovat ääntä kuvailevia suureita, jotka on määritetty tutkimalla erilaisten *ärsykkeiden* vaikutusta ihmisten *aistimuksiin*. Ärsykkeet on määritetty siten, että jotain sen ominaisuutta muuttamalla on aistimus kvantisoitavissa eli asetettavissa ennaltamäärätylle mitta-asteikolle. Äänekkyys on standardoitu (DIN 45631, ISO 532A/B) ja standardoinnin alla ovat mm. karheus, terävyys, vaihteluvoimakkuus, tonaalisuus ja äänenkorkeus. Esimerkiksi äänen *terävyys* S (engl. sharpness) kertoo äänen taajuussisällöstä eli miten *spektri* sijoittuu keskimäärin taajuusasteikolle. Terävyys kasvaa, mikäli äänen sisältämien korkeiden taajuuksien osuus lisääntyy. Äänitason lisäys kasvattaa myös hieman terävyyttä.

Äänenlaatua voidaan kuvailla psykoakustisilla tunnusluvuilla joissakin hyvin rajatuissa tapauksissa. Esimerkiksi *sensorinen miellyttävyys* P (engl. sensory pleasantness) riippuu äänen *karheudesta* R, *terävyydestä* S, *tonaalisuudesta* T ja *äänekkydestä* N. Zwicker (Zwicker, 1990) on määrittänyt sille kuuntelukokeiden perusteella matemaattisen mallin (Kaava 2.1).

$$\frac{P}{P_0} = e^{\frac{-0.7R}{R_0}} \cdot e^{\frac{-1.08S}{S_0}} \cdot \left(1.24 - e^{\frac{2.43T}{T_0}}\right) \cdot e^{-\left(\frac{0.023N}{N_0}\right)^2}. \quad (2.1)$$

Tämän kaltaisten, useista primäärisuureista laskettujen, mittalukujen tulokset voivat vaihdella paljon koehenkilöiden koulutus-, kulttuuri- ja kokemustustojen mukaan ja eivät ole suoraan hyödynnettävissä eri tapauksiin. Kuitenkin yksittäisiin kohteisiin voidaan määrittellä vastaavia laskentamenetelmiä (engl. instrumental tools) ja saada yleispäteviä vastauksia rajatussa ihmisryhmässä.

### 2.1.5 Binauraaliset psykoakustiset tunnusluvut

Psykoakustiset tunnusluvut lasketaan samanaikaisesti kummallekin korvalle riippumatta korviin tulevien äänten eroista. Nämä *monauraaliset* tunnusluvut saattavat erota merkittävästi *binauraalisista* tunnusluvuista (Bodden, 1993). Binauraalisista auditorisista malleista johdetut algoritmit antavat jo varsin hyviä estimaatteja näistä tunnusluvuista. Tämänkaltaisille työkaluille on kysyntää niin äänenlaadun arvioinnin alueella kuin sovelluksissa, joita kutsutaan nimellä *binauraalinen signaalien ehostaminen* (engl. binaural signal enhancement).

### 2.1.6 Binauraalinen signaalien ehostaminen

Hyvin tunnettu termi binauraalisen signaalien ehostamisen yhteydessä on ns. "cocktail-party" -ilmiö, jonka mukaan normaalikuuloiset ihmiset (binauraalisen kuulemisen avulla) voivat keskittyä tiettyyn äänilähteeseen vaikka tilassa olisi muitakin yhtä voimakkaita

herätteitä. Tietenkin tämä on jossain määrin mahdollista monauraalisen kuulemisenkin avulla, mutta binauraalisesti se on monin verroin tehokkaampaa.

"*Bochum*" -versiossa "cocktail-party" -prosessorista eli algoritmista, joka vahvistaa puheita kyseisessä tilanteessa, käytetään kuulon binauraalista mallia kontrolloimaan Wiener-suodinta (Bodden, 1993) (Bodden et al, 1992.). Tämä on toteutettu määrittämällä ensin halutun puhujan paikka tilassa ja arvioimalla sen signaalikohinasuhdetta muihin puhujiin sekä taustameluun nähden. Järjestelmä suorittaa laskennan kriittisillä kaistoilla. Kahden puhujan tilanteessa saadaan haluttu signaali kohtuulliselle ymmärrettävyytasolle jopa siinä tilanteessa, että se on 15 dB pienemmällä tasolla kuin kilpaileva äänilähde. Sovelluksia tällaiselle järjestelmälle on lukuisia, kuten välineet binauraalisten signaalien editointiin, kuulokojeet, puheentunnistus sekä "hands-free" -puhelimet. Esimerkiksi binauraalista signaalien ehostamista voidaan käyttää suuntaavampien mikrofonien toteuttamiseen akustisesti huonoihin tiloihin.

### 2.1.7 Binauraalinen mittaustekniikka

Binauraaliset äänitys-, mittaus- ja analysointitekniikat ovat kehittyneet erittäin voimakkaasti viimeisen vuosikymmenen aikana. Nykyaikaiset binauraalisessa äänityksessä käytetyt keinopäät varustettuna kehittyneillä tietokonepohjaisilla signaalinprosessointi- ja analysointivälineillä tarjoavat akustiikkasuunnittelijoille hyvät työvälineet sekä subjektiiviseen että objektiiviseen akustisten tilojen suunnitteluun.

Psykofyysisessä binauraalisessa mittauksessa käytetään fysiikkaan perustuvia menetelmiä, missä auditorisessa mielessä koehenkilö toimii mittaus- ja arviointi-instrumenttina. Nykyisiä sovelluksia binauraalisessa mittauksessa ja arvioinnissa voidaan löytää sellaisilta alueilta kuten meluntorjunnasta, akustisten tilojen suunnittelusta, äänenlaadun arvioinnissa (esimerkiksi puheteologiassa, arkkitehtuurissa akustiikassa ja tuotteen äänen suunnittelussa) sekä erityisissä mittauksissa puhelinjärjestelmissä, kuulokkeissa, kuulosuojaimissa ja kuulolaitteissa (Blauert et al., 1980) (Schröter, J., 1986). Joissakin sovelluksissa käytetään jopa eri mittasuhteissa rakennettuja keinopäitä, esimerkiksi arkkitehtuuristen pienoismallien arvioinnissa (Els et al., 1985) (Els et al., 1986.) (Xiang et al., 1991.) (Xiang et al., 1993.).

Koska keinopäät ovat peruseräatteiltaan vain tapa toteuttaa sarja lineaarisia suodattimia, voidaan ajatella myös muita tapoja implementoida sellaisia suodattimia, esimerkiksi elektronisesti. Monissa sovelluksissa tämä antaa paljon lisää vapautta, koska sähköisiä suodattimia voidaan kontrolloida varsin monipuolisesti.

### 2.1.8 Transauraalisuus

Termi "binauraalinen" edellyttää, että ääni toistetaan stereokuulokkeiden kautta. Kun samaa äänitystä aiotaan toistaa stereokaiuttimilla, käytetään termiä "transauraalinen". Kaiutinkuuntelussa tulee ongelmaksi kanavien ylikuuluminen. Tämä voidaan ehkäistä esimerkiksi Cooperin menetelmällä käyttämällä minimivaiheisia suotimia (Cooper et al., 1989) tai lisäämällä alkuperäiseen signaaliin ekvalisoinnin lisäksi keinotekoiset ylikuulumisen "poistavat" signaalit (Atal et al, 1962) (Møller, 1989). Näiden signaalien generoi-

misesta on useita eri variaatioita ja periaate on patentoitu Atalin ja Schroederin toimesta vuonna 1962. Møllerin menetelmää käsitellään tarkemmin kappaleessa 2.4.5. Helppoin toteutus transauraaliselle järjestelmälle on kaiuton tila ja tarkalleen määrätty kuuntelupaikka. Lähikenttäkaiuttimien käyttämistä toistoon on myös tutkittu (Salava, 1990).

### **Stereoäänityksen ja binauraalisen äänityksen ero**

Stereoäänityksessä mikrofonit ovat yleensä sijoitettuna paljon kauemmaksi toisistaan kuin keskimääräinen korviemme välimatka (7 tuumaa tai 17-18 cm). Tällöin kanavien välinen viive ei vastaa todellisuutta. Myöskään mukana ei ole HRTF:t aiheuttavia korvalehteä, hartioita ja päähäälloä välissä.

### **2.1.9 Kuuloketerminologiaa**

Kuulokkeilla voidaan tuottaa äänipaineita suoraan korvaan monella eri tekniikalla. Sähköakustisena muuntimena voi olla pietsoelementti tai herkkä kalvo värähtelemässä sähkökentässä (sähköstaattiset kuulokkeet). Useimmat hyvälaatuiset kuulokkeet on kuitenkin toteutettu magneettisesti (dynaamiset kuulokkeet).

*Akustisen kytkennän* perusteella kuulokkeet jaetaan yleensä kolmeen ryhmään (Minnaar, 1996): kuulokkeet, jotka lepäävät korvalehden päällä (engl. supra-aural), laitetaan korvakäytävään (engl. intra-aural) ja kuulokkeet, jotka ympäröivät korvalehden koskematta siihen (engl. circumaural). Korvakäytävään laitettavista ns. tulppamalleista voidaan vielä erottaa ns. nappikuulokkeet, jotka laitetaan korvakäytävän suulle. Tulppamallit sulkevat korvakäytävän kokonaan, mutta nappimallien akustinen kytkentä vaihtelee henkilöltä toiselle. Yleensä nappimalliset kuulokkeet eivät sulje korvakäytävää täysin.

### **FEC-kuuloke**

Avoimella kuulokkeella tarkoitetaan usein puhekielessä kuuloketta, joka ei vaimenna kuulokkeen ulkopuolelta tulevaa ääntä. Avoin eli FEC (free-air equivalent coupling) on määritelmä kuulokkeille, joiden akustinen sovitus korvaan on sama kuin vapaaseen ilmaan. Binauraalisille äänitteille joudutaan tekemään erikseen korjaus kompensoimaan kuulokkeen akustisen impedanssin aiheuttama muutos korvan vapaakenttävasteeseen, mikäli kuulokkeet eivät ole riittävän avoimet.

## **2.2 Binauraalinen kuuleminen**

### **2.2.1 Binauraalisen kuulemisen akustiikkaa**

Ihmisillä, kuten useimmilla selkärankaisilla, on kaksi korvaa suunnilleen samalla korkeudella kummallakin puolella päätä. Fyysisesti korvat ja pää muodostavat monimutkaisen ja erityiset siirto-ominaisuudet omaavan antennijärjestelmän, joka vastaanottaa väliaineessa - yleensä ilmassa - eteneviä pitkittäisiä ääniaaltoja. Koska se on fyysinen järjestelmä ja äänen eteneminen on lineaarinen prosessi (norm. olosuhteissa), voidaan systeemiä pitää lineaarisena ja siksi se on helposti simuloitavissa.

Ottamalla tuleva ääniaalto herätteeksi ja äänipaineet kummankin korvan tärykalvolla lähtösignaaliksi voidaan järjestelmää kuvata samaan herätteeseen kytketyiksi kahdeksi suuntariippuvaksi suodattimeksi, joiden siirtofunktiot ovat korviin tulevan aaltorintaman kulmasta riippuvaiset.

### **Spatiaalisen informaation säilyminen ja mikrofonin sijoitus**

Äänen siirtyminen korvakäytävän suulta tärykalvolle on äänen tulosuunnasta riippumaton ja myös korvakäytävän suu voi toimia äänityspaikkana (Møller, 1992). Tämän todistus on johdettu myös *suljetun* korvakäytävän suulta tallennetulle äänipaineelle, joka on käytännöllisempää kuin tärykalvon läheltä (Hammershøi, 1996) (Møller, 1995a). Äänitystilannetta vastaavan ekvalisoinnin ja oikean kalibroinnin jälkeen voidaan toistaa äänipaineet tärykalvolla riippumatta äänityspaikasta. Mikrofonin voi olla jopa muutaman millimetrin korvakäytävän aukon ulkopuolella (Hammershøi et al., 1991).

Äänitettäessä suljetun korvakäytävän suulta on toistoketju kalibroitu oikein, kun kuulokkeisiin syötettävästä signaalista ekvalisoidaan pois kuulokkeista suljetun korvakäytävän suulle mitatun äänipainesignaalin siirtofunktion epäideaalisuudet (Hammershøi, 1996). Tämä edellyttää, että kuulokkeiden korjaussuotimet tulee suunnitella mittaamalla vasteet suljetulta korvakäytävältä. Yksilöiden väliset erot vaikuttavat kaikkein vähiten suljetun korvakäytävän suulta mitattujen siirtofunktioiden mukaan suunniteltuihin korjaussuotimiin (Møller, 1992). Mittausmikrofonin voi valaa yksilöllisesti muotoiltuihin korvatulppiin, joka poistaa suuren joukon tarkistusmittauksia, sillä mikrofonin sijoitus on tarkasti toistettavissa eri mittauskertoina.

### **2.2.2 Binauraalisen kuulemisen psykologiaa**

Useimmissa ääreiskuulon malleissa on herätesignaaliin pohjautuva, hierarkkinen alhaalta-ylös (engl. bottom-up) rakenne (Schomaker et al., 1995). Tuloksena saadaan muuttuva binauraalisen tiedon (binauraalisen aktiviteetin) malli, joka toimii sitten aivokuorelle (engl. cortex) menevänä herätteenä. Tämän binauraalisen aktiviteetin mallin evaluointia voidaan kuvitella ylhäältä-alas (engl. top-down), mielikuviin perustuvana prosessina. Tämän ajattelumallin mukaan aivokuorella muodostetaan mielikuva käsitteen odotettua havainto-objektia ja sitten yritetään sovittaa tätä mielikuvaa havaittuun objektiin. Muodostaessaan mielikuvaa aivokuori tuottaa havainnon opitulla tietämyksellä ja kokemuksella, joka vastaa kyseistä tilannetta. Lisäksi se ottaa huomioon herätteet muilta aisteilta, kuten näkö- ja tuntoaisteilta. Muodostettuaan mielikuvan korkeammalla hermostotasolla voi syntyä kontrollointitoiminteita mielikuvan testaukseksi, esimerkiksi pään liikettä.

Seuraavat kaksi esimerkkiä tuovat esiin joitakin binauraaliseen tekniikkaan liittyviä teknisiä ongelmia. Ensinnäkin, "cocktail-party"-tilanteessa ihminen voi seurata yhtä kuulijaa ja sitten välittömästi kääntää huomionsa toiseen. Kuulolaitteen tulisi kyetä tekemään sama käyttäjänsä huomion kohdistumisen mukaan. Toiseksi, konserttisalien akustiikan laadun mittauslaitteiston tulisi ottaa huomioon psykoakustiset tunnusluvut kuten tilantuntu (engl. spaciousness), kaiuntaisuus (engl. reverberance) ja läpikuultavuus (engl. transparency). Kuitenkin, yleinen tilantuntu ja -laatu, joka kuulijalle syntyy huo-

neessa, saattaa olla biasoitu visuaalisten signaalien vuoksi: tietynlainen esitys, kuulijan ennakkoluulot, tekijät kuten muoti ja maku esimerkkeinä.

Aivokuoren osallistuminen tulkintaan lisää huomattavasti subjektiivisuutta binauraaliseen kuulemiseen. Tämä aiheuttaa luonnollisesti suuria ongelmia koko tekniikalle. Insiinöörit ja useimmat tiedemiehet ovat tottuneet käsittelemään kohteita havaittajasta riippumattomina (objektiivisuuden mielikuva) ja mielellään jättävät sellaiset ilmiöt, joita ei voida mitata tai arvioida puhtaasti objektiivisesti, huomioimatta. Lisäksi heillä on taipumus pilkkoa jokainen ongelma pieniksi yksityiskohdiksi ja analysoida osia erikseen. Aivokuoritasolla kuitenkin käsittelemme havaintoja erillisinä kokonaisuuksina ja osana koehenkilö-tutkija (havaittaja-havainto) suhdetta. Lisäksi tulisi ottaa huomioon, että ihmiset tavallisesti kuuntelevat "gestalt"-moodissa (Schomaker et al., 1995) eli he havaitsevat globaalisti eikä lohkoittain.

Sekä havaittaja että havainto vaikuttavat toisiinsa ja kumpikin saattaa muuttua havaitsemisprosessin aikana huomattavasti. Esimerkiksi, kuulotapahtuma saattaa muuttua, kun kuulija keskittyy kuuntelemaan tiettyä ääntä, kuten tiettyä soitinta, orkesterissa. Lisäksi havaittajan asenne havaintoa kohtaan saattaa muuttua koesarjan kuluessa ja siten vaikuttaa annettuihin vastauksiin.

### 2.2.3 Binauraalisen tekniikan tarpeellisuus

On sanomattakin selvää, että edellä kuvatulla järjestelmällä on useita rajoituksia. Esimerkiksi akustisten aaltojen pitää olla kuuloalueella taajuuden ja intensiteetin puolesta, kuulojärjestelmän pitää olla kunnossa ja aivokuoren tietoisessa tilassa, valmiina vastaanottamaan ja tulkitsemaan auditorista informaatiota. Lisäksi signaalien vastaanottamisessa, käsittelyssä ja tulkitsemisessa on useita takaisinkytkentöjä. Takaisinkytkentöjä tapahtuu selvästi subkortikaalisen auditorisen systeemin moduulien välillä sekä tämän että aivokuoren välillä. Ilmeinen takaisinkytkentä keskushermoston motoriikan säätelyalueelta on havaittavissa aina kun tehdään pään asennon selvitysiikkeitä (Schomaker et al., 1995).

Vaikka ihmiset voivat kuulla yhdelläkin korvalla (monaural hearing) kuuleminen kahdella toimivalla korvalla on täysin erilaista. Tätä tosiasiaa voidaan parhaiten tarkastella korvan biologisen roolin kannalta. Korvan biologinen tehtävä on nimenomaan kerätä tietoa ympäristöstä, erityisesti omasta sijainnista tilassa ja äänilähteiden sijainnista sekä niiden aktiviteetin tilasta. Lisäksi tässä yhteydessä tulisi muistuttaa, että yksilöiden välinen kommunikaatio tapahtuu pääasiassa akustisesti, aivojen tulkitessa ajatukset akustiksi signaaleiksi toisille aivoille.

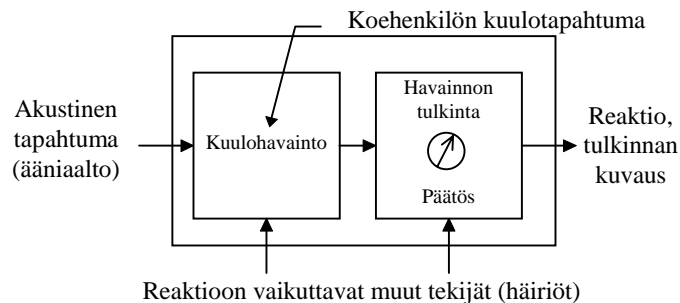
Tämän kuulon perustehtävän suhteen binauraalisen etu monauraaliseen kuulemiseen on lueteltavissa mm. seuraavilla osa-alueilla (Blauert, 1983a):

1. Yhden tai useamman äänilähteen paikallistaminen ja vastaavasti auditorisen "perspektiivin" eli auditorisen tilaelämyksen muodostaminen.

2. Eri paikoissa tilassa sijaitsevien äänilähteistä tulevien ei-koherenttien signaalien sekä muutamien rajoituksin koherenttien signaalien erottaminen toisistaan.
3. Suorien (ei-heijastuneiden) signaalien vahvistaminen kaikuisassa ympäristössä kuten myös kohteeksi valitusta lähteestä tulevan äänen vahvistaminen muista ei-koherentteista äänilähteistä.

## 2.3 Kuuntelukokeet

Psykoakustisia kuuntelukokeita (Blauert, 1983b) kuvataan asetelmalla, jossa herätteenä on äänitapahtuma, tuloksena sisäinen kuulotapahtuma ja tarkkailutavasta riippuen sen ulkoinen kuvaus. Yksinkertainen psykologinen malli auditoriselle havainto- ja arviointiprosessille on seuraavassa kaaviossa (Kaavio 2.1). Kaavio kuvaa koehenkilöä kuuntelukokeessa.



**Kaavio 2.1** Psykologisen kuuntelukokeen kaavio. Havainto, kuten myös sen kognitiivinen käsittely muuntuvat reaktiota muokkaavien tekijöiden vaikutuksesta.

Ääniaallot tulevat kumpaankin korvaan, ne esiprosessoidaan ja ohjataan ylemmälle tasolle keskushermostojärjestelmään, missä ne muodostavat äänitapahtuman koehenkilön havaintomaailmassa. Äänitapahtuma on koehenkilön havainto, eli vain hänellä on *suora kosketus* siihen. Ulkopuolisilla havaintosijoina on koehenkilön havaintoon *epäsuora kosketus* ja he voivat tehdä siitä johtopäätöksiä vain siitä, miten koehenkilö reagoi havaintoon.

Järjestelmällisissä kuuntelukokeissa koehenkilöä pyydetään vastaamaan tietyllä tavalla, esimerkiksi kuvailemalla tietyillä etukäteen valituilla sanoilla kuulotapahtumaa. Mikäli vastaus on kvantitatiivinen tunnusluku, voidaan puhua mittauksesta. Kuuntelukokeessa koehenkilö voi toimia siten "mittausinstrumenttina" omille havainnoilleen eli sekä kohteena mittaukselle että "mittarina". Kaavion mukaan reaktioon vaikuttavat muut tekijät tuovat häiriötekijöitä eli havaitsemiseen ja sen tulkintaan vaikuttavia persoonallisia vaihteluita sekä kuulohavainto- että tulkintavaiheeseen.

Kuulohavainnon selvittämiseen on useita eri keinoja. *Aistimuksen kuvailu* on näistä yksinkertaisin, mutta sen analysointi voi olla työlästä. Analysoinnin helpottamiseksi laitetaan koehenkilö yleensä sijoittamaan kuulotapahtuma ennalta määrätylle asteikolle. *Aistimuksen asettelu- ja jäljitysmenetelmissä* koehenkilön annetaan vaikuttaa itse ärsykykseen. *Valintamenetelmässä* (engl. forced choice method) koehenkilö sijoittaa äänitapahtu-

man johonkin ennalta määrätystä luokista ja päättää kahden tai useamman äänitapahtuman erilaisuudesta ennalta annetun kuvauksen mukaan.

### 2.3.1 Kuuntelukokeiden suunnittelu ja toteutus

Toteamus "*hyvin suunniteltu on puoliksi tehty*" pitää kuuntelukokeiden suunnittelun kohdalla paikkansa. Mikäli kuuntelukoea ei ole suunniteltu alusta loppuun saakka hyvin, se ei voi onnistua. Usein tulosten aikaansaamisella on niin kiire, että tingitään suunnittelusta. Tämä kostaatuu kuitenkin varsinaisessa tulosten analyysivaiheessa. Kelvollisen analyysin suorittaminen voi olla täysin mahdotonta, jos ennen koetta ei ole valittu riippuvia muuttujia ja faktoreita eikä niitä ole otettu huomioon kokeen suunnittelussa. Tässä kappaleessa pohditaan, mitä seikkoja tulee ottaa huomioon ennenkuin koetta ryhdytään suunnittelemaan.

#### Ääninäytteet

Kuulon perustutkimukseen liittyvissä kuuntelukokeissa käytetään yleensä hyvin yksinkertaisia ja pelkistettyjä ääninäytteitä, koska muuten faktoreiden määrä lisääntyy suhteessa näytteen äänikomponentteihin erittäin hankalasti analysoitavaksi. Usein käytettyjä ääniärsykeitä ovat puhtaat ja eri tavoin moduloidut siniäännekset, erilaiset kohinat sekä todelliset, äänittämällä saadut äänet.

Binauraalisia äänityksiä hyödyntävissä kuuntelukokeissa käytettävät ääninäytteet vaihtelevat sekunnista alle kymmeneen sekuntiin, jos on kyse eri näytteiden vertailusta. Tämän vuoksi on pyrittävä tallentamaan aina tiettyä tilannetta riittävän pitkä aika, jolloin mitään muutosta ei tapahdu äänikentässä (liike, kiihdytys). Äänitystilanteessa on tärkeää, että saadaan talletettua mahdollisimman hyvälaatuista materiaalia signaali-kohinasuhteeltaan ja kaikki häiriötekijät, joita kuuntelukokeessa ei arvioida, tulee eliminoida. Riippuu hyvin paljon kuuntelukokeen luonteesta ja sisällöstä, mitä asioita äänitystilanteessa tulee pyrkiä saamaan esiin ja talletettua. Jos kyseessä on tuotteen äänenlaadun arviointi, on tärkeää että juuri ne mahdollisesti asiakasta häiritsevät kolahdukset ja vihellykset tulevat nauhalle.

#### Koehenkilöt ja testiryhmän koko

Ennen koehenkilöiden valintaa on tiedettävä, mitä vastausta haetaan kokeen avulla. Useimmissa kuuntelukokeissa koehenkilöt pyritään valitsemaan hyvin rajoitetuista joukoista. Koehenkilöiden fyysiset (sukupuoli, ikä ja kuulo) ja psyykkiset ominaisuudet sekä elintaso-, kulttuuri- ja kokemustaustat aiheuttavat usein variaatiota kokeiden tuloksiin ja näin ollen tulisi ottaa huomioon tulosten analyysissä. Tuoteäänienlaadun tutkimisessa hyvä esimerkki rajoitetusta koehenkilöjoukosta on arvokkaiden urheiluautojen valmistajat. Heille koehenkilöksi valittuja yhdistää yksi yhteinen tekijä - ostovoima. Maatilojen isäntien ja emäntien mielestä taas työskentely tilalle hankittavalla maatalustraktorilla pitää olla tehokasta ja miellyttävää. Kaupat jäävät tekemättä, jos koeajossa ohjaamoon kuuluu epämääräisiä kitinöitä ja sirinöitä eikä moottorikaan kuulosta kovin tehokkaalta.

Kaikki ihmiset eivät sovellu koehenkilöiksi kuuntelukokeisiin. Hyvän koehenkilön tunnusmerkit vaihtelevat jonkin verran sovelluksesta toiseen, mutta avoin, selkeästi itseään ilmaiseva, johdonmukainen ja normaalikuuloinen henkilö on potentiaalinen valinta.

Kuuntelukokeen tulosten *objektiivisuus* voidaan aina kyseenalaistaa. Rajoitettu koehenkilöjoukko vähentää aina tulosten kattavuutta.

Kaikissa objektiivisuutta tavoittelevissa kokeissa pyritään saamaan *normaalijakautuneita* tuloksia. Tähän päästään helposti suurella otannalla, mutta sopivien koehenkilöiden palkkaaminen on kallista ja valinta työlästä. Reliabiliteettia voidaan kasvattaa toistokokeilla (toistamalla samat näytteet satunnaisessa järjestyksessä samoille koehenkilöille) ja yleensä päästään varsin hyviin tuloksiin jo 10-20 koehenkilön joukolla. Varsinainen *kuuntelukoejärjestelmä* asettaa myös rajoituksia koehenkilöjoukolle. Mahdollisuus usean koehenkilön samanaikaiseen testaukseen vähentää kokeisiin menevää aikaa.

Mikäli kuuntelukokeita tehdään usein, kannattaa harkita *kuuntelukoeraadin* perustamista. Huolellisesti valittu, tehtävään koulutettu (kts. koehenkilöiden treenaus) ja motivoitunut joukko voi antaa luotettavampia tuloksia nopeammin kuin erikseen kokoon kutsuttu raati.

### **Koehenkilöiden treenaus sekä biasointi**

Joskus äänimateriaali vaatii, että koehenkilöitä valmistellaan kokeeseen. Erot näytteissä saattavat olla niin pieniä, että niiden kuuleminen vaatii harjoitusta. Tällöin on kuitenkin aina vaarana, että koehenkilöiden *mielipiteisiin vaikutetaan* ja tulosten objektiivisuus heikkenee.

Mielipiteisiin vaikuttamista on tietysti mielessä *biasointi*, jolloin koehenkilöitä esimerkiksi ärsytetään pitämällä heitä häiritsevässä äänikentässä ennen varsinaista kuuntelukoea. Äänestä saattaa kuulla häiritseviä komponentteja vasta kuunneltuaan sitä riittävän pitkään. Esimerkiksi työkoneiden melun evaluoinnissa voitaisiin koehenkilöitä ajelluttaa testattavalla koneella ensin täysi työpäivä ja tehdä kuuntelukoe päivän päätteeksi. Tulokset ovat todennäköisesti erilaiset kuin ilman biasointia.

### **Koesarjat ja kokeiden kesto**

Kuuntelukokeet vaativat keskittymistä ja ihminen ei kykene keskittymään kovin pitkään samaan asiaan. Yleensä pyritään suunnittelemaan koe niin, että yhtäjaksoinen sessio kestää korkeintaan puoli tuntia. Tämä rajoittaa näytteiden määrän hyvin pieneksi. Esimerkiksi yksinkertaisessa <sup>1</sup>parivertailussa ehdoton maksimilukumäärä viiden sekunnin mittaisille näytteille on kymmenen näytettä, jos näytteet kuunnellaan "kaikki vastaan kaikki molemminpäin" -periaatteella (90 näyteparia).

---

<sup>1</sup> Kuunnellaan kaksi näytettä peräkkäin ja vastataan toisen näytteen sopivan paremmin annettuun kuvaukseen. Erikoistapaus valintamenetelmistä (engl. forced choice methods).

Tilastollisen analyysin helpottamiseksi pitäisi aina valita kuuntelukoenäytteistä kysyttäväksi sellaisia ominaisuuksia, jotka voidaan helposti kvantisoida (asettaa jollekin suhdasteikolle). Aina tämä ei ole mahdollista ja tällöin joudutaan käyttämään *ei-parametrisia tilastollisia analyysimenetelmiä* (katso kappale 3.6.1), joiden *tehokkuus* (engl. power) ei ole niin hyvä kuin parametrisissa menetelmissä.

### Koejärjestelyt

Kokeissa tarvitaan toistoja, jotta saadaan selville satunnaisvaihtelu. Tämä tarkoittaa sitä, että sama koe on tehtävä usealle *koeyksikölle* (esim. henkilölle tai ryhmälle). Koejärjestelyissä vertaillaan eri *käsittelyjen* vaikutusta tutkittavaan muuttujaan. Käsittelyt ovat *faktoreita* eli selittäviä muuttujia ja sellaisia voivat olla esimerkiksi tietyn ääneksen poistaminen kuuntelukokeen herätteestä tai koehenkilön biasointi. Käsittelyjen järjestyksellä saattaa olla vaikutusta tulokseen, joten jos koeyksiköille tehdään useita eri käsittelyjä, on eri koeyksiköille valittava eri kokeentekojärjestys. Yleensä kuuntelukokeet pidetään aamuisin, kun koehenkilöt ovat levänneitä ja heidän kuulonsa herkimmillään. Kokeen tarkoitus määrää kuitenkin, mikä on koehenkilöiden *virkeystila* koehetkellä. Mikäli kokeita tehdään useana eri ajankohtana, pitää virkeystila ottaa tilastolliseen analyysiin mukaan yhtenä tekijänä.

*Satunnaistaminen* vähentää systemaattista virhettä. Satunnaistaminen tarkoittaa, että koeyksiköt jaetaan satunnaisesti eri käsittelyryhmiin. Samassa koeasetelmassa voidaan tutkia usean eri tekijän vaikutusta selitettävään muuttujaan. Koeyksiköt jaetaan tällöin useaan ryhmään. Esimerkiksi, jos meillä on kaksi käsittelyä, joiden vaikutusta halutaan tutkia, jaetaan koeyksiköt vähintään kolmeen ryhmään: kontrolliryhmä, 1. käsittelyryhmä ja 2. käsittelyryhmä. Ryhmiinjako kutsutaan *lohkomiseksi*. Koeyksiköt voidaan jakaa ryhmiin usean eri tekijän suhteen. Lohkominen vähentää koeyksiköiden muodostamien ryhmien sisäistä vaihtelua.

*Klassinen koejärjestely* on yksinkertainen esimerkki koejärjestelyn toteuttamisesta. Käsittelyjä on kaksi: tutkittava käsittely ja placebo. Mittauksia on kaksi: alkumittaus, jolla kontrolloidaan lähtötaso ja loppumittaus, johon käsittelyn arvellaan vaikuttavan. Koe tehdään koeyksiköille vain kerran. Klassinen koejärjestely voidaan esittää seuraavien vaiheiden avulla. *Alkumittauksessa* mitataan tutkittavat muuttujat kaikilta koeyksiköiltä. Tämän jälkeen suoritetaan *ryhmiinjako*, jossa koeyksiköt jaetaan koe- ja vertailuryhmään. Jako voi tapahtua arpomalla. (satunnaistaminen). Alkumittauksen tuloksia voidaan käyttää hyväksi ryhmien muodostamisessa, sillä tavoitteena on saada samankaltaiset ryhmät. *Käsittelyssä* koeryhmä käsitellään tutkimuksen kohteena olevalla käsittelyllä. Vertailuryhmälle annetaan placebokäsittely siten, etteivät koeyksiköt tiedä mihin ryhmään kuuluvat ja ettei tämä vaikuttaisi tutkimustulokseen. *Loppumittauksessa* mitataan tutkittavat muuttujat uudelleen. Lopuksi tehdään *johtopäätös*: jos koeryhmän tulokset ovat muuttuneet keskimäärin enemmän kuin vertailuryhmän tulokset, on käsittelyllä vaikutusta tutkittaviin muuttujiin.

## 2.4 Binauraalinen äänitys- ja toistotekniikka

Binauraalista äänitystä tehdessä pyritään äänikenttä tallentamaan aistillisesti autenttisesti tavalla ja toistotekniikalla synnyttämään sama äänikenttä akustisesti erilaisissa tiloissa eri henkilöille. Tällaiselle on käyttöä esim. viihdeteknologian, koulutuksen, tieteellisen tutkimuksen, dokumentoinnin ja valvonnan palveluksessa. Binauraalisia äänitteitä voidaan verrata myös suoraan esimerkiksi A/B -kokeilla, mikä on yleensä mahdotonta oikeiden äänilähteiden ollessa kyseessä.

### 2.4.1 Laitteisto

Henkilökohtaisten binauraalisten äänitteiden tuottaminen ei vaadi mitään erityislaitteistoa eikä tekniikan syvällisempää tuntemusta. Tarvitaan vain pienet mikrofonit, laadukas tallennin (esimerkiksi DAT-nauhuri) ja kuulokkeet toistotilannetta varten.

Tilanne vaikeutuu huomattavasti, kun kyseisillä äänitteillä pitäisi tuottaa autenttinen toisto useammille henkilöille. Äänitys tulee tehdä tarkkaan valitulla päällä (hyvä "lokalisointipää"), yleensä keinopäällä (Kuva 2.4) ja jokaiselle kuuntelijalle joudutaan laskemaan ja toteuttamaan korjaussuotimet. Tänä päivänä itse signaalin *ekvalisointi* (kappale 2.4.4) onnistuu toistotilanteessa reaaliaikaisesti useammallekin henkilölle samanaikaisesti tehokkaiden signaaliprosessorien ansiosta.



**Kuva 2.4** Yksi suurimmista binauraalisen tutkimuksen rahoittajista on autoteollisuus. Äänen häiritsevyys ja laatu on nousemassa tärkeimmäksi tutkimuksen kohteeksi.

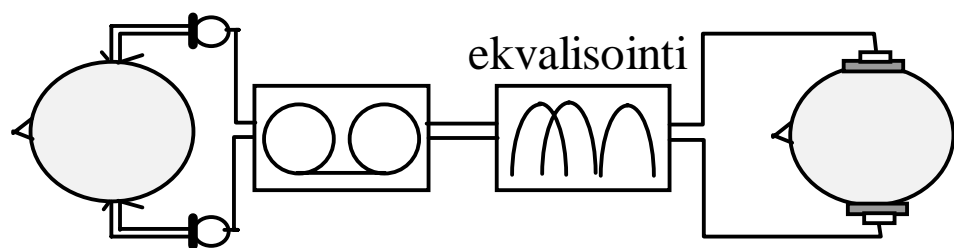
Keinopää tulee valita käyttötarkoituksen mukaan. Mikäli tutkimus tapahtuu pääasiassa laboratoriossa, ei signaalin prosessointia tarvita implementoituna. Kenttäolosuhteiden evaluointia varten on keinopäitä, joissa on laadukas tallennin ja tarvittavat ekvalisoinnit sisäänrakennettuna. Mikäli suuntakuulon arviointi on kriittistä kuuntelukokeissa, tulee ottaa huomioon olkapäiden ja ylävartalon osuus. Etu- ja takaerottelukyvyn osalta vaikutus on  $\pm 3\text{dB}$  ylävartalon osalta ja  $\pm 5\text{dB}$  olkapäiden osalta (Genuit, 1984).

## Tosipää

Paraskaan keinopää ei ole niin hyvä henkilökohtaisen binauraalisen äänitteen valmistukseen kuin kuuntelijan oma pää (Møller et al., 1997). Yksi vaihtoehto on järjestää kuuntelukoe hyvän "äänityspään" löytämiseksi (Møller et al., 1996). Parhaan lopputuloksen saavuttamiseksi toistotilanteessa jokaiselle kuuntelijalle tehdään yksilölliset ekvalisoinnit, joten useimmissa tapauksissa tosipää soveltuu erittäin hyvin äänityksiin.

Tosipää-äänityksessä on monia etuja keinopää-äänityksiin. Äänitys voidaan tehdä helposti myös liikkuvassa kohteessa. Ainoastaan liikkumisen laatu voi tuottaa ongelmia - tärinänkestävät tallennuslaitteet ovat varsin kalliita. Tutkittavan kohteen, esimerkiksi kulkuneuvon, kuljettajan korviin voidaan laittaa pienet mikrofoni-kapselit ja kuljettaja voi työskennellä vapaasti samanaikaisesti kun ääniympäristö tallennetaan binauraalisesti häiritsemättä äänikenttää äänityslaitteistolla.

Tämän hetken parhaita mikrofoneja tosipää-äänityksissäkin ovat kondensaattorimikrofoni-kapselit (Kuva 2.9). Ne vaativat *polarisaatiojännitteen* (phantom), jonka järjestäminen voi joskus tuottaa ongelmia. Tosipäällä tehdään äänityksiä eri kohdilta korvakäytävältä. *Sondimikrofonit* mahdollistavat äänityksen teon jopa tärykalvon välittömästä läheisyydestä.



**Kuva 2.5** Binauraalinen äänitys sondimikrofonin avulla tosipästä. Sama henkilö kuuntelee äänityksen, joten tarvitaan vain kuulokkeiden epäideaalisuudet korjaava ekvalisointi.

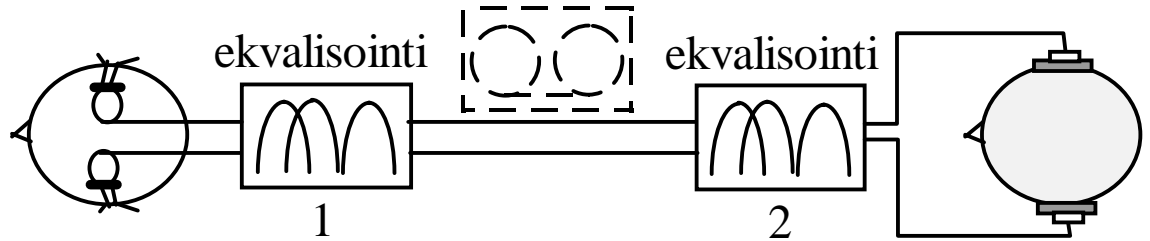
## Sondimikrofonit

Yksinkertaisin laitteisto täydelliseen binauraaliseen äänitykseen ja toistamiseen käsittää mikrofoneit, kuulokkeet, äänentallennusvälineen sekä kuuloke-ekvalisointisuotimen (Kuva 2.5). Kumpaankin koehenkilön korvaan tulevat äänipaineaallot tallennetaan sondimikrofoneilla (kutsutaan myös *probemikrofoneiksi*) ja myöhemmin toistetaan samalle henkilölle tarkoituksenmukaisen ekvalisoinnin jälkeen. Sondimikrofoni on ohut (1-2 mm ulkohalkaisijaltaan) putki ja sen päässä oleva pieni mikrofoni-kapseli. Putki voidaan työntää myös aivan tärykalvon lähelle.

## Keinopää

Keinopäillä on monia käytännön etuja tosipäihin verrattuna useimmissa sovelluksissa. Ne mahdollistavat esimerkiksi reaaliaikaisen äänitarkkailun fyysisesti eri paikassa. Täytyy kuitenkin pitää mielessä, että keinopäät on muotoiltu ja suunniteltu tyypillisen keskivertoihmisen mukaan. Niiden suuntaavuusominaisuudet eroavat yleensä yksittäisen kuuntelijan ominaisuuksista. Tämä tosiseikka voi huonontaa merkittävästi kuulo-

elämyksen autenttisuutta. Yleisimmin esiintyvät virheet ovat äänen värittyminen ja etu-takaerottelun sekoittuminen. Henkilökohtaiset säädöt ovat vain osittain mahdollisia, nimittäin ekvalisoimalla kuulokkeet jokaiselle kuuntelijalle erikseen. Tämän vuoksi ekvalisaattori joudutaan jakamaan kahteen komponenttiin, pääekvalisaattoriin (1) ja kuuloke-ekvalisaattoriin (2).



**Kuva 2.6** Binauraalinen äänitys keinopäällä. Pää- (1) ja kuulokekorjain (2).

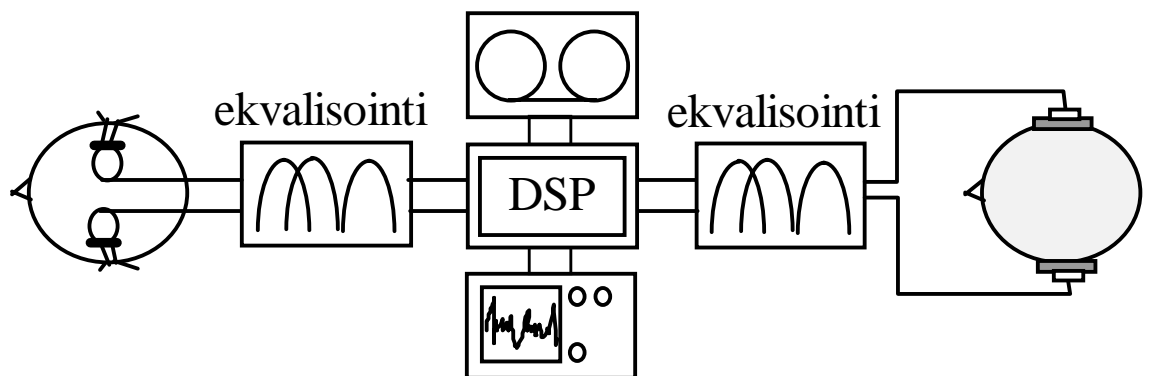
Liityntä näiden kahden välillä mahdollistaa hieman valinnan vapautta. On selvää, että henkilökohtaiset säädöt koko järjestelmässä (lukuunottamatta yksittäistä äänen tulo-suuntaa) ovat mahdottomia, elleivät sitten keinopään ja kuuntelijan pään siirtofunktiot ole identtisiä.

### Talletuslaitteisto

Käytetyin tallennusformaatti on nauha. DAT-nauhurin ominaisuudet riittävät lähes kaikkien kuuntelukokeissa käytettävien näytteiden tallentamiseen. Laboratorio-olo-suhteissa erinomainen keino on kovalevytallennus. Nykyisin on saatavilla hyvinkin laa-dukkaita 20-bittisiä koodekkeja eri tietokoneille. Kenttäkäytössä ainoaksi vaihtoehdoksi jää DAT, ja senkin tärinän- ja pölynsietokyvyt joutuvat kovalle koetukselle.

### Signaalinkäsittely

Usein signaaleja kumpaankin kuulijan korvaan mitataan ja käsitellään tietokoneella (Kuva 2.7). Signaalinkäsittelylaitteilla työstetään äänitettyjä signaaleja. Vaikka reaaliaikainen signaalinkäsittely ei ole tarpeellista useimmissa sovelluksissa, tosiaikainen toisto on välttämätöntä. Muunneltuja ja muuntelemattomia signaaleja voidaan tarkkailla joko signaalianalysaattorilla tai binauraalisella kuuntelulla.



**Kuva 2.7** Keinopääjärjestelmä signaalin käsittely- ja analysointimahdollisuuksilla.

## Muut keinot binauraalisten äänitteiden tuottamiseksi

Kuuntelukokeissa käytetään myös keinotekoisesti tehtyjä binauraalisia ääninäytteitä. Ne vaativat paljon monimutkaisemman laitteiston. Signaaleja ei enää tallenneta koehenkilön korvista tai keinopäästä, vaan ne on äänitetty tai jopa generoitu ilman korvan tai keinokorvan vaikutusta. Käytetään esimerkiksi kaiuttomia äänitteitä tavanomaisilla studiomikrofoneilla. Ihmiskorvan synnyttämät lineaariset suodattimet voidaan saada aikaan sähköisesti HRTF:illä (sähköinen keinopää). Järjestelmä tarvitsee tietoa äänikentän geometriasta pään siirtofunktion määrittämiseksi jokaiselle äänen tulosuunnalle. Tyypillisessä sovelluksessa, kuten huoneakustiikkasuunnittelussa, järjestelmä sisältää huoneen geometriaan perustuvan äänikenttäsimuloinnin, materiaalin absorptio-ominaisuudet sekä äänilähteiden paikat ja suuntaavuusominaisuudet. Äänikentän mallintamisen jälkeen “sähköinen keinopää” kykenee tuottamaan binauraalisia impulssivasteita. Näiden impulssivasteiden konvoluutio kaiuttomien äänisignaalien kanssa saa aikaan binauraalisia signaaleja, joita henkilö voisi kuulla vastaavassa oikeassa huoneessa. Menetelmää kutsutaan usein *binauraaliseksi huonesimuloinniksi*.

Tilantunnun säilyttämisen kannalta on tärkeää saada koehenkilölle aikaan vaikutelma, että hän on kuulemassaan äänikentässä. Toisin sanoen, kun henkilö liikuttaa päätään, havaitun auditorisen maailman tulisi siitä huolimatta säilyttää tilailluusio. Simulointisysteemin tulee siten tietää pään asento kyetäkseen muuttamaan impulssivasteita riittävästi. Pään asennon ilmaisimet on tästä syystä lisättävä järjestelmään. Vaikutelma tilassa olemisesta on erittäin tärkeä *virtuaalitodellisuussovellusten* osa-alue.

## Kuulokevahvistimet ja kuulokkeet

Toistotilanteessa tarvitaan yleensä erityinen kuulokevahvistin, jotta saadaan koko dynamiikka kuulokkeisiin. Kuulokeliitännät tavallisissa vahvistimissa tai toistolaitteissa, jopa high end -malleissa, ovat yleensä alimitoitettuja, sillä se ominaisuus ei ole juuri koskaan ensisijainen funktio. Jotkut kuulokevahvistimet käyttävät luokan A kytkettyä pääteasetetta, joka antaa parhaan tuloksen - tosin huonolla hyötysuhteella (suuri virrankulutus). Useita malleja on saatavilla eri valmistajilta kuten HeadRoom, McCormack, Melos, Krell, AKG, EarMax ja Behringer.

Kuulokkeiden merkitystä ei pidä väheksyä. Kuuloke-ekvalisoinnit tulee tehdä jokaiselle kuuloketyypille erikseen. Kuulokkeet eivät saa myöskään häiritä korvasta ulospäin nähtävää akustista impedanssia (katso *FEC-kuulokkeen* määritelmä kappaleessa 2.1.9 sivulla 9) (Møller et al., 1995a). *Suljetut* kuulokkeet toteuttavat harvoin tämän ehdon. Eri kuulokkeiden soveltuvuudesta binauraaliseen kuunteluun kriteerillä *avoimuus* on tehty myös tutkimus (Møller et al., 1992).

### 2.4.2 Äänitys tosipäällä

Äänitykset ihmisellä voidaan jakaa kolmeen erilailla käsiteltävään tapaukseen: tärkalvolta, korvakäytävän suulta ja suljetun korvakäytävän suulta (kappale 2.4.4). Korva-

käytävä suljettuna korvakäytävän suulta tallennettuihin signaaleihin sisältyy kaikkein vähiten subjektiivista säröä (Møller, 1992).

Alhainen herkkyys ja siten huono signaalikohinasuhde on usein ongelma pienissä mikrofoneissa. Lisäksi niiden dynamiikka ei ole riittävä kaikkiin äänityksiin. Kuuntelukokeissa käytettävä dynamiikka-alue onkin määritettävä aina etukäteen ja näin valmistettava äänitys sitä silmällä pitäen. Toisaalta tallenninlaitteillakaan ei kyetä toistamaan ihmiskorvan hallitsevia valtavia dynamiikkaeroja (noin 130 dB). Lisäksi pienien mikrofoniin kalibrointi voi tulla ongelmaksi.

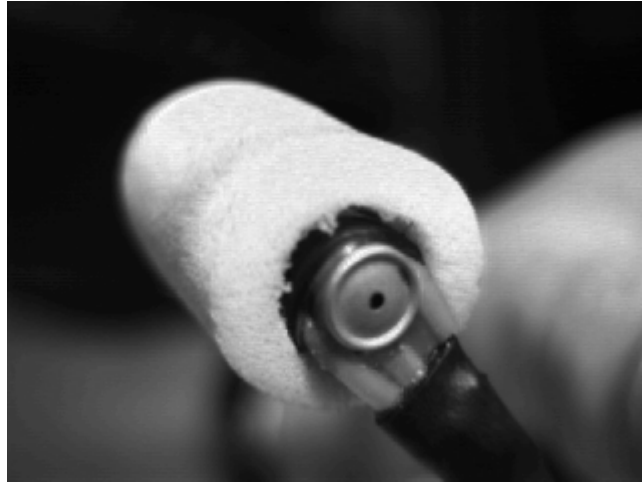
Myös äänityksen tarkkailun vaikeus on ongelma tosipää-äänityksissä. Yksi vaihtoehto olisi käyttää pientä radiolähetintä äänittävän henkilön mukana ja varsinainen signaali tallennettaisiin tarkkaamossa, jossa olisi vastaanotin.



**Kuva 2.8** Mikrofoni jää korvakäytävän aukon tasalle. Korvakäytävä suljetaan tulpalla.

### **Mikrofonit erilaisille päille**

Yksilöiden välillä on suuriakin eroja. Korvat ovat erimallisia ja erikokoisia. Mikäli äänityksiä toistetaan samoilla henkilöillä usein, paras tapa olisi vala kullekin yksilölliset korvatulpat, joihin mikrofonit upotettaisiin. Näin mikrofonin sijoitus olisi aina tarkka ja ne pysyisivät paremmin päässä (Kuva 2.9).



**Kuva 2.9** Tosipää-äänityksissä käytetty Sennheiserin painemikrofonikapseli korvatulpassa.

### 2.4.3 Äänitys keinopäällä

Keinopäällä äänittämistä koskevat samat fysiikan lait kuin tosipäätä. Äänityksessä tulee ottaa samat asiat huomioon. Keinopäihin on usein integroitu suodinten lisäksi muitakin käyttökelpoisia ominaisuuksia: nauhalle voi tallentaa esim. äänitettävän koneen kierros-  
luvut takometrin avulla. Tästä on hyötyä signaalianalyysia tehdessä. Jokaisella valmistajalla on oma käyttöliittymänsä ja keinopään mukana tulee yksityiskohtaiset käyttöohjeet.

### 2.4.4 Ekvalisoinnit

Vaikka ihmiset ovat hyvin hämmästyneitä binauraalisten äänitysten autenttisuudesta yleensä, lokalisointi heikkenee huomattavasti ja etäisyyden arvioinnissa tulee virheitä, mikäli kuunnellaan toisen henkilön päällä äänitettyjä binauraalisia äänitteitä (Møller et al., 1995c) (Hudde, 1980). Kuulokkeiden kunnollisesta ekvalisoinnista ei yleensä välitetä. Ekvalisointi on tarpeen korjaamaan mikrofoneissa, tallennuskalustossa sekä kuulokkeissa syntyneet lineaariset vääristymät. Äänityspään suunnitteluun käytetään paljon aikaa ja rahaa, mutta äänentoiston vaativuutta on aliarvioitu jo olemassa olevana tekniikkana.

Keinopäiden ekvalisointiprosessoreille on usein saatavana muitakin kuin puhtaita vapaakenttä- ja diffuusikenttäkorjaimia. Usein nämä ovat edellisten variaatioita joillakin erityispiirteillä. Neumann:n ja Head Acoustics:n keinopäihin löytyy myös korjain suoraan stereokaiutinkuunteluun.

Hyvä lokalisointi voidaan saavuttaa vain *horisontaalitasossa*, mikäli ei käytetä henkilökohtaisia HRTF:iä (Wightman et al, 1992).

### Kuuloke-ekvalisoinnit

Kuuloke-ekvalisoinnit voidaan helposti mitata suoraan. Siirtofunktio on

$$G = \frac{E_{kuuloke}}{P_{korva}} = \frac{E_{kuuloke}}{E_{mikrofoni}}, \quad (2.2)$$

missä  $E_{kuuloke}$  on jännite kuulokeliitännässä ja  $P_{korva}$  on jännitettä vastaava äänipaine siinä samassa pisteessä korvakäytävällä, minne ekvalisointi halutaan tehdä. Käytännössä tämä saadaan mittaamalla kyseiseen pisteeseen korvakäytävälle sijoitetun mikrofonin yli vallitseva jännite  $E_{mikrofoni}$ . Tässä yhteydessä isot (capital) kirjaimet ilmoittavat suureen taajuustasossa ja pienet kyseisen suureen aikatasossa.

### Tärykalvolta äänittäminen

Tieteelliseen tutkimukseen eniten käytetty tapa tähän saakka binauraalisessa tekniikassa on ollut äänitys tärykalvon pinnan läheisyydestä sondimikrofonilla ja toisto kuulokkeilla. Tässä määritetään siirtofunktio  $G_A$  tärykalvon pinnan läheisyydessä olevasta mikrofonista kuulokkeisiin, eli kyseinen ekvalisointisuodin. Jos mikrofonin siirtofunktio on  $M_1$  (määrittelee myös herkkyuden sekä taajuusvasteen), niin kokonaissiirtofunktio äänikentästä  $p_1$  (äänipaine pään keskellä, mikäli pää ei olisi äänikentässä) äänipaineeseen tärykalvolla  $p_7$  on

$$\frac{P_4}{P_1} \cdot M_1 \cdot G_A \cdot \frac{P_7}{E_{kuuloke}}, \quad (2.3)$$

missä  $E_{kuuloke}$  on jännite kuulokeliitännässä ja  $P_4$  äänipaine tärykalvolla ilman kuulokkeita. Tämän kokonaissiirtofunktion tulisi olla

$$\frac{P_4}{P_1}. \quad (2.4)$$

Jos yhtälöt (2.3) ja (2.4) merkitään yhtäsuuriksi, saadaan

$$G_A = \frac{\frac{P_4}{P_1}}{\frac{P_4}{P_1} \cdot M_1 \cdot \frac{P_7}{E_{kuuloke}}} = \frac{1}{M_1 \cdot \frac{P_7}{E_{kuuloke}}}. \quad (2.5)$$

*Johtopäätös.* Oikea ekvalisointi saadaan, kun kompensoidaan mikrofonin herkkyys ja kuulokkeen siirtofunktio tärykalvolle.

### Korvakäytävän suulta äänittäminen

Kappaleessa 2.2.1 todettiin, että avoimen korvakäytävän suulta tehty äänite sisältää koko spatiaalisen informaation. Kuten edellä, mikrofonin siirtofunktio on  $M_1$  ja siirtofunktio mikrofonista kuulokkeisiin on  $G_B$ . Kokonaissiirtofunktio äänikentästä  $p_1$  äänipaineeseen tärykalvolla  $p_7$  on

$$\frac{P_3}{P_1} \cdot M_1 \cdot G_B \cdot \frac{P_7}{E_{kuuloke}}, \quad (2.6)$$

missä  $E_{kuuloke}$  on jännite kuulokeliitännässä ja  $P_3$  äänipaine korvakäytävän suulla ilman kuulokkeita. Tämän tulisi olla

$$\frac{P_4}{P_1}. \quad (2.7)$$

(2.6) ja (2.7) merkitään yhtäsuuriksi ja lavennetaan  $P_6/P_6$ :lla, missä  $P_6$  on paine korvakäytävän suulla kuulokkeen kanssa, saadaan

$$G_B = \frac{\frac{P_4}{P_1}}{\frac{P_3}{P_1} \cdot M_1 \cdot \frac{P_7}{E_{kuuloke}}} = \frac{\frac{P_4}{P_3}}{\frac{P_7}{P_6}} \cdot \frac{1}{M_1 \cdot \frac{P_6}{E_{kuuloke}}}. \quad (2.8)$$

Ensimmäinen termi  $(P_4/P_3)/(P_7/P_6)$  on yksi, sillä äänen siirtofunktio korvakäytävän suulta tärykalvolle on riippumaton äänilähteestä (Møller, 1992). Siten

$$G_B = \frac{1}{M_1 \cdot \frac{P_6}{E_{kuuloke}}}. \quad (2.9)$$

*Jobtopäätös.* Oikea ekvalisointi saadaan, kun mikrofonin herkkyys ja kuulokkeen siirtofunktio korvakäytävän suulle saadaan kompensoitua.

### Korvakäytävän suulta, korvakäytävä suljettuna äänittäminen

Kappaleessa 2.4.1 todettiin, että myös suljetun korvakäytävän suulta voidaan tehdä täydellinen binauraalinen äänitys. Mikrofonin siirtofunktio on  $M_1$  ja siirtofunktio mikrofonista kuulokkeisiin on tässä  $G_C$ . Kokonaissiirtofunktio on

$$\frac{P_2}{P_1} \cdot M_1 \cdot G_C \cdot \frac{P_7}{E_{kuuloke}}, \quad (2.10)$$

missä  $P_2$  on äänipaine suljetun korvakäytävän suulla ilman kuulokkeita. Tämän tulisi olla

$$\frac{P_4}{P_1}. \quad (2.11)$$

Tämä toteutuu, jos (2.10) ja (2.11) ovat yhtäsuuria. Lavennetaan ja saadaan

$$G_C = \frac{\frac{P_4}{P_1}}{\frac{P_2}{P_1} \cdot M_1 \cdot \frac{P_7}{E_{kuuloke}}} = \frac{\frac{P_4}{P_3} \cdot \frac{P_3}{P_2}}{\frac{P_7}{P_6} \cdot \frac{P_6}{P_5}} \cdot \frac{1}{M_1 \cdot \frac{P_5}{E_{kuuloke}}} \quad (2.12)$$

Ensimmäinen termi  $(P_4/P_3)/(P_7/P_6)$  on yksi kuten edellä. Jos merkitään ilman kuulokkeita olevan korvan

$$\frac{P_{\text{avoimen}_\text{korvakäytävän}_\text{suulla}}}{P_{\text{suljetun}_\text{korvakäytävän}_\text{suulla}}} = \frac{P_3}{P_2}, \quad (2.13)$$

ja Thevenin teoreeman mukaan

$$\frac{Z_{\text{korvakäytävä}}}{Z_{\text{korvakäytävä}} + Z_{\text{säteily}}} = \frac{P_3}{P_2}, \quad (2.14)$$

missä  $Z_{\text{säteily}}$  on samassa tilanteessa korvakäytävästä ulos näkyvä impedanssi. Samoin voidaan laskea kuulokkeille:

$$\frac{Z_{\text{korvakäytävä}}}{Z_{\text{korvakäytävä}} + Z_{\text{kuuloke}}} = \frac{P_6}{P_5}, \quad (2.15)$$

missä  $Z_{\text{kuuloke}}$  on korvakäytävästä ulos näkyvä impedanssi, kun kuuloke peittää korvan.  $P_5$  on äänipaine suljetun korvakäytävän suulla kuulokkeiden kanssa. Kun lauseet (2.14) ja (2.15) sijoitetaan siirtofunktioon (2.10) ja supistetaan, saadaan

$$G_C = \frac{Z_{\text{korvakäytävä}} + Z_{\text{kuuloke}}}{Z_{\text{korvakäytävä}} + Z_{\text{säteily}}} \cdot \frac{1}{M_1 \cdot \frac{P_5}{E_{kuuloke}}} \quad (2.16)$$

Idealisille avoimille kuulokkeille ensimmäinen termi on yksi (Møller, 1992), joten

$$G_C = G_C^* \cdot \frac{1}{M_1 \cdot \frac{P_5}{E_{kuuloke}}}, \quad (2.17)$$

missä  $G_C^*$  on mahdollinen kuulokekompensaatiokerroin, ideaalitapauksessa  $G_C^*=1$ .

*Jobtopäätös.* Oikea ekvalisointi saadaan, kun mikrofonin herkkyys, kuulokkeen siirtofunktio suljetun korvakäytävän suulle sekä kuulokkeen aiheuttaman akustisen impedanssin suhde ilmaan saadaan kompensoitua. Ideaalisen avoimen kuulokkeen tapauksessa kuulokkeen akustisen impedanssin suhde ilmaan on yksi.

### Vapaakenttäkorjaus

Koska äänittäväällä päällä on erilaiset siirtofunktiot äänen eri tulokulmille, tasaista taajuusvastetta ei voida saavuttaa kaikista kulmista. Jos suurin osa äänitapahtumista on suoraan pään edessä, voidaan korjainsuodin suunnitella siten, että saadaan tasainen taajuusvaste suoraan edestä tulevalle herätteelle. Tätä kutsutaan vapaakenttäekvalisoinniksi (engl. free-field equalization).

Äänityskohdalla korvakäytävästä ei ole merkitystä kun äänitys on vapaakenttäekvalisoitu. Kun siirtofunktio korjataan antamaan tasainen vaste tietylle suunnalle jossakin äänityskohdassa, on vaste sama muissakin kohdissa äänitetyille signaaleille (Møller, 1992).

### Diffuusikenttäkorjaus

Diffuusin kentän korjainsuodin suunnitellaan siten, että saadaan tasainen taajuusvaste diffuusissa äänikentässä. Ohjaamoissa ja muissa pienissä tiloissa, joissa on paljon lasipintoja ympärillä (etenkin työkoneissa), tulisi käyttää diffuusin kentän korjainta. Sama tilanne on, jos äänittävä pää on kauempana äänilähteestä kuin äänitystilän säde. Myöskään diffuusille kentälle korjattu vaste ei muutu, kun äänityskohta korvakäytävällä muuttuu.

### 2.4.5 Toistotekniikka

Myös kaiuttimia voidaan käyttää binauraalisen äänityksen toistossa (Griesinger, 1989). Kaiuttimien synnyttämä äänikenttä on parhaiten hallittavissa kaiuttomassa huoneessa (hiljainen, heijastukseton tila) tai tarkoituksenmukaisessa kuunteluhuoneessa. Täydelliseen tilantunnon toistoon ei kaiuttimilla ole vielä päästy, mutta oikean ekvalisoinnin avulla laatu on verrattavissa tavanomaiseen stereoäänitykseen äänen sävyn ja tilantunnon osalta (Theile, 1981).

Kuulokkeet ovat helpoin vaihtoehto, koska ympäristön akustiikan vaikutus vähenee tai poistuu kokonaan. Lisäksi ekvalisoinnissa ei tarvitse ottaa huomioon eri kanavien signaalien sekoittumista ilman kautta ristiinkuulumalla kuten kaiutinkuuntelussa.

Äänten paikantumisesta pään ulkopuolelle käytetään nimitystä *lokalisaatio* ja nimitystä *lateralisaatio* käytetään kuulotapahtuman sijoittuessa pään sisään korvien väliselle akselille (Jauhiainen, 1995).

### Toisto stereokuulokkeilla

Kuuloketoisto takaa sekä sen, että kummankin kanavan signaali päättyy ainoastaan yhteen korvaan ja ettei kuunteluhuoneen heijastukset häiritse.

### Tasojen kalibrointi

Jotta toisto olisi mahdollisimman autenttinen, on suoritettava tasojen säätö vastaamaan äänitystilannetta. Äänitteelle pitää tallentaa kalibrointisignaali myöhempää toistotilanteen verifiointia varten. Kuuntelukokeiden luonteesta riippuen kalibrointi on usein

ääninäytteiden normalisoinnin apukeino. Pienillä tosipää-mikrofoneilla ja sondimikrofoneilla kalibrointi voi olla ongelmallista. Keinopäissä käytetään usein 1/2- tai 1/4 -tuuman mittausmikrofoneja, jotka on helppo kalibroida luotettavasti. Suunnittelimme projektissa tosipää-äänityksiin käytetylle pienoismikrofonille sovittimen (Kuva 2.10) tavanomaiseen kalibraattoriin. Mikrofonin voidaan kalibroida sen ollessa sangassa kiinni.



**Kuva 2.10** Suunnittelimme PVC-muovista sorvattu adapteri tosipää-mikrofonin kalibrointiin Brüel&Kjær:n kalibraattorille 4230.

Mikäli äänitemateriaali on voimakasta melua, ei ole järkevää toistaa sitä alkuperäisellä voimakkuudella. Tällöin määritetäänkin usein *melun laatua*, joka ei edellytä absoluuttisia äänipaineita.

### Toisto stereokaiuttimilla

Kaiutinkuuntelun ongelma on kanavien ylikuuluminen (crosstalk) sekä kuunteluhuoneessa esiintyvät heijastukset. Täydelliseen toistoon ei ole vielä päästy, mutta teoriassa se on mahdollista (Bauer, 1961) (Damaske, 1971) (Cooper, 1989) (Møller, 1989).

Møllerin (1989) menetelmän mukaan kanavien ylikuuluminen voidaan poistaa prosessimalla kanavien signaalit algoritmin (2.18) mukaan (Kaavio 2.2).

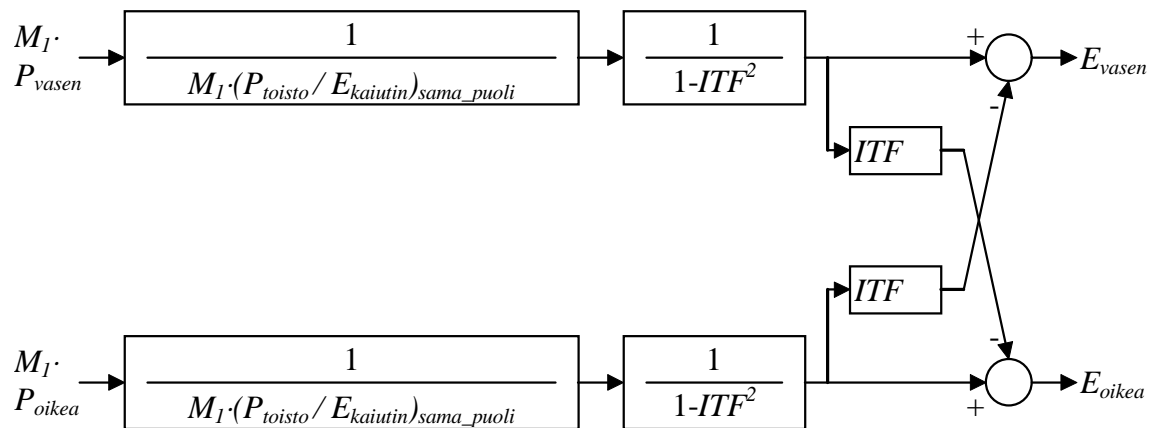
$$E_{\text{kaiutin}} = \frac{P_{\text{äänitys,sama\_puoli}} - P_{\text{äänitys,vastakkainen\_puoli}} \cdot ITF}{\left( \frac{P_{\text{toisto}}}{E_{\text{kaiutin}}}_{\text{sama\_puoli}} \right) (1 - ITF^2)}, \quad (2.18)$$

missä  $E_{\text{kaiutin}}$  on kaiuttimen toisen kanavan napojen yli vallitseva jännite,  $P_{\text{äänitys,sama\_puoli}}$  on äänipaine taajuustasossa referenssipisteessä äänittävän pään korvakäytävällä (eli kaiuttimen kyseistä kanavaa vastaava binauraalisesti äänitetty kanava),  $P_{\text{toisto}}$  vastaa äänipainetta referenssipisteessä kuulijan korvakäytävällä toistotilanteessa ja  $ITF$  on korvien välinen siirtofunktio (engl. interaural transfer function).  $ITF$  voidaan määrittää esimerkiksi HRTF:ien avulla. Näin ollen

$$ITF = \frac{HRTF_{vastakkainen\_puoli}}{HRTF_{sama\_puoli}}, \quad (2.19)$$

missä  $HRTF_{vastakkainen\_puoli}$  ja  $HRTF_{sama\_puoli}$  ovat analogiset edellisen yhtälön (2.18) nimityksille.

Vasemmanpuoleiset lohkot tekevät kaiuttimien ja mikrofonien ekvalisoinnin. Seuraavat lohkot poistavat ylikuulumisesta aiheutuvan värityksen (myös ekvalisointi). Taajuuksilla, joilla ylikuuluminen on vähäistä, tämän lohkon kerroin on noin yksi. Todellinen ylikuulumisen eliminointi tehdään kahdella ristiin kytketyllä loholla.



**Kaavio 2.2** Kaavio yhtälöstä (2.18) signaalinkäsittelyn keinoin. Kuvassa  $E_{vasen}$  ja  $E_{oikea}$  ovat kaiuttimille menevät signaalit ja  $P_{vasen}$  sekä  $P_{oikea}$  äänitetyt äänipaineet korvista.  $M_1$  on äänitystilanteessa vallinneen äänipainetasen toistamiseksi tarvittava vahvistuskerroin.

## 3 Järjestelmän suunnittelu

Kuuntelukokeiden järjestäminen vaatii aina huolellisia esivalmisteluja. Ääninäytteiden *nauboittaminen* ja niistä *sopivimpien valitseminen* vie paljon aikaa. Koetta suunnitellessa tulee myös miettiä etukäteen, miten huolellisesti *näytteet ekvalisoidaan* sillä ekvalisoinnin voi tehdä pienelläkin vaivalla - tinkimällä laadusta. *Koehenkilöiden valinta* on tärkeä vaihe, sillä sen tulisi määräytyä kokeen tavoitteiden perusteella. Esimerkiksi haluttaessa parantaa metsätraktorin ohjaamon äänenlaatua, tärkein koehenkilöryhmä on metsäkoneen kuljettajat. Yleisiä tapauksia koskevissa kuuntelukokeissa koehenkilöiksi valitaan normaalikuuloisia ihmisiä. Koehenkilöiden *kuulon tarkistaminen* on tärkeää kuitenkin myös tapauskohtaisissa tutkimuksissa.

Suunnittelimme käyttööme soveltuvan kannettavan tosipää-äänityslaitteiston, joka koostuu pienestä paristolla toimivasta etuvahvistimesta (Kuva 3.2) ja DAT -nauhurista. Etuvahvistin suunniteltiin käyttäen vähäkohinaista yksipuoleisella käyttöjännitteellä toimivaa operaatiovahvistinta SSM-2135. Mikrofoneina käytimme Sennheiserin pienoismikrofonikapselia E-A-R korvatulppien kanssa (Kuva 2.9). Ääni tallennettiin suljetun korvakäytävän suulta, missä mikrofonit pysyvät hyvin paikoillaan korvan taakse menevän sangan ansiosta (Kuva 3.1). Näytteet tallennettiin 48kHz:n näytetaajuudella DAT-nauhalle, josta ne siirrettiin digitaalista äänenkäsittelyä varten UNIX- ja PC-tietokoneille. Käsitellyt ääninäytteet toistettiin Macintosh<sup>®</sup>-tietokoneelle ohjelmoidun kuuntelukoeohjelman ohjaamana kuulokkeiden kautta koehenkilöille.

Tässä luvussa käydään läpi järjestelmän eri osat ja niiden valinnan taustatekijät. Lisäksi selvitetään perusteet kokeiden tulosten tilastolliseen analyysiin, tärkeimmät mittavälit sekä analyysimenetelmät.

### 3.1 Mikrofonikapseli

Kapseli (Sennheiser KE-4-211-2) on toimintaperiaatteeltaan painevastaanotin ja kondensaattorimikrofoni. Siihen on integroitu n-kanava JFET:llä toteutettu impedanssimuunnin. Kapselin kohinataso on valmistajan mukaan absoluuttiarvoltaan 38 dB (katso liite D) ja A-painotettuna 27 dB.



**Kuva 3.1** Mikrofonin pysyy hyvin paikoillaan korvan taakse menevän sangan ansiosta. Sankojen vaikutus äänikenttään äänenlaadun arvioinnin kannalta kiinnostavalla taajuusalueella on useimmissa tapauksissa merkityksetön.

### Mikrofonin kalibrointi

Pienten tosipää-mikrofonien kalibrointi on ongelmallisempaa kuin keinopäissä usein käytettyjen  $\frac{1}{2}$ - tai  $\frac{1}{4}$ -tuuman mittausmikrofonien kalibrointi. Äänitystilanteessa vallinneiden äänipaineiden jäljittämiseksi suunnitelimme PVC-muovista adapterin (Kuva 2.10) Brüel&Kjær:n kalibraattorille 4230. Adapterin ja kalibraattorin avulla voidaan äänittää kalibrointisignaali juuri ennen nauhoituksen aloittamista nauhalle. Kalibroinnista on kuvasarja liitteenä (Liite A).

## 3.2 Mikrofonietuvahvistin

Vahvistimen tuli olla mahdollisimman kenttäkelpoinen. Tämä edellytti paristokäyttöisyyttä, suljettua rakennetta ja pientä kokoa. Lisäksi sen tuli kyetä käsittelemään signaaleja hyvin suurella vaihtelualueella, joten vahvistuksen tuli olla aseteltavissa.

Koteloksi valittiin Noretronin maahantuoma vyökiinnikkeellä varustettu ABS-muovista valmistettu kotelo (Kuva 3.2), jonka sisään suunniteltiin yhdellä 9 voltin paristolla toimiva etuvahvistin.

### Operaatiovahvistin

Analog Devices SSM-2135P on pakattu 8 jalkaiseen muoviseen DIP-koteloon. Siinä on kaksi yksipuoleisella käyttöjännitteellä toimivaa vähäkohinaista operaatiovahvistinta ja se sopii erittäin hyvin juuri paristokäyttöisiin mikrofonietuvahvistimiin. Käyttöjännite on 4-36 V ja tyypillinen kohina  $5.2 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ .

### 3.2.1 Lähtöarvojen määrittäminen

Vahvistimesta tuli saada täysi ( $4V_{pp}$ ) lähtöjännite syötettäessä mikrofonin 60dB:n äänipaine. Äänipaine voidaan muuntaa pascalleiksi yhtälöllä

$$p = 10^{\frac{L_p}{20}} \cdot p_0, \quad (3.1)$$

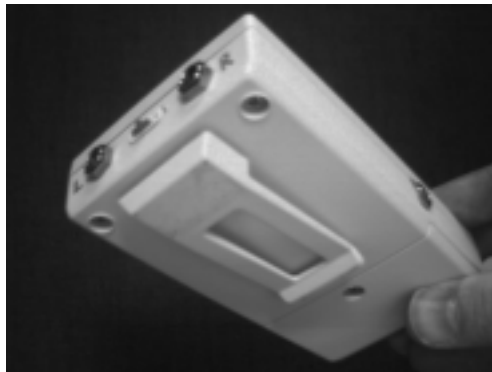
missä  $p_0 = 20\mu Pa$  ja  $L_p$  on muunnettava äänipaine.

Koska 1 Pascal vastaa äänipainetta 94 dB ja kapselin herkkyys on valmistajan antamien tietojen mukaan 10 mV/Pa, saadaan 60 dB äänipainetasolla kapselista 0.2 mV. Tällöin tarvitaan vahvistusta ( $2V/0.2mV$ ) 10000.

Oletettu suurin käytettävä äänipaine on 120 dB. Tällöin kapselista saadaan 200 mV ja vahvistukseksi riittää 10 ( $2V/200mV$ ).

Sähköisen suunnittelun lähtökohdiksi valittiin kaksi astetta, joista ensimmäisen vahvistus  $g = 100$  ja toisen säädettävissä välillä  $g \in [0.1, 100]$ .

Kapselin valmistajan antamien arvojen mukaan esivahvistimen ensimmäisen asteen ( $g=100$ ) jälkeen kapselin aiheuttama kohina  $U_N \approx 1.6 mV$ . Maksimissaan täydellä ( $g=10000$ ) vahvistuksella  $U_N \approx 159 mV$ . Operaatiovahvistimen aikaansaama kohina on tällöin suurimmillaan  $U_N \approx 16 \mu V$ . Esivahvistimen suunnittelussa ei tarvitse kiinnittää suurta huomiota itse vahvistimen kohinan pienentämiseen, koska mikrofonikapseli tuottaa lähes  $10^4$ -kertaa enemmän häiriötä.



**Kuva 3.2** Mikrofonietuvahvistin on rakennettu pieneen ja kevyeen vyölle kiinnitettävään koteloon.

### 3.2.2 Sähköinen rakenne

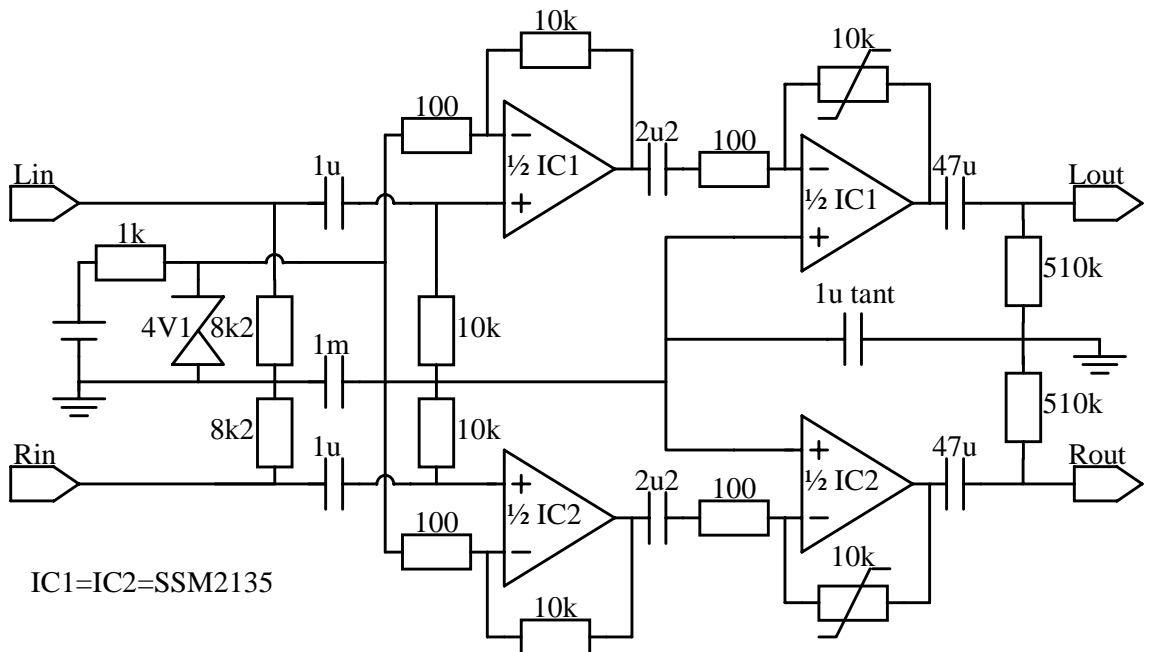
Esivahvistin suunniteltiin käytettäväksi digitaalisten äänentallenninlaitteiden kanssa (lähinnä DAT-nauhurit). Pienet mikrofonit on erittäin vaikea suunnitella vähäkohinaisiksi tinkimättä herkkyydestä ja käyttämämme kapseli ei ole poikkeus. Jotta 16-bitin dynamiikasta saataisiin tällä mikrofonilla kaikki irti, tulee pieniä (muutama kymmenen hertziä) taajuuksia rajoittaa äänitysvaiheessa.

Ensimmäinen aste (Kaavio 3.1) on sovitettu mikrofonikapselin valmistajan antamilla komponenttiarvoilla ( $1\mu\text{F}$  ja  $8\text{k}\Omega$ ) kapseliin. Ensimmäisen asteen vahvistus asetetaan sadaksi ja toiseen asteeseen tulee säätö, joka toteutetaan käytännössä dippi-kytkimillä. Virtuaalimaa operaatiovahvistimille järjestetään  $1\text{k}\Omega$  vastuksella ja  $4\text{V}1$  zener-diodilla. Virtuaalimaan heilahtelut operaatiovahvistimien virrankäytön vaihdellessa signaalin mukana estetään  $1000\mu\text{F}$  elektrolyytti- ja  $1\mu\text{F}$  tantaalikondensaattoreilla.

Ensimmäisen ja toisen asteen väliin laitetaan ylipäästö

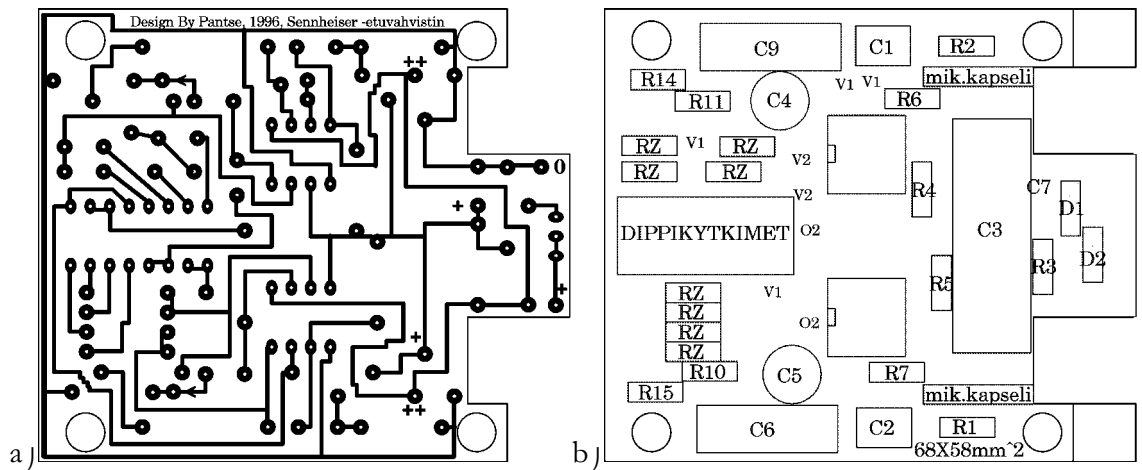
$$f_{-3dB} = \frac{1}{\sqrt{2.2 \cdot 10^{-6} \cdot 100}}, \quad (3.2)$$

mistä saadaan  $-3\text{ dB}$ :n pisteeksi noin  $67\text{ Hz}$ .



**Kaavio 3.1** Etuvahvistimen piirikaavio.

Piirikaavion pohjalta suunniteltiin piirilevy (Kuva 3.3), joka sovitettiin ulkoisilta mitoiltaan koteloon. Piirilevylle laitettiin lisäksi diodit pariston väärinpäin kytkemisen estämiseksi.



Kuva 3.3 Mikrofonietuvahvistimen a) painopiirilevy ja b) komponenttien sijoittelu piirilevyllä.

### 3.3 Äänityslaitteisto

Markkinoilla on useita laadukkaita kannettavia korkealuokkaiseen äänentallennukseen soveltuvia laitteita. Monet näistä käyttävät kuitenkin audiodatan tallennusvaiheessa erilaisia epälineaarisia koodausmenetelmiä säästääkseen tilaa. Näissä koodausmenetelmissä käytetään hyväksi kuulon ominaisuuksista mm. huonoa vaiheherkkyyttä. Spatiaalisen informaation ja binauraalisten äänitteiden ollessa kyseessä, vaiheen säilyminen läpi tallennusprosessin on tärkeää. DAT (engl. digital audio tape) on lineaarinen media ja nauhurin ominaisuudet riittävät lähes kaikkien kuuntelukokeissa käytettävien näytteiden tallentamiseen, mutta äänitys vaatii huolellista valmistautumista ja ammattitaitoa. Signaalikohinasuhteen optimoimiseksi on tärkeää käyttää laitteen koko dynamiikka jo äänitysvaiheessa eli "headroom" tulee minimoida.

Tallennuslaitteeksi valittiin Tascam DA-P1 DAT-nauhuri. Nauhuri on akuilla tai paristoilla toimiva kannettava, mutta laadukas reporterikäyttöön tarkoitettu ammattilaitte. Siinä on digitaalinen SPDIF- (Sony Philips Digital Interface) liitäntä sisään sekä ulos ja näytteenottotaajuudeksi on valittavissa 44.1 tai 48 kHz. Kondensaattorimikrofoneille löytyy esijännitteensyöttö (phantom).

Kenttäkäytössä nauhurin herkkyys tärähdyksille antoi aiheita harkita myös kovalevytallennusta. Markkinoilla on pieniä digitaalisia äänityslaitteita, joissa tallennus tapahtuu suurelle kovalevyllä. Valmistajien mukaan nämä sietävät pudotuksen muutaman metrin korkeudesta kovalle lattialle toiminnan häiriintymättä. Ratkaisimme asian ripustamalla DAT-nauhurin äänittävän koehenkilön kaulaan, jolloin lähes kaikki tärähdykset vaimeivat koehenkilön vartaloon.

Mikrofonien kohina sekä ekvalisointien vaatimat suuret korjaukset taajuustasossa vaativat suuremman dynamiikan myös äänityslaitteille. Nykyisin on saatavilla jopa 24-bittisiä koodekkeja eri tietokoneille. Tutkimuksen tekohetkellä kenttäkäytössä ainoaksi järkeväksi vaihtoehdoksi jäi DAT-nauhuri.

### 3.4 Kuuntelukoelaitteisto

Yksi virhelähteistä kuuntelukokeissa on koehenkilöiden vastausten kirjaaminen. Vastausten kerääminen *paperilla ja kynällä* on mahdollista vain tietyissä kokeissa ja silloinkin pienessä mittakaavassa. *Kirjoitusvirheet* vähentävät aina tulosten luotettavuutta. Koehenkilön reaktion rekisteröinti ei saa vaikuttaa tulokseen millään tavalla, joten sen tulee tapahtua mahdollisimman luonnollisesti ja loogisesti. Laitteiston käyttöliittymän tulee olla mahdollisimman yksinkertainen.

Useimmat ihmiset ovat olleet tekemisissä tietokoneiden ja niiden ohjauksessa käytettävien *hiirien* kanssa. Jotkut hiirimalleista istuvat erittäin hyvin kämmeneen muotoilunsa ansiosta. Valitsimme halvan PC-hiiren (Kuva 3.4) koehenkilön käyttöliittymäksi kuuntelukoejärjestelmään. Hiiren ominaisuuksista käytettiin ainoastaan painokytkimä.

Kuuntelukoetyypiksi valittiin *forced-choise* -testi. Koehenkilö vastasi *kuulokkeista* kuulemansa signaalin perusteella joko hiiren vasemmanpuoleista tai oikeanpuoleista nappia painamalla, kumpi kahdesta näytteestä oli hänen mielestään lähinnä kysyttyä asiaa.

#### 3.4.1 Kuulokkeet ja kuulokevahvistin

Binauraalisille äänitteille tehdään yleensä yleiset ekvalisoinnit, joilla kuulokkeiden epäideaalisuudet voidaan jossain määrin poistaa. Kuulokkeiksi voitaisiin valita edullisinkin malli, mutta yleensä halvoissa malleissa toleranssit ovat liian suuret ja siten kuulokkeiden välillä on suuriakin eroja. Toinen tärkeä tekijä on kuulokkeiden aiheuttama akustisen impedanssin muutos korvassa. Kuulokkeiden tulisi olla mahdollisimman *avoimet*, jotta niiden akustinen impedanssi voitaisiin jättää huomiotta ekvalisointeja määritettäessä.

Projektin käyttöön hankittiin 16 kappaletta dynaamisia kuulokkeita (malliltaan Sennheiser HD580 precision) ja ne olivat varsin homogeenisia laadultaan. Kuulokkeet on evaluoitu kappaleessa 4.3 ja mittauspöytäkirja löytyy liitteestä E.

Tanskalaisessa tutkimuksessa (Møller et al., 1995a) testattiin 14 kuuloketta 40 koehenkilöllä. Joukossa oli Sennheiserin kuulokkeista mallit HD250, HD420, HD540 ja HD560. Kaikkien kuulokkeiden vasteet sijoittuivat 4 desibelin virherajan sisälle. Yksikään kuulokkeista ei siis ollut ideaalinen FEC-kuuloke (katso kappale 2.1.9), mutta tutkimuksen tekijät ehdottivat 4 dB:n virherajan käyttämistä avoimien kuulokkeiden valinnassa.

Kuulokeliitännät tavallisissa vahvistimissa tai toistolaitteissa ovat yleensä alimitoitettuja ja tarvitaan erillinen kuulokevahvistin toistamaan äänitteiden koko dynamiikka alkupe räisen kaltaisena. Monen koehenkilön kuuntelukokeissa täytyy sama näyte toistaa useille kuulokkeille samanaikaisesti ja viimeistään silloin on hankittava erillinen vahvistin. Projektille hankittiin kuulokevahvistin Behringer Powerplay mallia HA 4000 ja se on evaluoitu kappaleessa 4.2.

### 3.4.2 Vastausten kirjaaminen

#### Hiiret

Koehenkilön käyttöliittymä kuuntelukoejärjestelmään oli kolminäppäinen Logitech Pilot PC-hiiri (Kuva 3.4). Hiirien oma elektronikka ohitettiin ja johto vaihdettiin 4-pariseen kierrettyyn kaapeliin (engl. twisted pair), jonka toisessa päässä oli liittimenä 8-napainen UTP-liitin. Kaapelin 3 johtoparia liitettiin hiiren kolmeen painonäppäimeen ja neljäs pari käytettiin LED-merkkivalolle. Valolla voi antaa palautetta koehenkilölle, esimerkiksi vilkuttamalla sen hiiren valoa jolta ei saatu ajoissa vastausta ja näin vastaamaton henkilö löytyy nopeasti.



**Kuva 3.4** Vastaukset kerättiin PC-hiirillä. Niihin integroitiin lisäksi pieni LED-merkkivalo, joka näkyy kuvassa johdon sisäänmenon vasemmalla puolella. Valolla voi antaa palautetta koehenkilölle esimerkiksi virheestä.

Hiirien kaapeli jätettiin metrin pituiseksi niiden kuljetuksen helpottamiseksi. Hiiret kytkettiin UTP-jatkokappaleella varsinaiseen keskittimenä toimivaan näppäimistöille menevään kaapeliin. Kuuntelukoejärjestelmää pystytettäessä käytetään eri pituisia (5m - 25m) kaapeleita hiirien liittämiseksi järjestelmään.

#### Näppäimistö

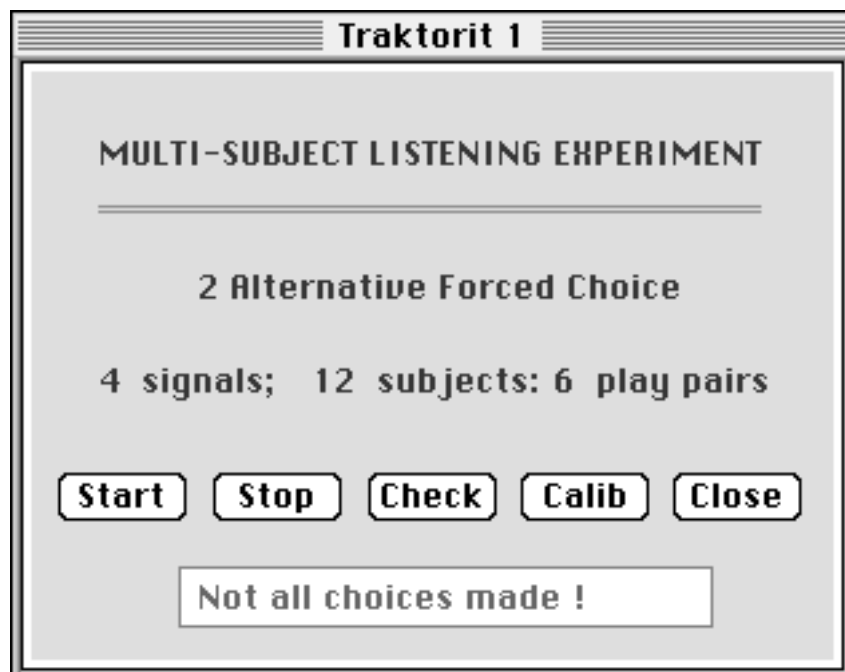
Apple<sup>®</sup> Macintosh<sup>®</sup> II FX -tietokoneen näppäimistöön (Apple<sup>®</sup> Extended Keyboard) liitettiin alumiinista muotoillun kehikon avulla 16 kappaleen UTP-riviliitin, jotka johdotettiin tiettyjen näppäimistöistä valittujen kytkimien rinnalle. Kyseinen näppäimistö kykenee puskuroimaan useita näppäimen painalluksia samanaikaisesti ja soveltuu varsin hyvin tämänkaltaiseen sovellukseen.



**Kuva 3.5** Kuuntelukoejärjestelmää varten muunneltu Apple<sup>®</sup> xtended Keyboard. Hiiret liitetään näppäimistön taakse lisättyyn liitinpaneeliin. Näppäimistö on edelleen ketjutettavissa Macintosh<sup>®</sup> Desktop Bus:in kautta (aukko näppäimistön päädysssä). Mikäli hiirien L D-merkkivaloja halutaan ohjata, täytyy näppäimistöön liittää ulkoinen virtalähde.

### 3.4.3 Ohjelmisto

Kuuntelukoeohjelmisto toteutettiin Macintosh<sup>®</sup> Common Lisp -ohjelmointiympäristön pohjalta. Common Lisp:n valmistaja on Digitoool Inc. Sovelluksen kehitys tapahtui Apple<sup>®</sup> Macintosh<sup>®</sup> II FX -tietokoneessa ja käytössä oli Common Lisp versio 3.0 CLOS (Common Lisp Object System) -oliolaajenuksella. Näiden pohjalta on Teknillisen korkeakoulun akustiikan laboratoriossa kehitetty laaja signaalinkäsittelyn sovellusten kehitysympäristö, joka kulkee työnimellä QuickSig (Karjalainen, 1990).

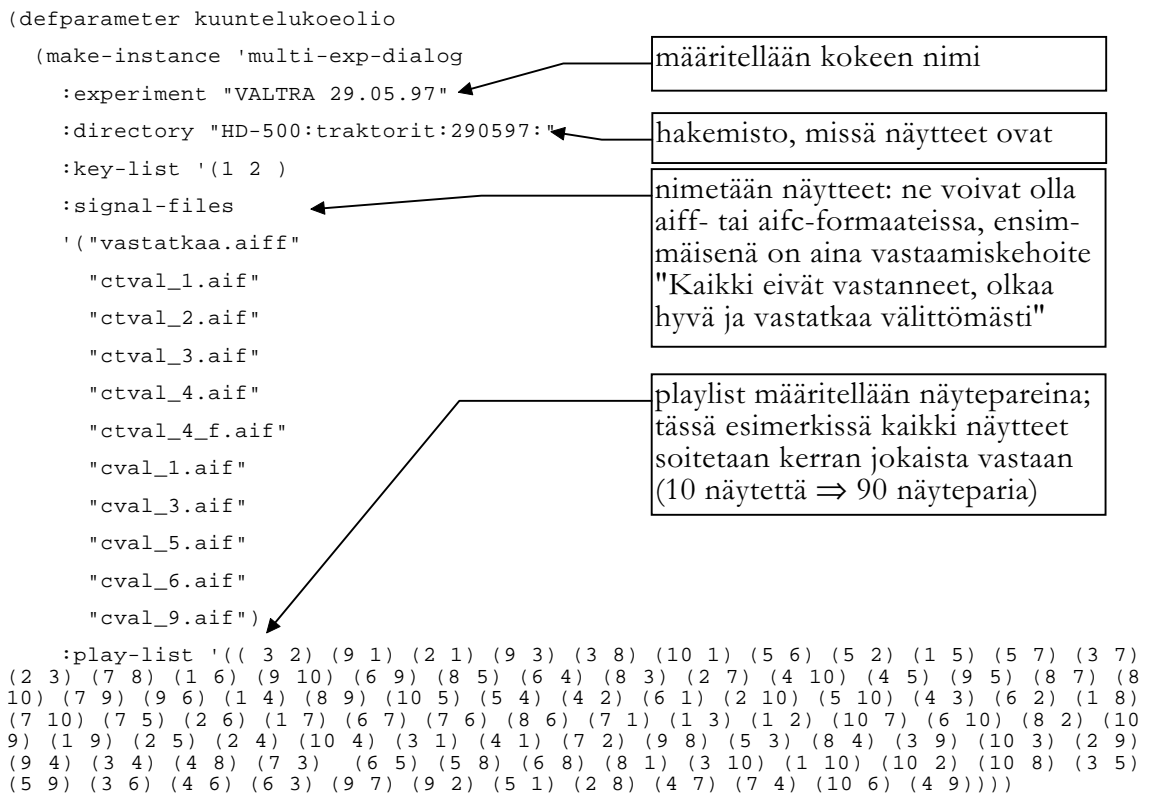


**Kuva 3.6** esimerkki kuuntelukoeohjelman dialogi-ikkunoista. Ohjelmalla voi tarkistaa hiirien toimintakunnon sekä kalibroida kuulokkeiden tasot. Kuuntelukokeen valvoja seuraa näytöltä kokeen edistymistä ja mikäli joku koehenkilöistä jättää vastaamatta, koe pysähtyy ja näytölle tulostuu "Not all choices made!". Koe jatkuu, kun kaikki vastaukset on saatu.

Kuuntelukoeohjelma sisältää noin 600 riviä Lisp -koodia. Ohjelman käyttöliittymä (Kuva 3.6) rakennettiin mahdollisimman helppokäyttöiseksi ja sen avulla voi tarkistaa koehenkilöiden käyttöliittymien (hiirien) toimintakunnon sekä kalibroida kuulokkeet. Kalibroinnissa ohjelma ajaa kuulokkeisiin 1 kHz:n taajuudella sinisignaalia, jonka taso vastaa 94 dB ääninäytteissä. Keinopään tai keinokorvan sekä ohjelman avulla kuulokkeet on helppo kalibroida toistamaan äänityksessä vällinneita todellisia äänipaineita.

Tietokoneessa oli käytössä National Instruments:n valmistama laadukas AD- ja DA-muunninkortti tyypiltään NB-A2100 (National Instruments, 1990).

Hiiret kytkettiin näppäimistön omien kytkimien rinnalle liitteenä olevan taulukon (Liite G) mukaan. Uusi kuuntelukoe määritellään ohjelmalle Lisp-skriptillä luomalla uusi kuuntelukoeolio:



### 3.5 Näytteiden ekvalisointi

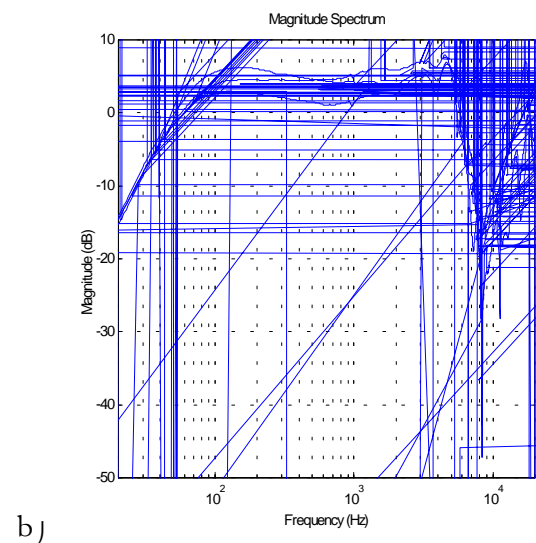
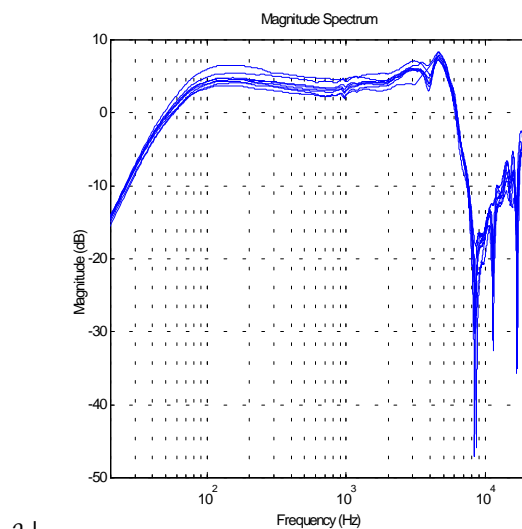
Tärkeä osa binauraalisten kuuntelukokeiden suunnittelusta on päätös kuinka *ekvalisointi* suoritetaan. Mikäli äänentoistoketjussa syntyviä vääristymiä ei korjata, lokalisointi heikkenee huomattavasti ja etäisyyden arvioinnissa tulee virheitä. Ekvalisoinnit voidaan tehdä *yleisinä*, jolloin ne ovat aina kompromissi eikä lokalisointi toimi kaikilla tai kenelläkään kovin hyvin. Paras laatu saavutetaan, jos ekvalisoinnit tehdään *henkilökohtaisina*.

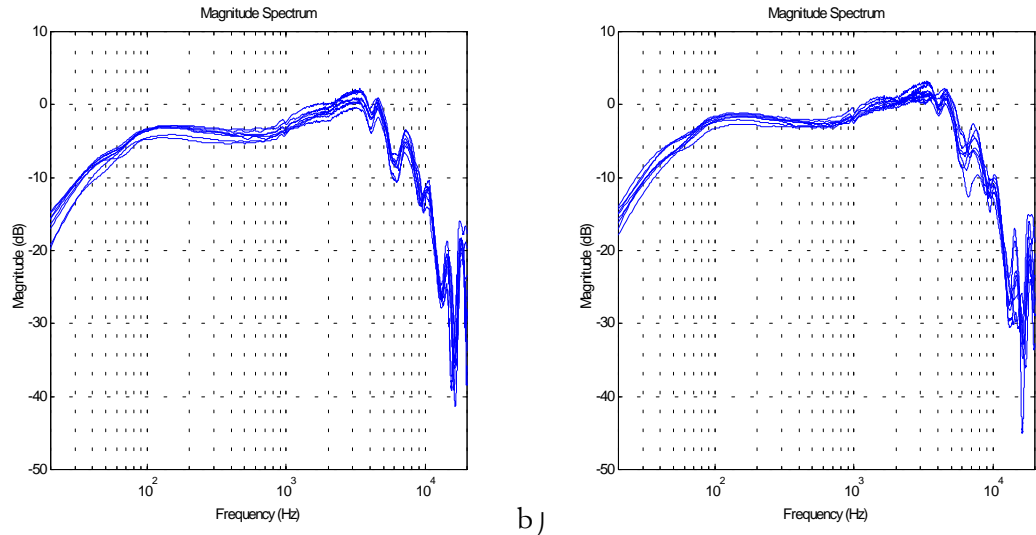
Suljetun korvakäytävän suulta (kappaleessa 2.4.2) äänitetyt ääninäytteet esitettiin kuuntelukokeissa koehenkilöille kuulokkeiden avulla. Kuulokkeita käsitellään tässä FEC-

kuulokkeina (kappale 2.1.9), joten niiden akustista impedanssia ei oteta huomioon. Korjattavat epäideaalisuudet ovat siten vain kuulokevaste ja äänityslaitteiston virheet. Kuulokevasteet mitattiin käyttäen samaa äänityslaitteistoa kuin näyttöiden äänitystilanteissa ja tämän vuoksi ekvalisointisuodin on kokonaisuudessaan kuulokevasteen käänteissuodin.

Lähes kaikki tosipää-näytteet äänitettiin saman koehenkilön päällä. Korjaussuodin suunniteltiin hänen kuulokevasteestaan. Sekä keinopää-, että tosipääkuulokevasteet määritettiin mittaamalla impulssivasteet päihin laitetuista kuulokkeista äänityksessä käytettyihin mikrofoneihin. Keinopäässä oli omat sisäänrakennetut Brüel&Kjær 4190 vapaankentän 1/2 tuuman mikrofonit ja koehenkilöllä käytettiin tässä työssä esitettyä suljetun korvakäytävän suulta äänittävää laitteistoa. Taajuusvasteet (Kuva 3.7 ; Kuva 3.8) määritettiin jokaiselle 16:sta kuulokkeesta ja ne pyrittiin asettamaan päihin täsmälleen samoille paikoille.

Keinopään ja koehenkilön kuulokevasteissa on huomattavan suuria eroja ensimmäisen 4 kHz:n resonanssikuopan jälkeen. Keinopäällä kuunneltuna Sennheiserin kuuloke vaimentaa yli 10 kHz:n taajuuksia noin 20 dB. Koehenkilöllä kuuloalueen yläpään taajuudet toistuvat vaimentuneina muutamasta syvästä kuopasta huolimatta mutta kuitenkin kaksi kertaa voimakkaampina kuin keinopäällä.





**Kuva 3.8** Kuuntelukokeiden näytteiden äänityksessä käytetyn keinopään kuulokevasteita saman merkisillä kuulokkeilla (Sennheiser HD-580), a) vasen korva b) oikea korva. Kuulokkeet asetettiin keinopäähän mahdollisimman tarkkaan samalle paikalle.

Kuulokevasteiden keskiarvojen (Evaluoinnit: Kuva 4.9 ; Kuva 4.10) perusteella voidaan laskea <sup>1</sup>käänteissuotimet, joilla kompensoitaisiin kuulokkeiden taajuustoiston epäideaalisuudet siten, että kaikki taajuudet toistuisivat yhtä voimakkaina. Tässä tapauksessa käänteissuotimien tulisi korostaa yli 10 kHz:n taajuuksia jopa satakertaisiksi (40 dB) ja siitä seuraa liian suuri signaalikohinasuhteen heikkeneminen. Kuulokevasteiden pohjalta suunniteltiin <sup>2</sup>FIR-suotimet (Kuva 3.9), jotka kompensoivat useimpien kuuntelukoenäytteiden olennaiselta taajuusalueelta epäideaalisuudet pois.

### 3.5.1 Ekvalisointiohjelma

Ekvalisointeja helpottamaan kirjoitettiin ohjelma Matlabia (Mathworks, 1996a) käyttäen. Ohjelma käy tarkistamassa ennalta määrätystä hakemistosta, onko siellä ekvalisoitavia näytteitä. Mikäli niitä löytyy, se tarkistaa niiden nimet ja formaatin. Ensimmäinen kirjain määrää näytteen tyyppin:

```
% r for the real head recording
% d for the dummy head recording
% c for the calibration signal
```

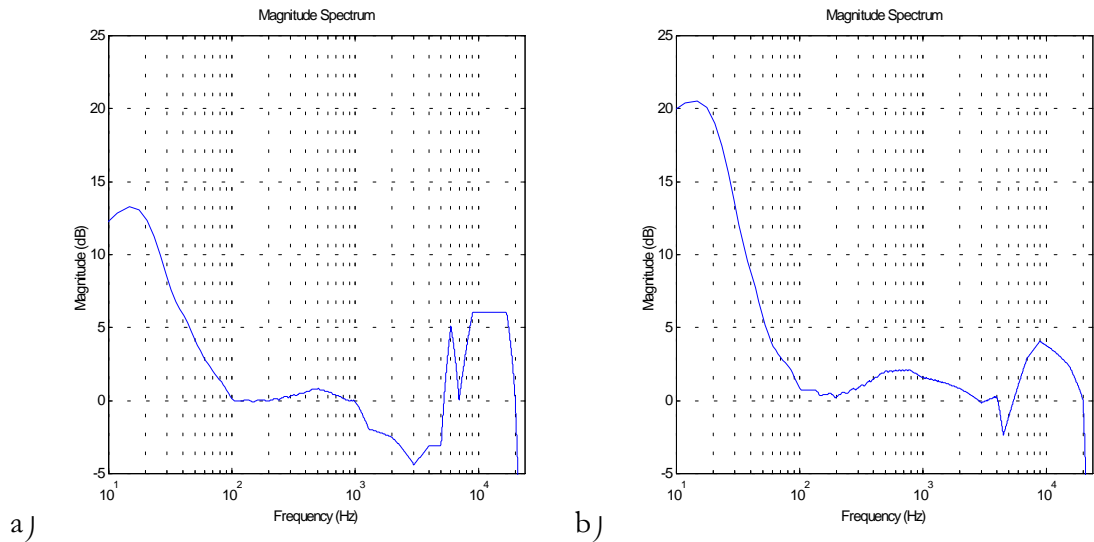
Jos näytteet ovat PC- tai Macintosh- AIFF-tiedostoja, tehdään niille tyypikohtainen ekvalisointi (ekvalisointisuodattimen suunnittelu liitteessä J). Ohjelma normalisoi näytteiden A-painotetut spektrit tarvittaessa samoiksi. Ekvalisointien jälkeen näytteille lasketaan vahvistuskerroin voimakkaimman näytteen maksimiarvon mukaan ja kaikki

<sup>1</sup> Impulssivasteelle lasketaan Matlabin (Mathworks, 1996b) lpc-komennolla minimivaiheiset lineaariprediktio-kertoimet.

<sup>2</sup> Finite Impulse Response. Digitaalisuodin, jolla on äärellinen impulssivaste ja sillä voidaan korjata sekä vaihe- että magnitudivääristymiä. FIR-suodin on aina stabiili.

näytteet sekä kalibrointisignaali kerrotaan vahvistuskertoimella signaalikohinasuhteen optimoimiseksi.

FIR-suodattimista tuli varsin pitkät ( $2^{11}$  ja  $2^{12}$ ), mutta se ei ole ongelma, koska näytteitä ei tarvitse ekvalisoida reaaliaikaisesti.



**Kuva 3.9** Kuuntelukokeita varten suunnitellut ekvalisointisuodattimet. a) keinopäänäynteille b) tosi-päänäynteille. Kummassakin tapauksessa alle 100 Hz:n taajuuksia korostettiin huomatta-vasti, sillä pienet taajuudet siirtyivät kokeisiin valituista kuulokkeista heikosti korviin.

### 3.6 Tilastolliset työkalut

Yleensä tieteellisessä tutkimuksessa pyritään mahdollisimman suureen *objektiivisuuteen*. Tilastotiede pyrkii antamaan ohjeita, jotta päästäisiin mahdollisimman lähelle objek-tiivisuutta. Täydellinen objektiivisuus on mahdotonta, sillä mittaajana toimii ihminen, ihmisen tekemillä välineillä, ja tietojen hankinta lähtee ihmisen tarpeista. Jos tilastoai-neisto on oikein analysoitu ja analyysit oikein tulkittu ja raportoitu, on tutkimustulok-sella *painoarvoa*. Tilastollisilla tempuilla voidaan huijata helposti sellaisia henkilöitä, jotka eivät tunne tilastollisia käsittelytapoja. Tilastotiedettä tunteva lukija taas havaitsee oikein raportoidusta tutkimuksesta, onko tilastoaineiston käsittely tehty oikein. Tämän vuoksi on tärkeää valita oikeat *tilastolliset mittavälineet* ja *analyysimenetelmät* jokaiseen tapaukseen.

#### 3.6.1 Tilastolliset mittavälineet ja analyysimenetelmät

Aineiston analysointiosa voidaan jakaa kahteen tilastotieteen osa-alueeseen: *kuvailu* ja *päättele* (Manninen, 1982). Kuvailu käsittää havaintoaineiston tiivistämistapoja ja esittämismenetelmiä, kuten taulukot, tunnusluvut ja kuviot. Tilastollisella päätteyllä pyritään vastaamaan tutkimusongelman kysymyksiin. Menetelminä käytetään *hypoteesin*

*testausta ja tilastollisia analyysejä.* Ne perustuvat epävarmuuden systemaattiseen käsitteelyyn.

### Hypoteesien testaus

Tilastollisten testien avulla voidaan tutkia otantapopulaatiota koskevien väittämien tai käsitysten (hypoteesien) paikkansapitävyyttä. Koska tehtävät päätelmät perustuvat otokseen, ei täyttä varmuutta koskaan voida saada. Tilastollisen testin avulla on vain mahdollista arvioida kyseiseen päätöksentekotilanteeseen liittyvää riskiä sille, että otoksen perusteella populaatiosta tehty johtopäätös on virheellinen. Lopullisen päätöksen teko jää aina tutkijalle itselleen. Tilastollinen testi antaa ainoastaan apua päätöksentekotilanteeseen.

Jotta hypoteesien testausta voitaisiin käyttää, täytyy olettaa, että muuttuja noudattaa likimain normaalijakaumaa perusjoukossa, osajoukkojen varianssit ovat yhtäsuuret ja osajoukot ovat toisistaan riippumattomia.

Hypoteesin testauksessa lasketaan 1. lajin virheen eli hylkäämisvirheen <sup>1</sup> todennäköisyys ja mikäli virheen tekemisen todennäköisyys on pieni, hylätään nollahypoteesi ja hyväksytään vastahypoteesi. Vastahypoteesi (antiteesi) on vastaväittämä nollahypoteesille. Riskitason rajoina käytetään yleensä arvoja 0.05, 0.01 ja 0.001. Näille löytyvät myös nimitykset:

$0.05 < p < 0.10$  tulos on suuntaa antava,

$0.01 < p < 0.05$  tulos on tilastollisesti melkein merkitsevä (\*),

$0.001 < p < 0.01$  on tulos tilastollisesti merkitsevä (\*\*)

$p < 0.001$  on tulos tilastollisesti erittäin merkitsevä (\*\*\*)

Näitä rajoja ei ole pakko käyttää, vaan on järkevämpää esittää tarkka merkitsevyytason arvo ja tehdä johtopäätös tilanteen mukaan.

### Tilastolliset kuvailumenetelmät ja tunnusluvut

Tilastollisena kuvailumenetelminä voidaan käyttää ryhmittäisiä *keskiarvoja* ja *keskivirheitä*, sekä näistä piirrettyjä kuvioita. Aritmeettinen keskiarvo on eniten käytetty ja usein "paras" keskiluku. Mikäli muuttujan jakauma on vino tai havaintoaineistossa on paljon muista poikkeavia havaintoja, kuvaavat geometrinen keskiarvo ja *mediaani* "paremmin" jakauman keskusta. *Fraktiilit* ovat prosenttisummafrekvenssin perusteella määrättyjä pisteitä jakaumasta. Mediaani on 50 %:n fraktiili. Fraktiili nimetään sen mukaan, kuinka moneen osaan jakauma jaetaan, esimerkiksi:

- kvartiilit 25 %, 50 % (mediaani) ja 75 %

---

<sup>1</sup> Kutsutaan merkitsevyytastasoksi tai riskitasoksi (significance = p tai  $\alpha$ ).

- tertiilit 33.3 % ja 66.7 %
- kvintiilit 20 %, 40 %, 60 % ja 80 %
- desiilit 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80% ja 90%.

Ainoa keskiluku, jonka voi määrätä luokitteluasteikon (esim. sukupuoli, siviilisääty, ammatti) muuttujasta on *moodi* eli tyyppiarvo. Moodi on suurimman frekvenssin omaava luokka. Mikäli jatkuvasta muuttujasta halutaan määrätä moodi, on se tehtävä luokitellusta muuttujasta.

Fraktiilit ja moodi ovat hyvin vähän käytettyjä keskilukuja. Keskiarvojen erojen tilastollista merkitsevyyttä voidaan testata *t-testeillä* tai *variانسsianalyysillä*.

### T-testi

T-testi on eräänlainen keskiarvotesti. Keskiarvotesteillä verrataan otoksesta laskettua keskiarvoa vakioon tai vertaillaan osajoukkojen (ryhmien) keskiarvoja toisiinsa. Kaikissa keskiarvotesteissä on luonnollisesti oletuksena, että tutkittavasta muuttujasta voidaan laskea keskiarvo eli muuttujan on oltava välimatka- tai suhdelukuasteikollinen. Lisäksi tutkittavan muuttujan tulee noudattaa likimain normaalijakaumaa.

Kun havaintoaineistosta voidaan osoittaa havaintoparit, jotka selvästi riippuvat toisistaan, käytetään ryhmäkeskiarvojen väliseen vertailuun *verrannollisten parien t -testiä*. Kun vertaillaan kahta täysin toisistaan riippumatonta osajoukkoa toisiinsa ja halutaan tietää eroavatko ryhmien keskiarvot toisistaan, voidaan tilastollisena menetelmänä käyttää *riippumattomien otosten t -testiä*.

### Varianssitestit

Mikäli toisistaan riippumattomia verrattavia ryhmiä on useita, ei näiden vertailuun saa käyttää parittaisia t -testejä, vaan soveltuva menetelmä on *yksisuuntainen variانسsianalyysi*. Variانسsianalyysi ei nimestään huolimatta testaa ryhmien varianssien välistä eroavaisuutta, vaan keskiarvoja. Nimi johtuu siitä, että analyysi perustuu ryhmien välisen ja sisäisen vaihtelun vertaamiseen ja vaihtelua arvioidaan variansseilla.

Yksisuuntaisen variانسsianalyysin lisäksi variانسsianalyysiä voidaan käyttää useampi-suuntaisena ja erilaisten koasetelmien (esim. lohkokokeissa) analysointiin.

### Jakauman tutkiminen

Kaikki keskiarvotestit ja monet monimuuttujamenetelmät olettavat *normaalijakauman*. Kaikissa testeissä riittää, jos muuttujat ovat likimain normaalijakautuneita. Näin voimakasta oletusta ei kaikissa menetelmissä tarvitse tehdä. Usein riittää, että keskiarvon otantajakauma on normaalin tai jäännökset noudattavat likimain normaalijakaumaa. Normaalisuuden voi todeta graafisesti histogrammasta tai summafrekvenssin kuvaajasta. Jakauman ominaisuuksia sijainnin ja hajonnan lisäksi ovat *vinous* (skewness) ja *huipukkuus* (kurtosis). Vinous kuvaa jakauman symmetrisyyttä. Jos jakauma on saman-

kaltainen jakauman keskikohdasta oikealle ja vasemmalle päin, on jakauma symmetrinen ja  $\text{vinous} = 0$ . Huipukkuustunnusluku kertoo jakauman maksimikohdan leveydestä. Yksi vinoustunnusluvusta on *Pearsonin vinousmitta*, joka perustuu keskilukujen väliin eroon. Jos  $P < 0$ , sanotaan jakauman olevan vasemmalle loiveneva ja jos  $P > 0$ , sanotaan jakauman olevan oikealle loiveneva. Näille tunnusluville voidaan myös laskea keskivirhe ja siten käyttää testeinä. On kuitenkin huomattava, että kyseiset testit testaavat sitä, poikkeako jakauman vinous tai huipukkuus normaalijakauman vastaavasta ominaisuudesta, eikä varsinaisesti sitä voiko saatu jakauma olla otos normaalijakaumasta. Jakaumatestejä kutsutaan yhteensopivuustesteiksi ja käytetyin on Kolmogorov-Smirnov -testi. Testi vertaa jakauman summafrekvenssejä normaalijakauman (tai muun jakauman) kertymäfunktion vastaaviin arvoihin.

### Jakaumasta riippumattomia testejä

Jakaumasta riippumattomat eli ei-parametriset menetelmät (nonparametric methods) eivät vaadi muuttujan perusjoukon jakauman tai jakauman parametrien (esim. varianssi) tuntemista. Tässä esitettävissä testeissä alkuperäiset havaintoarvot korvataan järjestyslukuilla ja laskutoimitukset perustuvat näihin järjestyslukuihin. Jakaumasta riippumattomat testit eivät tietysti ole niin voimakkaita kuin jakaumasta riippuvat menetelmät eli ne eivät yleensä hylkää nollahypoteesia yhtä helposti. Näistä esimerkkeinä voidaan mainita Wilcoxonin testi ja Mann-Withneyn U-testi.

### Regressioanalyysi

<sup>1</sup>*Korrelaatiokertoimen* avulla voidaan tutkia kahden, vähintään välimatka-asteikollisen, muuttujan lineaarista riippuvuutta. Mikäli tutkimusalan asiantuntemuksesta tunnetaan syy- eli selittävä-muuttuja ja seuraus- eli selitettävä-muuttuja, voidaan tilastollisena menetelmänä käyttää *regressioanalyysiä*. Regressioanalyysiin voidaan ottaa mukaan myös useita selittäviä muuttujia.

Regressiomallin selityskykyä kuvaa *selitysaste*, joka kertoo kuinka paljon malli selittää kokonaisvaihtelusta. Selitysaste esitetään usein prosentteina ja yhden selittävän muuttujan regressiomallin selitysaste on korrelaatiokertoimen neliö.

### Hajontalukuja

Käytetyin hajontaluku on *keskihajonta* (engl. standard deviation), joka ilmoittaa havaintoarvojen hajaantumisen keskiarvon ympärille. Luokitellulle muuttujalle keskihajonta lasketaan korvaamalla havaintoarvot luokkakeskuksilla. Keskihajonta on järkevä hajontaluku vain, kun muuttujat ovat luokiteltavissa jonkin asteikon mukaan (ovat välimatka- ja suhdeasteikon muuttujia).

---

<sup>1</sup> Esimerkkeinä erilaisista korrelaatiokertoimista mainittakoon Pearsonin tulomomenttikorrelaatiokerroin, Kendallin järjestyskorrelaatiokerroin, Spearmanin järjestyskorrelaatiokerroin. Korrelaatio ilmoittaa muuttujien välisen riippuvuuden lukuarvona nollan ja ykkösen väliltä. Korrelaatiokertoimen arvo nolla kertoo, että muuttujat eivät riipu lainkaan toisistaan. Jo korrelaatiokertoimen arvo 0.3 voi olla joissain tapauksissa suuri.

*Varianssi* (engl. variance) on keskihajonnan neliö  $s^2$ . *Variaatiokerroin* on suhteellinen keskihajonta. Sillä saadaan eri suuruusluokkaa olevien muuttujien hajonnat vertailukelpoisiksi. *Variaatiokerroin* voidaan laskea vain suhteasteikon muuttujille. *Keskiarvon keskiarvo* (engl. standard error of mean) kuvaa keskiarvon luotettavuutta. Käytetään usein keskiarvokuvioissa ja taulukoissa. Keskiarvoon käsite liittyy estimointiin. *Vaihteluvälön pituus* on suurimman havaintoarvon ja pienimmän havaintoarvon välinen erotus.

### Kokeiden luotettavuus ja oikeellisuus

*Reliabiliteetti* tarkoittaa mittauksen toistettavuutta. Tutkimuksen sisäinen reliabiliteetti voidaan todeta mittaamalla sama tilastoyksikkö useampaan kertaan. Jos mittaustulokset ovat samat, niin mittaus on *reliabeli*. Jos mittaustulokset poikkeavat toisistaan, tulosten satunnaisvaihtelu kertoo mittauksen reliabiliteetistä. *Satunnaisvaihtelua* tutkitaan usein laskemalla toistettujen mittausten *variaatiokerroin*. Toisaalta kahden toistetun mittaustuloksen välisen korrelaatiokertoimen täytyy olla lähellä ykköstä. Näin voidaan arvioida tutkimuksen sisäistä reliabiliteettia. Tutkimuksen *ulkoisen reliabiliteetti* tarkoittaa sitä, että tutkimus (ja mittaukset) ovat toistettavissa myös muissa tutkimuksissa ja tilanteissa.

*Validiteetti* (mittauksen oikeellisuus) on mitta sille, mitataanko todella sitä, mitä on tarkoitus mitata. Validisuus liittyy aina sovellusalueen teoriaan ja sen käsitteisiin. Sisäisellä validiteetilla tarkoitetaan sitä, vastaavatko mittaukset tutkimuksen teoriaosassa esitettyjä käsitteitä. Ulkoisesti validissa tutkimuksessa myös muut tutkijat tulkitsevat kyseiset mittaustulokset (ja tutkimustulokset) samoin kuin tutkimuksessa on esitetty.

### 3.6.2 Tilastolliset ohjelmistot

Tilastojen analysointiin on saatavilla hyvin eritasoisia ohjelmia eri käyttöympäristöihin. Statistix on esimerkki kevyestä ohjelmasta: ohjelman käyttö on helppoa ja sillä saa perustunnusluvut nopeasti. Muita esimerkkejä ovat NCSS, SURVO, BMDP ja GLIM. Lisäksi Excel- sekä Matlab -ohjelmiin on saatavissa tilastollinen analyysipaketti. Psykologisten kokeiden tulosten analyysiin nämä kevyemmät ohjelmat eivät yleensä riitä, sillä niistä puuttuu sosiaalitieteille tärkeät monen samanaikaisen muuttujan analyysimenetelmät.

Statistical Package for Social Sciences (SPSS) ja Statistical Analysis System (SAS) ovat markkinoiden johtavat tilastolliseen analyysiin tarkoitettut ohjelmistot. SAS on suosittu tekniikassa sovelluksissa, kun taas SPSS valitaan usein käyttäytymistieteiden käyttöön. Kummallakin voi tehdä samat asiat. Tämän tutkimuksen tilastojen analysointiin käytettiin SPSS -ohjelmaa.

## 3.7 Audiometri

Kuuntelukokeisiin osallistuvien koehenkilöiden kuulo tulee aina tarkistaa. Yleensä riittää *normaalikuulon* tarkistus alle 8 kilohertzin taajuuksilla. Kuuntelukokeiden tulosten

analysointiin otetaan usein yksi <sup>1</sup>faktori kuvaamaan henkilön kuuloa. Valitsimme kuulon tarkistukseen audiometrillä Interacoustics Diagnostic Audiometer AD28, joka täyttää standardit IEC 645-1-1992 ja ANSI 3.6-1989. Audiometrillä löytyy mm. automaattinen ISO 8253 standardin mukainen <sup>2</sup>Hughson-Westlake testi. Automaattisia testejä voi johtaa harhaan helposti ja siksi kuulotestiä tulee aina ehdottomasti valvoa ja suorittaa automaattisen testin lisäksi muutama manuaalinen taajuustarkistus epäilyttävissä tapauksissa. Laitteella voidaan määrittää kuulokynnys taajuusalueella 125-8000 Hz ja äänipainetasoilla -10 - +120 yhden desibelin tarkkuudella.

### 3.7.1 Kalibrointi

Audiometrillä voi kalibroida ilma siirtymän (engl. air conduction, standardi ISO R389-1991) tai luujohtumisen (engl. bone conduction, standardit ISO 7566 tai ANSI S 3.26-1981) mukaan. Audiometrillä mukana toimitettiin Telephonicsin kuulokkeet mallia TDH-39P, jotka soveltuvat vain äänieristetyssä tilassa tehtäviin testeihin. Kenttäkäyttöön valitsimme Sennheiserin suljetut kuulokkeet mallia HDA 200. Ne perustuvat Peltorin kuulosuojaimiin mallia H7 ja vaimennusarvot ovat työterveyslaitoksen testausstandardin ISO 4869-1 mukaan 18 dB:stä (125 Hz) 42 dB:iin (4 kHz). Kuulokkeet kalibroimme audiometriin Brüel&Kjær:n keinokorvaa 4153 käyttäen.

---

<sup>1</sup> Ikäkorjaustaulukon ISO 7029 mukaan normalisoitu kuuloindeksi sekä absoluuttiset luokitukset kuten normaalikuuloinen ja kuulovaurioinen.

<sup>2</sup> Hughson-Westlake on automaattinen, puhtaisiin siniääniin perustuva testisarja. Kuulokynnys määritetään kaksi kolmesta (tai kolme viidestä) oikeasta vastauksesta -periaatteella tietyllä äänipainetasolla. Testisekvenssissä tasoa nostetaan 5 dB:n kynnyksin ja lasketaan 10 dB:n kynnyksin.

## 4 Evaluoinnit

Tieteellisessä tutkimuksessa on tärkeää tulosten jäljitettävyyden ja toistettavuuden. Tutkimuksessa käytetyn laitteiston ominaisuudet on tiedettävä mahdollisimman tarkkaan, jotta koe olisi myöhemmin toistettavissa eri mittausvälineillä.

Tämän tutkimuksen kokonaistavoite oli saada tutkimukselle asetetut kriteerit täyttävä, toimiva järjestelmä. Tässä luvussa käydään laitteiston komponentit yksitellen läpi ja määritetään niistä tärkeimmät ominaisuudet. Laitteiston ominaisuuksia määritetään perinteisten mittausmenetelmien lisäksi kuuntelukokeella, josta tutkitaan ekvalisointien tarpeellisuutta sekä binauraalisten äänitysmenetelmien eroja.

Kuuntelukoenäytteiden äänityksessä käytettiin sekä keinopäätä että koehenkilöiden omia päitä tosipäätekniikalla äänittäen. Keinopää sisältää omat signaaliprosessorit vasteiden korjaukseen eri äänitysympäristöjä varten. Tässä luvussa läpi käytävissä mittauksissa keinopäässä käytettiin vasteen<sup>1</sup> lineaarisoivaa ekvalisointisuodinta, jota käytetään vapaankentän äänityksissä. Evaluoinneissa käytetyt mittausvälineet, ohjelmat ja työkalut on lueteltu liitteessä B.

### 4.1 Äänityslaitteisto

Tässä kappaleessa evaluoidaan tutkimuksessa kehitetystä tosipää-äänityslaitteistosta tärkeimmät ominaisuudet.

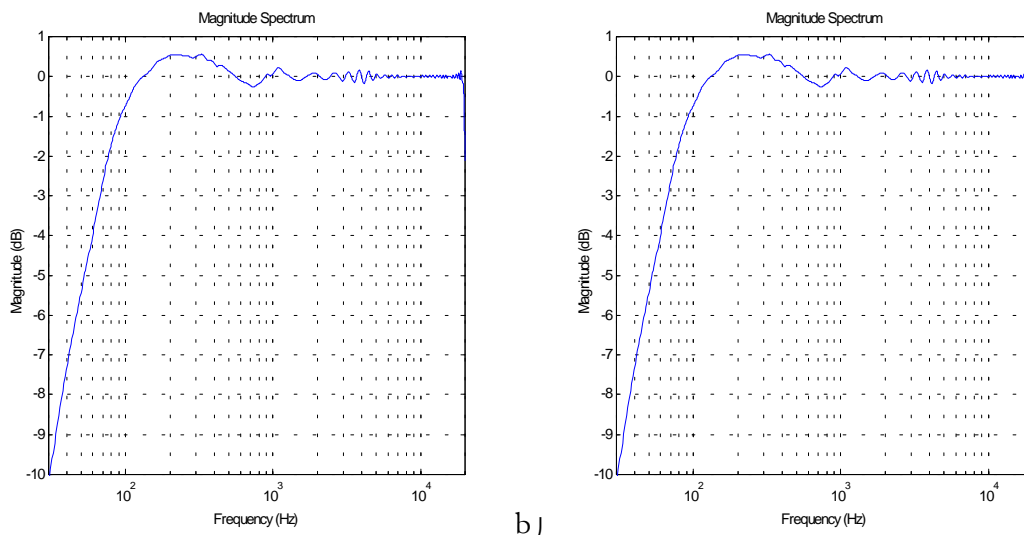
#### 4.1.1 Sähköinen vaste

Mikrofonietuvahvistimelle mitattiin sähköiset vasteet (Kuva 4.1) siten, että mikrofonit olivat kiinni ja heräte syötettiin mikrofoniliitäntään. Mittaukset suoritettiin sekä<sup>2</sup> MLSSAlla (DRA Laboratories, 1996) sekä QuickSigillä (Karjalainen, 1990) (Karjalainen, 1992).

---

<sup>1</sup> Käyttämämme keinopään "lineaarinen" suodatin (LC) ei todellisuudessa ole lineaarinen, vaan se korjaa keinopäässä käytössä olevien mikrofonien vasteen lineaariseksi. Suotimessa on 10 kHz:n kohdalla 7 dB:n korostus ja 15 kHz:n kohdalla 6 dB:n vaimennus.

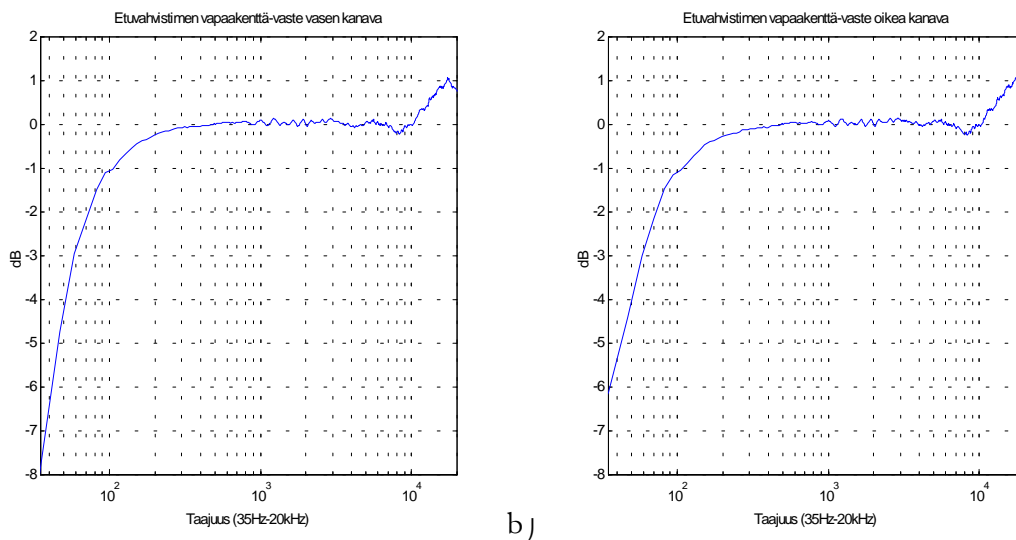
<sup>2</sup> MLSSA mittaa lineaarisen systeemin impulssivasteen käyttäen pseudosatunnaista herätettä, jota kutsutaan maksimipituusjonoksi (engl. maximum-length sequence, MLS).



**Kuva 4.1** Mikrofonietuvahvistimen sähköinen vaste a) vasen kanava b) oikea kanava. Ylipäästösuojituksen -3dB piste on 67 Hz.

### 4.1.2 Vapaakenttävaste

Vapaakenttävasteet (Kuva 4.2) mitattiin TKK:n isossa kaiuttomassa huoneessa. Mikrofonit oli sijoitettuna joutsenkaulan päähän 2 metrin etäisyydelle äänilähteestä.

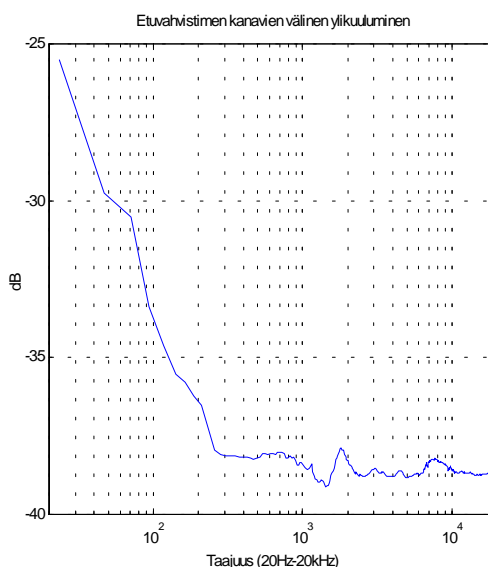


**Kuva 4.2** Mikrofonietuvahvistimen vapaakenttävaste mitattuna mikrofonikapselin kanssa, -3dB piste on 60 Hz, ylipäästö noin -6dB / oktaavi a) vasen kanava b) oikea kanava.

### 4.1.3 Kanavien välinen ylikuuluminen

Etuvahvistimen sähköisessä suunnittelussa pyrittiin pieneen virran kulutukseen ja kokoon. Samalla jouduttiin tekemään kompromisseja muiden ominaisuuksien suhteen. Vahvistinasteiden virtuaalimaa ei ole riittävän jäykkä ja seurauksena on jonkin verran ylikuulumista (Kuva 4.3). Ylikuuluminen määritettiin mittaamalla impulssivaste samanaikaisesti kummastakin kanavasta irrottamalla toisen kanavan mikrofonit liitti-

mestään. Heräte syötettiin mikrofoniin kuulokkeiden avulla ja mikrofonit olivat suljetun korvakäytävän suulla. Kuuloketoiston epäideaalisuudet kompensoituvat automaattisesti pois jaettaessa häiriökanavan magnitudivaste signaalikanavan vasteella.

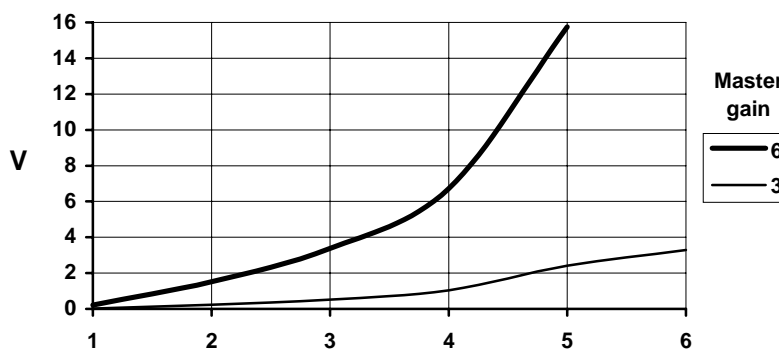


**Kuva 4.3** Mikrofonietuvahvistimen kanavien välinen ylikuuluminen. Asteikko ilmaisee absoluuttisen eron desibeleinä.

## 4.2 Kuulokevahvistin

Kuulokevahvistimesta (Behringer Powerplay HA 4000) määritettiin ylioheutusvara (engl. headroom), kohinatasot, kuormituksensieto ja vasteet. Mittauspöytäkirja löytyy liitteestä F.

Vahvistimen suurin ulostulojännite on  $20 V_{RMS}$ . Vahvistin saadaan ylioheutumaan jo  $100 mV_{RMS}$  :n siniherätteellä (Kuva 4.4). Kanavien stabiilius on erittäin hyvä ja tasot poikkeavat kanavien välillä vain vähän toisistaan (suurimmillaan desibelin verran).

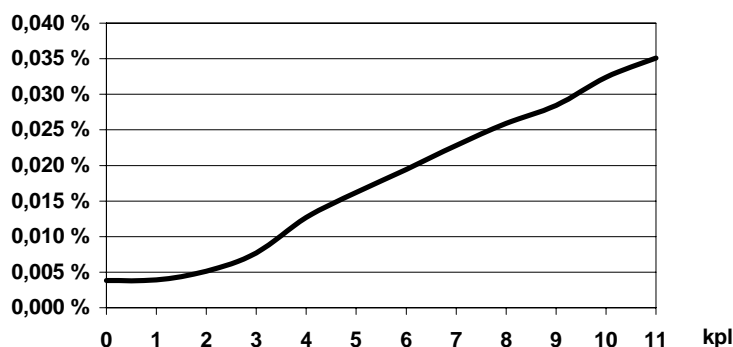


**Kuva 4.4** Kuulokevahvistimen kuormittamaton ulostulojännite vahvistuksen funktiona. Herätteenä on  $100 mV_{RMS}$  sinisignaali. Vahvistin ylioheutui pää- ja kanavasäätimien ollessa ääriasennoissaan.

Pienin kohina saavutetaan, kun päätasosäädin (Main level) on suurimmassa asennossaan ja kanavatasosäätimellä (Channel gain) säädetään sopiva lähtötaso.

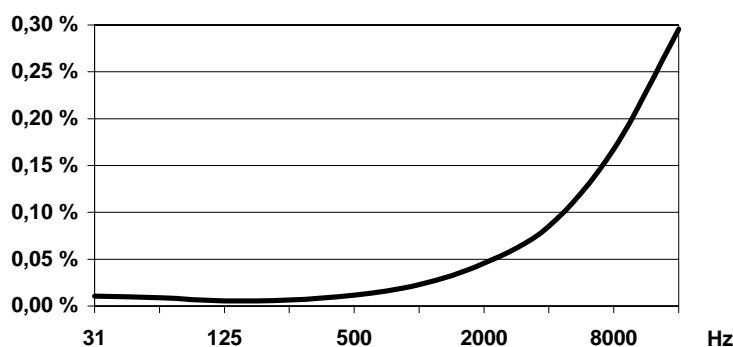
### Kuormitus ja särö

Vahvistimen pääteasteen säröytymistä (Kuva 4.5) arvioitiin kuormituksen funktiona. Herätteenä käytettiin 1 kHz:n sinisignaalia ja se ohjattiin kuulokkeisiin 20 mW:n teholla, joka vastaa keinopäällä mitattuna äänitasoa  $L_A=113$  dB. Standardin DIN 45580 mukainen suurin nimellisteho näille kuulokkeille on 0.2 W. Särön kasvu ei ole mitattavissa, mikäli muihin kanaviin lisätään kuhunkin kolme kuuloketta.



**Kuva 4.5** Kuulokevahvistimen särön kasvu kuormituksen funktiona. Mittaus on tehty kanavalla 1, muut kanavat eivät olleet käytössä. Vaaka-akselilla kuormituksen olevien kuulokkeiden lukumäärä.

Vahvistimen särö on erittäin pieni alle kilohertzin taajuuksilla (Kuva 4.6), kun vahvistimeen on kytketty 15 kuuloketta. Harmonisista komponenteista laskettiin mukaan 10 ensimmäistä lukuunottamatta 16 kHz:n taajuutta (5 komponenttia).



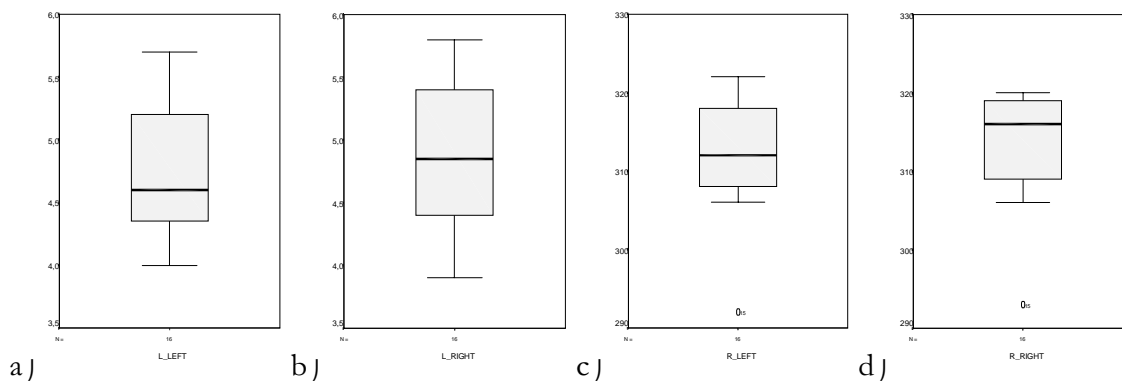
**Kuva 4.6** Kuulokevahvistimen särö taajuuden funktiona. Kuormituksen 15 kuuloketta.

## 4.3 Kuulokkeet ja ekvalisoinnit

Sennheiserin HD580 kuulokkeiden taajuusvaste Brüel&Kjær:n keinokorvalla 4153 mitattuna (DIN 45580) on 16-30000 Hz (-3 dB) ja 12-38000 Hz (-10 dB). Kuulokkeet ovat toimintaperiaatteeltaan dynaamiset ja avoimiksi suunnitellut (katso FEC-määrittely).

mä kappaleessa 2.1.9). Nimellisimpedanssi on  $300 \Omega$ . Taajuusvaste on ekvalisoitu diffuusiin kenttään ja kuuloke puristuu korvan ympärillä (engl. circumaural) noin 2.5 N voimalla.

Määritimme sähköiset ominaisuudet (Kuva 4.7; Kuva 4.8) ja siirtofunktiot jokaiselle 16:sta kuulokkeesta. Kuulokkeiden impedansseissa oli jopa  $12 \Omega$ :n eroja 1 kHz:n taajuudella saman kuulokkeen puhekelojen välillä ja suurin ero eri kuulokkeiden välillä välillä oli  $30 \Omega$ . Induktanssit poikkesivat suhteessa vielä enemmän, sillä ero eri kuulokkeiden välillä oli lähes 40 % keskimääräisestä arvosta.



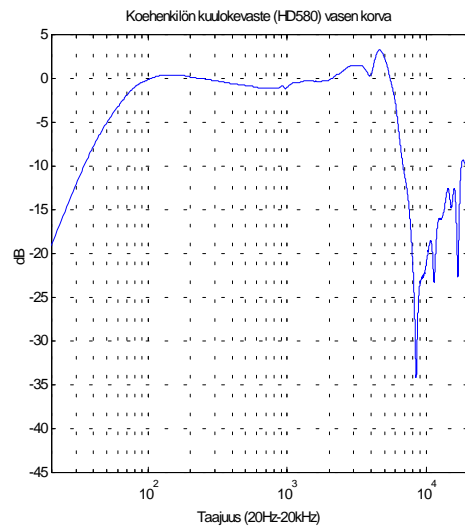
**Kuva 4.7** Kuulokkeiden induktanssi (mH) a) vasen ja b) oikea kuuloke sekä impedanssi ( $\Omega$ ) c) vasen ja d) oikea kuuloke 1 kHz:n taajuudella. Kuvaajissa harmaa alue osoittaa mille alueelle 95 % lukuarvoista sijoittui, harmaan alueen sisällä lukuarvojen keskiarvo (paksu viiva) sekä kaikkien lukuarvojen rajat.

**Descriptive Statistics**

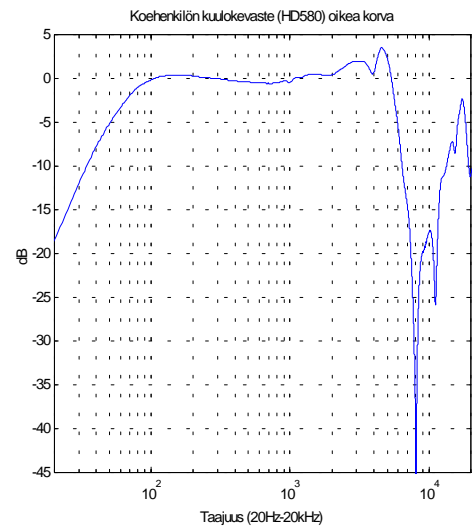
	N	Range	Minimum	Maximum	Mean	Std. Deviation	Variance
L_LEFT	16	1,70	4,00	5,70	4,7438	,5176	,268
L_RIGHT	16	1,90	3,90	5,80	4,8813	,5741	,330
R_LEFT	16	30,00	292,00	322,00	312,1250	7,3564	54,117
R_RIGHT	16	27,00	293,00	320,00	313,4375	7,3209	53,596
Valid N (listwise)	16						

**Kuva 4.8** Kuulokkeiden impedanssien ja induktanssien tilastollisia tunnuslukuja. L\_L FT on vasemman kuulokkeen induktanssi ja R\_L FT vasemman kuulokkeen impedanssi 1 kHz:n taajuudella. L\_RIGHT ja R\_RIGHT ovat vastaavat arvot oikean puoleisille kuulokkeille.

Kuulokkeiden siirtofunktioissa (kuulokevasteissa) oli jonkin verran poikkeamia, joista osa johtui sähköisten arvojen eroista. Kaikkien 16 kuulokkeen siirtofunktiot keskiarvoistettiin ja näin saatiin kuuloke-ekvalisoinneissa tarvittut kuulokevasteet (Kuva 4.9 ; Kuva 4.10).

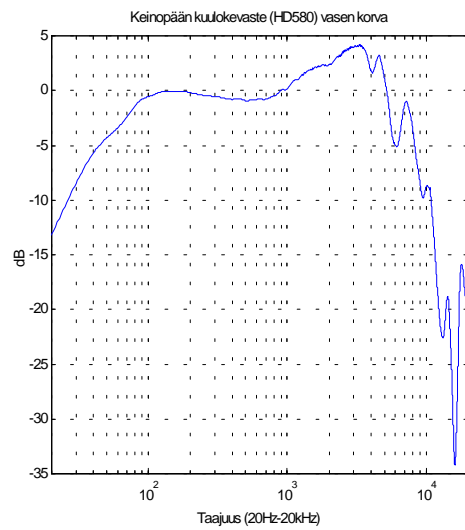


a)

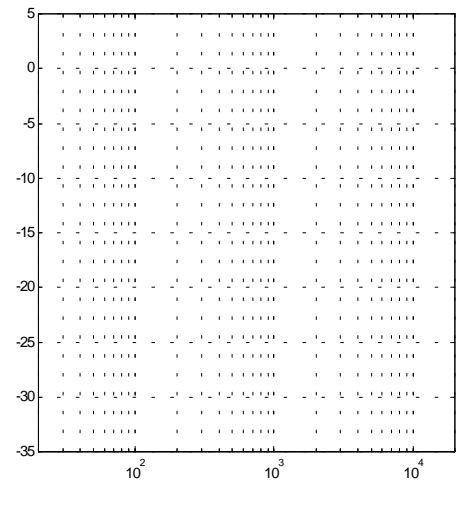


b)

**Kuva 4.9** Äänityksessä käytetyn henkilön kuulokevasteet: a) vasen korva ja b) oikea korva.



a)

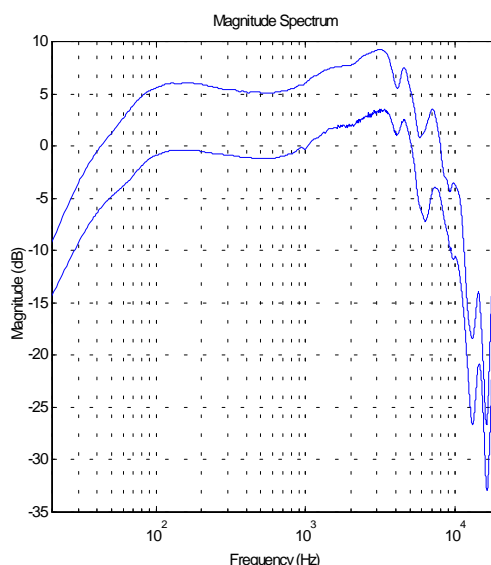


b)

josta seuraa tämän onkalon ilmasylinterin pituudeksi  $l_0=4.675$  mm. Kun äänen nopeus on  $c = 340$  m/s saadaan onkalon alimmaksi resonanssitaajuudeksi (neljännesaaltoresonaattori)

$$f_{res} = \frac{c}{4(l+l_0)} \approx 5100 \text{ Hz}. \quad (4.2)$$

Tämän onkalon pituus on kuitenkin niin paljon lyhyempi kuin ihmisellä ja se on liian suuri halkaisijaltaan pituuden suhteen, jotta se voisi korostaa merkittävästi resonanssitaajuuttaan. Eroja ei ole juuri havaittavissa (Kuva 4.11), jos verrataan onkalon perältä (sisäänrakennettu mikrofoni) tallennettua äänipainetta suljetun onkalon suulta (vertaa: suljetun korvakäytävän suulta) tallennettuun äänipaineeseen.



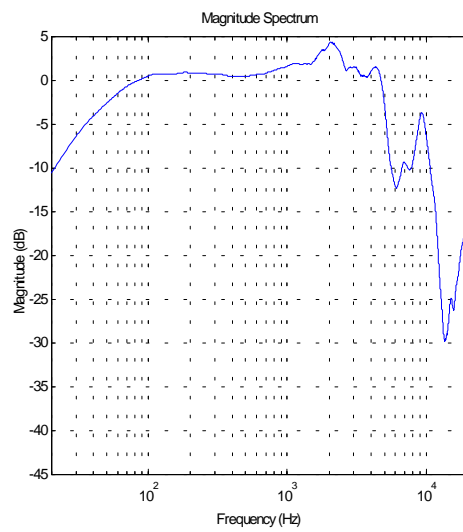
**Kuva 4.11** Keinopään vasen korva tosipää-äänityksissä käytetyllä laitteistolla mitattuna. Samoilla kuulokkeilla, sisäänrakennetuilla mikrofoneilla, vaste poikkeaa desibelin verran resonanssipainoissa. Alempi käyrä sisäänrakennetuilla mikrofoneilla.

### Kuulokkeiden sijoituksen vaikutus

Kuulokkeiden sijoituksen vaikutus riippuu hyvin paljon kuuloketyypistä. Mikäli tämä virhetekijä haluttaisiin minimoida, tulisi käyttää henkilökohtaisesti valettuja korvatulpakuulokkeita. Tulppakuulokkeissa on niin paljon muita ongelmia (mm. epäkäytännöllisyys ja ekvalisointi erittäin hankalaa), joten käytetään muita ratkaisuja. Tässä tutkimuksessa käytettyjen kuulokkeiden sijoituksen vaikutusta tutkittiin ja havaittiin, että asettamalla kuulokkeet huolellisesti päähän saadaan varsin hyvä tarkkuus toistolle.

<sup>1</sup> Täysikasvuisen ihmisen korvakäytävän pituus keskimäärin 25 mm ja halkaisija 8 mm. Nämä antavat alimmaksi resonanssitaajuudeksi  $f_{res} \approx 3$  kHz.

Kokeilimme myös miten kuulokkeiden voima, millä kuulokkeet puristuvat korvia vasten, vaikuttaa vasteisiin. Neljän kilohertzin taajuuksilla äänipainetaso nousee (Kuva 4.12), mutta sen yläpuolella vaste pysyy lähes identtisenä.



a)

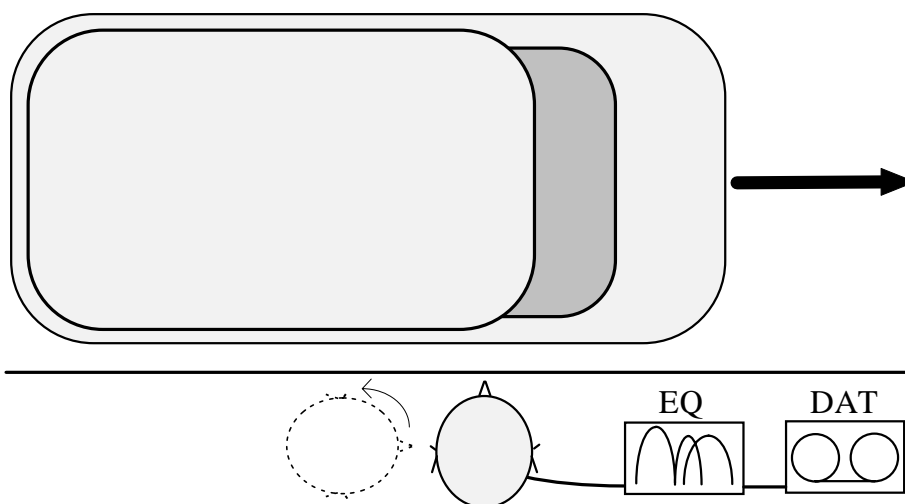
## 4.4 Keinopää-tosipää vertailu

Vertaillaksemme tosipäällä tehtyjä äänityksiä keinopäällä tehtyihin järjestimme kuuntelukokeen, jossa arvioitiin koehenkilöiden kykyä lokalisoida ääniä kuulokekuuntelussa. Lähtökohtana oli kysymys: *onko kenen tahansa henkilön päällä tehty äänite parempi kuin hyvällä keinopäällä tehty äänite?* Samalla haluttiin selvittää *ekvalisoinnin merkitystä* äänityksen laatuun.

Kuuntelukokeeseen osallistui 20 koehenkilöä iältään 20-50 vuotta. Koehenkilöiden kuulo oli todettu normaaliksi kuulotestillä eikä heitä harjoitettu etukäteen kuuntelukoetta varten. Osa oli osallistunut aikaisemminkin kuuntelukokeisiin, mutta ketään ei voinut pitää harjaantuneena koehenkilönä.

Se, että herätteenä ei käytetty keinotekoista tai laboratoriossa äänitettyä näytettä, tekee tästä kuuntelukokeesta normaalista poikkeavan. Tämän reaalisen stimuluksen, <sup>1</sup>henkilöauton ohiajo, vuoksi näytteissä oli luonnollisesti muitakin äänivihjeitä, kuten linnun laulua ja puron solinaa.

Auto ajoi äänittävän pään ohi hiekkaisella polulla noin metrin etäisyydeltä siten, että pää pysyi paikoillaan, katsoen kohtisuoraan polun ylitse ja auto ajoi edestakaisin polulla (Kuva 4.14). Näin saatiin näytteet, joissa auto ajaa oikealta vasemmalle ja vasemmalta oikealle. Päätä käännettiin kuvan mukaisesti katsomaan polun suuntaisesti, jolloin auton ajaessa edestakaisin saatiin näytteet "edestä taakse" ja "takaa eteen". Keinopäässä käytettiin vapaakenttäekvalisointia äänitystilanteessa.



**Kuva 4.14** Äänitysasetus kuuntelukokeiden herätteitä varten. Äänitettäessä "edestä taakse"- ja "takaa eteen"- näytteet päätä käännettiin katsomaan polun suuntaisesti.

<sup>1</sup> Ford Taunus 1.6 vm. -79, farmari.

Henkilö, jonka korviin laitetuista mikrofoneista äänitys tehtiin, oli satunnaisesti valittu. Äänityksestä valittiin neljä eri ohiajoa kummallakin äänityspäällä. Erilaisia näytteitä (Kaavio 4.1) oli kaiken kaikkiaan 16, koska kukin näyte toistettiin myös ekvalisoituna. Kaikki näytteet toistettiin kolme kertaa satunnaisessa järjestyksessä, joten koehenkilöt vastasivat 48:aan kysymykseen kokeen aikana. Vastaukset merkittiin paperille ympyröimällä yksi neljästä vaihtoehdosta. Vastauslomake on liitteenä (Liite C).

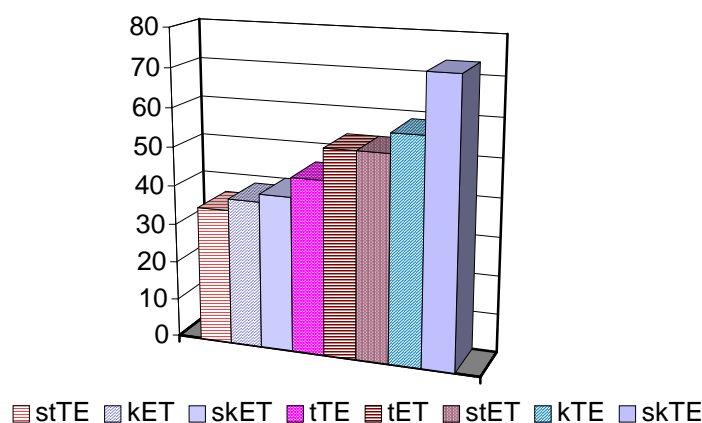
#### 4.4.1 Kuuntelukokeen tulokset

Toisessa kokeessa koehenkilöiden tekemien virheiden lukumäärä ja sen hajonta olivat hieman pienempiä (Taulukko 4.1). Liitteessä H on kattavampi taulukko tuloksista.

**Taulukko 4.1** *Kuuntelukokeen tuloksia.*

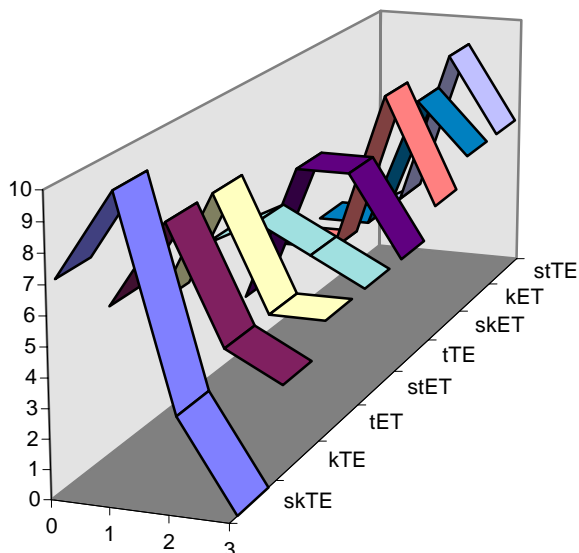
	1. koe	2. koe
Virheitä keskimäärin kaikkiaan	28 %	26 %
Virheiden lukumäärien keskihajonta (kpl)	2.8	1.9
Keinopäävirheitä (kaikista näytteistä)	14 %	12 %
Tosipäävirheitä (kaikista näytteistä)	14 %	13 %

Näytteet, joissa auto lähestyi päätä sivulta ja poistui toiselle sivulle osoittautuivat odotetusti hyvin helpoiksi (vain kaksi erehdystä) ja ne jätettiin varsinaisen tilastollisen analyysin ulkopuolelle. Ne pidettiin kuuntelukokeessa mukana psykologisista syistä - testi on koehenkilöille miellyttävämpi, kun joukossa on helppojakin tapauksia. Lisäksi koehenkilöt saavat itseluottamusta vastatessaan selkeään kysymykseen ja näin saadaan vaikeisiin kysymyksiin luotettavemmat vastaukset. Analyysiin valituista näytteistä, näytteeseen skTE (suodatettu keinopäällä äänitetty näyte "takaa eteen"), vastattiin parhaimmillaan lähes neljään viidestä oikein (Kuva 4.15).



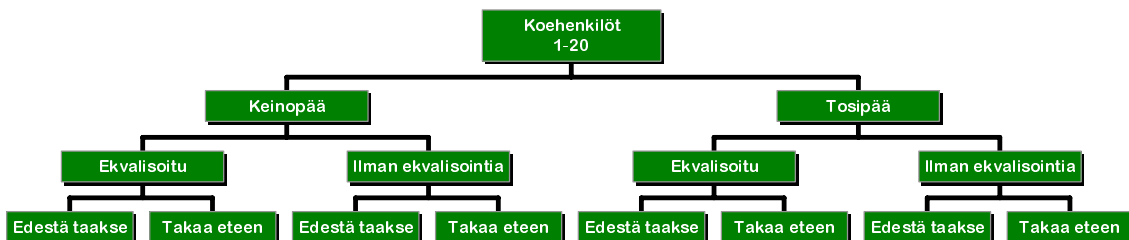
**Kuva 4.15** Näytteiden koemenestys. Näytteet on nimetty siten, että pieni "s"-kitjain tarkoittaa ekvalisoitua (suodatettu) näytettä. Pieni "t" tarkoittaa tosipää-äänitystä ja "k" vastaavasti keinopää-äänitystä. "TE" vastaa "takaa eteen" ja "ET" "edestä taakse".

Joukossa oli myös koehenkilöitä, joilla ei ollut lainkaan virheitä keinopäänäytteissä ja toisaalta myös henkilöitä, jotka vastasivat oikein kaikkiin tosipäällä äänitetyistä näytteistä. Enemmän kuin joka kolmas koehenkilöistä vastasi jokaisella kerralla oikein näytteeseen "suodatettu keinopää-äänitys takaa eteen" (Kuva 4.16).



**Kuva 4.16** Yksittäisten koehenkilöiden virheiden lukumäärä. Kuvassa on horisontaali-akselilla näytteiden tyypit (katso edellisen kuvan selostus), vaaka-akselilla virheiden tyypit (0 - 3 kertaa väärin vastannut) ja pystyakselilla virhetyyppien lukumäärä. Esimerkiksi näytteeseen skTE ei kukaan vastannut 3 kertaa väärin ja 7 henkilöä vastasi jokaisella kerralla oikein.

Faktorit tilastollisessa analyysissä olivat (Kaavio 4.1) *suunta* (takaa eteen tai edestä taakse), *pää* (keinopää tai tosipää) sekä *ekvalisointi* (ekvalisoitu tai ilman ekvalisointia).



**Kaavio 4.1** Tilastolliseen analyysiin valitut faktorit

Henkilökohtaisia ekvalisointeja emme tehneet, vaan suodattimet perustuivat kummankin äänittävän pään kuulokevasteisiin. Kuvissa (Kuva 4.9 ; Kuva 4.10) on 16 kuulokkeen (Sennheiser HD580) impulssivasteen keskiarvo kyseisillä päillä mitattuna. Samat kuulokkeet olivat käytössä kuuntelukokeissakin.

Selitettävä (riippuva) muuttuja analyysissä oli *koemenestys* eli kuinka monta oikeaa vastausta kukin näyte sai. Aineisto analysoitiin SPSS -ohjelmistolla ja tässä esitetyissä taulukoissa olevat p-arvot on saatu monen muuttujan variassianalyysiä (MANOVA), khiin neliötestiä sekä T-testiä käyttäen.

**Taulukko 4.2** *Faktoreiden ekvalisointi (FILTER) ja pää (HEAD) yhteisvaikutusten p-arvoja.*

HEAD by FILTER (0.03)	T-testi	$\chi^2$ -testi
kTE-skTE	0.02	0.04
tTE-stTE	0.21	0.40

Merkitsevä faktori oli ekvalisointi. Kun ääninäyte kompensoidaan kuulokevasteen käänteissuodattimella, paranee lokalisointi lähes kaikissa tapauksissa (Kuva 4.15 ; Taulukko 4.2) keinopäällä mutta suurella todennäköisyydellä huononee entisestään tosipäällä. Tämä tosin oli odotettavaa: koehenkilön korva ei välttämättä ole muodoltaan sama mitä äänittävällä henkilöllä ja kun myös ekvalisointi tehdään eri henkilön päälle, tulee ääninäytteeseen entistä enemmän henkilökohtaisia vivahteita.

Hyvin tunnettu lokalisointivirhe binauraalisessa kuuntelussa on äänen aistiminen taakse. Tämän tutkimuksen aineiston perusteella tilastollisesti merkittävä on myös suunnan ja pään yhteisvaikutus. Esimerkiksi ekvalisoiduilla keinopää-näytteillä keskiarvot eroavat 99 %:n todennäköisyydellä toisistaan (Taulukko 4.3). Khiin neliötestin mukaan niiden tulokset riippuvat myös jonkin verran toisistaan, joten tulokseen täytyy suhtautua varauksella.

**Taulukko 4.3** *Faktoreiden suunta (FRNTBACK) ja pää (HEAD) yhteisvaikutusten p-arvoja.*

HEAD by FRNTBACK (0.02)	T-testi	$\chi^2$ -testi
skET-skTE	0.01	0.26
skTE-stET	0.03	0.64

Tässä tutkimuksessa tulokset olivat lähes normaalijakautuneet.

### Johtopäätökset kuuntelukokeesta

Hyvällä keinopäällä saadaan parempia tuloksia kuin satunnaisesti valitulla tosipäällä. Mikäli halutaan saavuttaa paras mahdollinen laatu, on käytettävä henkilökohtaisia äänityksiä sekä korjaussuotimia. Kuuntelukokeiden avulla on kuitenkin mahdollista löytää koehenkilö, jonka päällä äänitetyt näytteet toimivat binauraalisesti paremmin useimmilla ihmisillä kuin hyvällä keinopäällä äänitetyt näytteet (Møller et al., 1997). On tunnettua, että yleisin virhe binauraalisia äänityksiä kuunnellessa on äänten lokalisoituminen taakse. Kokeen jälkeen suoritetussa haastattelussa koehenkilöt ilmoittivat pääsääntöisesti äänten lokalisoituneen heidän taakseen. Muutaman mielestä tosin kaikki tapahtui heidän edessään. Tilastollisen analyysin perusteella oli merkitsevää, kummalla päällä äänitetyt äänet lokalisoitui taakse, joten se on osaltaan vaikuttanut "takaa eteen" näytteiden hyvään menestymiseen kuuntelukokeessa. Kolmas merkitsevä tulos kuuntelukokeesta oli, että ekvalisointi paransi huomattavasti lokalisointia keinopää-äänitteillä ja huononsi jonkin verran lokalisointia tosipää-äänitteillä.

## 5 Diskussio

Tässä työssä esitetty järjestelmä antaa uusia haasteita tuoteäänienlaadun kaupallisille kehittämistyökaluille. Tosipää-äänitystekniikan eteenpäin vieminen on tarpeen keinopäiden kehittämisen rinnalla. Työssä esitetty järjestelmä on askel eteenpäin, mutta monia ongelmia jää kuitenkin vielä ratkaistavaksi.

### 5.1 Järjestelmän rajoituksia ja ongelmia

Perustavoitteena binauraalisessa tekniikassa on täydellisen kuuloillusion saavuttaminen toistamalla kuulotapahtumassa vallinneet äänipaineet tärykalvoilla kuuntelutilanteessa uudelleen. Kuuloaistimukseen vaikuttavat kuitenkin oleellisesti myös muiden aistien tuottamat ärsykkeet eikä kuulotapahtuman tunnetilan toistaminen tekniikan keinoin ole mahdollista.

Teknisesti voidaan binauraalisen tekniikan perustavoite saavuttaakin valvotuissa laboratorio-olosuhteissa, mutta käytännön kuluttajatasen ratkaisut kuuluvat vielä tulevaisuuteen. Kuuloketekniikan kehittämiseen tulisi ottaa toisenlainen lähestymistapa, sillä eri henkilöiden välillä on huomattavia eroja pelkästään kuulokevasteissa varsinkin korkeilla taajuuksilla. Keinokorvat, joilla kuulokkeiden vasteita tutkitaan, eivät ota lainkaan huomioon korvalehden vaikutusta. Digitaalitekniikan aikakaudella ei kuulokevasteen kompensointi reaaliaikaisella käänteissuotimella ole enää mahdotonta.

Etu- ja takalokalisointi on usein vaikeaa binauraalisilla äänitteillä. Yksi selitys sille on se, että ihminen tekee koko ajan pieniä pään liikkeitä tarkentaakseen äänen paikallistamista. Binauraaliset äänitteet eivät reagoi pään kääntämiseen. Tosipäällä tehtävissä äänitteissä on usein ongelmana äänittävän pään liikkeet. Ne saavat kuuntelijan äänen paikantamistoiminnon sekaisin, sillä hän ei kykene kääntämään samanaikaisesti samaan suuntaan päätään ilman erikoistoimenpiteitä.

#### Pään liikkeiden seuranta

Yksi keino saada binauraaliset äänitteet "elämään" olisi syöttää kuuntelijan pään liikkeet signaaliprosessorille ja laskea sillä kääntymisestä aiheutuneet muuttuneet HRTF:t, joilla signaalia sitten muokattaisiin reaaliaikaisesti. Toinen keino voisi olla äänityksen videointi.

## Videointi

Varustamalla äänittävä pää pienellä videokameralla, voitaisiin sen liikkeet ("katse") taltioitua synkronisesti äänitteen kanssa. Tämä helpottaisi äänitteen kuuntelua, kun pään asennosta olisi myös näköaistin antamaa tietoa.

## 5.2 Järjestelmän jatkokehitys

Kehitetystä kuuntelukoejärjestelmässä on ongelmia suurilla koehenkilömäärillä, sillä yhtäaikaisia vastauksia tulee ajoittain liikaa ja osa vastauksista jää rekisteröimättä. Koehenkilöt painavat vastausnappia liian pitkään ja järjestelmän yläraja samanaikaisilla vastauksilla tulee vastaan. Vastausten rekisteröimistä pitäisi muuttaa lisäämällä jokaisen kytkimen kohdalle piiri (triggeri), joka antaa jokaisesta kytkimen painalluksesta vain lyhyen impulssin tai muuttaa kytkimet mekaanisiksi liipaisukytkimiksi. Impulssin tulee olla tietenkin riittävän pitkä, että järjestelmän oma elektroniikka reagoi siihen.

Tosipää-äänityslaitteistoon kuuluvan etuvahvistimen kanavien välistä ylikuulumista voisi vähentää jäykistämällä virtuaalista maata sekä lyhentämällä toisen vahvistinasteen takaisinkytkentävastuksen signaalireittiä, joka kulkee monen dippikytkimen sekä vastuksen läpi.

Kuuntelukoeohjelma on varsin toimiva, mutta siihenkin voisi lisätä joitakin käyttöä helpottavia ominaisuuksia:

- ⇒ näppäimistön (=hiirinäppäimien) luku päällä ainoastaan kun koe on menossa; ohjelma voisi reagoida tuolloin esimerkiksi vain hiirellä tapahtuviin käskyihin
- ⇒ keskeytyksen tullessa tarkempi selvitys syystä: ilmoitus koehenkilölle, jos hänen vastauksensa on jäänyt rekisteröimättä
- ⇒ enemmän informaatiota kokeen edistymisestä ja automaattinen tauotus: pitkissä kokeissa n. 15 min. kuluttua

Työssä jouduttiin käyttämään äänitiedostoja sekä UNIX-, PC- että Mac-ympäristöissä. Tämä aiheutti päänvaivaa tiedostoformaattien muunnosten kanssa. Ajallisesti paljon työtä käytettiin Matlab-ohjelmointiin. Tärkeimmät diplomityön sivutuotteena aikaansaaduista ohjelmista olivat AIFF-formaatissa olevien äänitiedostojen lukemisen Matlab-ympäristöön ja äänivektorin Matlabista uloskirjoittamisen mahdollistavat skriptit readaiff.m sekä writeaiff.m.

## Tulevaisuus

Tulevaisuudessa binauraalinen tekniikka tulee käyttämään hyväkseen kuuloradan toimintaa vastaavia psykologisia malleja. Siihen tarvittavaa tekniikkaa ei toistaiseksi vielä ole. Massiivisen biologisen rinnakkaistietokoneen rakentaminen, kuten aivokuori, ei ole mahdollista vielä pitkään aikaan.

Toistaiseksi helpoin tapa toteuttaa kuuntelukokeet on kuulokekuuntelu hyvässä kuunteluhuoneessa, mutta binauraalisten signaalien toistossa kaiutinten kautta on saavutettu myös lupaavia tuloksia.

### 5.3 Binauraalisen tekniikan muita sovelluksia

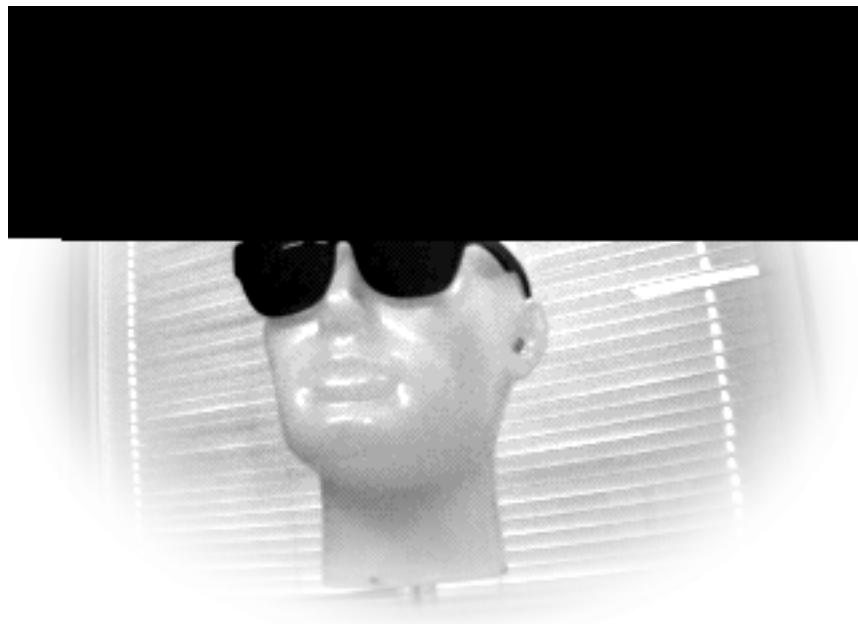
#### Binauraalinen simulointi ja sonifikaatio

On olemassa monia sovelluksia binauraalisessa simuloinnissa ja sonifikaatiossa (engl. simulation and auditory displays, sonification) jo nyt ja ala on voimakkaassa kasvussa. Esimerkiksi binauraalinen miksaus (Pössel et al., 1986.), binauraalinen huoneiden simulointi (Lehnert, et al., 1989.) (Lehnert, et al., 1992.), kehittyneimmät ääniefektit (esimerkiksi tietokonepeleissä), kuulon avulla suunnistamisessa varoitusääninä (esimerkiksi ohjaushyhteissä tai sokkolentämisessä), monimutkaisen tiedon auditorisissa visualisoinneissa sekä esityksissä, telekonferensseissa ja teleoperaattorijärjestelmissä.

#### Binauraaliset valvontajärjestelmät

Ihmisen psykologiset ominaisuudet tulee ottaa huomioon, mikäli haluamme rakentaa laitteita jotka perustuvat tähän tekniikkaan. Esimerkiksi tehtäseen sijoitetun binauraalisen valvontajärjestelmän tulee erottaa kaikesta melusta ja hälystä eri komponentit ja valikoida niistä ne, joissa tapahtuu jotain normaalista poikkeavaa.

Teknillisen korkeakoulun akustiikan laboratoriossa harjoitustyönä tehtiin (Maijala et al., 1996) demonstraatiotarkoitukseen suuntakuuntelija "Keino Suuntonen" (Kuva 5.1).



**Kuva 5.1** Mr Keino Suuntonen soveltaa binauraalista tekniikkaa tiedekeskus Heurekassa.

Keinon korvissa on mikrofonikapselit ja se laskee niihin tulevien signaalien välille ristikorrelaation. Ristikorrelaation tuloksen perusteella se kääntää pänsä tulevaa äänialtoa

kohti. Kyseistä tekniikkaa soveltaen on helppo keksiä monia eri käyttötarkoituksia. Yksi voisi olla videokameran ohjaus. Kamera voisi olla valvontatarkoituksessa tai kuvaamassa tärkeissä kokouksissa kulloistakin puhujaa.

### **PA-järjestelmät**

Teattereissa ja konserteissa miksauspöytä vie monta arvokasta katsojapaikkaa. Lisäksi se häiritsee usein tilaisuutta läsnäolollaan. Sijoittamalla keinopää konserttisaliin, voidaan miksaus tehdä missä tahansa muulla. Teoriassa vaikka toisella puolella maapalloa verkkoyhteyksien kautta.

### **Etäkokoukset**

Binauraalisen äänitys- ja toistotekniikan yksi sovellus voisi olla esimerkiksi etäneuvottelut, joissa kuulija kykenisi lokalisoimaan kiinnostavan puhujan ja siten muut samaan aikaan puhuvat eivät häiritsisi ymmärtämistä, kuten todellisessakin elämässä (coctail-party -efekti).

### **Heikkokuuloisten apu**

Yleensä kuulolaitteet vahvistavat kuuloa vain monauraalisesti. Binauraalisesta tekniikasta on ollut paljon apua osittain heikkokuuloisten puheenymmärtämisessä. Binauraaliset kuulolaitteet ottavat äänen vastaan korvakäytävän suulta ja syöttävät sen joko akustisesti tai mekaanisesti tärykalvolle. Kappaleessa 2.1.6 on esitelty hienostuneempi kuulo-laite.

## **5.4 Vastaavat kaupalliset järjestelmät ja alan yritykset**

SDRC (Structural Dynamics Research Corp.) ja Brüel&Kjær ovat tehneet yhteistyössä binauraalisen äänenlaatujärjestelmän. Se koostuu Silicon Graphics -työasemasta ja mitauslaitteistosta sekä I-Deas Sound Quality Engineering -ohjelmasta. Kyseisen ohjelman avulla suunnittelijat voivat mitata ja analysoida läpikotaisin tuotteidensa ääntä. Lisäksi ohjelma analysoi tuotteen äänestä useita psykoakustisia tunnuslukuja. Mikäli jostain ei-toivottua löytyy, voi suunnittelija ohjelman avulla "virittää" tuotteen ääntä hyväksyttävämmäksi.

Binauraalinen tekniikka ja psykoakustiikka mahdollistavat yhdessä vakavasti otettavan kilpailutekijän - tuoteäänienlaadun - kehittämisen. Lisäksi tekniikka on luonut ympärilleen aivan uuden HIFI-kulttuurin. Jo tällä hetkellä on saatavilla useita satoja binauraalisia äänitteitä ja jotkut tekniikasta innostuneet eivät suostu muilla tekniikoilla äänitettyjä äänitteitä enää kuuntelemaankaan. Liitteessä I on taulukko joistakin binauraalisen tekniikan alan yrityksistä ja heidän WWW-yhteystietojaan.

## 6 Yhteenveto

Tässä diplomityössä on kehitetty järjestelmä äänenlaadun arviointiin. Järjestelmä voidaan jakaa kahteen osaan: laitteistoon sekä menetelmiin.

*Laitteisto* perustuu binauraaliseen tekniikkaan ja se on jaettavissa kahteen erilliseen kokonaisuuteen: äänitys- ja kuuntelukoelaitteistoon. Äänityslaitteistolla voidaan säilyttää spatiaalinen informaatio ääninäytteiden taltioinnissa. Tutkimuksessa käytettiin äänityksiin sekä kaupallista keinopää-äänityslaitteistoa että diplomityössä kehitettyä tosipää-äänityslaitteistoa. Kuuntelukoelaitteisto suunniteltiin usean koehenkilön samanaikaiseen testaukseen ja ääninäytteet voidaan toistaa sillä binauraalisesti.

*Menetelmät* kuvaavat äänityslaitteistolla kerätyn kuuntelukoemateriaalin digitaalisia signaalinkäsittelykeinoja sekä varsinaisesta kuuntelukokeesta saatavan tiedon tilastollista analyysia ja tulkintaa.

Äänitysmenetelmiä verrattiin kuuntelukokeen avulla ja tulos oli, että *hyvä keinopää säilyttää paremmin suuntainformaation äänityksessä kuin satunnaisesti valittu koehenkilö*. Mikäli halutaan saavuttaa paras mahdollinen laatu, on käytettävä henkilökohtaisia äänityksiä sekä kuulokevasteen korjaussuotimia. Kuuntelukokeiden avulla on kuitenkin mahdollista löytää koehenkilö, jonka päällä äänitetyt näytteet toimivat binauraalisesti paremmin useammilla ihmisillä kuin hyvällä keinopäällä äänitetyt näytteet.

Ihmiset ovat yleensä hyvin hämmästyneitä binauraalisten äänitteiden autenttisuudesta, vaikka niitä ei olisi ekvalisoitu mitenkään. Äänitapahtuma voidaan toistaa täydellisenä kuitenkin vain oikean ekvalisoinnin avulla. Kuuloaistimukseen vaikuttavat kuitenkin oleellisesti myös muiden aistien tuottamat ärsykkeet eikä kuulotapahtuman tunnetilan toistaminen tekniikan keinoin ole mahdollista. Yksi merkitsevä tulos kuuntelukokeesta oli, että kuulokkeiden vasteen korjaava ekvalisointi paransi huomattavasti lokalisointia keinopää-äänitteillä.

Järjestelmä on ollut jo tutkimuskäytössä (Järveläinen, 1997).

## 7 Läheteet ja viittaukset

- Atal, B.S & Schroeder, M.R. 1962. Apparent sound source translator. Pat. U.S. 3 236 646.
- Bauer, B.B. 1961. Stereophonic earphones and binaural loudspeakers. *Journal of Audio Engineering Society* Vol. 9, 2. 148 s.
- Blauert, J. 1983a. Hearing - Psychological Bases and Psychophysics. Kappale Psychoacoustic binaural phenomena.
- Blauert, J. 1983b. *Spatial Hearing. The psychophysics of human sound localization.* Cambridge, The Massachusetts Institute of Technology, MIT Press. 427 s.
- Blauert, J. & Genuit K. 1993. Sound-Environment Evaluation by Binaural Technology: Some Basic Consideration. *Journ. Acoust. Soc. Japan*, Vol. 14. S. 139-145.
- Blauert, J. & Els, H. Schröter, J. 1980. A Review of the Progress in External Ear Physics Regarding the Objective Performance Evaluation of Personal Ear Protectors. In *Proceedings of Inter-Noise 1980*, New York, USA. S. 643-658.
- Bodden, M. 1993. The importance of binaural hearing for noise validation. In *Contr. To Psych. Acoust.* Ed. A. Schick, 1. Ed., Oldenburg: Bibl.- und Informationssystem Universität Oldenburg.
- Bodden, M. 1993. Modeling Human Sound Source Localization and the Cocktail-Party-Effect. *Acta Acustica* 1, Vol. 1. S. 43-55.
- Bodden, M. & Blauert, J. 1992. Separation of Concurrent Speech Signals: A Cocktail-Party Processor for Speech Enhancement. In *Proceedings of ESCA Workshop on: Speech Processing in Adverse Conditions (Cannes Mandleieu)*. S. 147-150.
- Braune, B. 1971. Mögliche Grössen zur Bewertung von Geräuschen. Unikeler Conference Paper.
- Cochran, W.G. & Cox, G.M. 1957. *Experimental designs.* 2<sup>nd</sup> ed. John Wiley & Sons, New York.
- Cooper, D.H. & Bauck, J.L. 1989. Prospects for Transaural Recording. *Journal of Audio Engineering Society*, Vol. 37, Number 1/2, 1989. S. 3-19.
- Damaske, P. 1971. Head-related two-channel stereophony with loudspeaker reproduction. *Journal of Audio Engineering Society*, Vol. 50, 1971. S. 1109.
- DRA Laboratories. 1996. MLSSA, Maximum-Length Sequence System Analyzer. Reference Manual Version 10.0A. DRA Laboratories, Copyright 1987-96 by Douglas D. Rife. S. 296.
- Els, H. & Blauert, J. 1985. Measuring Techniques for Acoustic Models - Upgraded. In *Proceedings of Internoise 1985*, Schriftenr. Bundesanst. Arbeitsschutz, Vol. Ib 39/II. S. 1359-1362.

- Els, H. & Blauert, J. 1986. A Measuring System for Acoustic Scale Models. In 12<sup>th</sup> Int. Congr. Acoust., Proc. of the Vancouver Symp. Acoustics & Theatre Planning for the Performing Arts. S. 65-70.
- Genuit, K. 1984. A model for the description of outer-ear transmission characteristics. HRTF:ien kehittäminen pään ja ulkokorvan geometrian pohjalta. Doctor of Engineering dissertation, Rheinisch-Westphalian Technical University, Aachen, Germany.
- Genuit, K. 1995. Examination of objective evaluation of binaural analysis. Proc. 15<sup>th</sup> Intern. Congr. Acoust. 1995, Trondheim. S. 233-236.
- Glasgal, R. The Ear Pinna and Realism in Music Reproduction.  
<URL:http://www.ambiophonics.org/pinna.htm>
- Gredmaier, L. 1996. Making sound quality audible. Proceedings of Internoise 1996, Liverpool. S. 2085-2088.
- Griesinger, D. 1989. Equalization and Spatial Equalization of Dummy-Head Recordings for Loudspeaker Reproduction. Journal of Audio Engineering Society, Vol. 37 (1/2). S. 20-29.
- Hammershøi, D. & Møller, H. 1991. Free-field sound transmission to the external ear; a model and some measurements. In Fortschritte der Akustik, DAGA 1991, Bochum. S. 473-476
- Hammershøi, D. & Møller, H. 1992. Artificial heads for free field recording; how well do they simulate real heads? Proceedings of 14<sup>th</sup> International Congress of Acoustics, Beijing 3 H6-7.
- Hammershøi, D. 1995. Binaural technique - a method of true 3D sound reproduction. Ph. D. dissertation, Aalborg Univ., Denmark. Aalborg University Press, ISBN 87-7307-516-7.
- Hammershøi, D. & Møller, H. 1996. Sound transmission to and within the human ear canal. The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 100, No.1, July 1996. S.408-427.
- Hammershøi, D. 1996. Fundamental Aspects of the Binaural Recording and Synthesis Techniques. AES Preprint Number: 4155<sup>th</sup> (C-8), Convention: 100, (1996 May 11-14).
- Hammershøi, D. & Sandvad, J. Binaural auralization. Simulating free field conditions by headphones. 96<sup>th</sup> Audio Eng. Soc. Conv. , Preprint 3863.
- Hudde, H. & Schröter, J. 1980. The equalization of artificial heads without exact replication of the eardrum impedance. Acustica, Vol. 44, 1980. S. 302-307.
- Jauhiainen, T. 1995. Kuulo ja viestintä. Yliopistopaino, Helsinki, ISBN 951-570-259-3.
- Lehnert, H. & Blauert, J. 1989. A Concept for Binaural Room Simulation. In Proc. IEEE-ASSP Workshop on Application of Signal Processing to Audio & Acoustics, USA-New Paltz NY.
- Jekosch, U. & Blauert, J. 1996. A Semiotic Approach toward Product Sound Quality. In Internoise 1996, Liverpool, Book 5. S. 2283-2288.
- Järveläinen, H. 1997. Ohjaamomelun häiritsevyyden subjektiivinen ja objektiivinen arviointi. Diplomityö. Teknillinen Korkeakoulu, Espoo.
- Karjalainen, M. 1990. DSP Software Integration by Object-Oriented Programming: A Case Study of QuickSig. IEEE ASSP Magazine, April 1990. S. 21-31.

- Karjalainen, M. 1992. Object-oriented programming of DSP processors: A case study of QuickC30. In Proc. 1992 IEEE Int. Conf. Acoust., Speech and Signal Processing (ICASSP'92), San Francisco, CA, Vol. 5. S. 601-604.
- Lehnert, H. & Blauert, J. 1992. Principles of Binaural Room Simulation. *Journ. Appl. Acoust.*, Vol. 36. S. 259-291.
- Letowski, T. 1989. Sound quality assessment: Concepts and criteria. Proc. 87<sup>th</sup> AES Convention, preprint 2825.
- Letowski, T. 1994. Guidelines for conducting listening tests on sound quality. Proc. Noise-Con '94, Ft. Lauderdale, Florida. S. 987-993.
- Maijala, P. & Kaaresoja, T. 1996. Keino Suuntonen. Akustiikan ja äänenkäsittelytekniikan laboratorio, Teknillinen Korkeakoulu.  
<URL:http://www.acoustics.hut.fi/~pantse/projects/keino>
- Maijala, P. 1997. Better binaural recordings using the real human head. In Proceedings of Internoise 1997, Vol. II. S.1135-1138.
- Manninen, P. 1982. Tilastotiedettä yhteiskuntatieteilijöille. Gaudeamus, Helsinki.
- Mathworks. 1996a. Using MATLAB. Mathworks, Inc. December 1996. S. 2-174.
- Mathworks. 1996b. MATLAB Signal Processing Toolbox User's Guide. Mathworks, Inc. December 1996. S. 2-174.
- Minnaar, P. 1996. An investigation of the signal detection- and localisation capabilities of people using binaural sound reproduction systems. A dissertation for the degree of M.Sc. University of Southampton. 112 s.
- Møller, H. 1989. Reproduction of Artificial-Head Recordings Through Loudspeakers. *Journal of Audio Engineering, Society*, 37 (1/2), 1989. S. 30-33.
- Møller, H. 1992. Fundamentals of binaural technology. *Applied Acoustics* 36, 1992. S. 171-218.
- Møller, H. & Hammershøi, D. & Jensen, C.B. & Hildebøll, J.V. 1992a. Transfer characteristics of headphones: Measurements on 40 human subjects, presented at the 92<sup>nd</sup> Convention of the Audio Engineering Society, Vienna, Austria, 1992.
- Møller, H. & Sørensen, M.F. & Hammershøi, D. & Jensen, C.B. 1992b. How well do existing binaural systems work?. In preparation, preliminarily reported in (Hammershøi and Møller, Artificial heads for free...,1992).
- Møller, H. & Hammershøi, D. & Jensen, C.B. & Sørensen, M.F. 1995a. Transfer characteristics of headphones measured on human ears. *Journal of Audio Engineering Society*, Vol. 43, (4). S. 203-217.
- Møller, H. & Sørensen, M.F. & Hammershøi, D. & Jensen, C.B. 1995b. Head-related transfer functions of human subjects. *J. Audio Eng. Soc.* Vol. 45 (5). S. 300-321.
- Møller, H. & Sørensen, M.F. & Hammershøi, D. & Jensen, C.B. 1995c. Binaural technique: Do we need individual recordings. *J. Audio Eng. Soc.*, Vol. 44, N. 6. S. 451-.
- Møller, H. & Clemen, B.J. & Hammershøi, D. & Sørensen, M. 1996. Using a Typical Human Subject for Binaural Recording. AES Preprint N. 4157 (C-10), 100<sup>th</sup> Conv., (1996 May 11-14).

- Møller, H. & Jensen, C.B. & Hammershøi, D. & Sørensen, M. 1997. Evaluation of Artificial Heads in Listening Tests. AES Preprint N. 4404 (A1), 102<sup>th</sup> Convention, (1997 March 22-25).
- Namba, S. 1996. Noise Quality, In Recent Trends in Hearing Research. Festschrift for Seiichiro Namba, Fastl H., Kuwano S., Schick A. (Eds.), Bibliotheks- und Informationssystem der Universität Oldenburg.
- National Instruments. 1990. NB-A2100 High-Resolution Audio Frequency Analog I/O Board for the Macintosh II Family of Computers, User Manual. June 1990 Edition, Part Number 320252-01.
- Pat. U.S. 3 236 646. Apparent sound source translator. Atal, B.S & Schroeder, M.R.
- Prante, H.U. 1996. Predicting Categorical Judgements of Sound. A Contribution using Artificial Neural Networks. In Results of the Seventh Oldenburg Symposium on Psychological Acoustics. Bibliotheks- und Informationssystem der Universität Oldenburg in press.
- Pösselt, C. et al. 1986. Generation of Binaural Signals for Research and Home Entertainment. In Proc. 12<sup>th</sup> Int. Congr. Acoust. Vol. I, B1-6, CND-Toronto.
- Salava, T. 1990. Transaural Stereo and Near-Field Listening. Journal of Audio Engineering Society, Vol. 38, Number 1/2. S. 40-41.
- Schomaker et al., Esprit Project 8579 / MIAMI, 1995,  
<URL:<http://www.cogsci.kun.nl/~miami/taxonomy/node1.html>>
- Schröter, J. The Use of Acoustical Test Fixtures for the Measurement of Hearing-Protector Attenuation. Part I: Review of Previous Work and the Design of an Improved Test Fixture. Journ. Acoust. Soc. Am., Vol. 79. S. 1065-1081.
- Soulodre, G.A. Spaciousness judgments of binaurally reproduced sound fields. ASA 125<sup>th</sup> Meeting Ottawa 1993 May 2aAA10.
- Sunear, 1996. Binaural Recording for Headphone Experiences, Binaural Frequently Asked Questions.  
<URL:<http://www.btown.com/binaural/binfaq.html>>
- Theile, G. 1981. Zur Kompatibilität von Kunstkopfsignalen mit intensitätsstereophonen Signalen bei Lautsprecherwiedergabe: Die Richtungsbild. Rundfunktech. Mitt., Vol. 25. S. 67-73.
- Toivanen, 1978. Teknillinen akustiikka. 4. painos, Otatieto 1976. 518 s.
- Wightman, F.L. & Kistler, D.K. 1992. A model of head-related transfer functions based on principal components analysis and minimum-phase reconstruction. Journal of Acoustical Society of America, Vol. 91, No. 3. S.1637-1647.
- Xiang, N. & Blauert, J. 1991. A Miniature Dummy Head for the Binaural Evaluation of Tenth-Scale Acoustic Models. Journal of Applied Acoustics, Vol. 33. S. 123-140.
- Xiang, N. & Blauert, J. 1993. Binaural Scale Modelling for Auralization and Prediction of Acoustics in Auditoria. Journal of Applied Acoustics, Vol. 38. S. 267-290.
- Zwicker, E. & Fastl, H. 1990. Psychoacoustics, Facts and Models. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York. S. 215-221.

## 8 Kirjallisuusviitteitä

- Asano, F. & Suzuki, Y. & Sone, T. 1990. Role of spectral cues in median plane localisation. *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 88, 1. S. 159-168.
- Batteau, D.W. 1967. The role of pinna in human localization. In *Proc. R. Soc. (London)*, Vol. B168. S. 158-180
- Bauer, B.B. 1961. Stereophonic earphones and binaural loudspeakers. *Journal of Audio Engineering Society* Vol. 9, 2. 148 s.
- Begault, D.R. 1994. 3D sound for virtual reality and multimedia. Cambridge, Massachusetts, Academic Press. 293 s.
- Blauert, J. 1969. Sound localization in the median plane. *Acustica* 22. S. 205-213.
- Blauert, J. & Hartmann, R. 1971. Loss factors and characteristic impedances of the cranial bone of varying degrees of air-filled porosity. *Acustica*, Vol. 24. S. 226-229.
- Blauert, J. 1983. *Spatial Hearing. The psychophysics of human sound localization*. Cambridge, The Massachusetts Institute of Technology, MIT Press. 427 s.
- Blauert, J. & Genuit K. 1993. Sound-Environment Evaluation by Binaural Technology: Some Basic Consideration. *Journ. Acoust. Soc. Japan*, Vol. 14. S. 139-145.
- Blauert, J. & Els, H. Schröter, J. 1980. A Review of the Progress in External Ear Physics Regarding the Objective Performance Evaluation of Personal Ear Protectors. In *Proceedings of Inter-Noise 1980*, New York, USA. S. 643-658.
- Bodden, M. 1993. The importance of binaural hearing for noise validation. In *Contr. To Psych. Acoust.* Ed. A. Schick, 1. Ed., Oldenburg: Bibl.- und Informationssystem Universität Oldenburg.
- Bodden, M. 1993. Modeling Human Sound Source Localization and the Cocktail-Party-Effect. *Acta Acustica* 1, Vol. 1. S. 43-55.
- Bodden, M. & Blauert, J. 1992. Separation of Concurrent Speech Signals: A Cocktail-Party Processor for Speech Enhancement. In *Proceedings of ESCA Workshop on: Speech Processing in Adverse Conditions (Cannes Mandleieu)*. S. 147-150.
- Braune, B. 1971. Mögliche Grössen zur Bewertung von Geräuschen. *Unikeler Conference Paper*.
- Burandt, U. & Pössett, C. & Ambrozus, S. & Knauff, V. 1991. Anthropometric contribution to standardising manikins for artificial-head microphones and to measuring headphones and ear protectors. *Applied Ergonomics*, Vol. 22. S. 373-378.

- Burkhard, M.D. & Sachs, R.M. 1975. Anthropometric manikin for acoustic research. *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 56. S. 214-220.
- Cartarette, E.C. & Friedman, M.P. 1978. *Handbook of perception (Volume IV): Hearing*. Academic Press Inc.
- Casseday, J.H. & Covey, E. 1989. Central auditory pathways in directional hearing. Published in Yost, W.A., Gourevitch, G. *Directional hearing*. New York, Springer Verlag. S. 109-145.
- CCIR Recommendation 562-1, 1978-1982. Subjective assessment of sound quality. S. 215-221.
- Christman, R.J. & Victor, G. 1955. The perception of direction as a function of binaural temporal and amplitude disparity. Rome Air Devel. Centre ARDC, USAF, Tech. Note RADC-TH-55-302.
- Cochran, W.G. & Cox, G.M. 1966. *Experimental designs*. 3<sup>rd</sup> ed. John Wiley & Sons, New York.
- Colburn, H.S. 1977. Theory of binaural interaction based on auditory nerve data. II. Detection of tones in noise. *Journal of Acoustical Society of America*. Vol. 61, No. 2. S. 525-533.
- Cooper, D.H. & Bauck, J.L. 1989. Prospects for Transaural Recording. *Journal of Audio Engineering Society*, Vol. 37, Number 1/2, 1989. S. 3-19.
- Crispien, K. & Petrie, H. 1993. Providing access to GUIs for blind people using a multimedia system based on spatial audio presentation. In 95<sup>th</sup> Audio Engineering Society Convention (Preprint No. 3738). New York.
- Damaske, P. 1971. Head-related two-channel stereophony with loudspeaker reproduction. *Journal of Audio Engineering Society*, Vol. 50, 1971. S. 1109.
- DRA Laboratories. 1996. MLSSA, Maximum-Length Sequence System Analyzer. Reference Manual Version 10.0A. DRA Laboratories, Copyright 1987-96 by Douglas D. Rife. S. 296.
- Durrant, J.D. & Lovrinic, J.H. 1995. *Bases of hearing science*. Williams & Wilkins, third edition.
- Egan, J.P. & Benson, W. 1966. Lateralisation of a weak signal presented with correlated and uncorrelated noise. *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 40. S. 20-26.
- Els, H. & Blauert, J. 1985. Measuring Techniques for Acoustic Models - Upgraded. In *Proceedings of Internoise 1985*, Schriftenr. Bundesanst. Arbeitsschutz, Vol. Ib 39/II. S. 1359-1362.
- Els, H. & Blauert, J. 1986. A Measuring System for Acoustic Scale Models. In 12<sup>th</sup> Int. Congr. Acoust., Proc. of the Vancouver Symp. Acoustics & Theatre Planning for the Performing Arts. S. 65-70.
- Everest, F.A. & Streicher, R. 1992. *The new stereo soundbook*. TAB Books, McGraw-Hill.
- Fisher, H. & Freedman, S.J. 1968. The role of the pinna in auditory localisation. *Journal of Auditory Research*, Vol.8. S. 15-26.
- Fukudome, K. 1980. Equalisation for the dummy-head-headphone system capable of reproducing true directional information. *Journal of Acoustical Society of Japan*, Vol. 1 (1). S. 59-67.
- Gardner, M.B. & Gardner, R.S. 1973. Problem of localisation in the median plane: effect of pinnae cavity occlusion. *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 53, 2. S. 400-408.
- Gardner, B. & Martin, K. 1994. HRTF measurements of a KEMAR dummy head microphone. MIT Media lab perceptual computing, Technical report No. 280. S. 1-7.

- Genuit, K. 1984. A model for the description of outer-ear transmission characteristics. HRTF:ien kehittäminen pään ja ulkokorvan geometrian pohjalta. Doctor of Engineering dissertation, Rheinisch-Westphalian Technical University, Aachen, Germany.
- Genuit, K. 1988. Simulation of the free-field using headphones for investigation of the spatial hearing and speech intelligibility. *Audiologische Akustik*, Vol. 6. S. 203-220.
- Genuit, K. 1990. Ear adequate spectral analysis for noise evaluation. *Journal of Acoustical Society of America Supplement 1*, Vol. 87. S. 99.
- Genuit, K. 1995. Examination of objective evaluation of binaural analysis. *Proc. 15<sup>th</sup> Intern. Congr. Acoust. 1995, Trondheim*. S. 233-236.
- Gierliech, H.W. & Genuit, K. 1989. Processing artificial head recordings. *Journal of Audio Engineering Society*, Vol. 37 (1/2). S. 34-39.
- Gierliech, H.W. 1992. The application of binaural technology. *Applied Acoustics*, Vol. 36. S. 219-243.
- Glasgal, R. The Ear Pinna and Realism in Music Reproduction.  
<URL: <http://www.ambiophonics.org/pinna.htm>>
- Gredmaier, L. 1996. Making sound quality audible. *Proceedings of Internoise 1996, Liverpool*. S. 2085-2088.
- Griesinger, D. 1989. Equalization and Spatial Equalization of Dummy-Head Recordings for Loudspeaker Reproduction. *Journal of Audio Engineering Society*, Vol. 37 (1/2). S. 20-29.
- Gröhn, M. & Takala, T. 1995. MagicMikes - method for spatial sonification. In *Proc. SPIE'95*.
- Haftner, E.R. & Jeffress, L.A. 1968. Two-image lateralisation of tones and clicks. *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 44. S. 563-569.
- Hall, J.W. & Taylor, R.S. & Fernandes, M.A. 1983. Monaural and binaural frequency resolution, measured using band limited noise and notched noise masking. *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 73. S. 894-898.
- Hammershøi, D. & Møller, H. 1991. Free-field sound transmission to the external ear; a model and some measurements. In *Fortschritte der Akustik, DAGA 1991, Bochum*. S. 473-476
- Hammershøi, D. & Møller, H. 1992a. Artificial heads for free field recording; how well do they simulate real heads? *Proceedings of 14<sup>th</sup> International Congress of Acoustics, Beijing* 3 H6-7.
- Hammershøi, D. & Møller, H. & Sørensen, M.F. & Larsen K.A. 1992b. Head-related transfer functions: Measurements on 40 human subjects. Presented at the 92<sup>nd</sup> Convention of the Audio Engineering Society, Vienna, Austria.
- Hammershøi, D. 1995. Binaural technique - a method of true 3D sound reproduction. Ph. D. dissertation, Aalborg Univ., Denmark. Aalborg University Press, ISBN 87-7307-516-7.
- Hammershøi, D. & Møller, H. 1996. Sound transmission to and within the human ear canal. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 100, No.1, July 1996. S.408-427.
- Hammershøi, D. 1996. Fundamental Aspects of the Binaural Recording and Synthesis Techniques. AES Preprint Number: 4155<sup>th</sup> (C-8), Convention: 100, (1996 May 11-14).

- Hammershøi, D. & Sandvad, J. Binaural auralization. Simulating free field conditions by headphones. 96<sup>th</sup> Audio Eng. Soc. Conv. , Preprint 3863.
- Han, H.L. 1994. Measuring a dummy head in search of pinna cues. *Journal of Audio Engineering Society*, Vol. 42, 1/2. S. 15-37.
- Hebrank, J. & Wright, D. 1974. Spectral cues used in the localization of sound sources on the median plane. *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 56, 6. S. 1829-1834.
- Hellstrom, P.-A. & Axelsson, A. 1993. Miniature microphone probe tube measurements in the external auditory canal. *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 93, 2. S. 907-919.
- Henning, G.B. 1980. Some observations on the lateralisation of complex waveforms. *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 68. S. 446-454.
- Hinton, P.R. 1995. *Statistics explained: A guide for social science students*. Routledge-London and New York.
- Hirsh, I.J. 1971. Masking of speech and auditory localisation. *Audiology*, Vol. 10. S. 110-114.
- Holman, T. 1991. New factors in sound for cinema and television. *Journal of Audio Engineering Society*, Vol. 39, No. 7/8. S. 529-539.
- Howard, I.P. & Templeton, W.B. 1966. *Human spatial orientation*. John Wiley & Sons, London.
- Hudde, H. & Schröter, J. 1980. The equalization of artificial heads without exact replication of the eardrum impedance. *Acustica*, Vol. 44, 1980. S. 302-307.
- Huopaniemi, J. & Karjalainen, M., Välimäki, V., Huotilainen, T. 1994. Virtual instruments in virtual rooms - a real-time binaural room simulation environment for physical models of musical instruments. In *proceedings of ICMC'94, Århus, Denmark*. S. 455-462.
- Ifeachor, E.C. & Jervis, B.W 1993. *Digital Signal Processing - A Practical Approach*. Addison-Wesley Publishing Company. 760 s.
- Jauhiainen, T. 1995. *Kuulo ja viestintä*. Yliopistopaino, Helsinki, ISBN 951-570-259-3.
- Jot, J.-M. & Larcher, V. & Warusfel, O. 1995. Digital signal processing issues in the context of binaural and transaural stereophony. In *98<sup>th</sup> Audio Engineering Society Convention (Preprint No. 3980)*. Paris.
- Jullien, J.-P. & Kahle, E. & Marin, M. & Warusfel, O. 1993. Spatializer: A perceptual approach. In *94<sup>th</sup> Audio Engineering Society Convention (Preprint No. 3465)*. Berlin.
- Karjalainen, M. 1997. *Kommunikaatioakustiikka*. Kurssin S-89.120 opetusmoniste. Teknillinen Korkeakoulu, Espoo.
- Karjalainen, M. 1990. DSP Software Integration by Object-Oriented Programming: A Case Study of QuickSig. *IEEE ASSP Magazine*.
- Karjalainen, M. 1992. Object-oriented programming of DSP processors: A case study of QuickC30. In *Proc. 1992 IEEE Int. Conf. Acoust., Speech and Signal Processing (ICASSP'92)*, San Francisco, CA, Vol. 5. S. 601-604.
- Keene, S.E. *Object-oriented programming in Common Lisp - A programmer's guide to CLOS*. Reading, Massachusetts, Addison-Wesley. 266 s.

- Kendall, G.S & Martens, W.L. 1984. Simulating the cues of spatial hearing in natural environments. In proceedings of ICMC'84, Paris. S. 111-125.
- Kistler, D.J. & Wightman, W.L. 1992. A model of head-related transfer functions based on principal components analysis and minimum-phase reconstruction. *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 91, 3. S. 1637-1647.
- Kleiner, M. 1978. Problems in the design and use of dummy heads. *Acustica* Vol. 41. S. 183-193.
- Kleiner, M. & Dalenbäck, B.-I. & Svensson, P. 1993. Auralization - An overview. *Journal of Audio Engineering Society*, Vol. 41, 11. S. 861-875.
- Klemm, O. 1969. Localisation of sensory impressions in connection with disparate additional stimuli. *Psychological Studies*, Vol. 5. S. 73-162.
- Killion, M. C. 1979. Equalisation filter for eardrum pressure recording, using a KEMAR manikin. *Journal of Audio Engineering Society*, Vol. 27 (1/2). S. 13-16.
- Kinnear, P.R. 1992. SPSS/PC+ Made Simple. Lawrence Erlbaum Associates Publishers.
- Krauss, T.P. & Shure, L. & Little, J.N. 1993. Matlab Signal Processing Toolbox - User's Guide. The Mathworks Inc. 347 s.
- Kuhn, G.F. 1979. The pressure transformation from a diffuse sound field to the external ear and to the body and head surface. *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 65, 4. S. 991-1000.
- Köring, J. & Schmitz, A. 1993. Simplifying cancellation of cross-talk for playback of head-related recordings in a two-speaker system. *Acustica*, Vol. 79. S. 221-232.
- Lehmann, E.L. 1975. Nonparametrics, Statistical Methods Based on Ranks. McGraw-Hill.
- Lehnert, H. & Blauert, J. 1989. A Concept for Binaural Room Simulation. In Proc. IEEE-ASSP Workshop on Application of Signal Processing to Audio & Acoustics, USA-New Paltz NY.
- Jekosch, U. & Blauert, J. 1996. A Semiotic Approach toward Product Sound Quality. In *Internoise 1996*, Liverpool, Book 5. S. 2283-2288.
- Lehnert, H. & Blauert, J. 1992. Principles of Binaural Room Simulation. *Journ. Appl. Acoust.*, Vol. 36. S. 259-291.
- Letowski, T. 1989. Sound quality assessment: Concepts and criteria. Proc. 87<sup>th</sup> AES Convention, preprint 2825.
- Letowski, T. 1994. Guidelines for conducting listening tests on sound quality. Proc. Noise-Con '94, Ft. Lauderdale, Florida. S. 987-993.
- Loomis, J.M. & Herbert, C., Cicinelli, J.G. 1990. Active localisation of virtual sources. *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 88. S. 1757-1764.
- Maijala, P. 1997. Better binaural recordings using the real human head. In *Proceedings of Internoise 1997*, Vol. II. S.1135-1138.
- Manninen, P. 1982. Tilastotiedettä yhteiskuntatieteilijöille. Gaudeamus, Helsinki.
- Mathworks. 1996a. Using MATLAB. Mathworks, Inc. December 1996. S. 2-174.

- Mathworks. 1996b. MATLAB Signal Processing Toolbox User's Guide. Mathworks, Inc. December 1996. S. 2-174.
- Mehrgardt, S. & Mellert, V. 1977. Transformation characteristics of the external human ear. *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 61, 6. S. 1567-1576.
- Mellert, V. 1972. Construction of a dummy head after new measurements of the threshold of hearing. *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 51. S. 1359-1361.
- Middlebrooks, J.C. & Makous, J.C. & Green, D.M. 1989. Directional sensitivity of sound-pressure levels in the human ear canal. *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 86, 1. S. 89-108.
- Minnaar, P. 1996. An investigation of the signal detection- and localisation capabilities of people using binaural sound reproduction systems. A dissertation for the degree of M.Sc. University of Southampton. 112 s.
- Mitra, S.K. & Kaiser, J.F. (editors) 1993. Handbook for digital signal processing. New York, John Wiley & Sons. 1268 s.
- Montgomery, D.C. 1984. Design and Analysis of Experiments. New York. Wiley.
- Moore, B.C.J. 1989. Introduction to the psychology of hearing. Academic Press Limited, London, 3<sup>rd</sup> edition.
- Morse, P.M. & Ingard, K.U. 1986. Theoretical acoustics. Princeton, New Jersey, Princeton University Press. 927 s.
- Musican, A.D. & Butler, R.A. 1985. Influence of monaural spectral cues on binaural localisation. *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 77 (1). S. 202-208.
- Møller, H. 1989. Reproduction of Artificial-Head Recordings Through Loudspeakers. *Journal of Audio Engineering Society*, 37 (1/2), 1989. S. 30-33.
- Møller, H. 1992. Fundamentals of binaural technology. *Applied Acoustics*, Vol. 36. S. 171-218.
- Møller, H. & Hammershøi, D. & Jensen, C.B. & Hundedbøll, J.V. 1992a. Transfer characteristics of headphones: Measurements on 40 human subjects, presented at the 92<sup>nd</sup> Convention of the Audio Engineering Society, Vienna, Austria, 1992.
- Møller, H. & Sørensen, M.F. & Hammershøi, D. & Jensen, C.B. 1992b. How well do existing binaural systems work?. In preparation, preliminarily reported in (Hammershøi and Møller, Artificial heads for free...,1992).
- Møller, H. & Hammershøi, D. & Jensen, C.B. & Sørensen, M.F. 1995a. Transfer characteristics of headphones measured on human ears. *Journal of Audio Engineering Society*, Vol. 43, (4). S. 203-217.
- Møller, H. & Sørensen, M.F. & Hammershøi, D. & Jensen, C.B. 1995b. Head-related transfer functions of human subjects. *J. Audio Eng. Soc.* Vol. 45 (5). S. 300-321.
- Møller, H. & Sørensen, M.F. & Hammershøi, D. & Jensen, C.B. 1995c. Binaural technique: Do we need individual recordings. *J. Audio Eng. Soc.*, Vol. 44, N. 6. S. 451-.
- Møller, H. & Hammershøi, D. & Jensen, C.B. & Sørensen, M.F. 1995d. Design criteria for headphones. *Journal of Audio Engineering Society*, Vol. 43. S. 208-232.

- Møller, H. & Clemen, B.J. & Hammershøi, D. & Sørensen, M. 1996. Using a Typical Human Subject for Binaural Recording. AES Preprint N. 4157 (C-10), 100<sup>th</sup> Conv., (1996 May 11-14).
- Møller, H. & Jensen, C.B. & Hammershøi, D. & Sørensen, M. 1997. Evaluation of Artificial Heads in Listening Tests. AES Preprint N. 4404 (A1), 102<sup>th</sup> Convention, (1997 March 22-25).
- Namba, S. 1996. Noise Quality, In Recent Trends in Hearing Research. Festschrift for Seiichiro Namba, Fastl H., Kuwano S., Schick A. (Eds.), Bibliotheks- und Informationssystem der Universität Oldenburg.
- National Instruments. 1990. NB-A2100 High-Resolution Audio Frequency Analog I/O Board for the Macintosh II Family of Computers, User Manual. June 1990 Edition, Part Number 320252-01.
- Norušis, M.J. 1990. SPSS/PC+ Statistics 4.0 for the IBM PC/XT/AT and PS/2. SPSS Inc.
- Pahkinen, E. & Lehtonen, R.. 1989. Otanta-asetelmat ja tilastollinen analyysi. Helsinki. Gaudeamus.
- Plenge, G. 1974. On the difference between localisation and lateralisation. Journal of Acoustical Society of America, Vol. 56. S. 944-951.
- Pralong, D. & Carlile, S. 1994. Measuring the human head-related transfer functions: A novel method for the construction and calibration of a miniature "in-ear" recording system. Journal of Acoustical Society of America, Vol. 95, 6. S. 3435-3444.
- Prante, H.U. 1996. Predicting Categorical Judgements of Sound. A Contribution using Artificial Neural Networks. In Results of the Seventh Oldenburg Symposium on Psychological Acoustics. Bibliotheks- und Informationssystem der Universität Oldenburg in press.
- Pösselt, C. et al. 1986. Generation of Binaural Signals for Research and Home Entertainment. In Proc. 12<sup>th</sup> Int. Congr. Acoust. Vol. I, B1-6, CND-Toronto.
- Rayleigh, 1907. On our perception of sound direction. Ed. Strutt, J.W. Philosophical magazine, Vol. 13. S. 214-232.
- Rife, D.D. & Vanderkooy, J. 1989. Transfer-function measurement with maximum-length sequences. Journal of Audio Engineering Society, Vol. 37, 6. S. 419-444.
- Rindel, J.H. & Lyngé, C. & Naylor, G. & Rishøj, K. 1994. The use of a digital audio mainframe for room acoustical auralization. In 96<sup>th</sup> Audio Engineering Society Convention, Preprint No. 3860, Amsterdam.
- Rubak, P. 1991. Headphone signal processing system for out-of the-head localisation. Audio Engineering Society, Paris, Pre-print 3063 (K-3).
- Rusotti, J.S. & Santoro, T.P. & Haskell, G.B. 1988. Proposed technique for earphone calibration. Journal of Audio Engineering Society. Vol. 36 (9). S. 643-650.
- Salava, T. 1990. Transaural Stereo and Near-Field Listening. Journal of Audio Engineering Society, Vol. 38, Number 1/2. S. 40-41.
- Sandvad, J. & Hammershøi, D. 1994. Binaural auralization. Comparison of FIR and IIR filter representation of HIRs. In 96<sup>th</sup> Audio Engineering Society Convention, Preprint No. 3862, Amsterdam.
- Schomaker et al., Esprit Project 8579 / MIAMI, 1995,  
<URL:http://www.cogsci.kun.nl/~miami/taxonomy/node1.html>

- Schröter, J. The Use of Acoustical Test Fixures for the Measurement of Hearing-Protector Attenuation. Part I: Review of Previous Work and the Design of an Improved Test Fixture. *Journ. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 79. S. 1065-1081.
- Schröter, J. & Els, H. 1982. On basic research to an improved artificial head for the measurement of hearing protectors. *Acustica*, Vol. 50. S. 250-260.
- Shaw, E.A.G. 1974. The external ear. In *Handbook of Sensory Physiology*. Editors Keidel, W.D & Neffs, W.D. Vol. V/1, Springer-Verlag, Berlin. 490 s.
- Shaw, E.A.G. 1974. Transformation of sound pressure level from the free field to the eardrum in the horizontal plane. *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 56, 6. S. 1848-1861.
- Shaw, E.A.G. & Vaillancourt, M.M. 1985. Transformation of sound-pressure level from the free field to the eardrum presented in numerical form. *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 78. S. 1120-1122.
- Shaxby, J.H & Gage, F.H. 1932. Studies in the localisation of sound. Medical Research Council Specification Report, Serial Number 166. S. 1-32.
- Shimada, S. & Hayashi S. 1995. Stereophonic sound image localisation system using inner-earphones. *Acustica*, Vol. 81. S. 264-271.
- Siegel, J.H. 1994. Ear canal standing waves and high-frequency sound calibration using otoacoustic emission probes. *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 95 (5). S. 2589-2597.
- Siegel, S. & Castellan, H.J.Jr. 1988. *Nonparametric Statistics for the Behavioral Sciences*. 2<sup>nd</sup> Edition McGraw-Hill.
- Soulodre, G.A. Spaciousness judgments of binaurally reproduced sound fields. ASA 125<sup>th</sup> Meeting Ottawa 1993 May 2aAA10.
- Spikofski, G. 1988. The diffuse field probe transfer function of studio quality headphones. EBU Review - Technical, No. 229. S. 111-126.
- Steele, G.L. 1990. *Common Lisp: The Language*. 2<sup>nd</sup> edition, Burlington, Massach. Digital Press. 1029 s.
- Stinson, M.R. & Lawton, B.W. 1989. Specification of the geometry of the human ear canal for the prediction of sound-pressure level distribution. *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 85 (6). S. 2492-2503.
- Sunear, 1996. Binaural Recording for Headphone Experiences, Binaural Frequently Asked Questions. <URL: <http://www.btown.com/binaural/binfaq.html>>
- Theile, G. 1981. Zur Kompatibilität von Kunstkopfsignalen mit intensitätsstereophonen Signalen bei Lautsprecherwiedergabe: Die Richtungsbild. *Rundfunktech. Mitt.*, Vol. 25. S. 67-73.
- Theile, G. 1986. On the standardisation of the frequency response of high-quality studio headphones. *Journal of Audio Engineering Society*, Vol. 34 (12). S. 956-969.
- Thurlow, W.R. & Mangels, J.W. & Runge, P.S. 1967. Head movements during sound localization. *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 42, 2. S. 489-493.
- Thurlow, W.R. & Runge, P.S. 1967. Effect of induced head movements on the localization of direction of sounds. *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 42, 2. S. 480-488.

- Tonndorf, J. 1988. The external ear. In *Physiology of the ear*. Editors Jahn, A:F. & Santos-Sacchi, J. Raven Press, New York. S. 29-39.
- Townsend, H.T & Goldstein, D.P. 1972. Suprathreshold binaural unmasking. *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 56. S. 621-624.
- Weinrich, S.G. 1994. Binaural fitting of hearing aids with optimal reproduction of auditory space. In *Proceedings of NAM'94*, Aarhus, Denmark. S. 181-186.
- Wenzel, E.M. & Wightman, F.L. & Kistler, D.K. & Foster, S.H. 1988. Acoustic origins of individual differences in sound localisation behaviour. *Journal of Acoustical Society of America Supplement 79*, Vol. 84.
- Wenzel, E. & Foster, S. 1993. Perceptual consequences of interpolating head-related transfer functions during spatial synthesis. *Proc. 1993 Workshop on Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics*, New Paltz, New York.
- Wenzel, E.M. & Arruda, M. & Kistler, D.K. & Wightman, F.L. 1993. Localisation using non-individualised head-related transfer functions. *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 94. S. 111-123.
- Wenzel, E.M. & Foster, S.H. 1993. Perceptual consequences of interpolating head-related transfer functions during spatial synthesis. *Proceedings of the IEEE workshop applications signal processing, Audio acoustics*, (IEEE, New York), INSPEC B9503-6140-136.
- Wightman, F.L. & Kistler, D.K. 1989a. Headphone simulation of free-field listening I: Stimulus synthesis. *Journal of Acoustical Society of America*, Vol 85. S. 858-867.
- Wightman, F.L. & Kistler, D.K. 1989b. Headphone simulation of free-field listening II: Psychophysical validation. *Journal of Acoustical Society of America*, Vol 85. S. 868-878.
- Wightman, F.L. & Kistler, D.K. 1992. A model of head-related transfer functions based on principal components analysis and minimum-phase reconstruction. *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 91, No. 3. S.1637-1647.
- Winer, B.J. 1971. *Statistical Principles in Experimental Design*. 2nd Edition, New York. Wiley.
- Wright, D. & Hebrank, J.G. & Wilson, B. 1974. Pinna reflections as cues for localization. *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 56, 3. S. 957-962.
- Xiang, N. & Blauert, J. 1991. A Miniature Dummy Head for the Binaural Evaluation of Tenth-Scale Acoustic Models. *Journal of Applied Acoustics*, Vol. 33. S. 123-140.
- Xiang, N. & Blauert, J. 1993. Binaural Scale Modelling for Auralization and Prediction of Acoustics in Auditoria. *Journal of Applied Acoustics*, Vol. 38. S. 267-290.
- Zhou, B. & Green, D.M. & Middlebrooks, J.C. 1992. Characterization of external ear impulse responses using Golay codes. *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 92, 2. S. 1169-1171.
- Zwicker, E. & Fastl, H. 1990. *Psychoacoustics, Facts and Models*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York. S. 215-221.

## 9 Liitteet

LIITE A. KUVASARJA KALIBROINNISTA	76
LIITE B. MITTAUSVÄLINELUETTELO	78
LIITE C. KUUNTELUKOKEEN VASTAUSLOMAKE	79
LIITE D. MIKROFONIKAPSELIN OMINAISUUKSIA	81
LIITE E. MITTAUSPÖYTÄKIRJA, KUULOKKEET	82
LIITE F. MITTAUSPÖYTÄKIRJA, KUULOKEVAHVISTIN	83
LIITE G. HIIRIEN JA NÄPPÄIMISTÖN RINNANKYTKENTÄTAULU	86
LIITE H. KUUNTELUKOKEEN TULOKSIA	88
LIITE I. BINAURAALISEN TEKNIIKAN YRITYKSIÄ	89
LIITE J. EKVALISOINTI-OHJELMAN SUODATTIMET	90

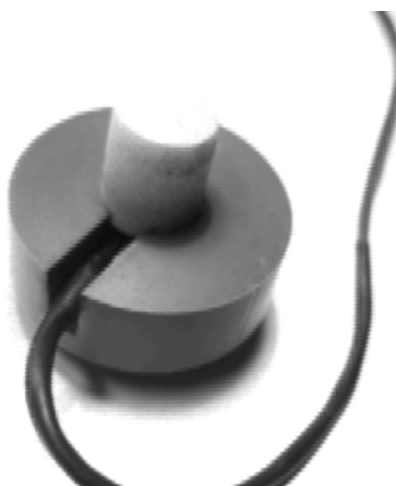
## Liite A. Kuvasarja kalibroinnista



**Kuva 9.1** Mikrofonialustaan on lovettu ura mikrofonin sankaa varten.



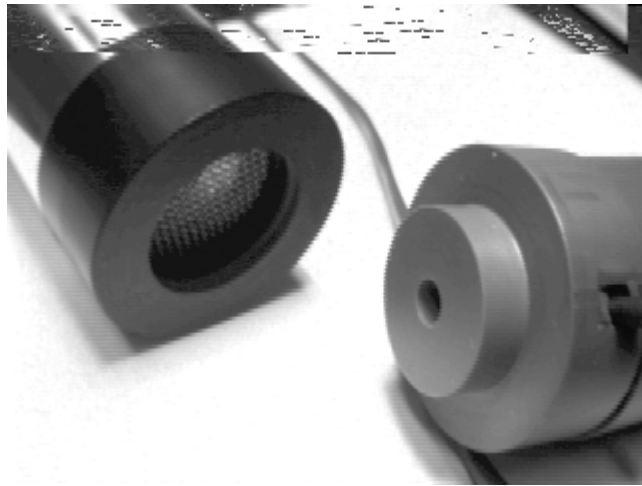
**Kuva 9.2** Mikrofoni asetettuna alustaan.



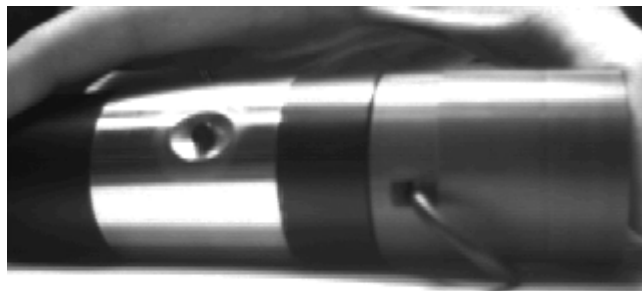
**Kuva 9.3** E-A-R korvatulppa mikrofonin päällä.



**Kuva 9.4** Sovittimen työntökappale paikoilleen asetettuna.



**Kuva 9.5** Sovitin on suunniteltu Brüel&Kjær:n kalibraattoriin tyyppiä 4230.



**Kuva 9.6** Kalibroitaessa sovitinta puristetaan kevyesti kalibraattoria vasten.

## Liite B. Mittausvälineluettelo

**Taulukko 9.1** *Evaluoinneissa käytetyt mittausvälineet ja ohjelmistot*

---

DAT-nauhuri	Tascam DA-P1
Kalibraattori	Brüel&Kjær 4230
Keinokorva	Brüel&Kjær Artificial head 4153
Keinopää	Cortex Manikin MK2, keinopään korvissa mikrofonit Brüel&Kjær 4190
Kuulokevahvistin	Behringer Powerplay HA-4000
Kuulokkeet	Sennheiser HD 580 Precision
LCR-mittari	MIC-4070D
Mikrofoni	Brüel&Kjær 4133 + joutsenkaula UA0196
Mikrofonivahvistin	Brüel&Kjær measuring amplifier 2636
Piirturi	Brüel&Kjær level recorder 2307
Päätevahvistin	Yamaha MX-70
Referenssiäänilähde	Genelec 1030A
Takometri	Optinen anturi Monark ROS-5 Etuvahvistin Monark SPS-5
Yleismittari	Fluke 45 ja Protek 506
Systemianalyysaattorit	(impulssivasteet) QuickSig (Karjalainen, 1990) (Karjalainen, 1992) MLSSA (DRA Laboratories, 1996)
Signaalinkäsittely	Matlab (versio 5.1.0.421) Signal Processing Toolbox versio 4.0.1
Tilastollinen käsittely	SPSS 7.5 for Windows SPSS Base 7.5 SPSS Professional Statistics 7.5 SPSS Advanced Statistics 7.5

---

## Liite C. Kuuntelukokeen vastauslomake

Kuuntelukoe 11.08.97

ääninäytteessä "auto" (Ford Taunus 1.6 farmari -79) ajaa äänittävän pään ohitse joko

OV oikealta vasemmalle ⇐

VO vasemmalta oikealle ⇒







ET edestä vasemmalta puolelta taakse ↓

TE takaa vasemmalta puolelta eteen ↑

Kuultuasi näytteen ympyröi/ruksaa seuraavista vaihtoehdoista se, joka on lähinnä kuulemaasi. Joka neljännen näytteen jälkeen tulee äänimerkki. Äänimerkin jälkeinen näyte on vahvennetulla fontilla. Koe kestää noin 7 ½ minuuttia.

 - äänimerkki

Aluksi äänimerkki ja kolme orientoivaa näytettä seuraavassa järjestyksessä:

	⇐OV	⇒VO	↓ET	↑TE
1. 	⇐OV	⇒VO	↓ET	↑TE
2.	⇐OV	⇒VO	↓ET	↑TE
3.	⇐OV	⇒VO	↓ET	↑TE
4.	⇐OV	⇒VO	↓ET	↑TE
5. 	⇐OV	⇒VO	↓ET	↑TE
6.	⇐OV	⇒VO	↓ET	↑TE
7.	⇐OV	⇒VO	↓ET	↑TE
8.	⇐OV	⇒VO	↓ET	↑TE
9. 	⇐OV	⇒VO	↓ET	↑TE
10.	⇐OV	⇒VO	↓ET	↑TE
11.	⇐OV	⇒VO	↓ET	↑TE
12.	⇐OV	⇒VO	↓ET	↑TE
13. 	⇐OV	⇒VO	↓ET	↑TE
14.	⇐OV	⇒VO	↓ET	↑TE
15.	⇐OV	⇒VO	↓ET	↑TE
16.	⇐OV	⇒VO	↓ET	↑TE
17. 	⇐OV	⇒VO	↓ET	↑TE
18.	⇐OV	⇒VO	↓ET	↑TE

19.	⇔OV	⇒VO	↓ET	↑TE
20.	⇔OV	⇒VO	↓ET	↑TE
21.🔔	⇔OV	⇒VO	↓ET	↑TE
22.	⇔OV	⇒VO	↓ET	↑TE
23.	⇔OV	⇒VO	↓ET	↑TE
24.	⇔OV	⇒VO	↓ET	↑TE
25.🔔	⇔OV	⇒VO	↓ET	↑TE
26.	⇔OV	⇒VO	↓ET	↑TE
27.	⇔OV	⇒VO	↓ET	↑TE
28.	⇔OV	⇒VO	↓ET	↑TE
29.🔔	⇔OV	⇒VO	↓ET	↑TE
30.	⇔OV	⇒VO	↓ET	↑TE
31.	⇔OV	⇒VO	↓ET	↑TE
32.	⇔OV	⇒VO	↓ET	↑TE
33.🔔	⇔OV	⇒VO	↓ET	↑TE
34.	⇔OV	⇒VO	↓ET	↑TE
35.	⇔OV	⇒VO	↓ET	↑TE
36.	⇔OV	⇒VO	↓ET	↑TE
37.🔔	⇔OV	⇒VO	↓ET	↑TE
38.	⇔OV	⇒VO	↓ET	↑TE
39.	⇔OV	⇒VO	↓ET	↑TE
40.	⇔OV	⇒VO	↓ET	↑TE
41.🔔	⇔OV	⇒VO	↓ET	↑TE
42.	⇔OV	⇒VO	↓ET	↑TE
43.	⇔OV	⇒VO	↓ET	↑TE
44.	⇔OV	⇒VO	↓ET	↑TE
45.🔔	⇔OV	⇒VO	↓ET	↑TE
46.	⇔OV	⇒VO	↓ET	↑TE
47.	⇔OV	⇒VO	↓ET	↑TE
48.	⇔OV	⇒VO	↓ET	↑TE



Kiitämme vaivannäöstäsi!!

## Liite D. Mikrofonikapselin ominaisuuksia

<b>Rakenne</b>	kondensaattoripainemikrofoni, elektreettirakenne
<b>Taajuusvaste</b>	20-20000Hz $\pm$ 3 dB
<b>Herkkyyys</b> (vapaa kenttä, ei kuormaa)	
1000 Hz $U_B = 5$ V	10mV/Pa $\pm$ 2.5 dB=40dB ref. 1V/Pa $\pm$ 2,5dB
1000 Hz $U_B = 0.9$ V	10mV/Pa -6 dB
<b>Sähköinen impedanssi</b> (1000Hz)	n. 1 k
<b>Pienin päättövastus</b>	4.7 k
<b>Kohina</b>	
Ekvivalentti äänipainetaso (tehollinen A-painotettu arvo)	27 dB
(CCIR 468-3, absoluuttinen arvo)	38 dB
<b>Käyttöjännite</b>	+0.9 - 15 V
<b>Virrankulutus</b>	n. 250uA
<b>Suurin sallittu äänipaine</b>	130 dB (K=1%)
<b>Varastointilämpötila</b>	-20 C - +70 C
<b>Käyttölämpötila</b>	-10 C - +50 C
<b>Ilmastollinen kestävyys: varastointi</b>	+40 C ja 90 % suhteellinen kos- teus (SNP 51)

### Liite E. Mittauspöytäkirja, kuulokkeet

Nro	Vasen ( $\Omega$ )	Oikea ( $\Omega$ )	Vasen (mH)	Oikea (mH)	$\Delta R$	$\Delta L$
1	310	308	4,5	4,9	2	0,4
2	318	318	5,2	4,8	0	0,4
3	308	318	4,7	5,6	10	0,9
4	306	310	5,2	4,5	4	0,7
5	318	318	4,4	5,4	0	1
6	308	306	4,5	5,2	2	0,7
7	322	320	5,2	5,6	2	0,4
8	320	320	5,7	4,8	0	0,9
9	310	320	4,9	5,4	10	0,5
10	308	320	4,9	5,8	12	0,9
11	320	308	5,6	4,9	12	0,7
12	316	318	4,2	4,4	2	0,2
13	314	314	4,2	4,4	0	0,2
14	312	312	4	3,9	0	0,1
15	292	293	4,3	4,4	1	0,1
16	312	312	4,4	4,1	0	0,3
Keskiarvo	312,1	313,4	4,7	4,9		
Keskihajonta	7,4	7,3	0,5	0,6		
Suurin arvo	322	320	5,7	5,8		
Pienin arvo	292	293	4	3,9		

## Liite F. Mittauspöytäkirja, kuulokevahvistin

Sennheiser HD 580

kuulokespeksien määrittäminen 13.02.97

BEHRINGER POWERPLAY HA 4000 testit:

speksien määrittäminen 13.02.97

mittausvälineet:

Fluke 45 multimeter

Philips PM3218 scope

Tektronix TG 5010 genis

HP 3561A analysaattori

1.Sinisignaali -> Main in L

Ilman kuormaa.

Mikäli main level on max.

vahvistinaste säröytyy kun Vin > 1.35 V

Mikäli main level on "3"

vahvistinaste säröytyy kun Vin > 8.8 V

Max Vout =~ 20V

Vin = 0.100 V RMS

Vout arvot myös RMS

main level "6"channel level "1" -> Vout=0.2196 V

main level "6"channel level "2" -> Vout=1.5282 V

main level "6"channel level "3" -> Vout=3.379 V

main level "6"channel level "4" -> Vout=6.727 V

main level "6"channel level "5" -> Vout=15.758 V

main level "6"channel level "5.5" -> Vout=19.784V

main level "3"channel level "1" -> Vout=0.02538V

main level "3"channel level "2" -> Vout=0.2329 V

main level "3"channel level "3" -> Vout=0.5167 V

main level "3"channel level "4" -> Vout=1.0386 V

main level "3"channel level "5" -> Vout=2.4185 V

main level "3"channel level "6" -> Vout=3.295 V

2.Sama asetelma,

main level "6", channel level "3" (kaikissa kanavissa)

säädetään Vin = 0.02955 V siten että Vout1=1.00 V

Vout1=1.0011 V

Vout2=0.9875 V

Vout3=0.9942 V

Vout4=0.8794 V

Stabiilius muuten hyvä (piti samat jännitteet tunnin ajan)

## 3.Kohina:

-ei signaalia sisään.

main level "6", channel level "3" Vout=0.25mV

main level "3", channel level "6" Vout=1.30mV

main level "6", channel level "6" Vout=2.23mV

## 4.THHD

Kuulokkeet pystyvät speksien mukaan käsittelemään

200mW eli 300 ohmin nimellisimpedanssilla noin

7.75 V.

Syötetään 1kHz sini 2.45 V eli n.20mW kuulokkeisiin ja tarkkaillaan jännitteitä sekä THD:tä. Korvatuntumalta ääni ON voimakas >100dB.

Testaan myöhemmin keinopäällä tarkemman arvon. Äänitasomittarilla mitattuna mikrofoni kuulokkeessa kiinni A-painotus päällä 115 dB.

Signaalikohinasuhteen ja THD:n mukaan optimoidut säädöt

Main level 5 ja channel level 2

(Vin(amp) 257mV)

Mitataan kanavasta 1 left

Avg = 20, Hanning

Kuulokkeita	THD	jännite
1	-82.77 dB	2.4388 V
2	-76.05 dB	2.4355 V
3	-71.22 dB	2.4323 V
4	-68.15 dB	2.4290 V
5	-66.24 dB	2.4274 V
6	-64.88 dB	2.4240 V

/\* ensimmäiset kuusi kanavassa 1, tällöin niiden impedanssi on 50 ohm (49.41 tässä tapauksessa vahvistimen lähtöimpedanssi mukaanlukien)

-> lisätään kanavaan 2 \*/

7	-64.92 dB	2.4237 V
8	-64.98 dB	2.4236 V
9	-64.80 dB	2.4237 V

/\* lisätään kanavaan 3 \*/

10	-64.85 dB	2.4236 V
11	-64.84 dB	2.4234 V
12	-64.90 dB	2.4234 V

/\* lisätään kanavaan 4 \*/

13	-64.86 dB	2.4234 V
14	-64.79 dB	2.4234 V
15	-65.00 dB	2.4233 V

Tässä vaiheessa 1kHz on +7dBV ja ensimmäinen harmoninen -64.78 dBV ja toinen harmoninen -60.06 dBV.

15 kpl kuulokkeita kiinni:

Pikainen katsaus eri taajuuksiin. Mukaan laskentaan otetaan 10 ensimmäistä komponenttia eli mittauskaista  $\geq 10 \cdot f_{fund}$

f (Hz)	THD (-dB)				
31	71.79				
63	73.15				
125	77.25				
250	76.14				
500	71.01				
1k	65.02				
2k	59.03				
4k	53.62				
8k	47.74				
16k	42.80	/*	mittauslaitteen	rajoituksista	johtuen vain 5
komponenttia*/					

UUSI KIERROS Main 5 ja channel 2 , testi vain yhdelle kanavalle.

Avg = 20, Hanning

Kuulokkeita	THD		jännite
0		-80.60 dB	2.4487 V
1		-80.41 dB	2.4454 V
2		-77.98 dB	2.4424 V
3		-74.47 dB	2.4394 V
4		-70.16 dB	2.4365 V
5		-68.03 dB	2.4274 V
6		-66.44 dB	2.4260 V
7		-65.05 dB	2.4249 V
8		-63.95 dB	2.4238 V
9		-63.14 dB	2.4226 V
10		-62.01 dB	2.4214 V
11		-61.31 dB	2.4202 V

Päätelmiä:

Kanavat ovat riippumattomia toisistaan kuormituksen suhteen.

Lisäämällä jokaiseen kanavaan neljä kuuloketta saadaan harm.

säröksi 8-(-68) dB eli varsin vähän. Kuudella luurilla

THD olisi parempi kuin  $1/3500 = 0.0003$

MAIN SECTION -> 5, mikäli linjatasoinen syöttö. Muulloin -> 6.

Channel level määrää lopullisen tason.

VASTEMITTAUKSIA:

QuickSig

Main 34 naksua, level 10 naksua

## Liite G. Hiirien ja näppäimistön rinnankytkentätaulu

Näppäimistön näppäin	Hiiren numero	Hiiren näppäin
Home	0	keskimmäinen
Help	0	vasen
PageUp	0	oikea
End	1	keskimmäinen
Del	1	vasen
Page (PageDown)	1	oikea
ö	2	keskimmäinen
p tai P	2	vasen
-	2	oikea
0	3	keskimmäinen
9	3	vasen
+	3	oikea
l tai L	4	keskimmäinen
o tai O	4	vasen
.	4	oikea
k tai K	5	keskimmäinen
i tai I	5	vasen
,	5	oikea
j tai J	6	keskimmäinen
u tai U	6	vasen
m tai M	6	oikea
7	7	keskimmäinen
6	7	vasen
8	7	oikea
h tai H	8	keskimmäinen
y tai Y	8	vasen
n tai N	8	oikea
g tai G	9	keskimmäinen
t tai T	9	vasen

---

b tai B	9	oikea
f tai F	10	keskimmäinen
r tai R	10	vasen
v tai V	10	oikea
4	11	keskimmäinen
3	11	vasen
5	11	oikea
d tai D	12	keskimmäinen
e tai E	12	vasen
c tai C	12	oikea
s tai S	13	keskimmäinen
w tai W	13	vasen
x tai X	13	oikea
a tai A	14	keskimmäinen
q tai Q	14	vasen
z tai Z	14	oikea
1	15	keskimmäinen
<	15	vasen
2	15	oikea

---

## Liite H. Kuuntelukokeen tuloksia

	1. koe	2. koe
Virheitä keskimäärin kaikkiaan	28 %	26 %
Virheiden keskihajonta	2.8	1.9
Suurin virheprosentti (yksittäinen henkilö)	53 %	31 %
Pienin virheprosentti (yksittäinen henkilö)	19 %	19 %
Etu-taka -virheitä (kaikista näytteistä)	25 %	25 %
Etu-taka -virheitä (etu-taka -näytteistä)	50 %	50 %
Etu-taka -virheiden keskihajonta	1.7	1.9
Suurin etu-taka -virheprosentti (yksittäinen henkilö)	75 %	31 %
Pienin etu-taka -virheprosentti (yksittäinen henkilö)	25 %	19 %
Keinopää -virheitä (kaikista näytteistä)	14 %	12 %
Tosipää -virheitä (kaikista näytteistä)	14 %	13 %

## Liite I. Binauraalisen tekniikan yrityksiä

*Binauraaliseen tekniikkaan liittyviä tuotteita valmistavia yrityksiä sekä heidän yhteystietojaan.*

---

Ambisonic Surround Sound	<a href="http://www.omg.unb.ca/~mleese/ambison.html">http://www.omg.unb.ca/~mleese/ambison.html</a>
Brüel&Kjær	Nærum, Denmark
CATT	<a href="http://www.netg.se/~catt">http://www.netg.se/~catt</a>
Chromatic Research	<a href="http://www.chromatic.com">http://www.chromatic.com</a>
Core Sound Binaural Microphones	<a href="http://www.panix.com/~moskowit/mics.html">http://www.panix.com/~moskowit/mics.html</a>
Creative Labs	<a href="http://www.creaf.com">http://www.creaf.com</a>
Crystal River Engineering	<a href="http://www.cre.com:80/cre">http://www.cre.com:80/cre</a>
Etymotic Research	
Focal Point	<a href="http://www.fpointinc.com/data/ads/focprod.htm">http://www.fpointinc.com/data/ads/focprod.htm</a>
HEAD Acoustics	Aachen, Germany
HeadRoom	<a href="http://headroom.headphone.com">http://headroom.headphone.com</a>
Holophonics	<a href="http://www.holophonics.com">http://www.holophonics.com</a>
Knowles Electronics	<a href="http://www.aeanet.org/homepage/mem2int/3a82.html">http://www.aeanet.org/homepage/mem2int/3a82.html</a>
Lake DSP Pty. Ltd	<a href="http://www.lakedsp.com">http://www.lakedsp.com</a>
Neumann	Berlin, Germany
NuReality	<a href="http://www.nureality.com">http://www.nureality.com</a>
Paradigm Simulation	<a href="http://www.paradigmsim.com">http://www.paradigmsim.com</a>
QSound Labs	<a href="http://www.qsound.ca">http://www.qsound.ca</a>
Roland Corporation	<a href="http://www.rolandcorp.com/">http://www.rolandcorp.com/</a>
Sonic Solutions	<a href="http://www.sonic.com/">http://www.sonic.com/</a>
Spatializer	<a href="http://www.spatializer.com">http://www.spatializer.com</a>
SRS Labs	<a href="http://www.srslabs.com">http://www.srslabs.com</a>

---

## Liite J. Ekvalisointi-ohjelman suodattimet

### Vasteen korjaus

Ekvalisointiohjelma konvuloi kunkin näytteen kahden eri suodattimen kanssa. Ensimmäisellä tehdään esikorostus ja jälkimmäisellä tehdään "hienoviritys". Tässä dummy\_a ja real\_a ovat esikorostussuodattimet ja dummy\_b sekä real\_b korjaavat loput epäideaalisuudet.

```
dummy_a=fir2(2^11-1, [0 10/24000 15/24000 18/24000 20/24000 ...
    30/24000 40/24000 60/24000 100/24000 150/24000 200/24000 ...
    300/24000 500/24000 900/24000 20000/24000 23500/24000 1], ...
    [0 0.1 5 12 8 3 1 1.6 1 1 1 1.03 1.1 1 1 0.1 0]);
dummy_b=fir2((2^12-1), [0 10/24000 15/24000 18/24000 20/24000 ...
    30/24000 45/24000 75/24000 100/24000 1000/24000 1300/24000 ...
    2000/24000 3000/24000 4000/24000 5000/24000 6000/24000 7000/24000 ...
    9000/24000 17000/24000 20000/24000 23800/24000 1], ...
    [0 0.1 2 6 2 0.6 1 1 1 1 0.8 0.75 0.6 0.7 0.7 1.8 1 2 2 1 0.1 0]);
real_a=fir2(2^11-1, [0 10/24000 15/24000 18/24000 20/24000 ...
    30/24000 40/24000 60/24000 100/24000 200/24000 300/24000 ...
    500/24000 800/24000 1000/24000 2000/24000 20000/24000 ...
    23500/24000 1], ...
    [0 0.1 8 20 16 5 0.3 1.7 1.1 1 1.03 1.1 1.2 1.2 1.1 1 0.1 0]);
real_b=fir2((2^12-1), [0 10/24000 15/24000 18/24000 20/24000 ...
    30/24000 40/24000 60/24000 100/24000 500/24000 1000/24000 ...
    2000/24000 3000/24000 4000/24000 4500/24000 7000/24000 ...
    9000/24000 15000/24000 20000/24000 23800/24000 1], ...
    [0 0.1 3 12 2 0.8 0.9 1.1 1 1.14 1 1 0.9 0.95 0.7 1.3 1.5 1.3 1 0.1 0]);
```

### A-painotettu suodin

Näytteiden A-painotettu spektri voidaan normalisoida seuraavalla ohjelmalla.

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Let's do the A-weighted normalization filter
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
if A_weighting
    br = [0 0 0 0];
    ar(1) = -2*atan(pi*20.6/srate);
    ar(2) = ar(1);
    ar(3) = -2*atan(pi*107.7/srate);
    ar(4) = -2*atan(pi*737.9/srate);
    kx = 10500*(44100/srate)^2;
    ar(5) = -2*atan(pi*kx/srate);
    %[b,a] = bilinear(poly(br),poly(ar),1);
    %freqx = freqz(b,a,[2*1000*pi/srate pi]);
    %b = b/abs(freqx(1));
    [b,a] = bilinear(poly(br),poly(ar),1);
    freqx = freqz(b,a,[2*1000*pi/srate pi]);
```

```

    b = b/abs(freqx(1));
    clear ar br kx freqx
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Now we shall do the normalization in A-weighted power spectrum
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    x=1;
    while x <= length(out)
        tmp=out{x};
        tmp_l=tmp(1,:);
        tmp_r=tmp(2,:);
        A_weighted_l=filter(b,a,tmp_l);
        A_weighted_r=filter(b,a,tmp_r);
        PwrSpctrm_l=norm(A_weighted_l,'fro');
        PwrSpctrm_r=norm(A_weighted_r,'fro');
        A_Coeffs(x,1)=PwrSpctrm_l;
        A_Coeffs(x,2)=PwrSpctrm_r;
        x=x+1;
    end
    Max_A=max(max(abs(A_Coeffs)));
    x=1;
    while x <= length(out)
        tmp=out{x};
        tmp_l=tmp(1,:)*(Max_A/A_Coeffs(x,1));
        tmp_r=tmp(2,:)*(Max_A/A_Coeffs(x,2));
        out{x}=[tmp_l;tmp_r];
        x=x+1;
    end
else
    no_A='We do not make A-weighting';
    disp(no_A)
end

```