

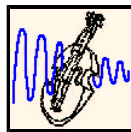
# Jousisoittimen äänen arviointi spektrianalyysin avulla

Helsingin yliopisto, Musiikkitiede

Kolmas versio PDF-julkaisua varten 16.3.2021

Toinen, korjattu versio 15.9.2006

Ensimmäinen versio 22.10.2001



Pekka Mikael Laine  
viulunrakentaja  
Sipoo

Kai Lassfolk  
tutkija  
Helsingin yliopisto

## Esipuhe

Tämä artikkeli käsittelee jousisoittimien äänen laadullisia tekijöitä. Artikkelin pohjautuu tutkimukseen, jonka keskeisenä menetelmänä on tietokoneella suoritettu Fourier-analyysi. Tutkimuksella on sekä tieteellisiä että tuotekehityksellisiä lähtökohtia. Tavoitteena on ollut kehittää soitinäänen analyysin teknisiä apuvälineitä sekä kartoittaa ja löytää objektiivisia äänen laadun arviointikriteerejä.

Artikkeli on suunnattu muun muassa soitinrakentajille, muusikoille, äänittäjille, tutkijoille ja opiskelijoille. Teksti on tarkoitettu oppimateriaaliksi joko itsenäisenä tai osana spektrianalyysimenetelmiä käsittelevää kurssia. Artikkelin valmistamisessa ovat keskeisesti avustaneet Max Savikangas äänimateriaalin tuottamisessa ja arvioinnissa sekä Jaska Uimonen analyysiohjelmien kirjoittamisessa. Kiitämme Jyri Pakarista artikkelin ensimmäistä versiota koskevista kommentteista ja korjausehdotuksista.

## Sisällys

### [1 Johdanto](#)

### [2 Spektrianalyysi](#)

#### [2.1 Musiikkisignaali](#)

#### [2.2 Fourier-muunnos](#)

#### [2.3 Fourier-analyysin graafiset kuvaajat](#)

#### [2.4 Fourier-analyysin kehitelmiä ja muita analyysimenetelmiä](#)

### [3 Välineistö](#)

#### [3.1 Mikrofonit](#)

#### [3.2 Muut tallennusvälineet](#)

#### [3.3 Mittausohjelmat](#)

### [4 Äänimateriaalin kerääminen ja hallinnointi](#)

#### [4.1 Välineistön valinta](#)

#### [4.2 Akustiikka ja äänimateriaali](#)

#### [4.3 Mikrofonien sijoittelu](#)

#### [4.4 Dokumentointi ja materiaalin organisointi](#)

### [5 Kuvaajien tulkinta](#)

#### [5.1 Soittimen arviointi](#)

#### [5.2 Fourier-analyysikuvaajien ominaisuudet](#)

#### [5.3 Soitinäänten spektrianalyysitutkimuksia](#)

#### [5.4 Kuulopsykologiset tekijät](#)

#### [5.5 Tulkintaesimerkkejä](#)

#### [5.6 Kuuntelutesti](#)

### [6 Esimerkki mittausprojektista](#)

#### [6.1 Hyvän äänen kriteerit](#)

#### [6.2 Soittimet](#)

#### [6.3 Tallennusvälineet](#)

#### [6.4 Kuvaajat](#)

#### [6.5 Musiikinäytteet](#)

#### [6.6 Johtopäätökset](#)

### [7 Yhteenveto](#)

### [Lähdeluettelo](#)

### [Ohjelmat](#)

[\[seuraava luku\]](#) [\[sisällysluettelo\]](#)

---

## 1 Johdanto

Jousisoittimen tärkein ominaisuus on äänen laatu. Ääneltään erinomaisesta viulusta voidaan maksaa jopa yli tuhatkertaisesti halvemman, täysin käyttökelpoisen soittimen hinta, vaikka soittimien valmistukseen käytetyn työn määrä voi olla sama. Hyvästä soittimen äänestä nauttii soittajan lisäksi yleisö, joko elävässä esityksessä tai äänitteen kautta. Esitystilanteessa soittaja pyrkii siihen, että sointi olisi paras mahdollinen. Äänitteen valmistamisessa hyvään sointiin pyrkivät myös äänittäjä ja tuottaja. Sama tavoite on kuitenkin tätä ennen ollut jo soittimen rakentajalla.

Soittimen äänen luotettava arviointi kuuntelun perusteella on vaikeaa, koska kuultavan äänen tuottamiseen vaikuttaa monta tekijää: soitin itse, soittaja, esitystilan akustiikka sekä soittimen suuntaus ja sijainti kuuntelijaan nähden. Jousisoittimissa ääneen vaikuttavat vielä käytettävät kielet ja jousi. Jos arvioitavana on useita soittimia, pitää vertailu tehdä samanaikaisesti ja nopeasti, koska ihmisen kuulomuisti on lyhyt, vain joidenkin sekuntien pituinen. Eräs ratkaisu ongelmaan on tehdä vertailu vakioituissa olosuhteissa tehtyjen äänitteiden perusteella. Soittimen äänentuottotapaa voidaan lisäksi selvittää analysoimalla ääni tietokoneen ja sopivan mittausohjelman avulla.

Spektrianalyysimenetelmien käyttö on lisääntynyt musiikki-instrumentteja käsittelevissä tutkimuksissa. Mittaustulosten tulkinta on kuitenkin osoittautunut vaikeaksi ja mittaustulokset on usein liitetty tutkimusraportteihin selostamatta, mitä ne soittimen äänestä kertovat. Tämän artikkelin tarkoituksena on selvittää yleisessä käytössä olevien spektrianalyysimenetelmien teoreettista perustaa ja selvittää mittaustulosten tulkintaa. Tarkoituksena on myös selvittää, miten mittaukset voidaan ja tulisi suorittaa ja mitä soittimien äänestä tulisi mitata.

Tutkimusesimerkkeinä on käytetty kahta alttoviulua ja kahta kokoviulua. Soittimista on äänitetty vapaat kielet, joiden alukkeet on kuvattu kolmiulotteisesti käyttämällä Fourier-muunnosta. Kuvaajien avulla nähdään asioita, joita ihminen ei pysty kuulemaan tai vain osaksi kuulee äänestä: spektrin rakenteen ja osasävelien keskinäisen suhteen, syttymisnopeuden sekä voimakkuusvaihtelun. Jousisoittimet tuottavat hyvin korkeita, jopa yli 50 kilohertsin taajuisia osasäveliä ([Boyk 2001](#)), joiden merkitys sointiin voi olla kahdenlainen: yli 20 kilohertsin äänet, jotka eivät yksin kuulu, voivat olla havaittavissa muiden, matalampien osasävelien mukana. Jousisoittimen kuultavaan sointiin voivat lisäksi vaikuttaa korkeimman yläsävelsarjan epäpuhtaudet ja epäharmonisuudet. ([Benade 1990: 313-318, 512-515.](#))

Spektrianalyysia voidaan käyttää eri soittimien vertailun apuvälineenä. Vertailu voidaan kohdistaa soittimen sijasta johonkin muuhun edellä mainittuun osatekijään; voidaan esimerkiksi vertailla yhden soittimen sointiä eri jousilla soitettuna. Mahdollisia vertailukohteita ovat myös muut mittausta varten tehtyyn äänitteeseen vaikuttavat osatekijät, esimerkiksi kielet, soittaja, huoneakustiikka tai mikrofonit. Menetelmän etuna onkin helppo sovellettavuus käytännön tarpeisiin.

Soittimien arvioinnissa spektrianalyysi on luonteeltaan kuuntelukoetta täydentävä menetelmä, jonka perusteella ei yksin voi antaa varmaa arviota jonkin yksittäisen äänen tai koko soittimenkaan laadusta. Usein käytännön ongelma syntyy graafisen kuvaajan sisältämän tiedon tulkitsemisesta. Kuvaajan tarkasteleminen ja ääninäytteen kuunteleminen samaan aikaan auttavat vastavuoroisesti hahmottamaan ääneen sisältyvää tietoa.

Artikkelissa on pyritty käyttämään pääosin vakiintunutta musiikkiakustiikan terminologiaa. Spektrin komponenteista käytetään nimityksiä yläsävel, osasävel ja osääni. Näistä kaksi ensimmäistä ovat rinnasteisia ja niillä tarkoitetaan periodista värähtelyä. Ylä- tai osasävelet voivat olla joko harmonisia tai epäharmonisia. Vakiintumatonta osääni-termiä käytetään tarkoittamaan mitä tahansa äänen osatekijää mukaanlukien sekä jatkuva värähtely että hetkellinen värähdys.

Artikkelin seuraavissa luvuissa kartoitetaan spektrianalyysin ja Fourier-muunnosten teoreettista taustaa sekä spektrianalyysimenetelmien käytännön sovelluksia. Artikkelin käsittelee myös äänimateriaalin keräämiseen tarvittavaa välineistöä sekä äänitilan ja äänimateriaalin valintaan liittyviä seikkoja.

---

[\[seuraava luku\]](#) [\[sisällysluettelo\]](#)

[\[seuraava luku\]](#) [\[edellinen luku\]](#) [\[sisällysluettelo\]](#)

---

## 2 Spektrianalyysi

Spektrianalyysimenetelmillä voidaan tutkia muun muassa paineen jakautumista eri taajuuksilla. Spektrianalyysilla tarkoitetaan tässä tekstissä laskennallista menetelmää, jolla ns. *aika-alueella* olevan signaali muunnetaan *taajuusalueelle*. Spektrianalyysi voi olla yksittäinen, rajatun aikajakson taajuusjakaumaa selvittävä toimenpide. Peräkkäisten spektrianalyysien muodostaman sarjan avulla voidaan myös tarkastella ajassa tapahtuvaa spektrin vaihtelua. Spektrianalyysimenetelmiä on useita. Digitaalisessa signaalinkäsittelyssä yleisimpiä ovat Fourier-muunnoksen eri versiot ja sovellukset.

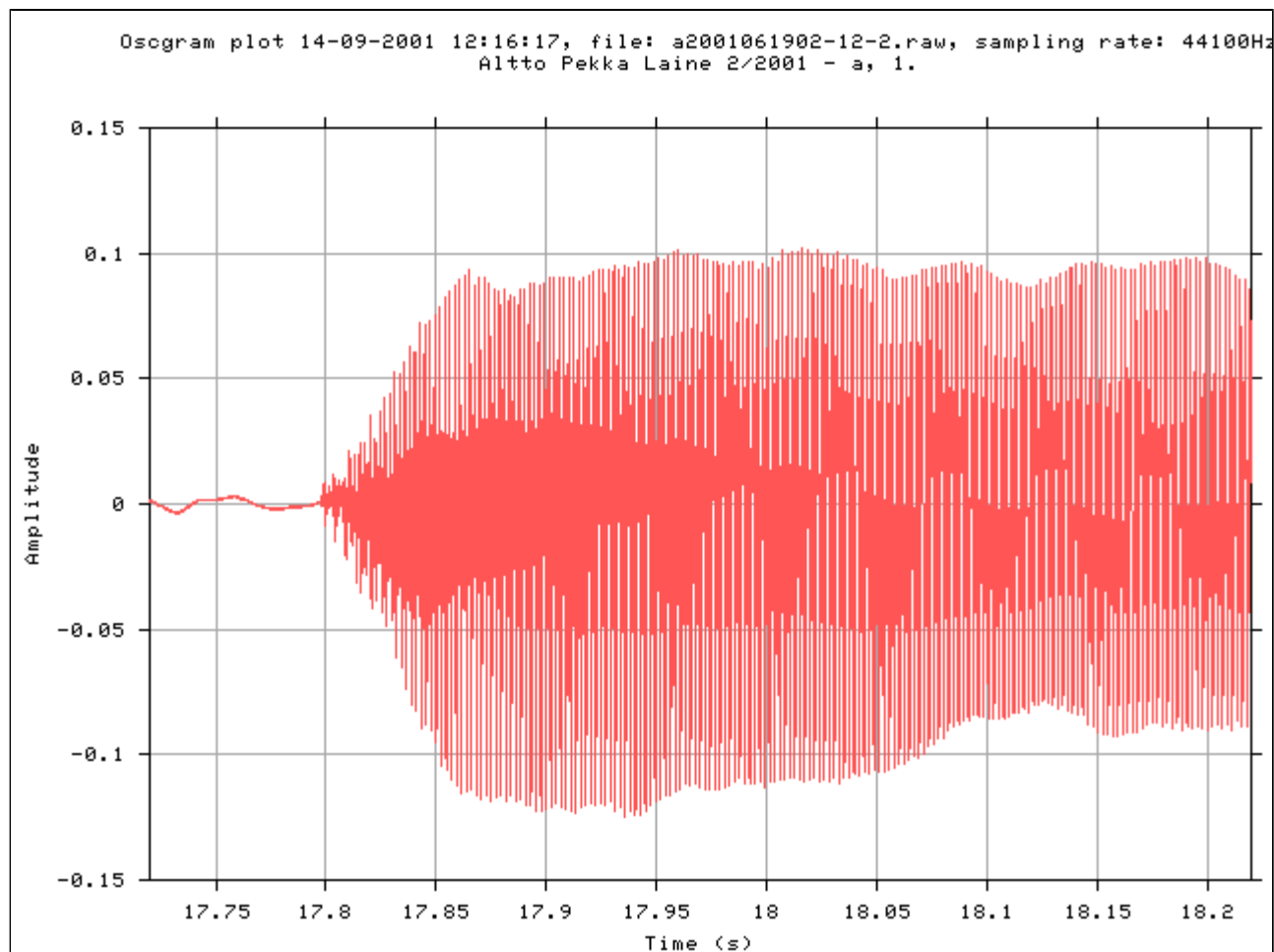
Musiikkiäänitteiden analysoinnissa spektrianalyysilla voidaan saada tietoa esimerkiksi soittimen äänensävyistä tai sävyn muutoksista ajassa. Muita sovellusalueita ovat musiikkiesitysten tulkinnan analyysi sekä soittajien ja laulajien äänenmuodostuksen tutkimus. Spektrianalyysimenetelmiä on käytetty myös tietokonemusiikin sävellyksessä.

### 2.1 Musiikkisignaali

Musiikkisignaali tarkoitetaan tässä artikkelissa akustisessa tai sähköisessä muodossa olevaa aaltoliikettä, joka on tuotettu musiikkiesityksellä. Musiikkisignaali voi sisältää esimerkiksi laajamittaisen sävelteoksen tai yksittäisen sävelen tai sen osan. Musiikin käsitteeseen sinänsä ei tässä tekstissä oteta kantaa.

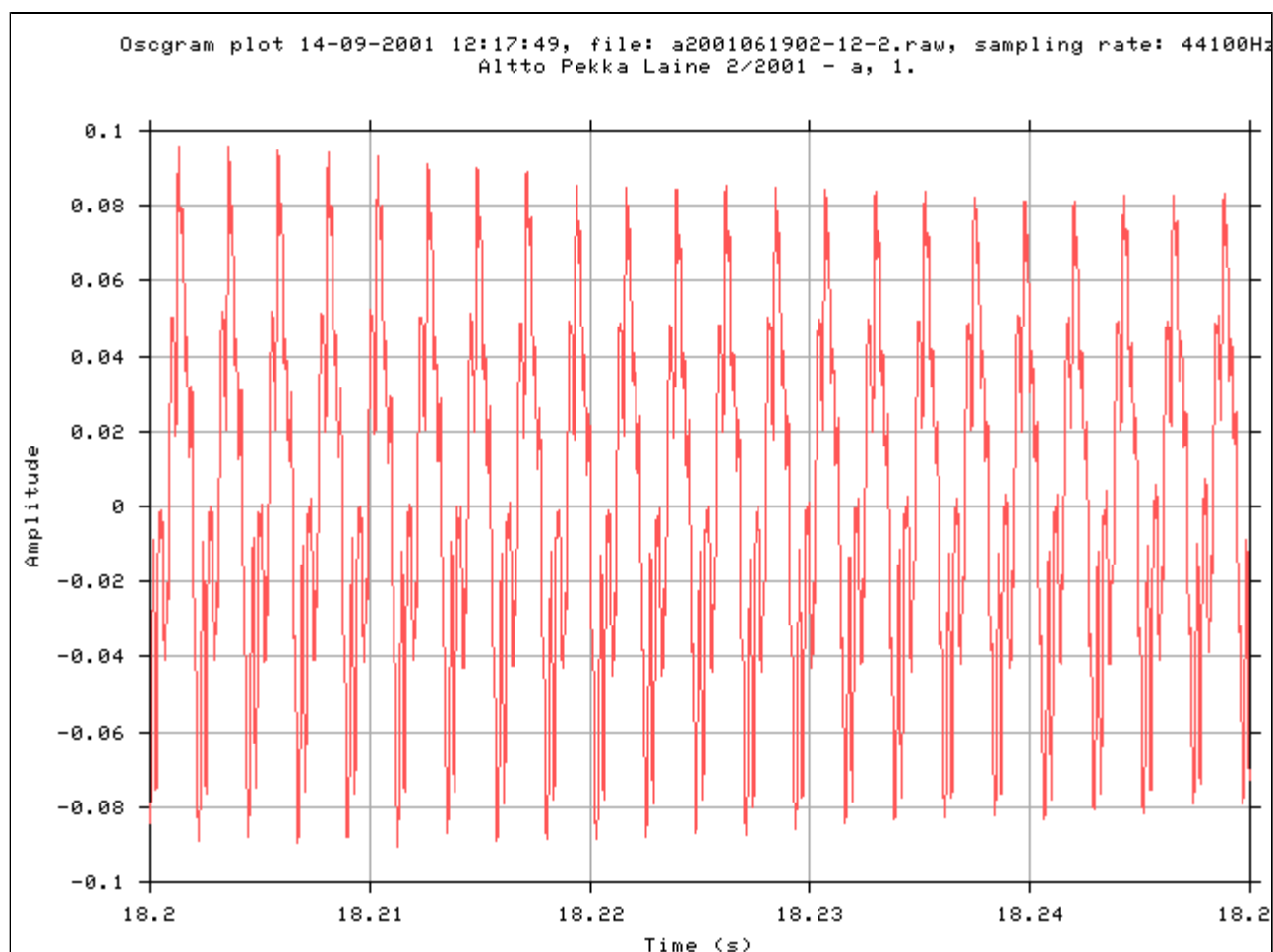
Akustinen musiikkisignaali on ilmanpaineen edestakaista vaihtelua staattisen ilmanpaineen suhteen. Analoginen sähköinen musiikkisignaali voi olla esimerkiksi sähköjännitteen tai magneettisuuden vaihtelua. Digitaalinen musiikkisignaali on numeeriseen muotoon koodattua aaltoliikettä.

Akustinen musiikkisignaali voidaan muuntaa digitaaliseksi mikrofonin avulla tehtävän akustissähköisen ja analogia-digitaalimuuntimen avulla tehtävän sähkönumeerisen muunnosprosessin kautta. Mikrofonilla suoritettussa akustissähköisessä muunnoksessa ilmanpaineen vaihtelu muunnetaan sähköjännitteen vaihteluksi. Tavanomaisella analogia-digitaalimuuntimella sähköjännitteestä otetaan näytteitä jollakin vakioaajuudella ja jokaiselle näytteelle annetaan sen jännitetasoa vastaava numeroarvo. Näin saadut ns. *pulssikoodimoduloidut* (engl. lyh. PCM) ääninäytteet voidaan esittää kokonais- tai reaalilukujen jonona. Lukujonon arvot voidaan esittää kaksiulotteisella graafisella kuvaajalla, joka kuvaa paineen vaihtelua ajan suhteen. Paineen vaihtelun ohella puhutaan myös signaalin voimakkuudesta eli amplitudista. Amplitudi tarkoittaa tietyllä aikavälillä vallitsevaa paineenvaihtelun laajuutta. Kaksiulotteista aika/paine- tai aika/amplitudikuvaajaa kutsutaan oskillogrammiksi ([Kuva 2.1](#)).



**Kuva 2.1:** Alttoviulun vapaan c-kielen oskillogrammi

Kuvassa 2.1 on alttoviululla jousella soitetun vapaan a-kielen alukkeen oskillogrammi. Kuvaajan ajallinen kesto on 0,5 sekuntia. Kuvassa 2.2 on samasta äänitteestä tulostettu oskillogrammi noin 0,4 sekunnin päästä äänen syttymisestä, kestoltaan 50 millisekuntia. Kuvassa näkyy karkeasti äänen aaltomuoto. Kuvaajaa voidaan tarkentaa edelleen lyhentämällä kuvattavaa aikajaksoa. Tarkimmillaan oskillogrammilla voidaan tarkastella yksittäisten signaalinäytteiden arvoja.



**Kuva 2.2:** Altoviulun vapaan a-kielen oskillogrammi, kesto 0,05 s

## 2.2 Fourier-muunnos

Fourier-muunnoksen teorian pari alulle ranskalainen matemaatikko Jean Baptiste Joseph Fourier (1768-1830) teoksellaan *La théorie analytique de la chaleur* (1822). Fourierin teorian mukaan mikä tahansa periodinen (ts. samanlaisena toistuva) aaltoliike on hajotettavissa harmonisessa suhteessa olevien siniaaltojen sarjaksi. Fourier kehitti matemaattisen muunnosfunktion, jolla aika-alueella oleva aaltoliike voidaan muuntaa taajuusalueelle ja käänteisen funktion, jolla signaali muunnetaan takaisin aika-alueelle. Muunnosta aika-alueelta taajuusalueelle kutsutaan Fourier-analyysiksi ja käänteistä muunnosta synteeksiksi.

Fourier-muunnoksesta kehitettiin 1900-luvulla digitaaliseen signaalinkäsittelyyn soveltuvia versioita. Fourier-muunnosta sovelletaan useilla eri signaalinkäsittelyn alueilla, esimerkiksi akustiikassa, äänenkäsittelyssä, kuvankäsittelyssä ja tietoliikenteessä. Fourier-muunnosten matematiikkaa ja tietokonetoteutuksia on käsitelty yksityiskohtaisesti monissa signaalinkäsittelyteoksissa (mm. [Oppenheim ja Schafer 1975:87-135,285-336](#), [Moore 1990:61-111](#)). Tämä artikkeli keskittyy Fourier-muunnosten käytännön sovelluksiin. Joitakin Fourier-muunnosten periaatteita on kuitenkin syytä selvittää artikkelin pohjana olevien mittausten ja oheisten kuvaajien ymmärtämiseksi.

Tietokonetoteutuksia käsiteltäessä Fourier-muunnokset voidaan jakaa kolmeen päätyyppiin:

1. Yleinen, teoreettinen Fourier-muunnos, joka toimii äärettömän pitkällä signaalilla
2. Diskreetti Fourier-muunnos (lyh. DFT), joka toimii äärellisellä määrällä ajallisesti tasavälein otettuja signaalinäytteitä
3. Laskennallisesti optimoitu, nopea Fourier-muunnos (lyh. FFT), joka toimii näytejonolla, jonka pituus on jokin 2:n kerrannainen.

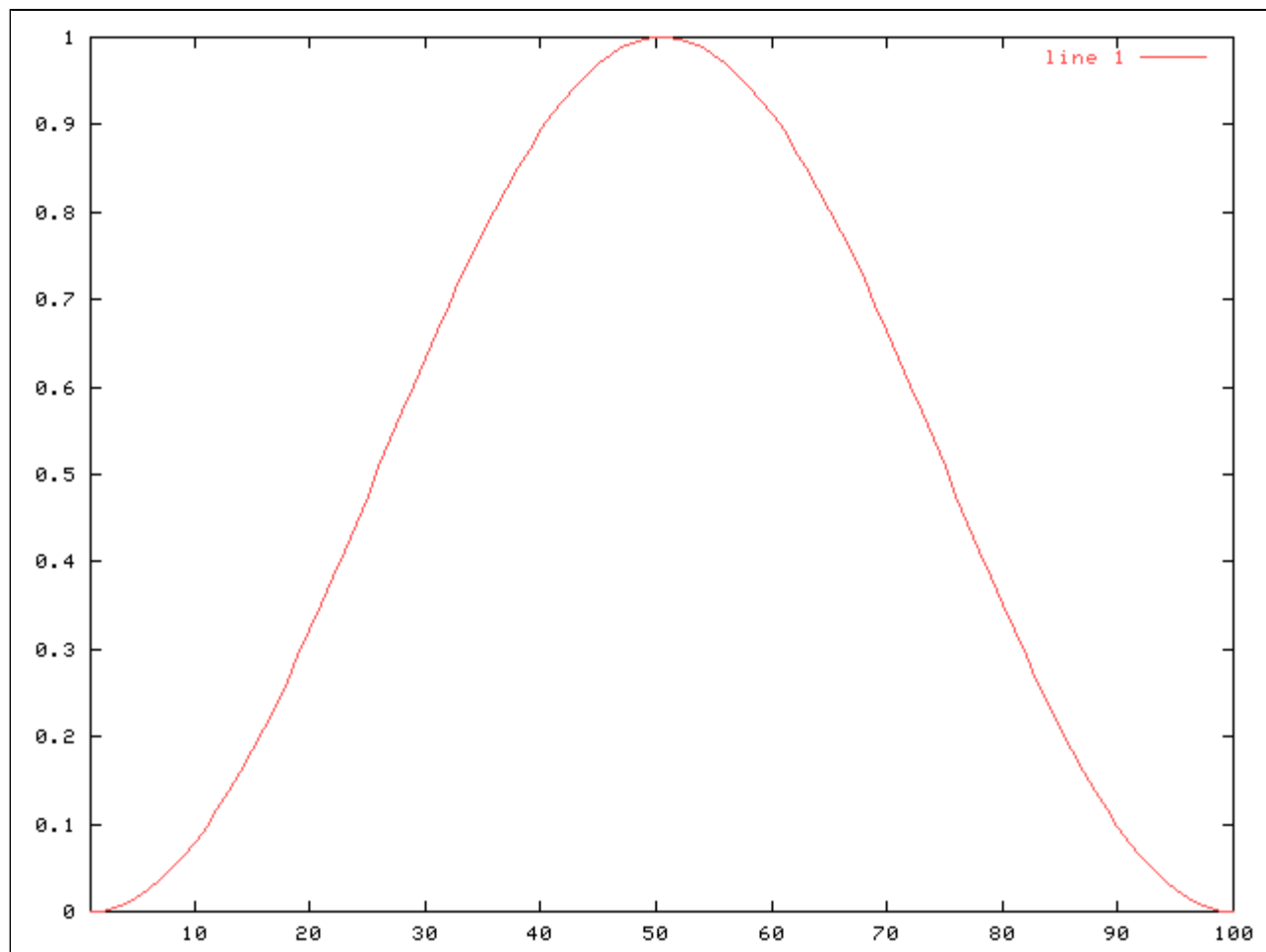
Musiikkisignaali ei sinällään täytä yleisen Fourier-muunnoksen äärettömän periodisuuden vaatimusta muussa kuin siinä teoreettisessa erikoistapauksessa, että signaalilla ei ole alkua eikä loppua, ja se soi muuttumattomana. Diskreetillä tai nopealla Fourier-muunnoksella voidaan käsitellä rajattua ääninäytejonoa. Tällöin oletetaan teoriassa, että käsiteltävä ääninäytejoukko sisältää signaalin yhden periodin.

Fourier-muunnosfunktio ottaa parametrikseen joukon aika-alueella olevia reaali- tai kompleksilukuja, jotka kuvaavat paineen vaihtelua ajan suhteen. Funktio tuottaa yhtä suuren joukon taajuusalueella olevia kompleksilukuja, ns. Fourier-pisteitä, jotka ilmaisevat signaalin spektrin. Kompleksiluvut voidaan muuntaa reaalilukupareiksi, jotka kuvaavat signaalin *magnitudin* ja vaiheen vaihteluja taajuuden suhteen. Magnitudin ohella kirjallisuudessa puhutaan myös amplitudista. Termien merkitysero on pieni ja voi esimerkiksi johtua tavasta, jolla arvo on johdettu vastaavasta Fourier-muunnoksen tuottamasta kompleksiluvusta ([ks. esim. Ifeachor ja Jervis 1993: 49-50](#)). Magnitudi- ja vaihetieto voidaan palauttaa kompleksiluvuiksi ja muuntaa takaisin aika-alueelle päinvastaisella Fourier-muunnoksella. Muunnosprosessi on symmetrinen, eli takaisin aikatasolle muunnettu signaali on sama kuin alkuperäinen. Kahden Fourier-pisteen välistä taajuusaluetta kutsutaan tässä artikkelissa Fourier-kaistaksi.

Myös taajuusalueelle muunnettu signaali on periodinen. Yhden periodin pituus on hertseinä sama kuin signaalin näytteenottotaajuus. Yleisesti taajuusalue esitetään rajattuna yhden periodin mittaiseksi ja normalisoituna välille  $-fs/2..+fs/2 - 1$ , jossa  $fs$  on näytteenottotaajuus. Jos Fourier-muunnosfunktiolle syötetyt luvut ovat reaalilukuja (ts. kompleksilukuja, joiden imaginääriosan arvo on 0), funktio tuottaa symmetrisen spektrin 0 hertsin molemmin puolin. Koska pulssikoodimoduloidut ääninäytteet ovat yleisimmin reaalilukuja, spektrin negatiiviset taajuudet voidaan jättää pois ja käsitellä pelkästään positiivista puolta 0 hertsin ja ns. Nyqvistin taajuuden välillä. Nyqvistin taajuus eli ns. ylärajataajuus on puolet näytteenottotaajuudesta eli  $fs/2$ . Korkein digitaaliäänitteessä toistettava taajuus on  $fs/2 - 1$ . Toisin sanoen värähtelystä on saatava enemmän kuin kaksi näytettä periodia kohti, jotta se voidaan toistaa oikeanlaisena.

Jos analysoitavan signaalin periodin pituutta eli perustaaajuutta ei tiedetä tai se vaihtelee, Fourier-muunnos tuottaa likiarvoisen spektrin, joka kuvaa signaalijakson keskimääräisiä magnitudi- sekä vaihearvoja, ja jonka tarkkuus ja luotettavuus riippuu muunnettavan jakson pituudesta. Tarkka taajuusresoluutio vaatii pitkää ns. aikaikkunaa, eli signaalijaksoa. Tämän kääntöpuolena on, että aikaikkunan sisällä mahdollisesti tapahtuvat spektrin muutokset pyöristyvät. Fourier-muunnoksen tarkkuuden valinnassa on tehtävä kompromissi sen suhteen, halutaanko tarkkuutta taajuus- vai aika-alueella. Jos taajuus halutaan tietää tarkasti, ajassa tapahtuvat muutokset pyöristyvät. Jos taas halutaan tietää muutosten ajankohta tarkasti, taajuusresoluutiota on heikennettävä.

Aikaikkuna on usein painotettu siten, että ikkunan laidoilla olevat näytteet häivytetään. Tällä pyritään pienentämään spektrianalyysin vääristymiä, joita esiintyy erityisesti silloin, kun aikaikkuna ei ole täsmälleen signaalin jakson pituinen ([Moore 1990: 97](#)). Häivyttämiseen käytettyjä *painotusikkunoita* on useita eri tyyppisiä. Yksi yleisimmistä on ns. Hanning-ikkuna, Se muistuttaa käänteistä kosinifunktiota, ja saa arvoja välillä 0..1. Kuvassa 2.3 on 100 alkion mittainen Hanning-ikkuna. Painotus tapahtuu kertomalla kukin analysoitavan aikaikkunan näyte samanpituisten painotusikkunan vastaavalla arvolla. Hanning-ikkunaa käytettäessä ikkunoidun signaalin voimakkuus alkaa nolasta, kasvaa ikkunan puolivälissä täyteen voimaakkuuteensa ja pienenee lopussa uudestaan noltaan.



**Kuva 2.3:** Hanning-ikkuna

Nopeaa Fourier-muunnosta (lyh. FFT) käytettäessä aikaikkunan näytteiden määrän tulee olla jokin  $2:n$  potenssi. Aikaikkuna voidaan kuitenkin säätää pienemmäksi, jos painotusikkunoinnin jälkeen ikkunan päihin lisätään nolla-arvoisia näytteitä niin, että määrä on tasan jokin  $2:n$  potenssi. Näin aika/taajuusesityksen tarkkuutta voidaan säätää yhden näytteen tarkkuudella. Toinen tapa täsmätä aikaikkuna ja Fourier-pisteiden määrä on ns. uudelleennäytteistää (engl. resampling) aikaikkunoitu signaalijakso, ja säätää näytteenottotaajuus sellaiseksi, että signaalin perustaajuuden yksi periodi tulee mahdollisimman täsmällisesti aikaikkunan pituiseksi ([McAdams ym. 1999](#)).

Pitkien, ajassa muuttuvien signaalien analyysissä käytetään ns. lyhyen aikavälin Fourier-muunnosta (engl. Short-Time Fourier Transform, lyh. STFT). Se on yhdistelmä peräkkäisistä, usein ajassa limitetyistä, aikaikkunoista tehdyistä Fourier-muunnoksista. Lyhyen aikavälin muunnoksissa voidaan ikkunapituuden lisäksi säätää ikkunoiden limityskerrointa. Aika/taajuusresoluutioon tulee näin yksi tekijä lisää.

### 2.3 Fourier-analyysin graafiset kuvaajat

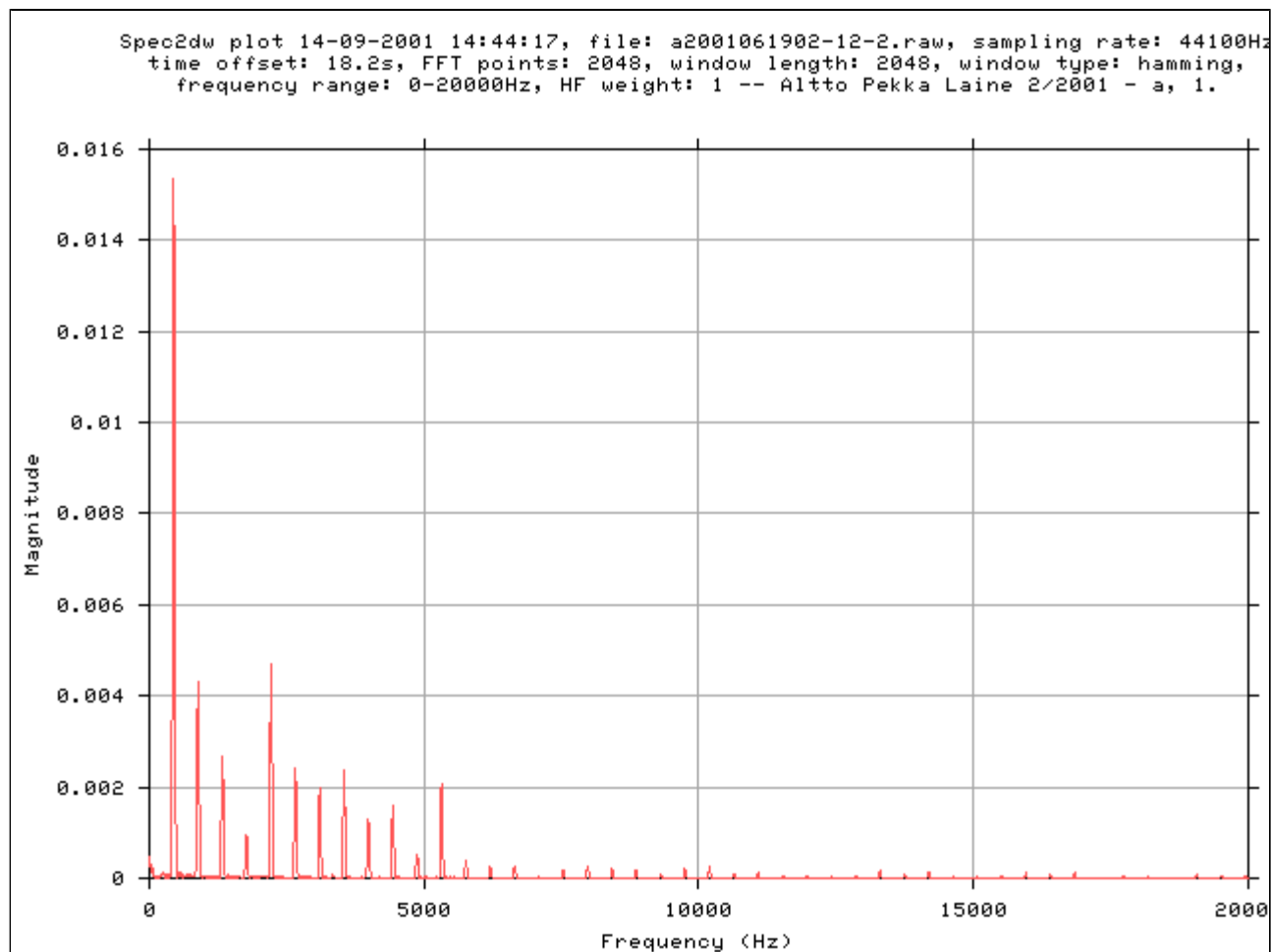
Yhden diskreetin Fourier-analyysin tulos voidaan kuvata graafisesti kahdella kaksiulotteisella kuvaajalla, joista toinen kuvaa signaalin magnitudia ja toinen vaihetta taajuuden suhteen. Näistä kuvaajista käytetään yksinkertaisesti nimitystä *spektri* tai *taajuusvaste*. Tarkemmin puhutaan magnitudispektristä (tai magonitudivasteesta) tai vaihespektristä (tai vaihevasteesta). Useimmiten Fourier-analyysin tulkinnessa rajaudutaan pelkän magnitudikuvaajan tarkasteluun. Siksi termillä spektri tai taajuusvaste tarkoitetaan myös pelkästään magnitudikuvaajaa.

Lyhyen aikavälin muunnoksen kuvauksessa käytetään yleisesti kolmiulotteisia kuvaajia, joita kutsutaan spektro- tai sonogrammeiksi. Spektrogrammissa on sarja peräkkäisiä kaksiulotteisia kuvaajia, jotka kuvaavat spektrin (joko magnitudien tai vaiheiden) muuttumista ajassa. Spektrogrammit esitetään tavallisesti kolmiulotteisessa koordinaatistossa, jonka akseleina ovat taajuus, aika ja magnitudi (tai vaihe). Katselukulma voi vaihdella eri akselien



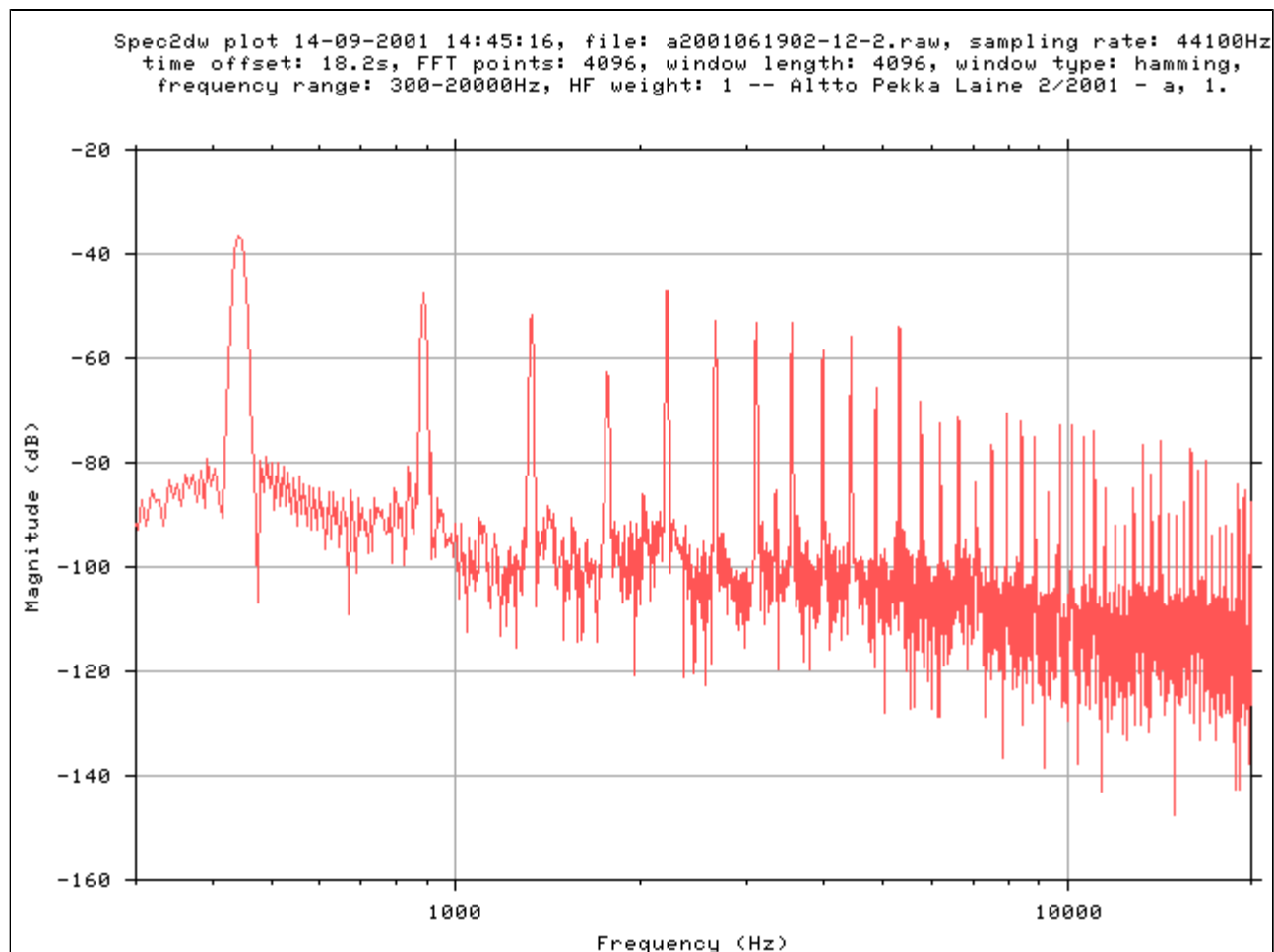
suhteen esimerkiksi havainnollistamistarpeiden mukaan. Sonogrammi on spektrogrammin erityistapaus, jossa spektrogrammi kuvataan suoraan magnitudiakselin yläpuolelta. Sonogrammeissa kuvataan yleensä vain magnitudiarvoja. Niissä taajuus esitetään pystyakselilla ja aika vaakakselilla. Magnitudiarvot kuvataan tummentumina tai eri värein aika- ja taajuusakselien muodostamassa kartassa.

Kuvassa 2.4 on magnitudispektri kuvan 2.2 aika-alueella esitetystä signaalista.



**Kuva 2.4:** Alttoiviulun vapaan a-kielen spektri

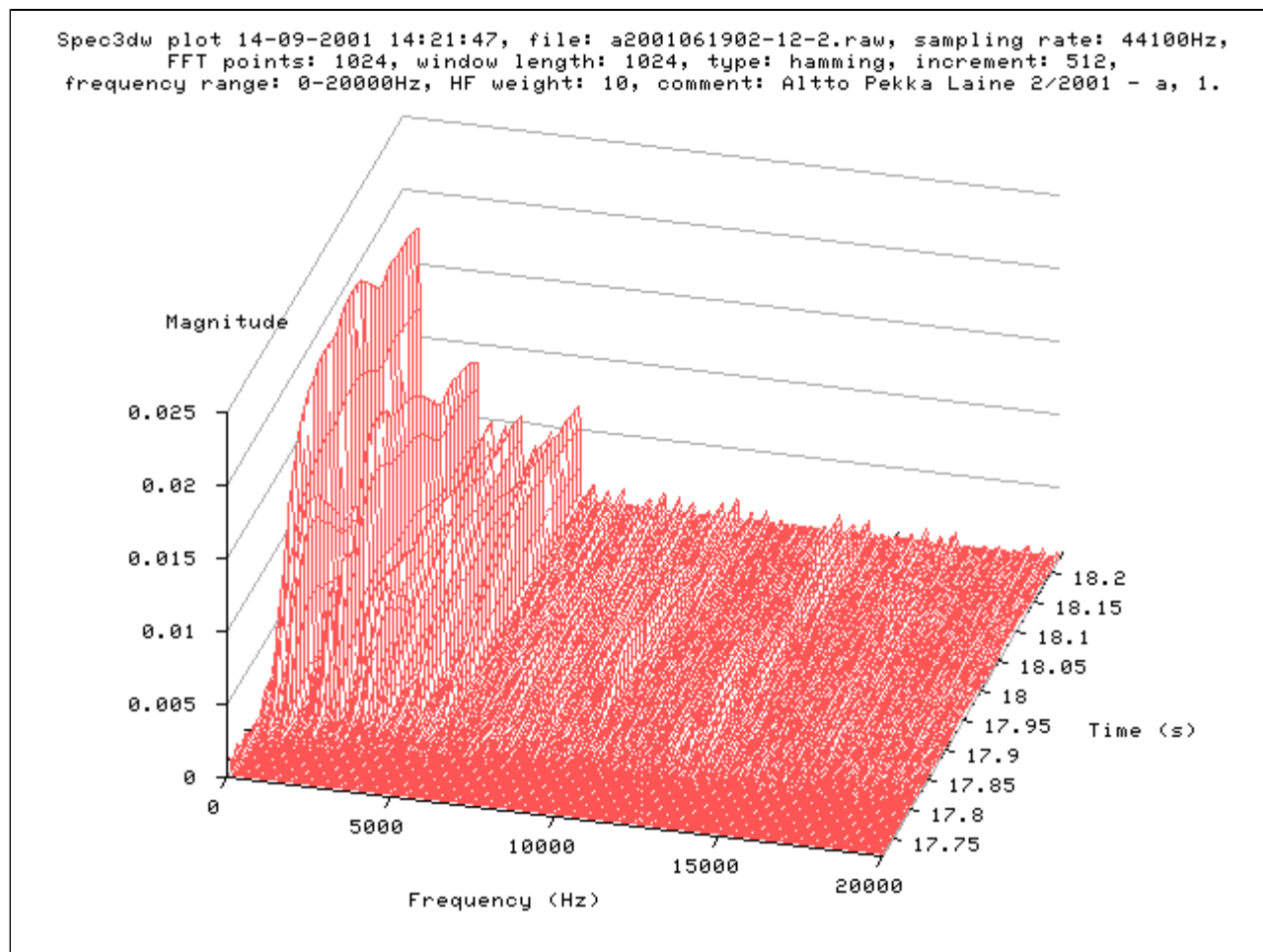
Kuvassa 2.5 on sama näyte, jossa taajuusakseli on kuvattu logaritmisesti ja magnitudiakseli on kuvattu desibeleinä.



**Kuva 2.5:** Vapaan a-kielen spektri desibeliasteikolla

Kolmiulotteisessa spektrogrammissa on kolme akselia, x, y ja z. Niistä x-akselilla kuvataan yleensä taajuus, y-akselilla aika ja z-akselilla magnitudi tai vaihe. Taajuusakseli voidaan piirtää joko lineaarisesti, jolloin hertsiluvut jakautuvat tasavälein, tai logaritmisesti, jolloin oktaavialet jakautuvat tasavälein. Magnitudi- tai vaiheakseli voidaan kuvata lineaarisesti mielivaltaisen suuruusina arvoina tai logaritmisesti, jolloin mittayksikkönä käytetään useimmin desibeliä. Aika-akseli kuvataan lähes aina lineaarisesti esimerkiksi sekunneissa.

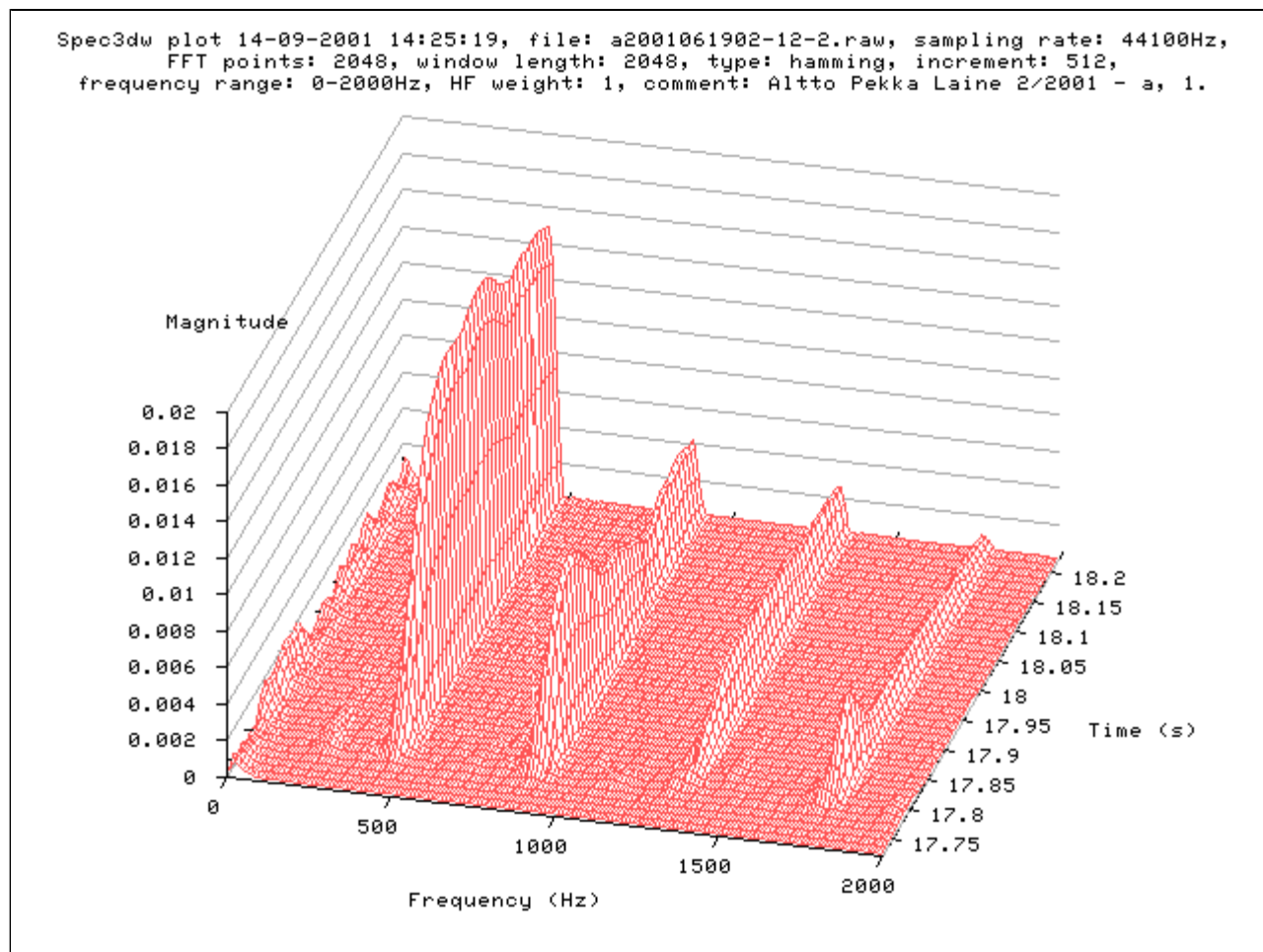
Kuvassa 2.6 on spektrogrammi samasta äänitteestä kuin kuvan 2.1 oskillogrammissa. Kuvattu taajuusalue on 0-20 kHz. Kuvassa korkeita taajuuksia on korostettu, jotta korkeataajuustoiston ulottuvuutta voidaan tarkastella.



**Kuva 2.6:** Vapaan a-kielen spektrogrammi 0-20 kHz

Kuvasta 2.6 näkyy karkea yleiskuva äänen rakenteesta ja siitä voidaan tarkastella esimerkiksi korkeiden osäänten syttymisnopeutta. Kuvaajan karkeus johtuu analyysitiedon suuresta määrästä sekä tietokoneen tavanomaisen näyttöruudun esitystarkkuudesta. Paperitulostuksessa kuvaajista voidaan saada tarkempia. Yksityiskohtaisempaa tietoa voidaan myös saada rajaamalla kuvaajaan pienempi osa taajuuskaistasta.

Kuvassa 2.7 on spektrogrammi samasta äänitteestä taajuusalueella 0-2 kHz. Kuvaajassa näkyy selvästi äänen neljä alinta yläsäveltä. Lisäksi äänen alukkeessa näkyy vaimeita osääniä, jotka todennäköisesti syntyvät jousen koskettaessa kieliä.



**Kuva 2.7:**Vapaan a-kielen spektrogrammi 0-2 kHz

Äänianalyysissa kuvaajat soveltuvat hyvin erityisesti lyhyiden, noin sekunnin suuruusluokkaa olevien äänitapahtumien havainnollistamiseen. Sonogrammeilla puolestaan voidaan tutkia useiden minuuttien mittaisia näytteitä. Sonogrammit ovat kuitenkin spektrogrammeja epätarkempia magnitudiarvojen kuvauksessa. Tässä artikkelissa käytetään spektrogrammeja, koska analyysit tehdään vain noin puolen sekunnin mittaisista tapahtumista. Artikkelissa käytetään ainoastaan magnitudivastekuvauksia, joiden tulkinta on helpompaa kuin vaihevastekuvauksien.

## 2.4 Fourier-analyysin kehitelmiä ja muita analyysimenetelmiä

Lyhytaikaista Fourier-analyysia on käytetty ns. vaihevokooderin (engl. Phase Vocoder) toteutuksessa. Siinä Fourier-analyysista jokaista Fourier-kaistaa kohti lasketaan taajuus- ja magnitudi- tai amplitudiarvo. Analysoitu ääni voidaan syntetisoida uudelleen esimerkiksi ohjaamalla parametritiedolla joukkoa siniäänioskillaattoreita.

Vaihevokooderin pohjalta kehitettiin ns. siniäaltomallinnus (Sinusoidal Modeling), jossa lasketaan taajuus- ja magnitudiarvot ainoastaan spektrin huippuarvoille. Lisäksi menetelmässä taajuusarvojen muutoksia seurataan ajassa siten, että ne voivat siirtyä Fourier-kaistalta toiselle. Menetelmällä tiedon määrää on pyritty vähentämään tavanomaisesta lyhytaikaisesta Fourier-muunnoksesta. Samalla on pyritty helpottamaan äänenmuokkausta ja parantamaan muokattujen tulosten äänenlaatua. Siniäaltomallinnusta on sovellettu muun muassa musiikisignaalin ja puheäänien uudelleensynteesiin ja tiedon pakkaukseen (mm. [Anderson 1996](#)). Mallinnusmenetelmää on laajennettu tuomalla mukaan siniäänien lisäksi stokastinen kohinakomponentti (engl. "Sinusoids + Noise", [Serra 1997](#)). Myöhemmin on tehty kokeita mallin laajentamiseksi kohinan lisäksi transienttikomponentilla ("Sinusoids + Noise + Transients", [Levine 1998](#)). Näitä menetelmiä on sovellettu muun muassa äänenmuokkauksessa ja äänisignaalin kompressoinnissa.

Fourier-analyysia on musiikisignaalin analyysivälineenä arvosteltu siitä, että se ei kuvaa äänen taajuusaluetta samalla

tavoin kuin ihmiskorva tai -aivot sen havaitsevat. Fourier-analyysi on taajuuden suhteen lineaarinen, kun taas ihmiskorva on taajuuden suhteen (karkeasti) logaritminen. Tämä ilmenee muun muassa länsimaisissa sävelasteikoissa, erityisesti tasavireisessä kromaattisessa asteikossa. Siinä sävelkorkeuden nostaminen oktaavilla merkitsee taajuuden kaksinkertaistumista. Oktaavin sisällä taajuusalue on jaettu logaritmisesti kahteentoista säveltasoon.

Sävelasteikkojen ja Fourier-analyysin ristiriita tarkoittaa käytännössä sitä, että Fourier-kuvaajat ovat matalilla sävelkorkeuksilla epätarkempia kuin korkeilla. Tähän ongelmaan on esitetty ratkaisuna muita spektrianalyysimenetelmiä, esimerkiksi vakio-Q-muunnosta (engl. constant Q transform, [Brown 1991](#)) ja aallokemuunnosta (engl. Wavelet transform). Myös Fourier-muunnoksesta on kehitetty paremmin kuulohavaintoa vastaavia moniresoluutioisia toteutuksia ([Anderson 1996](#), [Levine 1998](#)).

Siniäänimallinnuksen eri versiot, aalloeanalyysi sekä vakio-Q-menetelmä tarjoavat myös graafisia kuvaustapoja. Säveltasojen vaihtelua sisältävien äänitteiden analyysissa ja joissakin äänenkäsittelytehtävissä taajuuden suhteen logaritmiset analyysimenetelmät voivat olla havainnollisempia kuin tavanomainen lyhyen ajan Fourier-analyysi. Yläsävelrakenteen graafisessa kuvauksessa Fourier-muunnokselle on kuitenkin vaikea löytää korvaajaa. Tässä artikkelissa on keskitytty juuri tavanomaisen lyhytaikaisen Fourier-muunnoksen 3-ulotteisiin kuvaajiin. Syinä tähän on muun muassa analyysiohjelmien suhteellisen yksinkertainen toteutus, kuvaajien havainnollisuus, parametrien säädön helppous, ja mahdollisuus kuvata yksi äänitapahtuma yhdellä kuvaajalla (mikäli tulostimen tarkkuus on riittävä).

---

[\[seuraava luku\]](#) [\[edellinen luku\]](#) [\[sisällysluettelo\]](#)

[\[seuraava luku\]](#) [\[edellinen luku\]](#) [\[sisällysluettelo\]](#)

---

## 3 Välineistö

Mittauksissa käytetyiltä työvälineiltä edellytetään tarkkuutta, kestävyyttä ja käytettävyyttä. Käytännössä myös saatavuus ja kustannuseikat vaikuttavat välineiden valintaan. Periaatteessa mittauskäyttöön voidaan tehdä äänityksiä lähes millä tahansa laitteilla, jos vertailtavien soittimien erot vain voidaan kuulla äänitteistä. Hyvillä laitteilla vertailujen teko ja laadullisten tekijöiden havaitseminen on kuitenkin helpompaa ja mittaukset luotettavampia.

Tässä luvussa käsitellään mittauksiin soveltuvia tallennus- ja mittausvälineitä. Painopiste on yleiskäyttöisissä äänityslaitteissa ja ohjelmissa, mutta myös erikoistuneita mittausvälineitä käsitellään. Eniten painoarvoa on annettu mikrofoneille, joiden ominaisuudet ja käyttö vaikuttavat ratkaisevasti mittausmateriaalin laatuun.

### 3.1 Mikrofonit

Mikrofoni on mittauslaitteiston ensimmäinen ja usein eniten äänitteen laatuun vaikuttava laite. Mikrofonien luokitteluperiaatteita ovat muun muassa käyttötarkoitus, toimintaperiaate ja suuntaavuusominaisuudet. Soitinmittauksiin soveltuvat parhaiten joko mittaus- tai studiokäyttöön tarkoitettut mikrofonit. Toimintaperiaatteet voidaan jakaa edelleen sähköiseen ja akustiseen periaatteeseen. Sähköisen toimintaperiaatteen nimityksiä ovat muun muassa *sähköstaattinen*, *sähködynaaminen* ja *sähkömagneettinen*. Mittauskäyttöön soveltuvista mikrofoneista valtaosa on toimintaperiaatteeltaan sähköstaattisia eli kondensaattorimikrofoneja. Sähködynaaminen ja sähkömagneettinen periaate ovat käytännössä synonyymeja. Sellaisia ovat esimerkiksi (liikkuvakelaiset) dynaamiset mikrofonit ja nauhamikrofonit. Akustisia toimintaperiaatteita ovat muun muassa paine- ja painegradienttiperiaate. Akustinen toimintaperiaate vaikuttaa mikrofonin *suuntaavuuteen*. Suuntaavuusominaisuuksia kuvataan ns. suuntakuvion avulla, joka havainnollistaa mikrofonin suhteellista herkkyyttä eri suunnista tuleville ääniaalloille.

Soitinmittauksiin soveltuvalta mikrofonilta toivottavia ominaisuuksia ovat tasainen taajuusvaste, suuri *herkkyys*, pieni *omakohina*, suuri äänenpaineen kesto ja neutraali äänentoisto. Jos mikrofontia käytetään vain yhden soittimen äänittämiseen, kaikkia näitä ominaisuuksia ei välttämättä tarvita. Esimerkiksi suurta äänenpaineen kestoa tarvitaan etupäässä lyömäsoittinten ja joidenkin puhallinsoittimien äänittämisessä.

Mikrofonin taajuusvasteessa ei saisi olla suuria, äkillisiä korostumia tai vaimentumia sillä taajuusalueella, jonka mitattava kohde tuottaa. Esimerkiksi viulun alimman kielen (g) perustaajuus on noin 196-197 Hz. Tätä matalammat taajuudet aiheutuvat jousesta, soittajasta tai ympäristöstä. Korkeimmat taajuudet yltävät yli 20 kilohertsin. Viulun äänen mittaukseen soveltuvan mikrofonin pitäisi siten toistaa mahdollisimman tasaisesti noin 190 hertsiä korkeammat taajuudet. Korkeataajuustoistolle ei voida asettaa kiistatonta riittävää ylärajaa. Jos mittauksen tarkoituksena on keskittyä esimerkiksi tavanomaisten äänentoistolaitteiden välittämään taajuusalueeseen, mittamikrofonin riittävä taajuusalue voi olla esimerkiksi vain 190-10000 Hz.

Herkkä mikrofoni pystyy reagoimaan pieniin äänenpaineen vaihteluihin. Epäherkkä mikrofoni vaatii enemmän sähköistä vahvistusta, mikä lisää ääneen kohinaa. Mikrofonin itsensä tuottaman kohinan eli omakohinan pitäisi olla mahdollisimman pieni varsinkin hiljaisia soitinääniä mitattaessa. Tasainen taajuusvaste on vain yksi neutraalin äänentoiston kriteereistä. Toinen on transienttitoisto, eli kyky toistaa äkillisiä paineen vaihteluja. Hyvä transienttitoisto korreloi osittain hyvän diskanttitoiston kanssa. Transienttien mikrofonissa mahdollisesti synnyttämät jälkivärähtelyt eivät kuitenkaan aina näy taajuusvasteessa, mutta saattavat värittää ääntä, ja vaikuttaa näin äänitystulokseen. Neutraaliin äänentoistoon saattaa myös vaikuttaa muita, vielä tuntemattomia tekijöitä, joille ei ole keksitty määrittely- tai mittauksia.

Soittimien korkealaatuiseen äänittämiseen soveltuvat mikrofonit voidaan jakaa *studiomikrofoneihin* ja *mittamikrofoneihin*. Tämä jako perustuu laitteiden suunnitteluperiaatteiden erojen lisäksi tuotteistukseen ja markkinointiin. Studiomikrofoneja markkinoidaan etupäässä äänitysstudioille, mittamikrofoneja puolestaan tutkimuslaitoksille ja -laboratorioille. Joitakin mittamikrofoneja tosin markkinoidaan myös äänityskäyttöön. Studiomikrofonien suunnitteluun vaikuttavat äänenlaadun ohella muun muassa esteettiset seikat ja liitettävyyden muihin

studiolaitteisiin. Mittamikrofonien suunnittelun lähtökohtana on äänenlaatu sekä liitettävyyden kalibrointi- ja mittalaitteisiin. Molemmissa myös tavoitteena oleva myyntihinta vaikuttaa suunnitteluun.

Nykyaikaiset soitinmittauksiin soveltuvat mittamikrofonit ovat lähes aina kondensaattori- tai elektreettiperiaatteella toimivia painemikrofoneja. Kondensaattorimikrofonin toiminta perustuu ilmanpaineen vaikutuksesta värähtelevän ohuen, sähköä johtavan kalvon ja kiinteän takalevyn välisen etäisyyden muutoksiin, jotka muunnetaan jännitteen vaihteluksi kalvon ja takalevyn välille synnytetyn etujännitteen avulla. Kalvo ja takalevy muodostavat kondensaattorin, jonka kapasitanssi vaihtelee kalvoon kohdistuvan ilmanpaineen vaikutuksesta. Perinteisen kondensaattorin etujännite tuotetaan sisäänrakennetulla tai ulkoisella virtalähteellä. Elektreettimikrofoni vastaa toiminnaltaan kondensaattorimikrofonia, mutta siinä etujännite on varattu staattisesti kalvoon tai takalevyyn. Molemmat mikrofonityypit tarvitsevat lisäksi sisäänrakennetun vahvistimen, jotta kalvoelementin tuottama signaali voidaan siirtää hyvälaatuisena tallennus- tai mittalaitteistolle. Kondensaattorimikrofonien etuina ovat äänellisten ominaisuuksien lisäksi laadun tasaisuus ja stabiilius sekä mekaaninen kestävyys (oikein käsiteltynä).

Painemikrofoni reagoi ilmanpaineen muutoksiin ja on matalilla ja keskitaajuuksilla yhtä herkkä kaikista suunnista tuleville äänialloille. Tällaisen mikrofonin suuntakuvio on pallon muotoinen. Korkeilla taajuuksilla, joilla aallonpituus lähestyy mikrofonin kalvoelementin läpimittaa, painemikrofoni muuttuu kuitenkin suuntaavaksi ja on herkin suoraan kalvon etupuolelta saapuville äänille. Studiomikrofonit voidaan jakaa käyttötarkoituksen perusteella lähikenttä- (engl. near field) ja hajakenttämikrofoneihin (diffuse field). Mittamikrofonit jaotellaan vastaavasti vapaakenttä- (engl. free-field-calibrated) ja painekalibroituhiin (pressure-calibrated) mikrofoneihin ([Nielsen 1994: 77](#)).

Mikrofonityyppien eri luokittelutavat äänitys- ja mittauskäytössä johtuvat eri ammattikuntien omaksumista käytännöistä. Studiokäytössä jaottelua ei kovin yleisesti käytetä (ehkä siksi, että hajakenttämikrofonit ovat siellä suhteellisen harvinaisia). Studiokäytön luokittelu on kuitenkin mielestämme johdonmukaisempi. Esimerkiksi mittauskäytössä painekalibroituja mikrofonia kutsutaan myös pelkästään "(puhtaaksi) painemikrofoniksi" (esim. [Lahti 1997: 22](#)) tai tarkemmin painekenttämikrofoniksi. Nimitys saattaa kuitenkin helposti aiheuttaa sekaannusta puhuttaessa painemikrofonista yleisenä toimintaperiaatteena. Myös vapaakenttämikrofoni on toimintaperiaatteeltaan painemikrofoni.

Lähikenttämikrofonien (ts. vapaakenttämikrofonien) diskanttitoisto on tasaisin suoraan kalvon edestä tulevilla äänillä; korkeat taajuudet vaimenevat sivuilta ja takaa tulevilla äänillä. Lähikenttämikrofoni soveltuu soitinmittauksiin erityisesti lähietäisyyksiltä, ulkoilmassa tai kaiuttomassa huoneessa. Hajakenttämikrofoneissa (ts. painekalibroituissa) korkeita taajuuksia on korostettu joko akustisesti tai sähköisesti siten, että korkeataajuustoiston eri suuntien välinen keskiarvo saadaan tasaiseksi. Taajuusvaste on tasaisin mikrofonin poikittaissuunnasta tulevilla äänillä. Hajakenttämikrofoneja käytetään muun muassa äänityksiin kaikuisissa ympäristöissä, joissa mikrofonit on sijoitettava kauas äänilähteestä (mm. [Bauch 1979](#)), sekä sisämittauksiin kaikuisissa tiloissa ([Lahti 1997: 23](#)). Jotkin painemikrofonit voidaan muuntaa lähi- tai hajakenttäkäyttöön akustisella sovittimella.

Painemikrofoneja käytetään myös äänitysstudioissa, mutta studiokondensaattorimikrofonit ovat yleisemmin ns. painegradienttimikrofoneja, jotka reagoivat kahden pisteen välisiin äänenpaine-eroihin. Painegradienttiperiaatteella voidaan toteuttaa useita eri suuntakuvioita, mikä on äänityskäytössä usein toivottava ominaisuus. Suuntaavalla mikrofonilla voidaan esimerkiksi karsia pääasiallisen äänilähteen signaali liiasta salikaiusta tai muiden äänilähteiden signaalista. Painegradienttimikrofonin suuntakuvio ei kuitenkaan ole samanlainen koko taajuusalueella, vaan esimerkiksi suoraan takaa tai sivusta taajuusvaste voi olla hyvinkin vääristynyt. Painegradienttimikrofonia voidaan käyttää myös mittauksiin suhteellisen kuivassa akustiikassa, jossa mikrofonin sivuilta ja takaa tulevat heijastukset ovat pieniä. Painegradienttimikrofonien äänentoistoon vaikuttaa lisäksi ns. lähiefekti, joka korostaa alle metrin etäisyydellä olevan äänilähteen matalia taajuuksia.

Kaikkia studiomikrofoneja ei ole suunniteltu toistoltaan neutraaleiksi. Monet mikrofonit ovat äänittäjien suosiossa juuri siksi, että ne tuovat äänitteeseen oman sävynsä. Studioissa käytetään paljon esimerkiksi dynaamisia mikrofoneja, jotka värittävät ääntä jo toimintaperiaatteensa vuoksi. Lisäksi jotkin studiokondensaattorimikrofonit värittävät ääntä jopa enemmän kuin neutraaleimmat dynaamiset mallit.

Mittamikrofoneissa kondensaattorikalvon koko määrää suurelta osin mikrofonin käyttötarkoituksen. Ns. isokalvoiset eli

noin 2,5 cm läpimittaisella kalvolla varustetut mittamikrofonit ovat tyypillisesti herkkiä ja pienikohinaisia. Ne soveltuvat erityisesti hiljaisten, matala- ja keskitaajujen äänisignaalien mittaukseen. Pienikalvoiset, esimerkiksi n. 1,25 cm tai pienemmällä kalvolla varustetut mikrofonit kestävät tyypillisesti suuria äänenpaineita ja ovat diskanttitoistoltaan tarkempia. Pienikalvoinen mikrofoni on kuitenkin muuten vastaavaa isokalvoista mikrofonia epäherkempi (ts. vaatii enemmän sähköistä vahvistusta) ja omakohinaltaan suurempi. Pienikalvoista mikrofonia tarvitaan erityisesti mitattaessa yli 20 kilohertsin taajuuksia.

### 3.2 Muut tallennusvälineet

Mikrofonin lisäksi äänimateriaalin tallentamisessa tarvitaan korkealuokkainen mikrofonetuvahvistin, mikrofonin mahdollisesti tarvitsema virtalähde sekä tallennin tai mittalaite. Mikrofonetuvahvistin vahvistaa mikrofonin tuottaman alhaisen vaihtojännitteen tallentimeen sopivalle voimakkuudelle. Mikrofonetuvahvistimia valmistetaan erillislaitteina ja niitä on integroitu miksereihin ja kannettaviin tallentimiin. Kondensaattorimikrofonia käytettäessä tarvitaan myös virtalähde polarisaatiojännitettä ja mikrofonin vahvistinosaa varten. Puolijohde-elektronikalla toteutettujen studiomikrofonien käyttöön on vakiintunut 48 voltin phantom-virtalähde, jollainen on lähes poikkeuksetta sisällytetty studioskäyttöön tehtyihin mikrofonetuvahvistimiin. Phantom-jännite johdetaan virtalähteestä mikrofoniin tavanomaisen tasapainotetun mikrofoniapelin kautta. Erillistä virtalähdettä tarvitsevat studioskäytössä lähinnä vain putkielektronikalla toimivat mikrofonit. Erillistä, paristokäyttöistä virtalähdettä saatetaan myös tarvita kannettavalla äänityskalustolla työskennellessä. Mittamikrofonit saattavat vaatia oman, niitä varten suunnitellun etuvahvistimensa.

Mittauskäytössä yleisimpiä ovat puolijohde-elektronikalla toteutetut vahvistimet. Studiokäytössä varsin yleiset putkietuvahvistimet on usein tarkoituksellisesti suunniteltu ääntä värittäviksi, eivätkä näin ole optimaalisia mittauskäyttöön. Elektronikan toimintaperiaate ei kuitenkaan yksin määrää äänenlaatua. Myös putkielektronikalla on toteutettu neutraalisti soivia etuvahvistimia ja erinomaisia mikrofoneja.

Tallentimien sisäänrakennetut mikrofonetuvahvistimet ovat useissa ammattilaitteissakin heikkolaatuisempia kuin erilliset tai (ammatti)mikseriin sisäänrakennetut mikrofonetuvahvistimet. Heikko laatu ilmenee muun muassa rajoittuneena taajuustoistona ja suurena pohjakohinana. Lisäksi tallentimien etuvahvistimista puuttuu usein phantomsyöttö.

Korkealuokkaisten digitaalisten tallentimien etuina ovat muun muassa merkityksettömän pieni huojunta, yleensä tasainen taajuusvaste, pieni pohjakohina ja stabiilius. Esimerkiksi DAT-nauhuri tai CD-tallennin sopii hyvin äänimateriaalin tallentamiseen kyseisten järjestelmien teoreettisten rajojen puitteissa. Myös laadukas, pakkaamatonta tallennusta käyttävä, kiinteään muistiin tai vaihdettaviin muistikortteihin perustuva tallennin soveltuu tehtävään. Pakkaavaa tallennusta käyttävät digitaalitalentimet, esimerkiksi MiniDisc- tai MP3-tallentimet, ovat ongelmallisempia, koska niissä suuri osa digitaalisesti muunnetusta tiedosta karsitaan tallennusprosessissa. Voidaan kuitenkin myös väittää, että koska äänitteestä hävitetään pääasiassa niitä komponentteja, joita korva ei havaitse, pakkauksesta ei ole suurta haittaa. (Voidaan jopa väittää, että "tarpeettomien" komponenttien karsiminen tekee mittauksen helpommaksi.) Varmempaa on kuitenkin käyttää hävittämätöntä tallennusta. Tarjolla on myös ns. häviöttömiä äänen pakkaustapoja, esimerkiksi Ogg FLAC ja Apple Lossless, joissa digitaalisyys voidaan purkuvaiheessa palauttaa täysin pakkausta edeltävään muotoon.

Digitaalitalentimissa on suositeltavaa käyttää mahdollisimman korkeaa näytteenottotaajuuksia ja bittiresoluutiota, ellei käytännöllisyys aseta rajoituksia. CD-äänilevyllä käytettyä 44,1 kHz:n näytteenottotaajuuksia ja 16 bitin resoluutiota voidaan pitää jonkinlaisena miniminä soitinäänien mittaustyössä. Tällöin korkeataajuustoisto ulottuu noin 20 kHz:iin ja signaali/kvantisointikohinasuhde teoreettisesti korkeintaan 96 dB:iin. DAT-nauhurien 48 kHz:n näytteenottotaajuus tuo äänenlaatuun pienen parannuksen. Uudet 96 kHz:n tai 192 kHz:n ja 24 bitin muunnoksen mahdollistavat tallentimet tarjoavat teoriassa merkittävästi paremman äänenlaadun. Koska mittauskäytössä tarvitaan usein vain lyhyitä ääninäytteitä, suuren resoluution vaatima tallennuskapasiteetti ei välttämättä aseta merkittäviä rajoituksia.

Jos äänitykset tehdään suoraan tietokoneelle, ääniliitäntän ominaisuudet on huomioitava. Tietokoneiden sisäänrakennettujen analogia/digitaalimuuntimien äänenlaatu on usein puutteellinen, joskin se voi olla käyttötarkoitukseen riittävä. Parempaan äänenlaatuun voidaan päästä, jos tietokoneessa on liittimet digitaalisen äänisignaalin sisäänmenolle. Tällöin voidaan muuntimena käyttää erillistä laitetta, esimerkiksi DAT-nauhuria tai



MiniDisc-tallenninta. MiniDisc-tallentimen pakkausalgoritmi ei ole käytössä (ainakaan useimmissa laitteissa), kun ääni ohjataan tietokoneeseen suoraan tallentimen muuntimista. Yhtenä vaihtoehtona on myös ulkoisen USB- tai FireWire-liitäntäisen muuntimen käyttö. Näistä monissa on myös hyvälaatuinen mikrofonietuvahvistin ja phantomsyöttö.

Analogisten tallennusvälineiden ongelmana on herkkyys säätömuutosten, likaantumisen ja kulumisen aiheuttamille äänenlaadun muutoksille. Esimerkiksi C-kasettinauhuri on hyvin herkkä näille tekijöille. Korkealuokkaiset ammattikelanauhurit ovat hyvin huollettuina käyttökelpoisempia. Jos tallennuksessa käytetään analoginauhuria, se pitäisi puhdistaa ja säätää ennen mittaustapahtumaa. Lisäksi äänimateriaali kannattaa siirtää mittausvälineistöön, esimerkiksi tietokoneelle, mahdollisimman pian äänittämisen jälkeen, jotta nauhurin säädöt eivät ehdi muuttua.

Äänitteet on lopuksi siirrettävä mittausvälineistöön, esimerkiksi tietokoneelle. Siirto vaatii tietokoneelta digitaalista tai hyvälaatuista analogista ääniliitäntää sekä takoitukseen soveltuvaa äänitysohjelmaa. Jos äänitteet on tehty ääni-CD-tallentimella, ne voidaan nykyaikaisilla tietokoneilla siirtää suoraan CD-ROM-asemasta kovalevylle. Tällöin tietokoneiden ääniliitäntöjen ominaisuuksilla ei ole merkitystä.

### 3.3 Mittausohjelmat

Ihanteellinen mittausohjelma on juuri kyseiseen käyttötarkoitukseen räätälöity ja mahdollisimman pitkälle automatisoitu. Kovin erikoistuneeseen mittaustehtävään on kuitenkin harvoin tarjolla valmista ohjelmaa, joten käytännössä joudutaan useimmin turvautumaan kompromissiin muokattavuuden ja helppokäyttöisyyden välillä.

Mittauksiin soveltuvat tietokoneohjelmat voidaan jakaa karkeasti kolmeen luokkaan:

1. erikoistuneet mittausohjelmat
2. yleiskäyttöiset äänenkäsittelyohjelmat
3. ohjelmointikieliet

Erikoistuneet mittausohjelmat on tarkoitettu etupäässä pelkästään mittauskäyttöön. Lisäksi ne on usein tarkoitettu jonkin tietyn tieteenalan, esimerkiksi akustiikan tai fonetiikan mittauksiin. Yleiskäyttöiset äänenkäsittelyohjelmat on tarkoitettu äänen muokkaukseen, mutta monet niistä sisältävät myös spektrianalyysitoimintoja ja muita äänitiedon visualisointiin soveltuvia välineitä. Ohjelmointikieliet voidaan jakaa yleiskäyttöisiin ja erikoistuneisiin kieliin. Erikoistuneita kieliä on kehitetty muun muassa matemaattiseen ja logiikkapohjaiseen tietojenkäsittelyyn. Koska Fourier-analyysi on yksi matematiikan perustekniikoista, monet matemaattiset ohjelmointikieliet, esimerkiksi Mathworksin Matlab ja Wolfram Researchin kehittämä Mathematica sisältävät Fourier-muunnosfunktioita ja monipuolisia graafisten kuvaajien tulostusmahdollisuuksia. Myös moniin yleiskäyttöisiin ohjelmointikieliin on saatavissa valmiita Fourier-muunnostoteutuksia.

Vuorovaikutteisten äänenmuokkausohjelmien etuina ovat helppo omaksuttavuus ja kokeilujen helppous. Toisaalta graafisten kuvaajien muokkaus- ja tulostusmahdollisuudet ovat usein heikot. Vuorovaikutteisten ohjelmien käyttö on pitkälti käsityötä, joten usein toistettavat, samanlaiset työvaiheet vaativat työaikaa ja lisäävät virhemahdollisuuksia.

Yleiskäyttöisten ohjelmointikielten etuina ovat suuri muokattavuus ja automatisointimahdollisuudet. Haittapuolena on korkea aloituskynnys, koska ohjelmointikielen opettelu vaatii vaivannäköä ja mittaussovelluksen kehitysvaiheessa työmäärä on suuri. Myös erikoistuneet matemaattiset ohjelmointikieliet vaativat opettelua, mutta itse mittaussovellusten kehittäminen on usein helpompaa kuin yleiskäyttöisillä kielillä. Monien matemaattisten ohjelmien haittapuolena on korkea hinta, koska ne on usein suunnattu ammattikäyttöön. Korkealuokkasia ilmaisohjelmia on kuitenkin saatavilla. Myös kaupallisista ohjelmista on saatavissa ominaisuuksiltaan tai käyttötarkoituksiltaan rajoitettuja huokeita opiskelija- tai oppilaitosversioita.

Soitinmittauksissa mitattavaa äänimateriaalia ja tulosteita kertyy usein runsaasti, joten käsityön määrä pitäisi pystyä minimoimaan. Tällöin on perusteltua käyttää ohjelmaa, jolla työtä voidaan automatisoida, vaikka alkuvaiheessa tarvittaisiin enemmän opettelua tai omaa ohjelmointityötä. Lisäksi tiedon määrän hallintaa on syytä systematisoida muun muassa tiedostojen organisoimalla, nimeämällä ja kirjanpidon osalta.

[\[seuraava luku\]](#) [\[edellinen luku\]](#) [\[sisällysluettelo\]](#)

[\[seuraava luku\]](#) [\[edellinen luku\]](#) [\[sisällysluettelo\]](#)

---

## 4 Äänimateriaalin kerääminen ja hallinnointi

### 4.1 Välineistön valinta

Välineistön valinnassa keskeisenä tekijänä on äänitteiden vertailukelpoisuus. Eri kerroilla samoilla laitteilla tehdyt äänitteet ovat paremmin vertailukelpoisia kuin eri laitteilla tehdyt. Tällöin laitteiden helppo saatavuus saattaa olla tärkeämpi valintakriteeri kuin esimerkiksi äänenlaatu.

Jos äänimateriaalia kerätään johdonmukaisesti samalla äänitystekniikalla, voi materiaalista muodostua laaja käyttökelpoinen vertailuaineisto. Jos äänityslaitteistoa puolestaan päivitetään jatkuvasti parhaan äänenlaadullisen tuloksen saavuttamiseksi, ei vanhemman materiaalin keräämiseen käytetylle työlle kerry lisäarvoa. Myös uuden materiaalin käyttökelpoisuus pienenee, kun vertailumahdollisuus aiempaan materiaaliin menetetään.

Laitteiston päivittäminen on usein kuitenkin perusteltua. Yksi ratkaisu voi tällöin olla käyttää vanhaa laitteistoa rinnakkain uuden kanssa. Samalla voidaan saada vertailutietoa myös laitteistojen eroista.

### 4.2 Akustiikka ja äänimateriaali

Äänitystilanteessa soittajan suoritukseen vaikuttavat psykologiset tekijät on huomioitava. Stressiä aiheuttavia ja näin ollen äänitteiden edustavuutta vaarantavia tekijöitä ovat muun muassa epämukava tai epäluonnollinen äänitystilasto ja väsyttävä, mekaaninen musiikkimateriaali. Vaikka kaiuton huone on periaatteessa ihanteellinen soitinäänten akustiikasta riippumattomaan mittaukseen, muusikko kokee kaiuttoman huoneen kuitenkin helposti painostavana ja epämukavana. Hän ei saa totuttua akustista palautetta soitostaan. Tämä saattaa merkittävästi vaikuttaa soittajan äänenmuodostukseen.

Akustiset soittimet on suunniteltu ja rakennettu soimaan kaikuisassa ympäristössä; esimerkiksi modernit länsimaiset orkesterisoittimet on kehitetty konserttisalikäyttöön. Huoneakustiikan vaikutus äänenlaatuun on huomattu myös äänentoistolaitteiden, erityisesti kaiuttimien suunnittelussa ja testauksessa. Siinä on havaittu, että kaiuttomassa huoneessa tehty mittaus ei kuvaa laitteen sointia luonnollisessa huonetilassa. Esimerkiksi kaksi eri tavalla ääntä suuntaavaa kaiutinta voi soida kaiuttomassa huoneessa samalla tavalla, mutta kuulostaa huonetilassa erilaisilta.

Toisaalta hyvin kaikuisissa, erityisesti pienissä huonetiloissa akustiikan osuus kasvaa niin suureksi, etteivät eri paikoissa tehdyt mittaukset ole vertailukelpoisia. Ihanteellinen tila on kompromissi, jossa kaikuisuuden määrä saattaa riippua myös soitintyyppistä. Huonetilan kaiku voidaan jakaa kahteen osaan: aikaisiin heijastuksiin ja hajakaikuun. Aikaiset heijastukset tulevat suoraan sopivassa kulmassa äänilähteeseen ja kuuntelupaikkaan nähden olevista ääntä heijastavista pinnoista. Hajakaiussa ääni saapuu kuuntelupaikkaan monen heijastuksen kautta.

Aikaiset, läheltä äänilähdettä tai kuuntelupaikkaa tulevat voimakkaat aikaiset heijastukset värittävät ääntä voimakkaasti. Hyvän konserttisalin hajakaiku puolestaan lähestyy spektriltään valkoista kohinaa ([Moorer 1979](#)), eikä näin ollen merkittävästi vääristä äänilähteen taajuusvastetta. Soittajalle myös aikaiset heijastukset ovat kuitenkin tärkeitä nopean palautteen saamiseksi. Toisaalta monissa soittimissa esiintymislavan lattiasta katsomoon tuleva aikainen heijastus on olennainen osa soittimen kokonaisuutta. Tällöin soivaan lopputulokseen vaikuttaa soittimen ohella lavan rakenne ja lattiamateriaali sekä soittajan sijoittuminen.

Edellisen perusteella voidaan väittää, että optimaalinen paikka soitinäänten mittauksille on hyvä konserttisali, josta aikaiset heijastukset, tai osa niistä, on vaimennettu tai suunnattu pois soittimen ja mikrofonin väliltä. Toinen ratkaisu on käyttää huonetta, joka on sisustettu ääntä mikrofonin puolelta absorboivilla ja toiselta puolelta heijastavilla väliseinillä. Niillä aikaisia heijastuksia voidaan vaimentaa vaimentamatta jälkikaikua kokonaan.

Kaiuttomassa huoneessa soittimen suuntaavuus voidaan huomioida esimerkiksi äänittämällä samanaikaisesti kahdella tai useammalla mikrofonilla soittimen eri puolilta ja laskea äänikanavista erikseen tehdyistä analyyseistä painotettu

keskiarvo, jossa painotetaan suoraan edestä tai yläviistosta saatua spektriä. Soittajan kaipaamaa jälkikaikua voidaan simuloida kaikulaitteen ja kuulokkeiden avulla. Tällainen järjestely ei kuitenkaan tunnu soittajasta luontevalta tai mukavalta.

Soittajan väsymisen välttämiseksi äänimateriaali tulisi pitää suppeana. Eri soittimia vertailtaessa yhden soittimen äänittämiseen tulisi käyttää vain muutamia minuutteja. Toisaalta soittajalle pitää antaa aikaa totutella soittimeen ilman esiintymispainetta. Kaiken kaikkiaan soittajan olo tulee tehdä mahdollisimman mukavaksi. Soittajalle tulee myös etukäteen selvittää, mihin äänitteitä ja mittausmateriaalia käytetään ja mihin niitä ei käytetä. Jos tarkoituksena on yksinomaan testata soittimen sointia, musiikin tulkinnan puutteet eivät ole merkityksellisiä. Tällöin soittajalle on kuitenkin selvitettävä, kenelle ja missä yhteydessä äänityksiä soitetaan.

Mittauskäyttöön teytyjen äänitteiden yhteydessä voidaan kerätä materiaalia myös kuuntelutestiä varten. Lyhyen musiikkikappaleen soittaminen auttaa myös soittajaa totuttelemaan äänitystilanteeseen ja uuteen soittimeen.

### 4.3 Mikrofonien sijoittelu

Mikrofonien sijoitus on kriittinen tekijä erityisesti, jos äänitystä ei tehdä kaiuttomassa huoneessa tai muuten kontrolloidussa akustiikassa. Suuri äänilähteen ja mikrofonin välinen etäisyys lisää huoneakustiikan osuutta. Jos aikaiset heijastukset halutaan minimoida, mikrofoni olisi sijoitettava mahdollisimman kauas ääntä heijastavista pinnoista. Toisaalta kovin lähelle soitinta sijoitettuna mikrofoni saattaa poimia vain osan soittimen eri suuntiin säteilemistä äänistä. Painegradienttimikrofonia käytettäessä myös lähiefekti on otettava huomioon. Painegradienttimikrofonin suositeltava vähimmäisetäisyys on siten noin 1 metri. Korkeussuunnassa mikrofonin sijoitusta rajoittavat ääntä heijastavat katto- ja lattiapinnat. Korkeassa huonetilassa ihanteellinen sijoitus on usein yläviistossa soittimesta nähden.

Koska esimerkiksi jousisoittimet säteilevät ääntä eri suuntiin hyvin eri tavoin, mikrofonin sijoituksen vaikutusta on hyvä testata spektrogrammien avulla. Käytännöllinen ratkaisu on tehdä stereoäänite kahdella toisistaan erilleen asetettulla mikrofonilla ja verrata eri kanavien spektrogrammeja toisiinsa. Jos kanavien spektrogrammit poikkeavat olennaisesti toisistaan, voidaan kuvaajien tulkinnassa välttyä tekemästä liian pitkälle meneviä johtopäätöksiä.

### 4.4 Dokumentointi ja materiaalin organisointi

Toistettavuuden mahdollistamiseksi äänityssessio on dokumentoitava yksityiskohtaisesti. Soittimesta on kirjattava ylös yksilön tunnistetiedot, käytetty jousi, kielisarja ja mahdolliset edellisen mittauksen jälkeen tehdyt tai tapahtuneet muutokset. Mittauspaikasta ja välineistöstä on kirjattava soittajan ja mikrofonien sijoittelu (korkeus, suunta ja etäisyys soittimesta). Myös käytetty laitteisto on luetteloitava laiteyksilöiden tunnistetiedoin. Esimerkiksi mikrofoniyksilöissä voi olla huomattavia sointieroja.

Musiikkiäänityssession dokumentaatioon on studiotyöskentelyssä vakiintunut käytäntöjä, joita voidaan soveltaa myös mittausmateriaalin keruussa (mm. [Parsons 1992](#)). Kirjallisen dokumentaation lisäksi dokumentaatiotiedot voidaan kuuluttaa äänitteelle, jolloin ne pysyvät automaattisesti äänimateriaalin mukana.

Kun äänimateriaali siirretään tietokoneelle ja järjestetään huolellisesti, saadaan tehokas ja monipuolinen tietokanta. Esimerkiksi kuunteluvierailutesti on helppo tehdä tietokoneella, jos materiaali on järjestetty ja käsitelty siten, että eri äänitteiden välillä voidaan tehdä nopeita vertailuja.

Käytännössä organisointityötä rajoittaa usein tutkijan viitseliäisyys. Työssä olisi pyrittävä siihen, että tarvittava dokumentaatio voidaan tehdä ja syöttää tietokoneelle nopeasti ja vaivattomasti. Esimerkiksi systemaattisella tiedostojen nimeämisellä ja hakemistohierarkialla voidaan helpottaa äänitteiden tunnistamista ja vähentää dokumentaatiotekstin määrää. Tämän artikkelin ääniesimerkkien tiedoston nimiin on koodattu äänityspäivä sekä äänitteen, oton ja äänityskanavan tai editointiversion numerot.

---

[\[seuraava luku\]](#) [\[edellinen luku\]](#) [\[sisällysluettelo\]](#)

[\[seuraava luku\]](#) [\[edellinen luku\]](#) [\[sisällysluettelo\]](#)

---

## 5 Aineiston tulkinta

Mittauksessa tulostettujen kuvaajien tulkinnassa on huomioitava spektrianalyysimenetelmän ominaisuudet ja parametrien vaikutukset. Lisäksi on tiedettävä tai mittausten kautta opeteltava mitattavan soittimen äänelliset ominaispiirteet ja äänenmuodostusperiaate. Lisäksi on tiedettävä, millaisen musiikkimateriaalin soittamiseen instrumentti on tarkoitettu. Kuuntelutesti on keskeinen osa soitinäänen arviointiprosessia. Se voidaan suorittaa joko spektrianalyysikuvaajien tulkinnan jälkeen tai rinnan sen kanssa.

Mittauksia tulkittaessa on määriteltävä, pyritäänkö analysoimaan äänen fysikaalista rakennetta vai oletettua ihmisen äänihavaintoa. Edellisessä näkökulmassa voidaan käyttää spektrianalyysien graafisia kuvaajia sellaisenaan. Jälkimmäisessä on otettava huomioon kuulopsykologiset tekijät, mikä saattaa edellyttää spektrianalyysien jatkosäilytystä ennen kuvaajien tulostamista.

Monissa spektrianalyysia hyödyntävissä soitintutkimuksissa kuvaajat on esitetty sellaisenaan ilman sanallista tulkintaa. Ulkopuoliselle lukijalle, tai välttämättä tutkijalle itselleenkin pelkät kuvaajat eivät kerro äänestä välttämättä juuri mitään merkittävää. Syynä tulkinnan puuttumiselle voi olla esimerkiksi spektrianalyysimenetelmien uutuus tai tietämättömyys instrumentin äänenlaatuun vaikuttavista tekijöistä. Soittimien äänenlaatua käsittelevää relevanttia tutkimustietoa on julkaistu varsin vähän. Esimerkiksi akustiikan tai soitinmallinnuksen tutkimuksessa on keskitytty tyypillisen tietyn soitintyyppin äänen rakenteen tai äänenmuodostuksen selvittämiseen. Tätä jousisoittintutkimusta on innoittanut kysymys, mikä tekee "hyvän" soitinäänen ja millä hyvä soitin voidaan objektiivisesti erottaa huonosta.

### 5.1 Soittimen arviointi

Soittimien kehitys saa alkunsa yleensä tarpeesta toteuttaa uudenlainen musiikillinen äänitapahtuma. Mikäli olemassa oleva soitin ei tarvetta täytä, sitä parannetaan tai muutetaan. Jousisoittimien, erityisesti viulujen, kehitys nykyiseen muotoonsa tapahtui 1600-luvulla. Ei ole löydetty varmaa vastausta siihen, miksi kehitystyötä ei ole sen jälkeen jatkettu samaan tapaan kuin esimerkiksi puhaltimien yhteydessä. Joidenkin vanhojen italialaisten viulujen ääntä pidetään edelleen laadultaan ylittämättömänä. Kyseiset soittimet antavat samalla perustan uudempien soittimien kehittämiseksi ja arvioinnille.

Korkealuokkaisen soitinrakennuksen lähtökohtana ei kuitenkaan voi olla vain jonkin hyväksi tunnetun soittimen kopiointi, vaan parhaan mahdollisen soittimen valmistaminen sillä hetkellä vallitseviin olosuhteisiin. Sitä tarkoitusta varten tulisi määritellä ääni-ihanne, joka tarjoaa parhaat edellytykset soittajan työlle. Ääni-ihannetta ja sen määrittelyssä käytettävää kriteeristöä tarvitaan myös olemassa olevien soittimien arvioinnissa.

Lähtökohtia ääni-ihanteen määrittelyyn ovat esimerkiksi:

1. soitinakustiikan teoreettinen tutkimus
2. soitinmallinnuksella rakennettu ihanteellinen soitinääni
3. hyvistä ja huonoista soittimista koottu vertailuaineisto
4. hypoteettinen ideaali soitinääni

Soitinakustiikan teoreettinen tutkimus antaa joitakin lähtökohtia. Julkaistut teoreettiset tutkimukset saattavat sisältää kuitenkin virheellisiä olettamuksia, jotka johtuvat keskinkertaisten soittimien äänen perusteella tehdyistä yleistyksistä. Tutkimuksiin on siksi suhtauduttava varauksellisesti.

Soitinmallinnuksella eli soittimen äänen tuottomekanismin laskennallisilla malleilla on saatu vaihtelevia tuloksia. Uskottavimmat lopputulokset on saavutettu puhallinsoittimilla. Kaikukopallisten soittimien täydellinen laskennallinen mallintaminen on sen sijaan osoittautunut työlääksi. Käytännössä useimmissa soitinmalleissa on äänenlaadun maksimoiminen sijaan keskitytty laskentatehon optimointiin, jotta malli olisi toteutettavissa reaaliaikaisella laskennalla. Soitinmallien tutkimus voi kuitenkin tarjota varteenotettavan ja konkreettisen apuvälineen sointi-ihanteen määrittelyyn.

Olemassa olevista soittimista koottu aineisto on varmin tapa sointi-ihanteen muodostamiseen. Käytännössä menetelmä on kuitenkin työläs. Ongelmana on erityisesti huippusoitinyksilöiden saatavuus. Lisäksi soitinäänen kehittämistarve saattaa jäädä huomioimatta.

Hypoteettinen sointi-ihanne voidaan muodostaa esimerkiksi korkealuokkaisten äänentallennus- ja toistolaitteiden kriteeristön ja mittaustekniikan pohjalta. Tulos on abstrakti, mutta sitä voidaan käyttää täydentämään muita, edellä mainittuja lähtökohtia.

Yksi keskeisistä kysymyksistä on, miten määritellään virheellinen ja virheetön ääni. Virheellinen ääni voi kuulua esimerkiksi äänen muista poikkeavana sointivärinä tai voimakkuutena. Graafisessa kuvauksessa virhe näkyy esimerkiksi osäsävelsarjan joidenkin sävelien heikkoutena tai voimakkuutena viereisten suhteen tai osäsävelien syttymistapojen erilaisuutena.

Virheettömän, "neutraalin" äänen tunnusmerkkejä ovat äänen tasainen taajuusvaste koko sointialueella, yksittäisten äänien yläsävelsarjan tasaisuus ja samantapainen muodostuminen kaikilla kielillä. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että viulun äänessä ei ole formantteja eli korostumia millään taajuudella. Käytännössä näin ei kuitenkaan koskaan ole. Jotkut huippusoittimet ovat jopa tunnettuja äänensä yksilöllisestä väristään, "timbrestään". Myös joidenkin erinomaisten viulujen äänen taajuusvaste voi olla hyvinkin epätasainen.

Yhteistä erityisen hyvien viulujen äänelle on soittimien tapa synnyttää korkeisiin taajuuksiin ulottuva rikas ja nopeasti syttyvä yläsävelsarja. Nopeaa äänen syttyvyyttä tarvitaan soitettaessa nopeita sävelkulkuja, 10-15 ääntä sekunnissa. Mikäli yläsävelet eivät syty nopeasti, muuttuvat äänen väri ja voimakkuus. Yläsävelsarjaan sisältyvä epäharmonisuus antaa äänelle "rikkaan" ja pehmeän soinnin. Korkealle ulottuva yläsävelsarja lisää myös soittimen äänen voimakkuutta ja dynamiikkaa siihen sisältyvän äänienergian vuoksi.

Soittimen laatuun ja sopivuuteen soittajalle vaikuttavat äänen lisäksi soitettavuus eli mekaaninen toimivuus, soittimen mitat ja yleensäkin ergonomia. Joidenkin vanhojen jousisoittimien patinoituneisuus ja ulkonäkö saattavat innostaa soittajaa psyykkistä kautta parempaan suoritukseen. Näin soittimen mekaaniset ja visuaaliset ominaisuudet saattavat siirtyä myös mittaustuloksiin.

## 5.2 Fourier-analyysikuvaajien ominaisuudet

Mielivaltaisesta signaalista tehty Fourier-analyysi jakaa taajuuskaistan osiin tasavälein taajuuden mukaan. Jos signaalin näyteenottotaajuus on esimerkiksi CD-järjestelmässä käytetty 44100 Hz ja Fourier-analyysin erottelutarkkuus on 1024 kaistaa eli *pistettä*, kaistojen väli on 44100 Hz/1024 eli noin 43 Hz. Aikaikkunan pituus ajassa on tällöin 1024/44100 Hz eli n. 23 millisekuntia. Jos taajuusresoluutiota halutaan kasvattaa, aikaikkunan pituus kasvaa vastaavasti. Tällöin taajuusesityksen tarkkuus paranee kuitenkin vain, jos signaalissa ei tapahdu taajuuden muutoksia, esimerkiksi vibratoa tai glissandoa. Samoin aikaikkunan sisällä tapahtuvat amplitudimuutokset pyöristyvät. Syynä tähän on, että Fourier-analyysi mittaa taajuuskaistan keskimääräistä amplitudia.

Mielivaltaista signaalia analysoitaessa äänen yläsävelet eivät todennäköisesti osu täsmällisesti Fourier-pisteiden keskitaajuuksien kohdalle vaan johonkin kahden vierekkäisen pisteen väliin. Tämä näkyy taajuuskuvaajassa siten, että amplitudikuvaajassa on kohoama yläsävelen taajuuden ympäristössä kahden tai useamman vierekkäisen pisteen kohdalla. Leveä kohoama viittaa siihen, että taajuudessa saattaa tapahtua pieniä muutoksia aikaikkunan alueella. Osa taajuustason "vuodoista" viereisille kaistoille johtuu myös itse aikaikkunoinnista ja painotusikkunan muodosta. Taajuustason tarkkuutta voidaan lisätä esimerkiksi sovittamalla aikaikkuna täsmällisesti äänen perustaajuuden aallonpituuden jonkin kerrannaisen mittaiseksi. Tällöin perustaajuus on tiedettävä tai mitattava ennalta. Yläsävelten täsmällisemmät taajuudet voidaan myös laskea Fourier-analyysissa saatavan vaihetiedon avulla ([Moore 1990: 246-247](#)). Usein pelkkä amplituditiedosta tulostettu spektrogrammi, jonka Fourier-pisteiden määrä sekä ikkunan pituus ja muoto haetaan kokeilemalla, on kuitenkin riittävä äänen rakenteen kuvaamiseksi.

## 5.3 Soitinäänten spektrianalyysitutkimuksia

1960-luvulla Jean-Claude Risset tutki trumpetin äänen rakennetta lyhytaikaisen Fourier-analyysin avulla. Hän sai selville, että vastoin perinteistä helmholtzilaista näkemystä jokaisella yläsävelellä on oma yksilöllinen verhokäyrä ([Dodge ja Jerse 1985: 56-60](#)). Saman ilmiön oli tosin jo aiemmin havainnut Fletcher analogisilla mittausvälineillä ([Fletcher ym. 1962](#)). 1970-luvulla Moorer ja Grey keräsivät korpuksen eri instrumenttien analysoiduista äänistä. Sittenkin lyhytaikaisesta Fourier-analyysistä on tullut keskeinen apuväline muun muassa soitinmallinnuksen tutkimuksessa.

Soitinäänten uudelleensynteesiä käsittelevässä tutkimuksessaan McAdams, Beauchamp ja Menegucchi ([1999](#)) selvittivät siniaaltomallinnuksen avulla spektrin eri osa-alueiden merkitystä äänten tunnistettavuuteen. Tutkimukseen sisältyi koehenkilöille tehty vertailutesti aitojen ja vastaavien synteettisesti tuotettujen yksinkertaistettujen soitinäänten välillä. Lähtökohtana olivat Greyn ja Moorerin sekä Charbonneun aiemmat tutkimukset. Vaikka näiden tutkimusten tavoitteena oli kartoittaa äänisynteesissä käytettäviä parametreja, ne tarjoavat analyttisiä lähtökohtia myös soitinäänten laadulliselle arvioinnille.

McAdamsin tutkimusryhmä luokitteli joukon spektrin osatekijöitä, joita pyöristämällä (mm. laskemalla keskiarvoja vierekäisten yläsävelten amplitudiarvoista) pyrittiin vähentämään parametritiedon määrää. Tutkijat jakoivat ajassa muuttuvan spektrin kuuteen eri osatekijään, joiden pyöristettyjä uudelleensyntetisoituja versioita verrattiin erikseen ja eri yhdistelminä alkuperäiseen ääneen koehenkilöille tehdyssä kuuntelutestissä. Tutkimuksessa käytettiin seitsemän eri instrumentin ääniä.

Tutkimuksen käyttökelpoisuutta vähentää, että kaikkien parametrien pyöristämistä ei ulotettu äänten alukkeisiin. Ilmeisenä syynä on, että tutkijat pitivät aluketta olennaisena tunnistettavuuteen vaikuttavana osana, jota ei pidetty otollisena kohteena tiedon määrän vähentämiselle. Soitinäänen kokonaisverhokäyrä, erityisesti alukkeen muoto vaikuttaa merkittävästi äänen tunnistettavuuteen.

Tunnistuskokeessa eri osatekijöiden merkitys vaihteli eri instrumenteilla, mutta yleisesti ottaen kaikilla osatekijöillä oli vaikutusta tunnistettavuuteen ainakin siinä määrin, ettei mitään kaikille instrumenteille yhteistä osatekijää voida supistaa pois. Näin ollen spektrianalyysien esikäsittelyyn ei ainakaan McAdamsin ryhmän tutkimuksen pohjalta voida kehittää yleispätevää menetelmää, jolla spektrianalyysistä voitaisiin suodattaa tai pyöristää merkityksettömät tekijät. McAdamsin tutkimuksen perusteella voidaan sen sijaan olettaa, että paitsi soitinäänen alukkeen muodolla, myös sen spektrissä tapahtuvilla muutoksilla on olennainen vaikutus soittimen äänenlaatuun.

## 5.4 Kuulopsykologiset tekijät

Kuulopsykologisten tekijöiden tuntemus on avuksi eroteltaessa kuulon kannalta merkityksellisiä äänen komponentteja merkityksettömistä. Samalla voidaan välttyä tekemästä mittauksista vääriä johtopäätöksiä. Huomioitavia seikkoja ovat muun muassa äänenkorkeuden ja sävyn havaisemistapa. Näihin liittyviä tekijöitä ovat ns. kriittinen kaista ja peittoilmiö.

Peittoilmiössä amplitudiltaan voimakkaat komponentit peittävät lähistössään taajuus- tai aika-alueella olevia heikkoja komponentteja kuulumattomiin. Tästä voidaan päätellä esimerkiksi, että kahden voimakkaan yläsävelen välissä olevilla taajuuksilla mahdollisesti esiintyvä heikkotasoinen värähtely ei ole kuultavissa ja voidaan näin periaatteessa jättää huomiotta.

Peittoilmiö liittyy ns. kriittisen kaistan käsitteeseen. Korva erottaa esimerkiksi kaksi siniääntä erillisiksi ääniksi, jos ne ovat taajuuksiltaan riittävän etäällä toisistaan. Tätä etäisyyttä, joka on yli 1 kHz:n taajuuksilla noin 1/3 oktaavia, nimitetään kriittiseksi kaistaksi ([Mathews 1999a: 9](#), [Pierce 1999b: 168](#)). Kuulo sekoittaa samalla kriittisellä kaistalla olevat, yhtä voimakkaat siniäännet yhdeksi siniääneksi, jonka äänenvoimakkuus tai taajuus huojuu jaksottaisesti ([Mathews 1999a: 8](#)). Merkittävästi voimakkaampi siniääni kuitenkin peittää hiljaisemmat samalla kriittisellä kaistalla olevat äänekset. Tällöin kyseessä on peittoilmiö.

Max Mathewsin ([1999b](#)) mukaan harmonisten yläsävelten koetaan tuovan "karkeutta" tai "kovuutta" äänensävyyn silloin kun ne sijoittuvat samalle kriittiselle kaistalle. Mathews totesi, että karkeutta voidaan vähentää poistamalla osa korkeista yläsävelistä, jolloin yläsävelsarjaan syntyy "aukkoja". Mathews totesi myös, että esimerkiksi viulun kaikukopan formantit vaikuttavat ääneen samankaltaisesti. Kyseessä on kuitenkin vain hypoteesi, sillä Mathewsin

ääniesimerkit havainnollistavat ilmiötä varsin huonosti. Fletcher (1962) puolestaan tutki kielisoittimille ominaista yläsävelsarjan epäharmonisuutta ja totesi epäharmonisuuden, ts. korkeiden yläsävelten ylävireisyyden, tuovan ääneen "lämpöä" verrattuna täysin harmoniseen yläsävelsarjaan. Mathewsin ja Fletcherin tutkimusten perusteella voidaan olettaa, joskin varauksin, että voimakkuudeltaan tasainen tai tasaisesti korkeita taajuuksia kohti laskeva täysin harmoninen yläsävelsarja koetaan kovana, ehkä rasittavana. Sitä vastoin epäharmonisuus on kovuutta vähentävä tekijä.

Kolmas merkittävä tekijä on ihmisen tapa havaita matala- ja korkeataajuuksisia värähtelyjä keskenään eri tavoin. Kuulo on matalilla taajuuksilla tarkempi taajuuden vaihteluille ja korkeilla taajuuksilla nopeille ajassa tapahtuville muutoksille eli transienteille. Tästä voidaan päätellä, että kuvaajien matalilla taajuuksilla, äänitapahtuman harmonisella yläsävelrakenteella on tärkeä rooli kun taas korkeilla taajuuksilla esimerkiksi äänen syttymisnopeus on merkittävämpi tekijä kuin osasävelten käyttäytyminen taajuuden suhteen.

Neljäs huomioitava tekijä on säveltason havaitsemistapa. Kuulo päättelee akustisen soitinäänen säveltason yleisimmin yläsävelsarjan, eikä sävelen perustaajuuden perusteella. Säveltason tulkinta ei siten edellytä varsinaisen perustaajuuden olemassaoloa (Pierce 1999a: 58-60). Varsinkin alimmilla säveltasoiltaan monet soittimet eivät tuota kuultavaa perustaajuutta tai tuottavat sen hyvin vaimeana. Siksi myöskään graafisten spektrogrammien tulkinnassa säveltasoa ei määrää alin näkyvässä oleva taajuuskomponentti. Sen sijaan äänenkorkeus voidaan määrittää esimerkiksi mittaamalla kahden vierekkäisen yläsävelen taajuuksien erotus.

Kuulopsykologisia tekijöitä voitaisiin mahdollisesti käyttää apuna automaattisia tulkintamenetelmiä kehitettäessä tai kuvaajien esikäsittelyssä. Eräs mahdollinen esikäsittelytapa on siniaaltomallinnus. Sitä on jo käytetty kuulopsykologisten mallien kanssa äänenpakkausmenetelmien kehittämisessä.

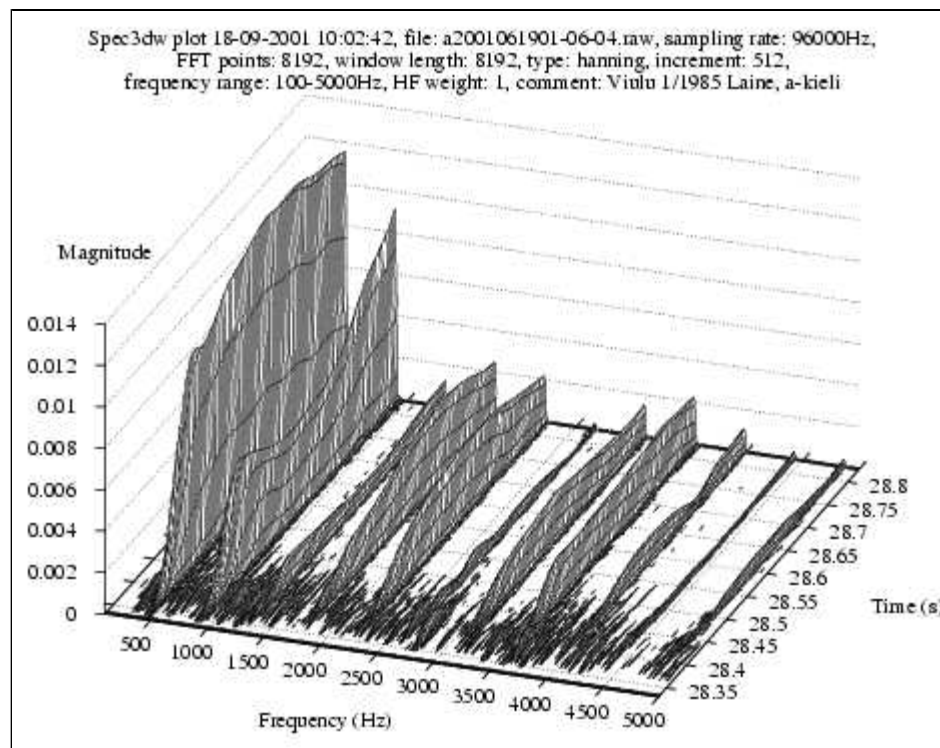
## 5.5 Tulkintaesimerkkejä

Kuvaajien tulkinnassa on huomioitava, että ne ovat dokumentteja tallennetusta äänestä, missä ovat mukana kaikki tallennukseen liittyvät osatekijät. Kuvaajista näkyvät helposti esimerkiksi sointivirheet, mutta niistä ei välttämättä ole helppo päätellä, mistä virhe johtuu. Vasta kokemus auttaa analysoimaan kuvaajiin sisältyvää suurta tietomäärää. Seuraavassa esimerkissä tarkastellaan viulun (1/1985 Laine) a-kielestä tehtyjä kuvaajia, jotka kaikki on tulostettu samasta äänitteestä.

Kuvaajista voi selvittää,

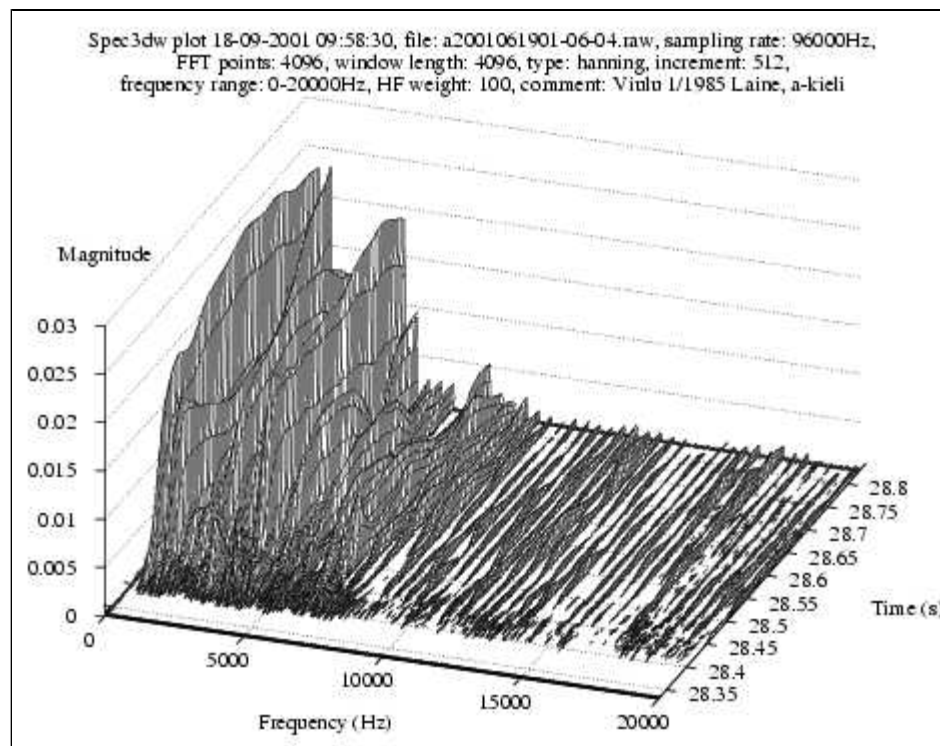
1. mikä on osasävelien voimakkuuksien ero,
2. minkälainen on osasävelien syttymistapa,
3. mikä on osasävelien syttymisaikojen ero,
4. kuinka korkealle osasävelsarja ulottuu,
5. onko osasävelillä jaksottaista voimakkuusvaihtelua sekä
6. onko havaittavissa selviä sointivirheitä tai säröä.





Kuva 5.1: Viulun a-kielen kuvaaja taajuusalueella 100-5000 Hz

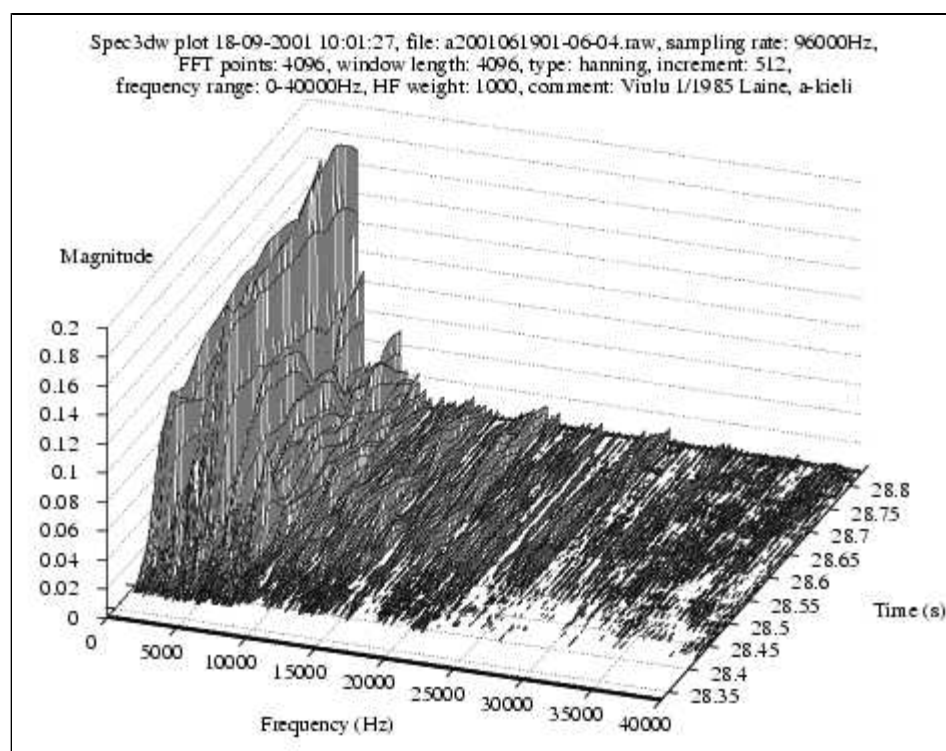
Ensimmäinen kuvaaja (kuva 5.1) esittää taajuusaluetta välillä 100-5000 hertsiä. Sävelen perustaajuus on hyvin voimakas, toisen osasävelen alku on voimakkaampi, mutta osasävel vaimenee n. 0,15 sekunnin kuluttua syttymisestä ja voimistuu uudestaan. Kolmas osasävel jää melko heikoksi. Kuvaajasta näkyy myös jousen aiheuttama särö ensimmäisen 0,1 sekunnin aikana.



Kuva 5.2: Viulun a-kielen kuvaaja taajuusalueella 0-20 kHz

Toinen kuvaaja (kuva 5.2) esittää taajuusaluetta välillä 0-20000 hertsiä. Osasävelsarjassa näkyy 5000 hertsin kohdalla vaimentuma. Välillä 6000-8000 hertsiä osasävelsarja on voimakas, mutta siinä on jaksottaisuutta,

voimakkain sointi on n. 0,2 sekunnin kuluttua sävelen alkamisesta. Kuvaustavasta johtuen välillä 8000-20000 hertsiä esiintyvät yläsävelsarjan korostumat eivät näy kovin korkeina amplitudiakselilla, mutta vaikuttavat kuitenkin merkittävästi sointiin (kuhunkin osasäveleeseen sisältyvä äänienergia on osasävelen amplitudin ja taajuuden tulo. Osasävelten sisältämä äänienergia vähenee silti yleensä korkeimmilla taajuuksilla). Välillä 8000-15000 hertsiä ja vielä selvemmin välillä 15000-20000 hertsiä näkyy kuvaajasta osasävelien syttymisen viive (n. 0,05 s).



Kuva 5.3: Viulun a-kielen kuvaaja taajuusalueella 0-40 kHz.

Kolmas kuvaaja (kuva 5.3) esittää taajuusaluetta välillä 0-40000 hertsiä. Kuvaajassa on korostettu korkeimpia osasäveliä luettavuuden helpottamiseksi. Yläsävelsarjassa on selviä korostumia taajuusalueilla 16000-17000 hertsiä, 18000-22000 hertsiä ja 23000-25000 hertsiä. Taajuusalueilla 29000-31000 hertsiä, 34000-35000 hertsiä ja 37000-38000 hertsiä on selvästi hitaammin syttyviä osasäveliä.

A-kielen sointiväri on pehmeä johtuen pitkälle ulottuvasta ja runsaasta yläsävelsarjasta. Kolmannen ja kuudennen osasävelen vaimeus antaa kuultavasta äänestä jonkin verran hauraan ja hiljaisen vaikutelman. Varsinaisia sointivirheitä ei ole. Yläsävelsarjan ulottuvuutta ei voitu selvittää, koska käytetyn laitteiston suorituskyky ei riitä tarkkoihin kuvauksiin 40 kilohertsiä korkeammilla taajuuksilla. On ilmeistä, että sointi jatkuu pitkälti yli 50 kilohertsin.

## 5.6 Kuuntelutesti

Kuuntelutesti on kaikkein tärkein tapa arvioida soittimen ääntä. Testi voidaan tehdä kahdella tavalla, joko kuuntelemalla soittimella soitettua elävää ääntä, tai kuuntelemalla äänitettä. Kuunteluun sisältyy kuitenkin monia arviointia vaikeuttavia tekijöitä. Suurimmat ongelmat syntyvät esitystilän akustiikan vaikutuksesta kuunneltavan soittimen ääneen, sekä ihmisen kuulomuistin lyhyedestä (vain n. 10 sekuntia). Olosuhteiden vakioinnin vaatimus johtaa siihen, että luotettava ja nopea vertailu pystytään tekemään parhaiten äänitteiden perusteella. Mitkään toistolaitteet eivät silti kykene toistamaan kaikkein hienoimpia nyansseja jousisoittimen äänestä. Laitteisto lisää ääneen aina säröä, vähentää dynamiikkaa ja muuttaa muutenkin sointia. Tallennuslaitteiston ja toistolaitteiston virheet voivat jopa korostaa toisiaan ja huoneakustiikka, jossa kuunnellaan äänitettä kaiuttimista, yleensä värittää ääntä.

Soittimia on totuttu kuuntelemaan jonkin verran kaikuisassa tilassa. Läheltä tai kuivassa akustiikassa äänitetyt musiikinäytteet kuulostavat paremmilta keinotekoisesti kaiutettuina. Siksi kaiuttamattoman mittausmateriaalin kuuntelu ei anna luontevaa kuvaa soittimen soinnista.

Äänentoistolaitteiden tärkein osatekijä on hyvälaatuiset kaiuttimet tai kuulokkeet, joiden tulee toistaa ääni mahdollisimman neutraalina kaikkine virheineen. Toistolaitteiston tulee olla arvioijalle ennestään tuttu. Laitteiston vaihtaminen erilaiseksi, laadultaan samantasoiseksikin, vaikeuttaa vertailua.

Kuuntelutestissä vertailukohteena voi olla referenssiäänite ennestään tunnetusta soittimesta. Vertailtavien äänitteiden tulee olla samasta äänitystilanteesta. Pienetkin erot mikrofonien sijoituksessa ja soittimen suuntauksessa saattavat muuttaa äänitteiden laatua niin, etteivät ne ole vertailukelpoisia. Äänitteen ei tarvitse olla pituudeltaan yhtä minuuttia pitempi. Tärkeää on, että soittimen koko ääniala tulee esille sekä hitaasti että nopeasti soitettaessa. Kuunteluvoimakkuuden tulee olla likimain sama kuin soittimen sointivoimakkuus äänitettäessä.

Kuuntelutestin voi aloittaa esimerkiksi sokkotestinä, jolloin ei tiedetä, mitä soittimia kulloinkin kuunnellaan. Tällä estetään ennakkoluulojen ja arvoasetelmien vaikutus vertailtaviin musiikinäytteisiin. Kuuntelutesti voi olla myös hyvä jakaa pitemmälle ajanjaksolle, jopa usealle päivälle. Ääninäytteistä oppii tunnistamaan ajan kuluessa asioita, jotka eivät heti hahmotu tai erotu äänestä.

---

[\[seuraava luku\]](#) [\[edellinen luku\]](#) [\[sisällysluettelo\]](#)

[\[seuraava luku\]](#) [\[edellinen luku\]](#) [\[sisällysluettelo\]](#)

## 6 Esimerkki mittausprojektista

Seuraavassa on esimerkki mittausprojektista, jonka tarkoituksena oli selvittää jousisoittimen äänellisiä eroja. Mittausprojektin tarkoituksena oli kerätä aineistoa tutkimus- ja opetustarkoituksia varten sekä toimia soittinrakennuksessa äänen laatuun keskittyvän tuotekehitystyön apuna. Tässä raportissa on käsitelty vain osaa mittausprojektissa syntyneestä aineistosta.

Mittausprojektissa äänitettiin studiossa kahden alttoviulun ja kahden viulun vapaat kielet sekä lyhyt musiikkinäyte. Äänen mittaus rajattiin vapaisiin kieliin, jotta soittajan sormen kosketus ei vaikuttaisi ääneen ja jotta käsiteltävä aineisto on hallittavissa. Mittaus kohdistettiin äänten alukkeisiin, koska äänen syttymistapaa ja valmistumisen nopeutta pidettiin ratkaisevana äänen laatua ja soittimen käyttökelpoisuutta määrittävänä tekijänä. Äänen syttymistapa vaikuttaa soittimen hallittavuuteen ja äänen sävyyn erityisesti nopeissa sävelkuluissa. Vapaiden kielten alukkeista tulostettiin 0,5 sekunnin ajalta kolmiulotteiset kuvaajat, joita arvioitiin sekä sellaisenaan että kuuntelemalla samalla vapaiden kielten ääninäytteitä.

Musiikkinäytteet kaiutettiin ja niitä vertailtiin keskenään. Kuvaaja- ja äänimateriaalin avulla pyrittiin selvittämään, mitä eroja soittimien soinnissa on ja ovatko erot objektiivisesti arvioitavia laatueroja vai mieltymysseikkoja.

### 6.1 Hyvän äänen kriteerit

Jousisoittimen ääni syntyy, kun kielen värähtely ohjautuu kannen ja pohjan kautta ilmaan. Viulun vartalo ei "vahvista" ääntä, vaan siirtää ainoastaan värähtelyn väliaineesta toiseen. Siirtymisessä tapahtuu suuria häviöitä, tuotetun äänienergian osuus soittimeen siirretystä energiasta on luokkaa 0,1-1 % eli yhtä suuri kuin tavallisessa dynaamisessa kaiuttimessa. Muu energia muuttuu pääasiassa lämmöksi. Hyötysuhde on huonoimmillaan värähtelyn siirtyessä kannesta ja pohjasta ilmaan (väliaineiden ominaispainojen ero on tässä suurin).

Jousisoittimen toimintaperiaate on sama kuin bassorefleksikaiuttimessa; matalimpia taajuuksia korostetaan tietyn viritystaajuuden avulla. Soittimen äänessä saattaa olla sointivärimuutoksia erityisesti kahdella taajuudella, ns. ilmaääniresonanssitaajuudella ja vartaloresonanssitaajuudella ([Benade 1990: 537](#).) Soinnissa tietyillä äänenkorkeuksilla joissakin soittimissa esiintyvä huojunta, "susiääni", on seurausta yleensä kannen eri osien värähtelemisestä niin, että ääneen syntyy vaihevirheitä. Myös värähtelevä kieli voi aiheuttaa sointivirheitä. Äänelliset erot soittimissa johtuvat pääasiassa kannen ja pohjan muodosta, paksuudesta, materiaalista ja pintakäsittelystä sekä soittimen tilavuudesta. Jousisoittimet suuntaavat suurimman osan äänestä ja varsinkin äänen korkeimmat taajuudet kohtisuoraan kannesta pois päin.

Varhaisempina aikoina jousisoittimien rakentamisessa huomioitiin nykyistä enemmän paikalliset esiintymistilat ja olosuhteet. Jos esimerkiksi paikkakunnalla sijaitsevassa kirkossa jälkikaiunta-aika oli pitkä, rakennettiin kirkkaasti ja selkeästi soivia viuluja. Äänen voimakkuus saattoi siinä tilanteessa olla vähemmän tärkeä ominaisuus. Orkesterien koon kasvaessa ja musiikkiesitysten siirtyessä monenlaisiin akustiikaltaan huonoihinkin tiloihin, tarvittiin soolosoittimina viuluja, joissa on kantava ja voimakas ääni.

Nykyisin studioäänityksissä ja sähköisessä äänen tallennuksessa äänen suuri voimakkuus ei ole välttämätöntä. Toisaalta orkesterien ja salien koko on edelleenkin kasvamassa ja soolosoittimilta vaaditaan yhä suurempaa äänenvoimakkuutta. Tärkeimpiä vaatimuksia näyttääkin olevan soittimen tietynlainen monikäyttöisyys tilanteissa, missä esitettävä musiikki, soitinyhtyeiden kokoonpano ja esitystilojen akustiikka vaihtelevat paljon.

Perinteisesti jousisoittimen ääntä pidetään hyvänä, kun seuraavat ehdot täyttyvät:

1. Äänessä on suuri dynamiikka; soittimen tulee tuottaa tarvittaessa hyvin voimakasta ja hyvin hiljaista ääntä.
2. Äänen tulee soida samalla, soittimelle ominaisella tavalla, matalalta ja korkealta, voimakkaasti ja hiljaa soitettaessa.

3. Äänen tulee syttyä nopeasti kaikilla, myös korkeimmilla yläsävelillä.
4. Äänen soinnin tulee olla miellyttävä; tämä ominaisuus on eniten sidoksissa käyttötarkoitukseen ja -ympäristöön.

## 6.2 Soittimet

Mittausprojektissa olivat mukana seuraavat soittimet:

1. Alttoviulu 2/2001 Laine, vartalopituus 411 mm, kielet: c-a Pirastro Obligato
2. Alttoviulu, rakennettu ehkä Saksassa 1900-luvun alussa, vartalopituus 420 mm, kielet: c-d D'addario Zyex, a: Pirastro Permanent weich
3. Viulu 2/1998 Laine, vartalopituus 354 mm, kielet g-a: Dominant weich, e: Kaplan
4. Viulu 1/1985 Laine (rakennettu uudestaan 1920-luvun viulusta, alkuperämaa ehkä Saksa), vartalopituus 356 mm, kielet g-e: Pirastro Oliv

Soittimilla äänitettiin raidat, joilla vapaat kielet soitettiin aina kahteen kertaan, sekä Bachin soolosellosarjasta nr. 1 g-duuri 1. osa kuuntelutestiä varten. Soittaja oli Max Savikangas.

## 6.3 Tallennusvälineet

Äänitykset tehtiin Helsingin yliopiston musiikkitieteen studiossa. Mikrofoneina käytettiin yhtä pienikalvoista Bruel & Kjaer 4007 pallosuuntakuvioista lähikenttämikrofonia, jolla äänitettiin vapaat kielet, sekä kahta Røde Classic II-mikrofonia, joilla äänitettiin musiikkinäytteet stereona. Mikrofonietuvahvistimina käytettiin kahta Behringer Pre-Q 520:ta.

Kaikkien mikrofonien korkeus lattiasta oli 1,8 metriä. Stereotallennukseen käytettyjen mikrofonien etäisyys soittajasta oli noin 1,2 metriä ja toisistaan 80 cm. B&K-mikrofonin etäisyys soittajasta oli 1 metri. Äänityshuoneen sivuseinistä tulevat heijastukset vaimennettiin sermeillä.



**Kuva 6.1:** Kuva äänitystilanteesta

Røde Classic II on isokalvoinen, perinteinen putkielektronikkaan perustuva vaihtuvasuuntakuvioinen malli, jossa käytettiin hertta-asetusta. Mikrofoni oli aiemmin valittu kuuntelutesteillä yhdentoista isokalvoisen alle 2500 euron hintaisen mikrofonin joukosta ja sitä pidettiin testijoukosta (yhdessä herttakuvioisen rinnakkaismallinsa Røde NTV kanssa) soinniltaan neutraaleimpana erityisesti keskitaajuuksilla. Korkeiden diskanttien tallennuksessa Classic II on epätarkka, mikä on ominaista isokalvoisille mikrofoneille.

Isokalvoisia mikrofoneja käytetään varsin yleisesti jousisoittinten äänityksissä. Tähän on todennäköisesti syynä, että ne voivat tallentaa suhteellisen tarkasti matalat ja keskitaajuuudet, mutta pyöristävät korkeita taajuuksia. Tällä on ilmeinen korrelaatio jousisoittinten ääni-ihanteeseen ja vahvistaa käsitystä, että jousisoittimen äänen korkeiden taajuuksien tulisi ihannetapauksessa muodostua suurelta osin epäsäännöllisestä värähtelystä, eikä pelkästään harmonisista yläsävelistä. Mittaustarkoituksiin isokalvoisen mikrofonin käyttö on kuitenkin perusteltua vain, jos se on soinniltaan neutraali ja mittauksissa diskanttitalennuksen detaljit eivät ole erityisenä tutkimuskohteena.

Vapaat kielet äänitettiin suoraan tietokoneen kovalevyille. Muuntimena oli Steinberg NUENDO 8 I/O 96k, jossa käytettiin 96 kHz:in näytteenottotaajuutta ja 24-bitin kvantisointiresoluutiota. Äänikortti oli RME Audio Hammerfall 9652 ja äänitysohjelma Steinberg NUENDO 1.5. Muuna tallennusvälineistönä olivat Behringer Pre-Q 520 mikrofonietuvahvistin ja Fostex CR-300 CD-tallennin, jolle äänitettiin musiikkikappaleet 44,1 kHz:in näytteenottotaajuudella. Laitteistoa pidettiin käyttötarkoitukseen hyvin soveltuvana ja laadultaan riittävänä.

## 6.4 Kuvaajat

Spektrianalyysia varten vapaiden kielten äänitteistä etsittiin kohdat, joissa kieli alkaa soida. Työvaihe automatisoitiin tarkoitusta varten kirjoitetulla analyysiohjelmalla. Jokaisesta äänitiedostosta muodostettiin analyysiohjelman erillinen kuvaustiedosto, jonne talletettiin soittimen tunnistetiedot sekä vapaiden kielten tunnistetiedot ja alkamisajat.

Spektrianalyysikuvaajat tuotettiin Linux-käyttöjärjestelmässä Octave-matematiikkakielellä kirjoitetulla aliohjelmalla. Octave on ilmainen ohjelma ja myös sen lähdekoodi on julkaistu ilmaisjakeluun. Linux-version lisäksi Octavesta on saatavissa myös Windows- ja Mac OS X -versiot. Octave on perussyntaksiltaan suurelta osin yhteensopiva MATLAB-ohjelman kanssa, joka on signaalinkäsittelyn tutkimuksessa yleisesti käytetty apuväline. Grafiikan osalta Octave ja MATLAB ovat kuitenkin epäyhteensopivia, joten tämän artikkelin spektrianalyysialiohjelmat eivät toimi MATLAB:issa. Aliohjelmapakettin ovat kirjoittaneet Kai Lassfolk ja Jaska Uimonen. Kuvaajien tuottamisessa ja äänitiedostojen esikäsittelyssä käytetyt ali- ja apuohjelmat on ladattavissa ilmaiseksi musiikkitieteen studion WWW-sivuilta.

Spektrianalyysikuvaajat ovat painotettuja siten, että korkeiden taajuuksien amplitudiarvoja on korostettu taajuuden suhteen lineaarisesti. Nyqvistin taajuus on korostettu amplitudiltaan 100-kertaiseksi 0 hertsiin verrattuna taajuusalueelta 0-20 kHz tehdyissä kuvaajissa ja 1000-kertaiseksi taajuusalueelta 0-40 kHz tehdyissä kuvaajissa. Painotusta käytettiin pelkästään kuvaajien luettavuuden parantamiseksi. Analyysialiohjelmassa painotuskerroin voidaan valita vapaasti, esimerkiksi cd-laatuissa äänitteissä, joissa käytetään 44,1 kHz:in näytteenottotaajuutta, on taajuusalueelta 0-20 kHz tehdyissä kuvaajissa sopiva korostuskerroin 10. Kuvaajien amplitudiakseli on lineaarinen. Korkeiden taajuuksien syttymisnopeutta on vaikeampi havaita, jos amplitudiakseli on logaritminen.

[Spektrogrammikuvaajat ja ääninäytteet alttoviulujen ja viulujen vapaista kielistä](#) ovat erillisellä sivulla.

## 6.5 Musiikkinäytteet

Musiikkinäytteet on poistettu PDF-versiosta.

## 6.6 Johtopäätökset

Mittausprojektissa mukana olleista soittimista tiedettiin käytössä saatujen kokemusten perusteella seuraavaa:

1. Alto 2/2001 soi hyvin, c-kielen voimakkuus on jonkin verran pienempi ja sointiväri erilainen kuin soittimen muilla kielillä. Ilmiö johtunee alton melko pienestä koosta.
2. Altossa "saksalainen" a-kielen sointiväri poikkeaa selvästi muiden kielten sointiväristä ja on koettu jonkin verran ongelmalliseksi.
3. Viulun 2/1998 sointi on kaikilla kielillä samantapainen. Sointiväri ei ole kuitenkaan täysin tyydyttävä; siinä on jonkin verran kovuutta ja epätäyteläisyyttä.
4. Viulu 1/1985 soi hyvin kaikilla kielillä. Sointi ei ole kovin voimakas, mutta erityisesti e-kielellä pehmeä ja

täyteläinen.

Mittausten perusteella todettiin muun muassa seuraavaa:

1. Alton 2/2001 soinnissa ei ole erityisiä sointivirheitä. A-kielen yläsävelsarja on rikas ja ulottuu ulottuu pitkälle, kuten viulussa.
2. Alton "saksalainen" a-kielen seitsemäs yläsävel on hyvin voimakas verrattuna muihin yläsäveliin. Tämä on syynä kielen poikkeavaan, terävähköön sointiin.
3. Viulussa 2/1998 on kaikkien kielten soinnissa vaimentuma taajuusalueella 5000-7000 hertsiä. Tämä antaa viululle sille ominaisen kovahkon sointiväriin.
4. Viulussa 1/1985 on hyvin rikas ja korkealle ulottuva yläsävelsarja a- ja e-kielillä. Matalammilla kielillä on yläsävelsarjan alussa epätasaisuutta, mikä antaa viululle jonkin verran voimattoman ja hauraan soinnin.

Jokainen soitin oli tunnistettavissa äänensä perusteella ja myös äänestä tulostetuista kuvaajista. Tiedossa olleet soittimien soinnin ominaispiirteet olivat tulkittavissa kuvaajien kautta paremmin kuin pelkän kuulohavainnon perusteella. Erot soinnissa näkyivät kuvaajista mm. matalimpien yläsävelien voimakkuuseroina sekä yläsävelsarjan ulottuvuudessa.

Sointivirheinä voidaan pitää "saksalaisen" alton a-kielen sointitapaa sekä viulussa 2/1998 Laine esiintyvää vaimentumaa kaikilla kielillä soitettaessa. Kaikki vertailussa olleet soittimet ovat kuitenkin laadultaan riittäviä ammattikäyttöön. Soinnin virheet eivät ole missään soittimessa vakavia ja yläsävelsarjan ulottuvuus antaa kaikille soittimille rikkaan sointiväriin. Mikäli mukana olisi ollut heikkotasoisempia soittimia, olisivat erot kuvaajissa olleet suurempia.

Pelkästään kuvaajia tutkimalla ei voinut sanoa, soiko soitin hyvin. Äänestä tulostetun kuvaajan katsominen samaan aikaan ääninäytteen kuuntelun kanssa auttoi tarkentamaan kuulohavaintoa äänestä ja kertomaan syyn, miksi ääni soi sille ominaisella tavalla.

Soittimien objektiivinen laatu ei ollut projektin tuloksena aivan yksiselitteisesti määriteltävissä. Laatua huonontavat yleensä selvät sointivirheet ja soinnin epätasaisuus, jotka kuvaajien avulla saadaan helposti selvitettyä. Toisaalta soittajan mieltymys soittimeen ja sen toimivuus tietyssä sointia värittävässä akustiikassa ovat tärkeitä henkilökohtaisia arviointiperusteita soittimen valinnassa.

---

[\[seuraava luku\]](#) [\[edellinen luku\]](#) [\[sisällysluettelo\]](#)

[\[lähteet\]](#) [\[edellinen luku\]](#) [\[sisällysluettelo\]](#)

---

## 7 Yhteenveto

Spektrianalyysikuvaajat tarjoavat tehokkaan apuvälineen soitinäänen rakenteen tutkimiseen. Kuvaajien tulkinta vaatii kuitenkin, paitsi akustiikan tuntemusta, ennen kaikkea käytännön työskentelyn tuomaa kokemusta - ts. harjaantunutta "silmää". Tällainen taito voidaan kuitenkin saavuttaa nopeastikin järjestelmällisellä harjoittelulla.

Spektrogrammikuvaajien tulkinta auttaa myös jäsentämään kuulokuvaa. Muusikolle spektrogrammit voivat tarjota apuvälineen myös äänenmuodostuksen analysointiin.

Tämän artikkelin yhteydessä on arvioitu soittimien vapaita kieliä ja niiden alukkeita. Mikään ei estä laajentamasta arviointia koskemaan soittimen muidenkin äänten sointia. Selvät sointivirheet jollakin sävelkorkeudella ovat kiinnostava kohde graafiselle kuvaukselle, samoin esimerkiksi kaikkein korkeimmat äänet, joita soittimella soitetaan.

Yhtenä vaikeutena äänen arvioinnissa on erotella ja tulkita ääninäytteeseen sisältyvää suurta tietomäärää. Kuvaajien tarkastelu ääninäytteitä kuunneltaessa opettaa kiinnittämään huomiota tiettyihin erillisiin äänen ominaisuuksiin. Äänen rakenteen kuuleminen on erityistaito, jota voi opiskella ja parantaa harjoittelemalla.

Yksi tämän tutkimuksen päämääristä on ollut tiedon välittämisen lisäksi edesauttaa korkealuokkaisten mittausvälineiden saamista myös muiden kuin ammattitutkijoiden käyttöön. Siksi kaikki tämän artikkelin spektrianalyysikuvaajat on tuotettu ilmaisilla ohjelmilla. Tätä tutkimusta varten kirjoitetut ohjelmat ovat ladattavissa ja levitettävissä edelleen [Gnu General Public Licensen](#) ehtojen puitteissa. Ohjelmat on kirjoitettu Gnu Octave-ohjelmalle ja Linux-käyttöjärjestelmälle, jotka molemmat ovat ilmaisia.

Ohjelmistojen ilmaisuus poistaa kuitenkin vain osan välinekustannuksista. Mittausten teko on kuitenkin mahdollista melko vaatimattomallakin äänitys- ja tietokonelaitteistolla. Mittausmenetelmät ovat näin ollen esimerkiksi soitinrakentajien, muusikoiden tai opiskelijoiden ulottuvilla.

---

[\[lähteet\]](#) [\[edellinen luku\]](#) [\[sisällysluettelo\]](#)



[\[sisällysluettelo\]](#)

---

## Lähteet

### Painetut lähteet

- Anderson, David V. 1996:  
Speech Analysis and Coding Using a Multi-Resolution Sinusoidal Transform. *Proceedings of ICASSP-96*. Atlanta, Georgia.
- Bauch, F. W. O. 1979 [1953]:  
New High-Grade Condenser Mikrophones. *Microphones - An Anthology of articles on microphones from the pages of the Journal of the Audio Engineering Society Vol.1-Vol.27 (1953-1979)*. New York: Audio Engineering Society.
- Benade, Arthur H. 1990:  
*Musical Acoustics*. New York: Dover Publications.
- Brown, Judith 1990:  
Calculation of a constant Q spectral transform. *Journal of the Acoustical Society of America* Volume 89, Number 1.
- Dodge, Charles - Jerse, Thomas A. 1985:  
*Computer Music - Synthesis, Performance and Composition*. New York: Schirmer Books.
- Fletcher, Harvey - Blackman, E. Donnell - Stratton, Richard 1962:  
Quality of Piano Tones. *The Journal of the Acoustical Society of America* Volume 34, Number 6.
- Lahti, Tapio 1997:  
*Akustinen mittaustekniikka*. Raportti 38, 2. painos. Espoo: Teknillinen korkeakoulu, Sähkötekniikan osasto, Akustiikan ja äänenkäsittelytekniikan laboratorio.
- Mathews, Max 1999a:  
The Ear and How It Works. *Music, Cognition, and Computerized Sound - An Introduction to Psychoacoustics*. Perry R. Cook (toim.). Cambridge, Massachusetts: The MIT Press.
- Mathews, Max 1999b:  
Introduction to Timbre. *Music, Cognition, and Computerized Sound - An Introduction to Psychoacoustics*. Perry R. Cook (toim.). Cambridge, Massachusetts: The MIT Press.
- McAdams, Stephen - Beauchamp, James W. - Meneguzzi, Suzanna 1999:  
Discrimination of musical instrument sounds resynthesized with simplified scetrotemporal parameters. *Journal of the Acoustical Society of America* 105 (2).
- Moore, F. Richard 1990:  
*Elements of Computer Music*. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall.
- Moorer, James Andy 1979:  
About This Reverberation Business. *Foundations of Computer Music*. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press.
- Nielsen, Torben 1994:  
Precision Microphones for Measurements and Sound Reproduction. *Microphone Engineering Handbook*. Gayford, M. (toim.). Oxford: Focal Press.
- Oppenheim, Alan V. - Shafer, Ronald W. 1975:  
*Digital Signal Processing*. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall.
- Parsons, Alan - Foster, Bill - Hollebone, Chris 1992:  
*The Master Tape Book*. Association of Professional Recording Services (APRS) and The British Record Producers Guild.
- Pierce, John 1999a:  
Introduction to Pitch Perception. *Music, Cognition, and Computerized Sound - An Introduction to Psychoacoustics*. Perry R. Cook (toim.). Cambridge, Massachusetts: The MIT Press.
- Pierce, John 1999b:  
Consonance and Scales. *Music, Cognition, and Computerized Sound - An Introduction to Psychoacoustics*. Perry R. Cook (toim.). Cambridge, Massachusetts: The MIT Press.

Serra, Xavier 1997:

Spectral Modeling Synthesis. *Musical Signal Processing*. Roads, Pope, Piccialli, Poli (toim.). Lisse: Swets & Zeitlinger.

### **Internet-lähteet**

Boyk, James 2001:

"There's Life Above 20 Kilohertz! - A Survey of Musical Instrument Spectra to 102.4 KHz".

<http://www.cco.caltech.edu/~boyk/spectra/spectra.htm>. 21.9.2001.

Levine, Scott N.

*Audio Representations for Data Compression and Compressed Domain Processing*. Ph.D. Dissertation.

December 2, 1998. <http://ccrma-www.stanford.edu/~scottl/thesis.html>.

---

[\[sisällysluettelo\]](#)

[\[sisällysluettelo\]](#)

---

## Ohjelmat

Artikkelin spektrogrammikuvaajat on tuotettu [Gnu Octave](#) -ohjelmistolle kirjoitetuilla aliohjelmilla. Aliohjelmat ovat ilmaisjakelussa ja ladattavissa osoitteesta <https://version.helsinki.fi/mri/>.

Ohjelmat on dokumentoitu pääosin englanniksi. Mukana on myös suppea suomenkielinen käyttöohje.

---

[\[sisällysluettelo\]](#)