

MITÄ ÄÄNI ON?

AKUSTIIKAN VAIHEITA ANTIIKIN AJATUKSISTA NYKYAIKAISEN ÄÄNENHALLINNAN ALKUUN

Mikko Kylliäinen

Ääni on tärkeä ja suorastaan välttämätön osa jokapäiväisestä kokemus- ja elämysmaailmaamme, sillä suurin ja merkittävin osa viestinnästämme tapahtuu puheen ja kuuloaistin välityksellä. Nykyisin elämme keskellä ääniympäristöä, jonka tuotamme suurimmaksi osaksi itse, osittain ääni on muiden elollisten olentojen ja elottoman luonnon synnyttämää. Äänen suuren merkityksen johdosta ei olekaan yllättävää, että ääni on ollut tutkimuksen kohteena ainakin antiikin ajasta saakka. 1600-luvun kuluessa ääni-ilmiöitä tutkivan tieteenalan nimitykseksi vakiintui akustiikka, joka pohjautuu kreikan kielen kuulemista tarkoittavaan sanaan.¹

Yksi tieteen tehtävistä on auttaa ihmisiä ymmärtämään kokemusmaailmaansa. Akustiikka on laaja tieteenala, joka etsii säännönmukaisuuksia ja järjestystä äänimaailmasta ja pyrkii esittämään ne luonnonlakeina. Akustiikka paljastaa kokeellisesti aiemmin tuntemattomia ääni-ilmiöitä ja luo teorioita selittämään niitä. Erityisesti akustiikka on yrittänyt selittää, mitä ääni on, kuinka se leviää ja miten kuuloaistimus tapahtuu. Nykyisin kahta ensin mainittua kysymystä tutkivaa akustiikan aluetta nimitetään fysiikaaliseksi akustiikaksi. Se on kaiken muun akustiikan perusta ja akustiikan alueista vanhin. Tarkasteltaessa äänen vaikutuksia laajemmin akustiikka voidaan liittää myös esimerkiksi filosofiaan, sosiaalitieteisiin ja ympäristötieteisiin. Akustiikka liittyy myös taiteisiin: akustiikka tuottaa tieteellistä tietoa, jota voidaan soveltaa paitsi soittinrakennuksessa, myös konserttisalien tai muiden esiintymistilojen suunnittelussa. Akustiikka on siten myös tekniikan ala, joka auttaa ihmistä muokkaamaan ympäristöään.²

Akustiikalle on nykyisin ominaista se, että se yhdistelee muiden tieteenalojen tutkimustuloksia. Esimerkiksi mekaniikka voi tutkia kappaleen liikettä riippumatta toisista tieteistä. Akustiikka ei voi näin tehdä, vaan värähtelevän kappaleen liiketilän ymmärtäminen edellyttää tietämystä mekaniikasta; kappaleen ympärilleen synnyttämässä äänikentässä tapahtuu painenvaihteluita ja nopeushäiriöitä verrattuna staattiseen ilmanpaineeseen, minkä tarkastelu edellyttää ilman fysiikkaan kuuluvien tietojen soveltamista. Äänikentässä tapahtuvat ilman tiheytemät ja harventumat aiheuttavat muun muassa lämpötilan muutoksia, jolloin on tarkasteltava termodynamiikan ilmiöitä. Kuuloaistimuksen syntyminen puolestaan on fysiologinen ja psykologinen ilmiö.³

Nykyisin tuskin on elämäalaa, jota akustiikka ei jollain tavalla koskettaisi: esimerkiksi lääketieteessä ultraääni on mahdollistanut monia tärkeitä tutkimusmenetelmiä. Viihteen aloilla, esimerkiksi elokuvateollisuudessa, akustiikan tuloksia sovelletaan

äänentallennuksessa, äänitehosteiden ja tilavaikutelman luomisessa, elokuvateatterin äänentoistossa sekä elokuvasalin suunnittelussa ja rakentamisessa samoin kuin rakennusmateriaalien valinnassa. Näin laajoja vaikutuksia akustiikalla on kuitenkin ollut oikeastaan melko lyhyen ajan, 1900-luvun alkuvuosikymmenistä lähtien. 1800-luvulla akustiikka poikkesi suuresti nykytilanteesta: se oli paljolti muista tieteistä irrallinen alue, joka kehittyi hitaasti.⁴

ANTIIKIN AKUSTIIKKA

Ymmärryksen siitä, että kiinteään kappaleeseen kohdistuva isku synnyttää äänen, on täytynyt olla tuttu jo kaukana muinaisuuksessa, sillä ilmiö on havaittavissa helposti luonnossa, kävellessä ja monessa muussa tilanteessa. Ihminen onkin kautta aikain tuottanut pilleillä, torvilla ja rummuilla erilaisia merkki- ja hälytysääniä. Näin tuotetut äänet ovat myös soitinmusiikin perusta. Musiikki on taidemuotona vanha, ja se tuli tieteen kiinnostuksen kohteeksi jo tuhansia vuosia sitten. Antiikin Kreikassa tarve ymmärtää musiikki-instrumenttien toimintaa johti yrityksiin kuvata äänen syntymistä. Kreikan filosofit olivat vakuuttuneita siitä, että äänen alkuperää oli etsittävä kappaleiden liikkeistä, jotka siirtyvät ilman välityksellä korvaan ja synnyttävät kuuloaistimuksen. Antiikin filosofien tarkemmat selitykset äänen syntymisestä olivat nykykäsityksiin verrattuna yksinkertaisia, mutta ne olivat silti lähempänä nykykäsityksiä kuin heidän ajatuksensa suurten kappaleiden liikkeistä, lämmöstä tai valosta.⁵

Antiikin aikana ymmärrettiin, että ääni-ilmiöiden kuvaamiseksi on tutkittava, mikä äänen synnyttää, miten ääni leviää ja kuinka kuuloaistimus tapahtuu. Ilmeisesti varhaisimmat pohdinnat äänen syntymekanismeista liittyvät värähteleviin kieliin, joita tutkimalla saatettiin todeta, että ääntä ei ole ilman vä-

rähtelevää kappaletta. Pythagoraan kerrotaan tutkineen eripituisten kielten ja sävelkorkeuden suhdetta. Ei ole kuitenkaan varmaa, tekikö Pythagoras todella tällaisia kokeita ja ymmärsikö hän sävelkorkeuden olevan kääntäen verrannollinen kielen pituuteen. Lähes tuhat vuotta Pythagoraan jälkeen, 400- ja 500-lukujen taitteessa ajanlaskun alun jälkeen, Boethius kuvaa tämän Pythagoraan tekemäksi oletetun kokeen. Kuvaus osoittaa ainakin sen, että Boethiuksen aikana ajatus koejärjestelyn tekemisestä tieteellisen tiedon hankkimiseksi ei ollut vieras.⁶

Äänen kuvaamisessa taajuus tai musiikissa sävelkorkeus on olennainen asia. Pythagoraan koulukuntaan kuuluneet Arkhytas ja Eudoksos selittivät 400-luvulla ennen ajanlaskun alkua, että kappaleen nopea liike vastaa korkeaa ääntä ja hidas liike matalaa. Toisaalta antiikin ajan käsitteet eivät kaikilta osin vastaa nykykäsitteitä: joissakin kirjoituksissa matalalla äänellä tarkoitetaan voimakkuudeltaan heikkoa ääntä ja korkealla hyvin kuuluvaa ääntä. Äänen voimakkuuden tutkimiseksi ei ollut antiikin aikana muuta keinoa kuin korva. Seneca päätyi pohdinnassaan siihen, että vaskipuhaltimet tuottavat voimakkaamman äänen kuin ihmisen suu siksi, että ne aiheuttavat ilmaan suuremman jännityksen.⁷

Äänen voimakkuudella ja äänellä fysiikkaalisena ilmiönä on suora yhteys. Ääni on ilmanpaineen vaihtelua staattiseen ilmanpaineeseen verrattuna. Mitä suurempia paineenvaihtelut ovat, sitä voimakkaampi kuuloaistimus on. Äänenä aistittavat ilmanpaineen vaihtelut syntyvät värähtelevän kappaleen ympäröivään ilmaan aiheuttamista ilman tihentymistä ja harventumista. Aristoteleen ajatteluun sisältyi oivallus ilman tihentymien merkityksestä: hän selitti, että lyömällä kaksi kappaletta yhteen voidaan synnyttää ääntä vain, jos lyönti tapahtuu nopeasti, sillä muuten ilma hajaantuu kappaleiden välistä pois. Demokritos selitti äänen syntyvän, kun ilma tiivistyy.⁸

Varhaisimmista antiikin aikana kirja-
tuista pohdinnoista lähtien on vallinnut
yksimielisyyttä siitä, että ääni siirtyy pisteestä
toiseen jonkin ilmassa tapahtuvan ilmiön tai
toiminnan välityksellä. Ääntä ei ole nähtä-
västi koskaan ajateltu esimerkiksi aineeksi.
Osa antiikin ajattelijoista käsitti äänen il-
meisesti ilman virtaukseksi, sillä esimerkiksi
Platon puhuu äänestä tuulena, puuskana,
puhalluksena tai henkäyksenä. Toiset ajat-
telijat selittivät äänen ilmaksi, joka liikkuu
otettuaan jonkun tietyn muodon. Tunte-
mattoman kirjoittajan ajoittamaton teos *De
Audibilibus* kuvaa äänen syntyvän kappalei-
den liikkeestä toisiaan vasten tai kappaleen
kosketuksesta ilmaan. Kirjoittajan mukaan
ei ole kyse siitä, että ilma ottaisi jonkin muo-
don, vaan ääni liikkuu puristumalla kokoon,
laajenemalla ja suppenemalla. Äänilähteenä
on elollisen olennon ”henkäys” tai soitinten
kielet. Ne iskevät ilmaa peräkkäisin puhal-
luksin, jolloin ilma pakotetaan liikkeeseen.
Liikkeessä oleva ilmahiukkanen vaikuttaa
seuraavaan hiukkaseen ja näin ääni etenee
ilmassa. Tämä häiriö ilmassa syntyy kirjoit-
tajan mukaan tietystä pisteestä, mutta sen
voima jakautuu laajenevalla alalla niin kuin
joen kuljettama aines tai tuulen kuljettama
pöly.⁹

Äänen leviämisen analogisuus aaltoren-
kaisuun vedessä oli antiikin aikana laajalti tun-
nettu. Ajatus tunnettiin ainakin 200-luvulla
eKr. Roomalainen arkkitehti Marcus Vitru-
vius Pollio selitti äänen etenevän lukemat-
tomina aaltoina ympyränmuodossa täsmäl-
leen samoin kuin tapahtuu pudotettaessa
kivi seisovaan veteen. Vitruviuksen mukaan
ääni synnyttää samojen lainalaisuuksien
mukaisesti kehämäisen aaltoliikkeen, mut-
ta sillä erotuksella, että toisin kuin vedessä,
jossa aaltorintama etenee vain vaakatasossa,
ääni etenee kaikkiin suuntiin. Antiikin ajan
ajatukset äänen leviämisestä summasi Boet-
hius: ääni leviää kuten kiven aiheuttama aal-
to vedessä; kun ilma saatetaan liikkeeseen,
se vaikuttaa lähellä olevaan ilmaan, ja näin

syntyy liikkeessä olevan ilman aaltokehä.
Kaukana oleva kuulija kuulee äänen vai-
meampana, koska hänet kohtaava aalto on
heikompi. Ääniaaltojen analogisuutta veden
pinta-aaltoihin on hyödynnetty akustisessa
suunnittelussa 1900-luvulla tekemällä au-
ditorioista, teattereista ja konserttisaleista
vedellä täytettyjä pienoismalleja, joilla on
tutkittu äänen heijastumista.¹⁰

Äänen liikkeeseen liittyvä kysymys on
äänen nopeus. Aristoteleen mukaan matal-
lat äänet liikkuvat hitaammin kuin korkeat,
mutta muutama sata vuotta hänen jälkeens-
sä Theofrastos päätteli, että äänen nopeus
on taajuudesta riippumaton – kokeellisesti
tämä osoitettiin 1600-luvulla. Perusteluna
oli se, että musiikissa ei voitaisi saavuttaa
harmoniaa, jos eri taajuudet kulkisivat eri
nopeuksilla. Antiikin aikana ei ollut mah-
dollista mitata äänen nopeutta, mutta luon-
nollinen vertailukohta äänen nopeudelle on
valo. Aristoteles selitti ukkosilman havain-
tojen perusteella, että salama nähdään en-
nen kuin kuullaan, koska näköaisti on nope-
ampi kuin kuuloaisti. Noin viisisataa vuotta
myöhemmin Plinius vanhempi selitti asian
nykykäsityksen mukaisesti: salama nähdään
ennen kuin kuullaan, koska valo kulkee no-
peammin kuin ääni.¹¹

Aristoteles päätyi kuuloaistia koskevas-
sa pohdinnassaan siihen, että kuuloelin on
fysikaalisesti yhtä ilman kanssa: se on ilmas-
sa ja ilma sen sisällä liikkuu vastaavasti kuin
ilma ulkona. Aristoteleen aikalainen Alk-
maeon selitti kuulemisen tapahtuvan korvi-
en kautta, sillä niissä on tyhjä ilmatila, joka
kaikuu. Hieman nuorempi Empedokles
esitti, että kuuloaistimus on tulosta äänen
liikkeelle saaman ilman kaikumisesta korvis-
sa: kuuloelin toimii kuin trumpetin suppilo,
joka soi äänten myötä. Useimmat filosofit
yhdistivät kuuloaistin korviin, mutta Platon
oli eri mieltä: hänen mukaansa ääni kulkee
korvien, ilman, aivojen ja veren kautta sie-
luun ja kuuloaistimus on värähtelyä, joka
alkaa päässä ja päättyy maksaan.¹²

Aristoteles pohti äänen heijastumista ja havaitsi, että ääni heijastuu pinnasta samalla tavalla kuin valo: kulma, jolla ääni kohtaa pinnan, on yhtä suuri kuin kulma, jolla ääni pinnasta heijastuu. Aristoteles selitti myös kaiun: värähtelevän kappaleen liikkeeseen saama ilma kimpoaa kovasta pinnasta takaisin. Tällaiset pohdinnat eivät olleet kaukana akustiikan soveltamisesta käytäntöön, mitä antiikin aikana jonkin verran esiintyi. Säilyneistä käytännön ohjeita sisältäviä dokumenteista tärkein on Vitruviuksen kymmenen kirjaa arkkitehtuurista. Vitruvius antaa muun muassa ohjeita teatterin paikan valinnasta sekä näyttämön ja katsomon muodosta hyvien akustisten olosuhteiden saavuttamiseksi.¹³

Useimmat antiikin ajattelijat pohtivat äänen ominaisuuksia yleisesti tai sen leviämistä ulkona. Lucretius esitti 100-luvulla ennen ajanlaskun alkua käsityksensä äänen leviämisestä sisällä suljetussa tilassa: kun äänen kulkema matka lähtöpisteestään kuulijalle ei ole pitkä, kaikki sanat voidaan kuulla selvästi. Mutta matkan ollessa pitkä sanat tulevat vaikeasti ymmärrettäviksi, sillä yksi ääni ha-

joaa useiksi ääniksi, ja jotkut äänet heijastuvat kovista kappaleista niin kuin ääni kaikuu kahden kukkulan välissä. Lopulta koko tila täyttyy äänistä niin, että sanat sekoittuvat eikä niitä voida kuulla oikein. Tämä kuvaus sisältää aavistuksen jälkikaiunna käsitteestä, joka on tilojen huoneakustisen suunnittelun perusta. Ennen 1900-lukua huoneakustinen suunnittelu perustui kuitenkin lähinnä pitkään traditioon, ei tieteeseen pohjautuviin suunnittelumenetelmiin.¹⁴

EMPIRISMIÄ SOVELLETAAN AKUSTIIKKAAN

Antiikin kulttuurin ja tieteen rapauduttua käsitykset äänen luonteesta eivät vuosisatoihin juuri edistyneet Euroopassa. Ainoa akustiikan lähialue, joka kehittyi merkittävästi, oli musiikki ja sen teoria. Islamilaiset oppineet sitä vastoin omaksuivat kreikkalaisten tietämyksen akustiikasta, ja kreikkalaisten filosofien teoksia käännettiin arabiaksi 700-luvulta 900-luvulle. Aluksi islamilaiset tiedemiehet omaksuivat lähinnä Aristoteleen



Pompeijin pienempi teatteri, jossa kuuluvuutta parantavat katsomon muoto, sen edessä oleva kivetetty lattia, joka heijastaa ääntä, sekä esiintyjien takana oleva muurattu seinä. Kuva: Mikko Kylliäinen.

käsityksiä akustiikasta, mutta vähitellen he alkoivat tuottaa myös uutta tietoa. 800-luvun lopulla Basrassa toiminut oppineiden salaseura erotti selvästi äänen korkeuden ja voimakkuuden ja selitti äänen syntyvän kappaleiden törmäyksistä ilmassa. Törmäävien kappaleiden välissä oleva ilma puristuu kokoon, mistä syntyy aaltoliike, jossa törmäilevät ilmahiukkaset leviävät aallonmuodossa kaikkiin suuntiin. Näin syntyy pallomainen aalto, joka laajenee niin kuin pullo lasinpuhaltajan puhaltessa siihen ilmaa. Kun tämä aaltoilu laajenee, liike heikkenee ja lopulta vaimenee kunnes liike laantuu ja lakkaa. Tässä on sanallisesti varsin tarkasti kuvattuna ilmiö, josta nykyisin käytetään käsitettä äänen leviämismuutos. Kvantitatiivisesti äänen vaimentumista ei pystytty esittämään.¹⁵

Muutamaa vuosisataa Basran koulukuntaa myöhemmin islamilainen kulttuuri alkoi tuottaa selvästi uutta tietoa ääni-ilmiöistä. Avicenna tutki 1000-luvun alussa kokeellisesti, kuinka lähekkäisiä taajuuksia kuuloisesti pystyy erottamaan. Persialainen Al-Biruni totesi havaintojensa perusteella Pliniuksen tuhat vuotta aiemmin selittämän eron äänen ja valon nopeuden välillä. Islamilaisista oppineista pisimmälle edistyi akustiikan alalla Safi al-Din, joka 1250-luvulla muun muassa korjasi antiikista periytyvän yleisen käsityksen siitä, että äänen taajuudella ja voimakkuudella on yhteys: al-Din selitti, että kappaleeseen kohdistuvan iskun voima tekee äänestä voimakkaamman, mutta ei korkeampaa. al-Din tutki jollain tavalla myös puheäänien tuottoa sekä puhallinsoitinten resonanssi-ilmiöitä. Värähtelevästä kielestä hän havaitsi, että värähtelyn taajuuteen ja äänen korkeuteen vaikuttaa kielen piteuden lisäksi myös sen paksuus ja jännitys.¹⁶

Länsieurooppalaisten tiedemiesten matkat Välimeren ympäristöön ja Vähään-Aasiaan sekä islamilaisien oppineiden tekstien käännökset latinaksi välittivät Aristoteleen ja Boethiuksen ajatuksia ja kreikkalaista tradi-

tiota akustiikasta Eurooppaan. Sitä vastoin islamilaisien tiedemiesten uudet ajatukset äänestä ja sen leviämisestä eivät näytä siirtyneen Eurooppaan tai ainakin niiden vaikutus on jäänyt vähäiseksi, sillä Aristoteleen auktoriteetti oli suuri vielä 1600-luvulla, jolloin hänen käsityksiään voitiin osoittaa vääräksi. Islamilaisien ja Euroopan oppineiden käsitysten eroa 1200-luvulla kuvaa esimerkiksi Robert Grossetesten kuvaus äänestä: hänen mukaansa ääni on valoa, joka sulautuu hienojakoisimpaan ilmaan. Keskiajan ja renessanssiajan Euroopassa ääni-ilmiöt ja musiikki numeerisesti esitettävien taajuuksuhteiden käsitettiin liittyviksi Jumalan luomaan harmoniseen maailmanjärjestyksen.¹⁷

1300-luvulla elänyt arabioppinut Al-Jurjani valitti kirjoituksissaan sitä, että koejärjestelyjä ääni-ilmiöiden tutkimusta varten tarvittavien suureiden mittaamiseksi ei ole olemassa. Tämä muodostui toiseksi kahdesta akustiikan kehitystä hidastavasta pullonkaulasta. Francis Bacon puhui koejärjestelyistä myös akustiikkaa koskevien pohdintojensa yhteydessä, mutta tieteellisen vallankumouksen aikana 1600- ja 1700-luvulla ei ollut laitteita, joilla olisi voitu saada mittaustuloksia äänen voimakkuudesta tai juuri mistään muustakaan ääni-ilmiöistä. Muilla tieteenaloilla, kuten optiikassa ja mekaniikassa, edettiin nopeammin käytännön sovelluksiin kuin akustiikassa. Akustiikan kehitys tieteellisen vallankumouksen alkuvaiheessa ei perustunutkaan välttämättä klassisen mekaniikan edistysaskeliin, vaan suuri osa mielenkiinnosta akustiikkaan juontui luonnonmagiasta: kiinnostavia olivat ihmeelliset ja poikkeukselliset ääni-ilmiöt, joita pyrittiin toistamaan yleisön edessä. 1600-luvulla harvoja ääni-ilmiöitä pystyttiin ilmaisemaan matemaattisessa muodossa, ja niitäkään, jotka voitiin, ei täysin ymmärretty. Akustiikka kuitenkin eriytyi itsenäiseksi, tunnistettavaksi tieteenalaksi 1600-luvulla.¹⁸

Francis Bacon määritteli 1626 ilmestyneissä luonnonfilosofisissa teoksissaan *New Atlantis* ja *Sylva Sylvarum* akustisen tieteen



Sir Francis Bacon (1561–1626) määritteli teoksissaan, mitkä ovat akustiikan tehtävät: ääni-ilmiöiden tarkkailu, jäljittely ja manipulointi. Tuntemattoman taitelijan maalaus.

tehtäviksi ääni-ilmiöiden tarkkailun, niiden jäljittelemisen ja manipuloinnin. Akustiikan oli tutkittava äänen ominaisuuksia yleensä, luokiteltava niitä, rakennettava akustisia instrumentteja, tutkittava puhetta ja äänen tuottoa sekä soittimia. Bacon tavoitteli näin keinoja, joilla ihminen voisi hallita ääni-ilmiöitä. Tässä yhteydessä hän määritteli käsitteet, jotka nykyisin tunnetaan äänen heijastumisena ja äänen vahvistuksena. Baconin ajattelu pohjautui edelleen luonnonmagiaan – hänen tavoitteenaan oli korkeamman luonnonmagian luominen – joten kiinnostaviksi ääni-ilmiöiksi hän nimesi erityisesti epätavalliset äänet, kuten kaikuilmiöt luonnossa ja rakennuksissa.¹⁹

Bacon esitti kirjoituksissaan menetelmän äänennopeuden mittaamiseksi. Hän ei tätä koejärjestelyä koskaan toteuttanut, mutta hänen ranskalainen aikalaisensa Marin

Mersenne vei Baconin ajattelua pidemmälle ja mittasi ensimmäisenä äänennopeuden. Mittauksen mahdollisti se, että Mersenne johti Galileista riippumatta suhteen heilurin heilahdusajan ja pituuden välille. Äänennopeuden mittauksessa äänilähteenä oli määrättyllä etäisyydellä tarkkailupisteestä laukaistava ase. Laukaisuhetki nähtiin suuliekkien välähdyksestä, jolloin kuluneen ajan ja etäisyyden perusteella voitiin laskea nopeus. Mersenne luopui Baconin luonnonmagiasta; kirkonmiehenä hänellä oli uskonnollisia tavoitteita kokeilleen. Kokeidensa perusteella hän esimerkiksi laski, missä ajassa tuomiopäivän pasuuna kuuluisi kaikkialla maailmassa paikasta, jossa sitä soitetaan. Tulos oli noin 10 tuntia. Koejärjestelyjen tarvetta Mersenne perusteli kuitenkin myös sillä, että näin saataisiin selville, hidastuuko äänen nopeus etäisyyden kasvaessa. Kokeidensa perusteella hän totesi, että näin ei ollut. Äänennopeuden hän osoitti kokeidensa perusteella myös riippumattomaksi äänilähteen voimakkuudesta.²⁰

Galilei ja Mersenne tutkivat samanaikaisesti kielen värähtelyä. Galilei laati ensimmäisen matemaattisen kokonaisuutensa kielen värähtelytaajuuden riippuvuudesta kielen pituudesta, halkaisijasta, tiheydestä ja jännityksestä. Myös Mersenne esitti kielen värähtelyt matemaattisessa muodossa. Hän myös määritteli kokeellisesti kielen värähtelytaajuudet siten, että koejärjestelyyn osallistuneista tarkkailijoista osa mittasi aikaa ja osa värähtelyjen lukumäärää.²¹

Ainoa mitattavissa oleva luonnonvakio

akustiikan alalla oli pitkään äänennopeus, jonka mittaustulokset poikkesivat toisistaan hyvinkin paljon, sillä koejärjestelyjen olosuhteita ei raportoitu. Ensimmäinen nykykriteerein tarkaksi katsottava mittaustulos saatiin Pariisissa 1738 Ranskan tiedeakatemian suorittamista mittauksista, joiden mitausolosuhteet raportoitiin. Tätä mittausta seuranneet huolellisesti tehdyt mittaustulokset ovat poikenneet 200 vuoden aikana vain prosentin verran. 1600-luvulla muiden muassa Robert Hooke ja Robert Boyle päättelivät tyhjiökokein ilman olevan äänen etenemisen väliaine. Äänennopeusmittausten lisäksi tyhjiökokeita toistettiin usein. 1600-luvun loppuun mennessä luonnonmagian traditioon perustuva poikkeuksellisten ääni-ilmiöiden raportointi korvautui ääni-ilmiöiden kokeellisella tutkimuksella. Tähän vaikutti erityisesti tieteellisten seurojen perustaminen. 1600-luvun lopulla tiedemiehet olivat sitä mieltä, että he olivat onnistuneet tuottamaan akustiikasta tietoa, joka loi paremman käsityksen akustiikasta kuin antiikin filosofeilla oli ollut.²²

Englantilaiset tiedemiehet olivat 1600-luvun loppupuolella yhtä mieltä siitä, että ääni on ilman aaltoliikettä, mutta liikkeen yksityiskohdista oli erimielisyyttä. Hooke ja Boyle olivat tietoisia resonanssin, harmonisen liikkeen ja värähtelevän kappaleen aineominaisuuksien yhteydestä. Newton yhdisti nämä ilmiöt matemaattiseksi selitykseksi äänen etenemisestä. Newtonin mukaan ääniaallot ovat toisiaan seuraavia ilman tihentymiä ja harventumia, jotka leviävät pallon muodossa kaikkiin suuntiin. Yksinkertaisuuden vuoksi Newton kuvasi pitkittäisaallon matemaattisesti yhdessä ulottuvuudessa: ilmahiukkaset värähtelevät edestakaisin noudattaen kukin harmonisen liikkeen sääntöjä kuten heiluri. Newton myös laski teorioidensa perusteella vuonna 1687 äänennopeuden ilmassa, joskin hänen tuloksensa oli alhainen todelliseen arvoon verrattuna. Mersennen, Hooken ja New-

tonin tutkimuksissa matemaattisia teorioita testattiin kokeellisesti, ja 1700-luvulle tultaessa käytäntö oli vakiintunut myös akustikassa.²³

YHTEISKUNNALLINEN MUUTOS LUO TUTKIMUSTARVETTA

Keskiajan Euroopassa musiikin teoriaa kehitettiin erityisesti katolisen kirkon piirissä. Paavi Gregorius Suuren nimiin on luettu nuottikirjoituksen uudistus: gregoriaaniseen nuottikirjoitukseen lisättiin Gregoriuksen vuonna 590 alkaneen kauden aikana sävelpituus. 1500-luvulla musiikki kuului oleellisena osana uskonnollisen elämän lisäksi hovielämään. Kirkko ja hovi olivat kaksi tärkeintä musiikin esityspaikkaa. Kirkkomusiikki oli julkista, mutta hovimusiikkia esitettiin suhteellisen pienille, ruhtinaitten koolle kutsumille seurueille. Hovimusiikin esitystilanteiden yksityisluonnetta korosti se, että hoviin kuuluvien ihmisten oli tavoiteltavaa osata laulaa tai soittaa jotakin instrumenttia. Hovin jäsenet soittivat palkattujen muusikoiden kanssa, jotka myös toimivat musiikinopettajina.²⁴

Teollinen vallankumous johti siihen, että porvaristolle alkoi kertyä varallisuutta. Myös yhteiskunnallinen aloitteenteko siirtyi yhä enemmän porvaristolle niin, että 1800-luvulle tultaessa porvaristo oli monessa suhteessa muuttunut johtavaksi säädyksi aatelin tilalle. Varallisuuden karttuminen mahdollisti sen, että porvaristo pääsi nauttimaan tai halusi nauttia taiteista. Tämä johti teatterin, oopperan ja konserttiesitysten kaupallistumiseen. Ensimmäisenä kaupallistuminen tapahtui siellä, missä porvaristo vaurastui voimakkaimmin ja varhaisimmin: Englannissa ja Alankomaissa.²⁵

Kaupallistuminen muutti musiikin esitystilanteen uudenlaiseksi: aiemmin julkiset esiintymiset saati palkkion vastaanottaminen olivat sopimattomia niille, joilla oli kor-

kea sosiaalinen status. Uusi konserttitilanne on verrattavissa tieteellisten kokeiden – ja luonnonmagian aikaisten ihmeiden – julkisiin esitystilanteisiin: virtuoosit esiintyivät yleisölle, jonka tehtävänä on passiivisesti seurata, todistaa ja arvioida esiintyjän virtuositeettia. Kaupallisuus tarkoitti lisäksi sitä, että esitykset rahoitettiin pääsylipputulolla toisin kuin hovimusiikki, jonka yleisö oli läsnä ruhtinaan kutsusta. Lontoossa teatterin ja musiikin kaupallistuminen tapahtui restauraation jälkeen 1600-luvun loppupuolella, kun kaupunki vaurastui nopeasti. Osittain siihen vaikutti myös kuningas Kaarle II, joka rakennutti Lontooseen kaksi julkista teatteria, jotka olivat avoimina yleisölle, eivät pelkästään aristokratialle. Samaan aikaan Lontoon kapakat ja krouvit alkoivat tarjota musiikkiesityksiä; aluksi esiintyjien palkan maksoi kapakoitsija, mutta ennen pitkää kuulijoilta alettiin periä pääsymaksua. Ensimmäisen kaupallisen konsertin, jossa kuulijat maksoivat pääsymaksun päästäkseen passiiviseksi kuuntelijaksi, järjesti John Banister vuonna 1672. Banister oli entinen hovimuusikko, joka aloitti julkiset konsertit menetettyään työnsä hovissa. Vuonna 1676 hänen konserteissaan oli 50 muusikkoa soittamassa yhdessä.²⁶

Lontoossa ensimmäinen varta vasten konserttikäyttöön tarkoitettu rakennus rakennettiin 1670-luvun lopulla. Vuosisadan vaihtuessa Lontoossa oli jo useita konserttisaleja, joita käytettiin myös tieteellisiin näytöksiin. Vastaava teatterin, oopperan ja musiikin kaupallistuminen tapahtui 1700-luvun kuluessa myös muualla Euroopassa niin, että vuosisadan loppuun mennessä teatterista ja konserteista oli tullut julkista toimintaa ja suosittua ajanvietettä esimerkiksi Pariisissa, Leipzigissa, Berliinissä, Wienissä, Dublinissa ja Tukholmassa. Saksassa ensimmäinen konserttisaliksi nimitetty rakennus valmistui 1761 Hampuriin, jolla oli tiiviit yhteydet Englantiin. Leipzigissa kangaskauppiaiden entinen messurakennus muu-

tettiin 1781 konserttisaliksi (Gewandhaus). Saksassa myös moni yleisöltä vanhastaan suljettu hoviooppera avasi ovensa yleisölle. Lontoossa tiedetään pidetyn vuosina 1750–1800 noin 5000 julkista konserttia. 1700- ja 1800-lukujen vaihte merkitti hovimusiikin aikakauden päättymistä ja sen korvautumista porvarillisella musiikkikulttuurilla, jonka keskuksena oli kaupallinen, pääsymaksuun ylläpidettävä konserttisali tai teatteri.²⁷

Musiikkielämän ja teatterin kaupallistuminen loi uudet sosiaaliset ja akustiset olosuhteet: 1700-luvun kaupalliset teatterit ja konserttisalit olivat suurempia kuin edeltäjänsä hoviteatterit ja palatsien musiikkisalit. Tyypillisessä hovioopperassa oli enintään noin 500 istumapaikkaa, mutta vuonna 1782 valmistuneessa La Scala -oopperatalossa Milanossa on 2300 paikkaa. Koska esitykset rahoitettiin pääsylipputulolla, esitystilojen ylläpito oli sitä tuottavampaa, mitä enemmän paikkoja oli. Samalla kuitenkin kuuluvuus tuli haasteellisemmaksi – hoviteattereissa kuuluvuusongelmia ei yleensä ollut, koska ne olivat pieniä. Kuuluvuus tuli entistä tärkeämmäksi myös siksi, että maksava yleisö edellytti rahansa vastineeksi pystyvänsä näkemään ja kuulemaan esityksen.

1700-luvun lopulta lähtien äänen kuuluvuuteen liittyvän huoneakustiikan – silloin vielä tuntematon termi – ongelmien ratkaisun katsottiin löytyvän tilan muodosta. Ranskalainen arkkitehti Pierre Patte tutki äänen leviämistä piirtämällä äänisäteitä ja heijastuksia tilan pinnoista. Englantilainen George Saunders selvitti ihmisen pään suuntaavuutta: kuulija kulki ääntä tuottavan ihmisen ympärillä joka suunnassa ja merkitsi kaukaisimman pisteen, jossa ääni oli kuultavissa. Optimaalista tilaa yritti löytää moni muukin, mutta lukuisissa ehdotuksissa yksimielisyys vallitsi lähinnä siitä, että tilan muoto on ratkaiseva tekijä, jonka avulla esiintyjän ääni saadaan vahvistetuksi. 1850-luvun puolivälissä yhdysvaltalainen Joseph Henry arvioi, että pelkkä tilan muoto ei voi rat-

kaista asiaa, vaan huomiota on kiinnitettävä myös tilassa oleviin materiaaleihin ja niiden kykyyn vaimentaa ääntä. Henryn ajatukset energiahäviöiden merkityksestä akustiikassa eivät kuitenkaan levinneet laajalle.²⁸

Saksalainen fyysikko Ernst Chladni julkaisi 1802 kirjansa *Die Akustik*, joka sisälsi paljon havainnointia ja sanallista kuvailua äänen syntymekanismeista, leviämisestä ja äänen aistimisesta, mutta ei juuri matemaattista formulointia. Vaikka Chladnin kerrotaan osallistuneen Berliinin Singakademien 1200-paikkaisen konserttisalin suunnitteluun vuonna 1827, huoneakustinen suunnittelu jäi 1800-luvulla kokemuseräiseksi ilman teoreettista taustaa ja akustiikan käytännön sovellukset vähäisiksi.²⁹

Konsertti-instituution kehittymisen synnyttäjä konserttisalien rakennusperinne tuotti 1800-luvulla monia edelleen akustiikaltaan korkeatasoisina pidettäviä saleja, kuten Wienin Musikvereinin, joka usein mainitaan maailman parhaaksi. Kuva: Mikko Kylliäinen.

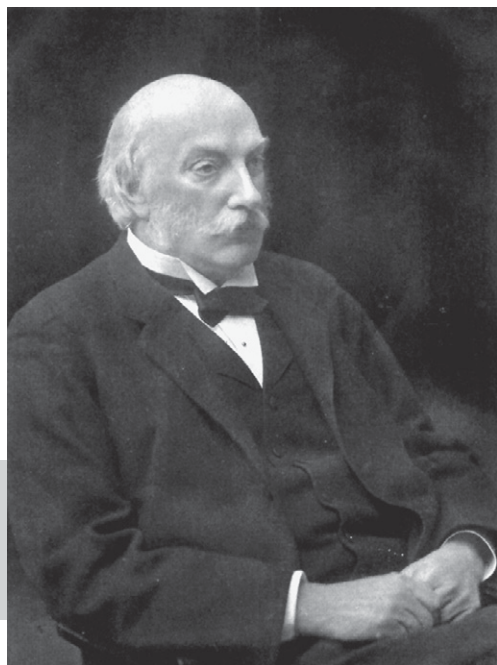
MATEMATIIKKA LUO POHJAN TEORIOILLE JA SÄHKÖ MITTAUKSILLE

Antiikin ajasta saakka akustiikan ongelmana oli ollut se, että ei ollut olemassa mittalaitteita, joilla akustisia ilmiöitä olisi ollut mahdollista havainnoida, vaan kaikki havainnot perustuivat kuuloon. Kuuloaistimuksen epäluotettavuuden vuoksi ääni-ilmiöt haluttiin selittää matemaattisesti. Joitakin muiden tieteiden tuloksia pystyttiin kuitenkin soveltamaan akustiikassa. Esimerkiksi diffraktio eli valon taittuminen kulmissa selitettiin optiikassa 1600-luvulla. Newton tutki aaltoja vedessä ja totesi, että aallon kohdatessa esteen myös liikkumaton vesi esteen takana alkaa liikkua. Pääteltävissä ja havaittavissa oli myös se, että äänikin on kuultavissa esteen takana, vaikka näköyhteyttä äänilähteestä tarkastelupisteeseen ei ole. 1700-luvulla matemaattisten teorioiden testaus kokeellisesti oli vakiintunut tieteellinen käytäntö, mutta nyt akustiikan kehitystä hidasti mittalaitteiden puutteen lisäksi se, että matemaattiset analysointimenetelmät eivät riittäneet ku-



vaamaan ääni-ilmiöitä. Tämä oli akustiikan kehityksen toinen pullonkaula.³⁰

Ennen Newtonia kaikki edistysaskeleet akustiikassa tehtiin matematiikkaa hyödyntämättä. Newtonin aika oli käännekohta, ja hänen sekä Leibnitzin differentiaalilaskenta otettiin käyttöön myös akustiikassa, ja 1713 Newtonin liikeyhtälöä sovellettiin ensimmäisen kerran liikkuvan kappaleen yhteen osaan. Matematiikan kehitys 1700-luvulla mahdollisti sen, että Daniel Bernoulli, Jean de la Rond d'Alembert ja Leonhard Euler saattoivat esittää analyyttisen ratkaisun värähtelevän kielen liikeyhtälölle. Jean Louis Lagrange ratkaisi yhtälön olettamalla kielen koostuvan lukuisista pienistä massoista, joiden määrän hän kasvatti äärettömän suureksi ja massan häviävän pieneksi. Yhtälön hän ratkaisi monen vapausasteen dynaamisena järjestelmänä ja sai tulokseksi matemaattisen yhteyden taajuuden ja massojen määrän välillä. Näistä taajuuksista käytetään nykyisin nimitystä ominaistaajuus.³¹



Akustiikan edistyminen edellytti yhä enemmän muiden tieteiden soveltamista. Mekaniikan, termodynamiikan ja sähköopin oli kehityttävä riittävästi ennen kuin akustiikassa voitiin edetä käytännön sovelluksiin. Nykyaikaisen fysikaalisen akustiikan perusta syntyi 1800-luvun loppupuolella lordi Rayleigh'n työn tuloksena. Lordi Rayleigh'n pääteos *The theory of sound* ilmestyi 1877–1888. Rayleigh esitti matemaattiset mallit akustisesti kiinnostavien dynaamisten järjestelmien värähtelylle, värähtelevän kappaleen ympäristöönsä tuottamalle äänelle sekä äänen etenemiselle nesteissä ja kaasussa. Rayleigh'n teoksen on sanottu merkinneen klassisen fysikaalisen akustiikan päättymistä ja tien avausta nykyaikaiseen fysikaaliseen akustiikkaan. Vaikka Rayleigh'n teosta ja artikkeleita siteerataan edelleen, *The theory of sound* jäi Rayleigh'n elinaikana merkitykseltään vähäiseksi samoja asioita tutkivia tiedemiehiä lukuun ottamatta. Tämä johtui siitä, että mahdollisuuksia käytännön sovelluksiin Rayleigh'n teorioiden perusteella ei ollut eikä mittausten menetelmiä, joilla ääni-ilmiöitä olisi voitu todentaa. Ensimmäisen maailmansodan jälkeen teoksesta sitä vastoin on otettu monia uusintapainoksia.³²

Mittalaitteita ja äänilähteitä oli yritetty kehittää jo pitkään. Robert Hooke rakensi sireeniä muistuttavan laitteen 1600-luvulla. Samantapaisen sireenin avulla Felix Savart määritteli ihmisen kuuloalueen ylärajaksi 24 000 Hz. Tämä tulos perustui taajuuden sireenin siipien määrään ja pyörimisnopeuteen, joista saatiin lasketuksi taajuus. Nykysäilyksestä Savartin tulos poikkesi 4 000

Kaikkien aikojen suurimmaksi akustikoksi mainittu John William Strutt (1842–1919) eli lordi Rayleigh avasi tutkimuksillaan tietä nykyaikaiseen fysikaaliseen akustiikkaan.



Wallace Clement Sabinen (1868–1919) tutkimukset loivat pohjaa akustiikkaan erikoistuneen insinöörikunnan, materiaaliteollisuuden ja testaustoiminnan synnylle.

Hz ylöspäin. 1800-luvulla ainoa standardiäänilähde oli äänirauta. Optisin välinein äänen aaltoliike voitiin saada näkyviin, mutta ilmiöiden suuruutta ei ollut mahdollista mitata. Tästä huolimatta 1800-luvun akustikassa päästiin tuloksiin, jotka loivat pohjan 1900-luvun akustiikalle. Lordi Rayleigh'n lisäksi merkittävästi akustiikan kehitykseen vaikuttanut 1800-luvun tiedemies oli Hermann von Helmholtz, joka kirjoitti vuosina 1856–1869 artikkeleita akustikasta. Hänen pääteoksensa ilmestyi 1862, ja siinä hän yhdisti tietonsa fysiologiasta ja fysiikasta akustiikkaan. Nimeään kantavien resonaattorien avulla hän tutki ihmisen puheentuodostusta ja päätyi siihen, että konsonantit syntyvät äänihuulten tuottaman perusäänen resonoinnista suun muodostamassa kammiossa. Helmholtz selitti myös kuuloaistimuksen syntymisen ja tutki erilaisten äänten häiritsevyyttä. Näin hän loi perustaa fysiologisle akustiikalle.³³

Helmholtzin äänilähteinä olivat sireeni ja äänirauta, mutta sähköopillinen perusta sähköakustiikalle oli alkanut hahmottua 1820-luvulta asti. Akustiikan tutkimus edellytti vakioäänilähteitä ja mittalaitteita, joiden äänenkehitys ja mittaustulokset olisivat toistettavissa. Vaikka tieteenekijät tiedostivat nämä ongelmat, ratkaisua niihin ei tieteen piirissä pystytty kehittämään. Ratkaisu pohjautui 1800-luvun keksijöiden, kuten Thomas Alva Edisonin ja Alexander Graham Bellin, työhön puhelimen, radion, äänen-toiston ja -tallennuksen parissa, mutta sähköakustiikkaan perustuvat mittaukset tulivat mahdollisiksi vasta 1900-luvun puolella.³⁴

Ilman sähköakustisia mittalaitteita työskenteli myös Wallace Clement Sabine, jonka vaikutus siihen, miten akustiikka alkoi vaikuttaa tieteen ulkopuolella, oli suuri. Sabine oli aloittanut tiedemiehen uransa sähköopin tutkijana. Monien muiden 1800-luvun lopun fyysikoiden tavoin hän pohti energiaperiaatteiden soveltamista – niitä sovellettiin yleensä valoon, lämpöön ja sähköön, mutta Sabine sovelsi niitä ääneen. Lähtökohta Sabinen tutkimuksille akustiikan alalla oli käytännöllinen: hän sai 1895 tehtäväkseen tutkia, kuinka Harvardin yliopiston vasta valmistunut luentosalii, jossa luentoja ei pystytty pitämään liiallisen kaiunnan takia, saataisiin otetuksi siihen käyttöön, johon se oli tarkoitettu. Sabinea kehoitettiin selvittämään, kuinka kaiunta voitaisiin vähentää ja kehittämään kvantitatiivinen mittaluku tilan akustisen laadun arvioimiseksi.³⁵

Sabine lähestyi ongelmaa kokeellisesti. Aluksi hän kokeili optisia järjestelmiä, mutta niiden tulosten tulkitsemiseen ei löytynyt käyttökelpoista tapaa. Näin ollen hän luopui katsomiseen perustuvista äänen mittaustavoista ja alkoi kuunnella sitä. Äänilähteenä Sabinella oli urkupilli, jonka taajuus oli 512 Hz. Mittalaitteita ei ollut, vaan urkupilli soi tilassa määrätyn ajan, minkä jälkeen Sabine kuunteli, kauanko hän pystyi erottamaan vaimenevan äänen. Samalla mitattiin vai-

menemiseen kuluva aika. Mittauksia tehtiin noin 3000 kappaletta erilaisissa tiloissa, joita muunneltiin lisäämällä niihin pehmeitä materiaaleja.³⁶

Sabine teki mittauksiaan vuosikausia ilman matemaattiseksi kaavaksi muodostettavaa tulosta. Ratkaisu löytyi, kun Sabine sovelsi energiaperiaatteita äänen vaimenemiseen. Hän päätteli, että äänienergia muuttuu materiaalin kohdatessaan lämmöksi ja tilaa rajaavien pintojen liike-energiaksi. Samantapaisia ajatuksia oli esittänyt Joseph Henry noin 50 vuotta aiemmin, mutta Sabine päätyi tähän ajatukseen ilmeisesti Henryn työtä tuntematta. Vuonna 1900 Sabine määritteli absorptioalan käsitteen: 1 m^2 :n absorptioala tarkoittaa 1 m^2 :n pinta-alaa, joka on tehty materiaalista, joka absorboi täysin äänen, joka materiaalin kohtaa. Samalla hän määritteli absorptiosuhteen, joka on materiaalin ominaisuus. Tilan absorptioala saatiin selville, kun tiedettiin tilassa olevien materiaalien pinta-alat ja absorptiosuhteet. Koetuloksistaan Sabine määritteli tilan akustista laatua kuvaavaksi tunnusluvuksi jälkikaiunta-ajan, jolle hän johti tuloksistaan kokeellisen kaavan. Sen mukaan jälkikaiunta-aika oli laskettavissa tilan absorptioalan ja tilavuuden perusteella. Huoneakustiikkana nykyisin tunnettu tieteen ja tekniikan ala, joka tutkii äänen kulkua ja vaimenemista tilassa, perustuu Sabinen työhön – esimerkiksi kuuluisa Sabinen kaava on akustiikkaa suunnittelevien konsulttien päivittäisessä käytössä edelleen.³⁷

NYKYAIKAINEN AKUSTIIKKA MUUTTA MAAILMAA

Jälkikaiunta-ajan kaavan johtaminen mahdollisti sen, että Sabine saattoi ottaa tehtäväkseen Bostonin suunnitteilla olevan uuden konserttisalin, Symphony Hallin, akustisen konsultoinnin. Suunnittelua varten Sabine tutki silloin olemassa olevia hy-

viksi tunnettuja konserttisaleja ja laski niiden jälkikaiunta-aikoja. Tästä yksittäisestä rakennushankkeesta lähtien akustiikan voidaan sanoa alkaneen vaikuttaa myös tiedeyhteisön ulkopuolella. Symphony Hall on ensimmäinen rakennus, jonka suunnittelussa on varmuudella käytetty tieteelliseen tietoon perustuvia menetelmiä ihmisen ääniympäristön hallitsemiseksi. Sabinen työ tiedemiehenä loi perustan paitsi huoneakustiikalle tieteenalana, myös akustiselle konsultoinnille sekä materiaaliteollisuudelle.³⁸

Sabine kehitti menetelmänsä edelleen ilman objektiivisia mittalaitteita. Nykyaikaisen akustiikan kehittymiseen niin, että teoreettiset ääni-ilmiöiden mallit voidaan todentaa mittauksin tai mittauksin havaita uusia ilmiöitä selitettäväksi matemaattisesti, vaikutti toisaalta ensimmäinen maailmansota ja toisaalta sähköakustiikan alalla toimivien yritysten tarve parantaa tuotteitaan. Ensimmäisen maailmansodan aikana suuri joukko yhdysvaltalaisia tiedemiehiä oli armeijan palveluksessa, myös Sabine, joka sairastui sota-aikana ja kuoli 1919. Toisin kuin Sabine, joka luotti kuuloaistiin mittarina, monet muut etsivät sähköisiä keinoja äänen mittaamiseksi. Sodassa kuuntelemisen merkitys oli suuri: rintamalla sotilaat käyttivät kuulotorvia vihollisen lentokoneiden havaitsemiseksi; eri etäisyyksillä olevien mikrofonien avulla pääteltiin kolmiomittauksin, millä etäisyydellä ja missä suunnassa vihollisen tykistö oli asemassa. Erityisen vaikea, mutta tärkeä alue sodassa oli äänimittaus sukellusveneiden havaitsemiseksi.³⁹

Akustiikkaan perehtyneiden tutkijoiden työllä oli ehkä osansa sotatoimien menestyksessä, mutta sota vilkastutti tutkimustoimintaa: Yhdysvalloissa ennen sotaa American Physical Societyn järjestämissä konferensseissa esitettiin ennen vuotta 1919 enintään neljä akustiikkaa koskevaa artikkelia vuosittain, mutta vuonna 1920 artikkeleita oli 19. Amerikkalaiset tiedemiehet, joista suurin osa oli osallistunut sotaan, perustivat 1922

komitean pohtimaan akustiikan tutkimuksen erityiskysymyksiä. Listattujen 13 akustiikan alueen ongelmista suurin osa näytti liittyvän puuttuvaan ja sopivaan mittauskalustoon. Tämän puutteen todettiin olevan ratkaiseva este akustiikan kehitykselle.⁴⁰

Komitea huomioi raportissaan myös uudenlaisen mittalaitteen, kondensaattorimikrofonin, jonka oli kehittänyt Edward Wente 1916. Mikrofoni ei ollut tieteellisen tutkimuksen tulos, vaan teollisuuden tarpeisiin kehitetty tutkimusväline. Bellin puhelimessa ollut mikrofoni ei ollut kovin herkkä ja sen signaali oli heikko ja vaikea välittää varsinkin pitkillä etäisyyksillä. Radio- ja puhelinteollisuus oli Yhdysvalloissa perustanut akustisia laboratorioita 1900-luvun alusta lähtien. Yksi teollisuuden kehitystavoitteista oli puhelimen äänenlaadun parantaminen. Sopivat tutkimuslaitteet puuttuivat, ja vuodesta 1913 tehdyn kehitystyön tuloksena saatiin rakennetuksi kondensaattorimikrofoni. Se mahdollisti toistettavat mittaukset ja kykeni erilaisiin mittalaitteisiin kytkettynä tuottamaan tuloksena absoluuttisia fysikaalisia suureita. Kondensaattorimikrofonista tuli nopeasti kaupallinen tuote, ja vuoteen 1930 mennessä yliopistojen ja teollisuuden akustiikkalaboratoriot olivat täynnä niitä.⁴¹

Ennen 1920-lukua akustiikka oli ollut vielä jokseenkin merkityksetön ihmisten elinympäristön ja -olosuhteiden kannalta. Akustiikan kehitystä oli aiemmin rajoittanut matemaattisten analyysimenetelmien puute ja sen jälkeen objektiivisten mittalaitteiden puute. Akustisia ilmiöitä oli pystytty pitkään todentamaan vain subjektiivisesti tutkijan kuuloaistin avulla, toisaalta ei ollut olemassa vakioäänilähteitä, jotka tuottaisivat aina samanlaisen herätteen. Tieteellisten kokeiden luotettavuus ja toistettavuus olivat siten pitkään olleet ongelmallisia.

Sähköakustiikan edistyminen 1800-luvun lopulla ja 1900-luvun alkuvuosikymmeninä johti nopeaan muutokseen: sähköiset äänilähteet ja mittalaitteet mah-

dollistivat objektiivisen tieteellisen tutkimuksen, mutta niiden myötä mahdolliseksi tuli kokonaan uudenlainen tekniikka, kuten puhelin, radio, äänielokuva sekä äänentallennus- ja toisto. Nämä asettivat vaatimuksia tiloille, joissa äänentallennus tai -toisto tapahtui: 1900-luvun alussa akustiikka synnytti myös materiaaliteollisuuden, testauksen ja mittaustoiminnan sekä akustiseen suunnitteluun erikoistuneen insinöörinkunnan. 1930-luvulla eri maissa laadittiin ehdotuksia rakennusten ääneneristysmääräyksiksi; suurkaupungeissa mitattiin liikenteen aiheuttamaa melua ja pohdittiin keinoja sen vähentämiseksi. Viimeistään 1930-luvulta lähtien akustiikka onkin ollut yksi keino, jonka avulla ihminen on voinut hallita ympäristöään: torjua epätoivottua ääntä eli melua, jonka lähteenä on ihmisen oma toiminta, kuten koneet ja liikenne, tai luoda toiminnalleen sopivat olosuhteet esimerkiksi ääneneristyksen, huoneakustiikan, sähköakustiikan ja äänentoiston keinoin.⁴²

Kirjoittaja on tekniikan lisensiaatti ja akustiikan asiantuntija Insinööritoimisto Heikki Helimäki Oy:ssä.

¹ Lindsay 1973, s. 1–3; Gouk 1999, s. 157–158.

² Lindsay 1973, s. 1–3.

³ Hunt 1978, s. 4–5.

⁴ Hunt 1978, s. 6–10.

⁵ Lindsay 1966, s. 629; Lindsay 1973, s. 4.

⁶ Hunt 1978, s. 10–14.

⁷ Hunt 1978, s. 14–17 ja 24.

⁸ Hunt 1978, s. 23 ja 27.

⁹ Lindsay 1966, s. 635; Hunt 1978, s. 19, 24 ja 26–27.

¹⁰ Hunt 1978, s. 23 ja 27; Vitruvius 1960, s. 138–139.

¹¹ Hunt 1978, s. 15 ja 21–22.

¹² Hunt 1978, s. 19–20.

¹³ Vitruvius 1960, s. 137–139 ja 153.

¹⁴ Hunt 1978, s. 21–23 ja 32.

¹⁵ Hunt 1978, s. 49–50 ja 55–56.

¹⁶ Hunt 1978, s. 69–70.

- ¹⁷ Hunt 1978, s. 62–63; Lindsay 1966, s. 635; Thompson 2002, s. 18.
- ¹⁸ Lindsay 1966, s. 629; Hunt 1978, s. 75–77; Gouk 1999, s. 157–158.
- ¹⁹ Gouk 1999, s. 159–161 ja 171.
- ²⁰ Gouk 1999, s. 171–174; Hunt 1978, s. 85–99.
- ²¹ Hunt 1978, s. 82–85; Gouk 1999, s. 173–174.
- ²² Lindsay 1966, s. 635; Hunt 1978, s. 116–117; Gouk 1999, s. 191–192.
- ²³ Gouk 1999, s. 248–250.
- ²⁴ Hunt 1978, s. 47; Gouk 1999, s. 33–34.
- ²⁵ Tegen 1986, s. 13–25; Thompson 2002, s. 20; Skoda 2001, s. 13.
- ²⁶ Gouk 1999, s. 54–60.
- ²⁷ Gouk 1999, s. 60–61; Weinzierl 2001, s. 25 ja 38–40; Beranek 2004, s. 8–11; Skoda 2001, s. 14.
- ²⁸ Thompson 2002, s. 21–24 ja 26–28.
- ²⁹ Beyer 1998, s. 2–4; Weinzierl 2002, s. 42.
- ³⁰ Lindsay 1966, s. 636–637; Hunt 1978, s. 10.
- ³¹ Hunt 1978, s. 139–142, Lindsay 1966, s. 631–632.
- ³² Lindsay 1945, s. 27–29; Lindsay 1966, s. 632.
- ³³ Hunt 1978, s. 136–137; Lindsay 1966, s. 634; Beyer 1998, s. 57–67.
- ³⁴ Beyer 1998, s. 62.
- ³⁵ Thompson 2002, s. 34; Sabine 1900, s. 3.
- ³⁶ Thompson 2002, s. 35–36, Sabine 1900, s. 14–15.
- ³⁷ Thompson 2002, s. 37–40.
- ³⁸ Thompson 2002, s. 42 ja 47–75.
- ³⁹ Thompson 2002, s. 87–88.
- ⁴⁰ Thompson 2002, s. 89–90.
- ⁴¹ Thompson 2002, s. 90–94.
- ⁴² Lindsay 1973; Hunt 1979; Thompson 2002.

LÄHTEET:

- BERANEK, L. 2004. Concert halls and opera houses – Music, acoustics, and architecture. New York, Springer-Verlag.
- BEYER, R. T. 1998. Sounds of our times – two hundred years of acoustics. New York, Springer-Verlag.
- GOUK, P. 1999. Music, science and natural magic in seventeenth-century England. London, Yale University Press.
- HUNT, F. V. 1978. Origins in acoustics – The science of sound from antiquity to the age of Newton. New Haven, Yale University Press.
- LINDSAY, R. B. 1966. The story of acoustics. The Journal of the Acoustical Society of America. Vol. 39(4), s. 629–644.
- LINDSAY, R. B. 1973. Acoustics: historical and philosophical development. Stroudsburg, Dowden, Hutchinson & Ross.
- SABINE, W. C. 1900. Reverberation. Collected papers on acoustics. New York, Dover Publications (toim. Theodore Lyman 1922, 2. p. 1964).
- SKODA, R. 2001. Die Leipziger Gewandhausbauten. Berlin, Verlag Bauwesen.
- TEGEN, M. 1986. Populär musik under 1800-talet. Stockholm, Reimers.
- THOMPSON, E. 2002. The soundscape of modernity – Architectural acoustics and the culture of listening in America, 1900–1933. Cambridge, The MIT Press.
- VITRUVIUS. 1960. The ten books on architecture. New York, Dover Publications.
- WEINZIERL, S. 2002. Beethovens Konzerträume – Raumakustik und symphonische Aufführungspraxis an der Schwelle zum modernen Konzertwesen. Frankfurt am Main, Verlag Erwin Bochinsky.