

Fysiikan ja musiikin oppiaineintegrointi lukiotasolla

Pro gradu -tutkielma, 29.12.2014

Tekijä:

MARKKU SIIRONEN

Ohjaaja:

JUHA MERIKOSKI



JYVÄSKYLÄN YLIOPISTO
FYSIKAN LAITOS

TIIVISTELMÄ

Siironen, Markku

Fysiikan ja musiikin oppiaineintegrointi lukiotasolla

Pro gradu -tutkielma

Fysiikan laitos, Jyväskylän yliopisto, 2014, 101 sivua

Fysiikan ja musiikin oppiaineintegraatiosta on vähän tutkimusta, vaikka oppiaineet tarjoavat lukuisia mahdollisuuksia integroinnin toteuttamiseen. Integrointi auttaa tutkittuun muodostamaan opetettavista sisällöistä arjessa sovellettavia merkityksellisiä kokonaisuuksia. Tällöin opetus valmentaa opiskelijaa paremmin elämässä tarvittaviin taitoihin. Integrointi vaatii opettajilta käytännössä paljon, ja kahden aineen sisältöjen ja aikataulujen sovittaminen yhteen on haastavaa.

Tämän tutkielman tarkoitus on kartoittaa lukion oppimäärän sisällä olevia integrointimahdollisuuksia ja antaa esimerkkejä integroituvista sisällöistä. Kartoitus perustuu voimassa olevien opetussuunnitelmien, oppiaineiden oppikirjojen ja käytävissä olevien opetusvälineiden tarjoamiin eheytyismahdollisuuksiin. Eheytyesimerkit on kerätty tiettyjen yleisten koulusoittimien ympärille, joiden soittoa nuoret usein harrastavat. Tutkielman liitteissä esitellään erilaisia kokeellisia integrointi-ideoita.

Tutkielman pääpaino on fysiikan aalto-opin käsitteiden yhdistämisessä musiikkikasvatukseen sekä musiikkiluokan tarjoamien opetusvälineiden hyödyntämisessä fysiikan kokeellisuudessa. Ensisijaisesti keskitytään akustisten soittimien fysiikkaan ja niiden tuomiin integrointimahdollisuuksiin. Lisäksi sivutaan kuulonhuoltoa sekä musiikkiteknologian tuomia mahdollisuuksia sähköopin ja magnetismin käsittelyyn. Näin pyritään löytämään yhteys fysikaalisen ajattelutavan ja musiikillisen kehityksen välille.

Fysiikan ja musiikin integrointimahdollisuuksia on useita ja tässä tutkielmassa painotettu käsiteintegrointi on vain kapea leikkaus eri vaihtoehdoista. Käsitteiden integrointi antaa mahdollisuuden kytkeä fysiikan sisällöt ympäröivään maailmaan ja vähentämään virhekäsitysten määrää. Yhteys musiikkiin on mielekäs ja motivoiva kannustin opiskeluun, mikä mahdollisesti heijastuu suorana hyötynä opiskelijan henkilökohtaiseen musiikin harrastamiseen. Tutkielman aikana tehtiin kaksi lyhyttä integrointikokeilua ja huomattiin integroinnilla olevan positiivinen vaikutus opiskelumotivaatioon.

Jatkotutkimuksen kohteina voisivat olla oppimateriaalien integroituvuus, erilaiset opetuskokeilut sekä integroivien työohjeiden suunnittelu. Lisäksi oppiaineintegroinnilla on selviä sovelluskohteita musiikkiteknologiassa sekä mobiililaitteiden käytössä opetuksessa. Kahden aineen yhdistämisestä voisi olla myös hyötyä erityispedagogiikan tarpeisiin. Tutkielma on kirjoitettu fysiikan näkökulmasta, johon olisi tervetullutta saada myös musiikkikasvatuksen näkökulma oppiaineintegroinnista.

Avainsanat: Oppiaineintegrointi, eheyttäminen, fysiikka, musiikki, musiikkiteknologia

ABSTRACT

Siironen, Markku

Possibilities of integrating physics and music subject matter in Finnish upper secondary school

Master's thesis

Department of Physics, University of Jyväskylä, 2014, 101 pages.

There is a little research on integrating physics and music education even though these two subjects offer multiple opportunities for integration. It is a known fact that an integrated curriculum results in better learning by forming more coherent and structured content knowledge for the students. As a result students will have a better understanding of the subject matter. Integration has its difficulties because teachers have to work together to find ways to meld contents and schedules of different subjects.

This thesis tries to provide information about subject integration between physics and music in the Finnish upper secondary school. Based on the information collected from national curriculums, student text books and subject-specific teaching equipment, examples of integration are suggested. Examples are based on common musical instruments found in schools and instruments that students themselves are often playing. Different practical applications of integration are included in the appendices.

The main focus is on physical waves, especially sound and wave mechanics with emphasis on practical laboratory work and concept-understanding. Physics contents are compared to contents in music education and musical instruments available in the schools. Acoustic instruments receive special attention and in addition, topics on hearing loss and music technology are briefly explored in the context of electricity and magnetism. The goal of this integration is to reinforce the individual physical thinking and musicianship.

There are many fields where subject matter integration is possible and this thesis could cover only a minute amount of that. Integrating different concepts of physics and music to each other gives a very good way to make physics contents meaningful and hopefully reducing tendency to generate alternate frameworks for physics phenomena. Furthermore, relation to music is motivating for the student and might have gain in personal musical growth. Two short teaching experiments were conducted while writing the thesis and these confirmed the motivational gain with subject integration.

More research is needed and interesting topics could be text book analysis, different teaching experiments and designing practical exercises for laboratory work. Music technology and applications of mobile technology also present many opportunities for integration. In addition, combining two subjects could have benefits in the field of special education. This thesis is written from the physics point of view and naturally a view from music education could shed additional light to possibilities of subject integration.

Keywords: Integrated curriculum, integration of subject matter, physics, music, music technology

ESIPUHE

Olin pyöritellyt jo vuosia mielessäni fysiikan ja musiikin keskinäistä suhdetta tieteenaloina ja oppiaineina ja näin useita yhdistäviä tekijöitä. Musiikkiharrastukseni ja soitinrakennuskokeilujeni innoittamana päädyin jossain vaiheessa ajatukseen, että Pro graduni tavalla tai toisella liittyy sekä fysiikkaan että musiikkiin. Sain lisäksi päähäni poiketa pesunkestävän fyysikon aineyhdistelmästä ja hakea opiskelemaan musiikkikasvatusta. Ei minusta musiikkikasvattajaa tullut, vaikka pääsykokeissa hikoilin kahtena vuotena, mutta musiikin laitoksen vapaan sivuaineen kursseilla istuessani kaikki loksalti kohdalleen. Musiikin opiskelu fysiikan rinnalla vei pohtimaan asioita kummankin aineen näkökulmista ja ajatus oppiaineintegraatiosta heräsi. Keskustelut aiheesta fysiikan laitoksella dosentti Juha Merikosken kanssa lopulta poikivat kandidaatintyön ja edessäsi olevan – valmiin – gradun.

Tämä tutkielma on yliopisto-opintojeni huipentuma, jossa yhdistyvät rakkauteni musiikkiin, soitinrakentamiseen, fysiikkaan sekä kasvatustyöhön. Haluan ensiksi kiittää vanhempiani Mattia ja Mirjaa, isää ja äitiä, hyvästä kasvatuksesta sekä kannustuksesta ja tuesta, mihin ikinä olen tähän mennessä elämässäni päättänyt ryhtyä. Toiseksi kiitän nuorempia sisarusiani Sinikkaa ja Mikkoa siitä, että ovat kestäneet isoveljeään näinkin pitkään.

Juha ei ole pelkästään ohjannut vain graduani, vaan myös ollut neuvomassa opintojeni suunnittelussa ja potkimassa eteenpäin venyvän, monisyisen tutkintoni kanssa. Monet keskustelut opetuksesta, fysiikasta, musiikista ja soittimista gradupalaverien ohessa osoittavat, että myös jonkun toisen fyysikon mielestä gradun aihevalinnassa on ollut järkeä. Kiitos, Juha, ja urkuja odotellessa. Kiitän samassa yhteydessä Juhaa ja professori Jukka Maalampea graduani tarkastamisesta sekä fysiikan laitosta rahallisesta avusta, jolla sain vapautettua aikaa kirjoitustyöhön.

Niin opiskelun kuin gradunkin työmäärän ja murheen lievittämiseen paras lääke on ystävät. Haluankin kiittää ystäviäni tuesta, kannustuksesta ja opiskelun ulkopuoliseen elämään palauttamisesta. Erityisesti kiitän teitä Mikot – kaikki neljä, Ilkka, Miika, Ellu, Outi ja Pirjo.

Opetuskokeilut mahdollistivat tohtorikoulutettava Riku Tuovinen ja lehtori Marjut Pohjonen, jotka ennakkoluulottomasti luovuttivat oppilaansa armoilleni fysiikan ja musiikin ihmeelliseen maailmaan. Kiitos teille palautteesta ja rakentavista keskusteluista. Perhon keskuskoulun seiskojen tytöille kiitos ämpäriin huutamisesta ja ennakkoluulottomasta asenteesta opetuskokeilun aikana.

Harjoitus tekee mestarin myös opetustyössä. Vuosien mittaan olen saanut kunnian tehdä työtä hyvin erilaisten ja taitavien kasvattajien kanssa Perhon keskuskoululla sekä Onerva Mäen koulussa – teidän ansiostanne olen löytänyt oman opettajuuteni.

Lopuksi kiitän nuorekasta Harjun Laulua, varsinkin tenoreita, henkireikänä toimimisesta kaiken kiireen keskellä. Jou!

Jyväskylässä 29.12.2014
Markku Siironen

SISÄLTÖ

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Johdanto | 8 |
| 2 | Oppimiskäsityksestä | 10 |
| 2.1 | Motivaatiosta | 10 |
| 2.2 | Aktiivisesta oppimisesta | 11 |
| 3 | Oppiaineintegroinnista | 12 |
| 3.1 | Oppiaineintegroinnin historiasta | 12 |
| 3.2 | Motivaatio oppiaineintegraatioon | 12 |
| 3.3 | Fysiikan ja musiikin oppiaineiden integrointi peruskoulun ja lukion opetus- | |
| | suunnitelmissa | 13 |
| 3.3.1 | 1994 POPS | 13 |
| 3.3.2 | 2004 POPS | 14 |
| 3.3.3 | 2014 POPS | 15 |
| 3.3.4 | 1994 LOPS | 17 |
| 3.3.5 | 2003 LOPS | 18 |
| 4 | Musiikki ja fysiikka oppiaineina | 20 |
| 4.1 | Oppiaineiden luonteet ja ominaispiirteet | 20 |
| 4.1.1 | Fysiikan luonteesta | 21 |
| 4.1.2 | Musiikin luonteesta | 21 |
| 5 | Työtavoista | 23 |
| 5.1 | Oppilaslähtöisiä työtapoja | 23 |
| 5.2 | Yhteistoiminnallisia työtapoja | 24 |
| 5.3 | Opettajajohtoisia työtapoja | 26 |
| 6 | Integroinnin käytännön vaatimuksia | 28 |
| 6.1 | Opetustiloista | 28 |
| 6.2 | Opetusvälineistä ja oppimateriaalista | 29 |
| 6.3 | Ajankäyttö ja kustannukset | 30 |
| 7 | Soittimien fysiikasta | 32 |
| 7.1 | Kielisoittimet | 32 |
| 7.1.1 | Näppäilysoittimet | 33 |
| 7.1.2 | Jousisoittimet | 34 |
| 7.1.3 | Piano ja flyygeli | 35 |
| 7.2 | Puhallinsoittimet | 37 |
| 7.2.1 | Lehdettömät puhallinsoittimet | 38 |
| 7.2.2 | Vapaalehdykkäsoittimet | 39 |
| 7.2.3 | Yksilehtiset puupuhaltimet | 40 |
| 7.2.4 | Kaksilehtiset puupuhaltimet | 42 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 7.2.5 | Vaskipuhaltimet | 42 |
| 7.3 | Lyömäsoittimet | 44 |
| 7.3.1 | Sävelkorkeus määritely | 44 |
| 7.3.2 | Sävelkorkeus määrittelemätön | 45 |
| 7.4 | Sähkösoittimet | 46 |
| 7.5 | Ihmisiäni ja soittimet | 48 |
| 8 | Lukion integrointimahdollisuuksia | 50 |
| 8.1 | Fysiikka 3: Aallot | 50 |
| 8.1.1 | Aalto-opin käsitemaailma | 50 |
| 8.1.2 | Yleisiä aalto-opin ilmiöitä | 51 |
| 8.1.3 | Äänen fysiikkaa | 52 |
| 8.1.4 | Kuulonhuollosta ja äänenvoimakkuudesta | 53 |
| 8.2 | Muiden fysiikan kurssien integrointimahdollisuuksia | 54 |
| 9 | Päätelmät | 55 |
| | Lähteet | 59 |
| A | Työohjeista | 63 |
| B | Aaltoliikkeen perusyhtälö | 64 |
| B.1 | Taajuus | 64 |
| B.1.1 | Demonstraatio: Kitaran kielen virityksen riippuvuus jännityksestä | 64 |
| B.1.2 | Demonstraatio: Kielen massan vaikutus värähtelytaajuuteen | 67 |
| B.1.3 | Oppilastyö: Kielen pituuden vaikutus värähtelytaajuuteen | 69 |
| B.2 | Aallonpituus | 71 |
| B.2.1 | Oppilastyö: Putken pituus ja aallonpituus | 71 |
| B.2.2 | Projekti: Boomwhackersien rakentaminen | 73 |
| B.2.3 | Projekti: Poikkihuilun ja saksofonin valmistus | 75 |
| B.2.4 | Oppilastyö: Nokkahuilun reikien vaikutus | 77 |
| B.3 | Jaksonaika | 78 |
| B.3.1 | Oppilastyö: Jaksonajan mittaus | 78 |
| B.3.2 | Oppilastyö: Metronomi heilurina | 79 |
| C | Aaltoliikkeen energia | 80 |
| C.1 | Amplitudi | 80 |
| C.1.1 | Demonstraatio: Amplitudin vaikutus äänenvoimakkuuteen | 80 |
| C.2 | Intensiteetti | 81 |
| C.2.1 | Oppilastyö: Etäisyyden vaikutus intensiteettiin | 81 |
| C.2.2 | Demonstraatio: Desibelit ja korvanapit | 83 |
| D | Vuorovaikuttavat aallot | 84 |
| D.1 | Seisova aalto | 84 |
| D.1.1 | Demonstraatio: Seisova aalto | 84 |
| D.2 | Resonanssi | 85 |
| D.2.1 | Oppilastyö: Resonoiva kaikukoppa | 85 |
| D.2.2 | Oppilastyö: Kitarasta kitaraan | 87 |
| D.2.3 | Oppilastyö: Kitaran kielen välinen resonanssi | 88 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| D.3 | Interferenssi | 89 |
| D.3.1 | Demonstraatio: Interferenssi | 89 |
| D.4 | Yläsävelsarja | 90 |
| D.4.1 | Oppilastyö: Kanteleen yläsävelet | 90 |
| D.4.2 | Demonstraatio: Yläsävelsarja huiluäänien avulla | 91 |
| D.4.3 | Demonstraatio: Vokaalien erottaminen | 92 |
| D.5 | Huojunta | 94 |
| D.5.1 | Demonstraatio: Huojunta virityskeinona | 94 |
| D.5.2 | Demonstraatio: Huojunta äänensävyn luojana. | 96 |
| D.6 | Dopplerin ilmiö | 97 |
| D.6.1 | Demonstraatio: Dopplerin ilmiö | 97 |
| E | Perhon keskuskoulun opetuskokeilun pistetyöohjeet | 98 |
| E.1 | Kitaran fysiikka | 98 |
| E.2 | Pianon fysiikka | 99 |
| E.3 | Värähtelijän massan vaikutus | 100 |
| E.4 | Resonanssi kitarassa | 101 |

1 JOHDANTO

Albert Einstein oli innokas viulisti. Kerran hän esitti taitojaan kuuluisalle sellistille Gregor Piatigorskylle ja kysyi sitten: ”Miltäs kuulosti?” ”Suhteellisen hyvältä”, Piatigorsky vastasi.

-R. Giddings, Musical Quotes and Anecdotes.

Musiikki oli antiikin aikana tasavertaisessa asemassa tieteenä matematiikan ja astronomian kanssa. Musiikki on niistä päivistä kehittynyt ja monipuolistunut siihen pisteeseen, että nyky-yhteiskunnassa musiikin alalla voi kouluttautua hyvinkin pitkälle. Suomalaisessa yhteiskunnassa ja koulumaailmassa musiikki ei ole ollut vain oppiaine vaan harrastus, josta moni iloitsee päivittäin koko elämänsä ajan. Musiikki tarjoaa elämyksiä, ja on jopa saatu tutkimustuloksia, että kuorolaulu edistää ikääntyvien ihmisten hyvinvointia [58]. Tästä huolimatta musiikki on jäänyt aikojen saatossa tieteenä taka-alalle ja on jatkuvasti heikommassa asemassa verrattuna muihin aineisiin suomalaisessa koulujärjestelmässä. Tuntimäärät ja määrärahat supistuvat, mikä ajaa opettajat ahtaalle pienissä kouluissa. [46, s. 9–10] Samaan aikaan fysiikan opetuksessa päivittäin yritetään ymmärtää luonnon ilmiöitä ja niiden merkitystä ihmisen arkielämään. [30, s. 3] Yrityksistä huolimatta sisällöt jäävät usein todellisuudesta irrallisiksi kokemuksiksi. Ymmärtämisen ollessa puutteellista syntyy pahimmassa tapauksessa vahvoja virhekäsityksiä, joiden korjaaminen on työlästä. Musiikkia ja matematiikkaa on integroitu opetuksessa, ja tulokset ovat olleet lupaavia. [38, s. 44–46] Miksi siis fysiikka ja musiikki eivät voisi lähentyä toisiaan?

Aihe on ajankohtainen, koska esi- ja perusopetuksen opetussuunnitelman perusteiden uudistaminen, POPS 2014, valmistui vuoden 2014 lopussa. Uuden opetussuunnitelman luonnoksissa korostuu elämään liittyvien monialaisten oppimiskokonaisuuksien hyödyntäminen opetuksessa, jossa erityinen pääpaino on oppiaineintegroinnilla. Tarkoituksena on saada oppilaat ymmärtämään, miten eri oppiaineet liittyvät toisiinsa käytännön elämässä, ja toisaalta motivoimaan opiskeluun luomalla yhteyksiä oppitunneilta arkeen. Tässä tutkielmassa selvitetään lukion fysiikan ja musiikin oppiaineintegraation mahdollisuuksia erityisesti kummallekin aineelle yhteisten käsitteiden näkökulmasta.

Oppiaineintegraatiolla ja eheyttämällä on historiallisesti pitkät perinteet suomalaisessa koululaitoksessa ja sen opetussuunnitelmissa. Niiden tarjoamia mahdollisuuksia on tutkittu laajasti niin kotimaassamme kuin muissakin maissa. Tästä huolimatta fysiikan ja musiikin välisiä liittymäkohtia opetuksessa on selvitetty vähän, jos ollenkaan. Tämän tutkielman on tarkoitus antaa vastauksia, ovatko fysiikka ja musiikki oppiaineina integroitavissa ja miten kyseisten oppiaineiden erityispiirteet on otettava eheyttämisessä huomioon. Integroinnin mahdollisuuksia ja haasteita pohditaan voimassaolevien peruskoulun ja lukion opetussuunnitelmien valossa ja erityisesti huomioiden kummankin aineen kokeellinen ja tutkiva luonne.

Yksi fysiikan opetuksen helposti hyödyntämättä jättämä välineaarraitta on musiikin opetukseen hankitut soittimet; nämä jokaisessa koulussa jo valmiina olevat välineet ovat tärkeä motivaattori fysiikan ja musiikin oppiaineintegroinnille. Tutkielma sisältääkin melko

laajan katsauksen opetustyön ja oppilaiden harrastusten osalta tärkeiden soittimien fysiikkaan, minkä tarkoitus on tietopääomansa lisäksi motivoida opettajia näkemään integrointimahdollisuuksia nykyisessä opetustyössään. Lisäksi ei pidä unohtaa, että musiikinopettaja on aineenhallintansa sekä muusikkoutensa takia fysiikanopettajalle tärkeä kollega musiikin aalto-opin käytännön soveltajana.

Kynnyksen madaltamiseksi tutkielmassa esitellään musiikkiluokan soittimiin pohjautuvia ja käytännön opetukseen sopivia integrointiesimerkkejä lukion fysiikan eri aihepiireistä. Painotus on lukion syventävän Aallot-kurssin sisällöissä, ja tarkoituksena on keskittyä ensisijaisesti fysiikan ilmiöitä kuvaavien käsitteiden hahmottamiseen integroinnin avulla. Lisäksi osoitetaan integrointimahdollisuuksia muilta lukion fysiikan kursseilta esimerkiksi musiikkiteknologiasta, mutta tutkielman varsinainen tavoite on esitellä akustisten soittimien hyödyntämistä opetuksessa. Inspiraatiota integrointiesimerkkeihin on haettu fysiikan oppikirjojen perinteisistä kokeellisen työskentelyn tehtävistä, omista musiikki- ja instrumenttiopinnoistani sekä intohimoisesta soitinrakennusharrastuksestani.

Tutkielman kirjoittamisen aikana suoritettiin pienimuotoinen opetuskokeilu, jossa fysiikan ja musiikin integrointia kokeiltiin Perhon keskuskoulun seitsemännen luokan oppilaiden sekä Jyväskylän yliopiston fysiikan peruskurssin opiskelijoiden kanssa. Tarkoituksena oli selvittää integroinnin vaikutusta opiskelumotivaatioon ja toisaalta kokeilla erilaisia integrointi-ideoita. Kokeiluista hankitut kokemukset, pedagogiikan kirjallisuus, eri kouluasteiden fysiikan ja musiikin oppikirjojen sisällöt ja omat kokemukseni fysiikan ja musiikin integroinnista opetustyössä tukevat näiden kahden aineen integroimista ei pelkästään lukion, mutta vaan muiden kouluasteiden opetuksessa. Lisätutkimusta vaaditaan, jotta voitaisiin tarkemmin eritellä, millainen integrointi on toimivaa oppimistulosten näkökulmasta, mutta jo nyt tehdyt huomiot ovat lupaavia.

2 OPPIMISKÄSITYKSESTÄ

"Oppimisella tarkoitetaan suhteellisen pysyviä, kokemukseen perustuvia muutoksia yksilön tiedoissa, taidoissa ja valmiuksissa sekä niiden välityksellä itse toiminnassa. Oppiminen lisää yksilön mukautumiskykyä erilaisissa tilanteissa ja mahdollistaa tapahtumien ennakoinnin ja ilmiöiden hallinnan." [6, s. 20] [19, s. 13–14]

2.1 Motivaatiosta

Motivaatio on henkilökohtainen ja näkymätön biologinen tapahtuma, joka edeltää ympäristön havaitsemaa, tavoitteellista toimintaa. [48, s. 151] Se on käyttäytymistä virittävien ja ohjaavien tekijöiden systeemi ja sitä kautta sisäinen prosessi, joka ohjaa toimimaan tietyn tavoitteen saavuttamiseksi. [6, s. 32] [29, s. 41–53] Motivoituminen ja sitä seuraava toiminta liittyvät läheisesti toisiinsa, mutta motivaatio on suhteellisen subjektiivisesti koettu syy, josta seuraa ympäristölle objektiivinen havainto, toiminta. Itseohjautuvuusteoriassa motivaatio määritellään miksi tahansa toimintaa aiheuttavaksi ja ohjaavaksi toiminnaksi. Motivaatio auttaa tekemään toiminnan pitkäjänteiseksi ja intensiiviseksi vieden sitä kohti jotain tavoitetta. [48, s. 150–151] Itseohjautuvuusteoriassa tehdään alkuoletus, että oppijan ikä, sukupuoli, sosioekonominen tilanne, kansallisuus tai kulttuuri eivät vie pois motivaatioon syntymiseen johtavaa luonnollista uteliaisuutta ja tiedonhalua. Tällöin korostuu opettajan rooli motivaation synnyttäjänä, koska oppijan aikaisempia kokemuksia ja arvomaailmaa ei pidetä niin suuressa arvossa motivoitumisen kannalta. Itseohjautuvuusteoriassa tarkastellaan tällöin motivaatiota minä tahansa toimintaa aiheuttavana vuorovaikutuksena. [48, s. 152]

Perusedellytyksenä motivaation syntymiselle voidaan pitää oppijan vapautta päättää omista tekemisistään, jolloin motivaatio on oppijälähtöistä eikä synny ulkoisesta pakotteesta. Oppijan tulee lisäksi tuntea voivansa selvittää annetuista haasteista sen hetkisten omien taitojensa avulla. Näin maksimoidaan oppimista edistäviä tunteita, kuten uteliaisuutta, kiinnostuneisuutta ja innokkuutta samalla minimoiden ahdistusta, epävarmuutta, pelkoa ja muita oppimista haittaavia tunteita. [48, s. 151] Opetuksessa opettajalla on suuri vaikutus oppimismotivaatioon, jonka opettaja pyrkii säilyttämään tekemällä oppimisen merkitykselliseksi. Silloin oppilas hyötyy oppimisesta, hänen ponnistelunsa huomataan ja tehtyä työtä arvostetaan, mikä edelleen pitää yllä motivaatiota. [6, s. 33] [54, s. 104]

Oppilas, joka ei ole motivoitunut, on opiskelun suhteen passiivinen, ja aktiivista oppimista ei voi tapahtua ilman motivaatiota. [6, s. 37] Syy passiivisuuteen voi olla oppilastai opetuslähtöistä. [30, s. 5] Motivaatiolla on kuitenkin lajeja, jotka ulkoisesti näyttävät edistävän oppimista mutta jotka eivät mahdollista pitkän tähtäimen tuloksia. Koska motivaatio on sisäinen prosessi, siihen vaikuttavat oppilaan omat käsitykset siitä, mikä on hänen tavoitteensa ja arvomaailmansa. Motivaatio voi olla tilannekohtaista ja lyhytaikaista, mikäli sen on saanut aikaan jokin ulkoinen tekijä, uutuudenviehätys tai opettajan kiinnostavat opetusmenetelmät. Välineellinen opiskelumotivaatio seuraa usein jonkin ulkoisen palkkion tavoittelusta tai ongelmien välttelemisestä. Arvosanojen tai vain opinto-kokonaisuuksien läpäisyn merkitykselliseksi kokevat oppilaat eivät opi tehokkaasti, vaan

toimivat enemmän selviytymisvaistonsa varassa. Oppimisessa tulisi tavoitella sisällöllistä motivaatiota, jossa opittavan aineksen käyttöarvo tajutaan, ja sitä kautta kehitetään syvä kiinnostus aiheeseen ja sen soveltamiseen elämässä. Tästä seuraa kriittisyys omaa oppimista ja opittavaa asiaa kohtaan. [11, s. 28–29]

2.2 Aktiivisesta oppimisesta

Suomen koululaitoksessa on pitkään pidetty aktiivista oppimista keskeisenä teemana pohdittaessa oppimiskäsitystä esimerkiksi opetussuunnitelmien yhteydessä. [37, s. 14] [43, s. 18] [?, s. 11] Oppiminen on tähän asti perustunut konstruktivistiseen oppimiskäsitykseen, jossa oppija yhdistelee uutta tietoa vanhaan tietorakenteeseensa. Tarkoitus on tehdä oppimisprosessista aktiivista ja päämääräsuuntaista, itsenäistä ja ongelmanratkaisua sisältävää, jolloin aiemman tietorakenteen käsittelyn ja tulkinnan pohjalta syntyy uusia kokonaisuuksia. [6, s. 20] [29, s. 20–23] [42, s. 9] Tällainen oppiminen vaatii oppijalta aktiivista osallistumista oppimiseen, ongelmanratkaisuun ja tiedollisten ristiriitojen pohjimiseen – ymmärtämisen kannalta tavoitteelliseen toimintaan. [19, s. 13–14] [30, s. 5] [43, s. 38] Jotta aktiivista oppimista voisi tapahtua, oppilaan täytyy ensiksi olla motivoitunut opiskeluun ja haluta oppia. Oppiaineintegrointi pyrkii oppiaineiden yhdistelemisellä motivoimaan oppijoita, ja toisaalta kahden aineen rajapinnan ylittäminen suosii aktiivista oppimista tuomalla erilaisia näkökulmia opetukseen.

Aktiivisessa oppimisessa opettajan rooli tietolähteenä ja tiedon jakajana pienentyy. Opettaja toimii ensisijaisesti oppimisen ohjaajana ja opetusympäristöjen suunnittelijana, jolloin työtapojen valinta ja oppimisen sosiaalisen luonteen huomioiminen on tärkeää. [54, s. 104] Keskeistä on siirtää oppimisen vastuuta oppilaalle, sillä oppilaat eivät ole tyhjiä tauluja, vaan heillä on ennakkokäsityksiä, joiden kriittinen tarkastelu on opetuksen päätehtävä. Opettajan ohjailun työkalu on ohjeistaminen ja johdattelu, joilla luonnollinen uteliaisuus herätetään ja ongelmien keksimistä sekä ratkaisujen löytämistä helpotetaan. [19, s. 43–45] Opettajaa ohjaa opetuksen suunnittelussa oman ammattitaidon lisäksi valtakunnallinen opetussuunnitelma. [42, s. 10, 12]

Esimerkiksi Kalifornian polyteknisessä valtionyliopistossa vuonna 1998 aktiiviseen oppimiseen perustuva fysiikan opetus paransi oppimistuloksia kokonaisuuksien ymmärtämisessä ja ongelmanratkaisutaidoissa. Lisäksi oppilaat olivat paljon tyytyväisempiä opetuksen laatuun verrattaessa perinteiseen, luennoivaan opetukseen. Richard Hake teki samana vuonna laajemman tutkimuksen, joka keskittyi Yhdysvaltojen lukiotason fysiikan oppimiseen. Tutkimus vahvisti Kaliforniassa saadut tulokset, ja kerätystä aineistosta paljastui jopa kaksinkertaistuneet oppimistulokset aktiivisen oppimisen avulla. [30, s. 7–9]

Musiikki taide- ja taitoaineena sekä fysiikka kokeellisena luonnontieteenä ovat oivallisia alustoja aktiiviselle oppimiselle. Kummankin aineen oppilaskeskeiset työtavat kokeellisuuden ja soittamisen muodossa antavat opettajalle valmiin pohjan, johon suunnitella integrointia. Fysiikan ja musiikin ilmiömaailmojen yhdistämisessä opettaja pystyy helpommin toimimaan opetuksen ohjaajana, koska samaa ilmiötä tarkasteltaessa kummankin oppiaineen näkökulmasta yhteyksien näkeminen arkikokemuksiin helpottuu. Oppilas saa tällöin tarttumapintaa, jonka pohjalta muodostaa omia johtopäätöksiään ja teorioitaan. Opettajan suurin tehtävä on auttaa oikeiden havaintojen tekemisessä sekä kannustaa omatoimisuuteen.

3 OPPIAINEINTEGROINNISTA

Oppiaineintegrointia on tapahtunut niin kauan kuin opetusta on jossain muodossa ollut. Oppimisen tavoitteena on antaa taitoja, joita tarvitaan elämässä; tällöin osaaminen liittyy useampaan elämänalaan. Tässä luvussa tarkastellaan oppiaineintegroinnin historiaa, perusteita integroinnin käyttöön sekä tutustutaan suomalaisen koululaitoksen opetussuunnitelmiin tämän tutkielman oppiaineintegroinnin näkökulmasta. Lopuksi katsotaan opetuksen ja oppiaineintegroinnin tulevaisuuteen uuden perusopetuksen opetussuunnitelman perusteiden 2014 valossa.

3.1 Oppiaineintegroinnin historiasta

Suomalaisen opetuksen historiassa integrointi on esiintynyt jo 1850-luvulta lähtien ensin konsentraationa, vuosisadan lopulla kokonaisopetuksena ja lopulta eheytyksenä 1900-luvun alkupuolella. [47, s. 15–24] Integroinnin tulkinnasta synonyymiksi eheyttämisen kanssa ei kaikissa lähteissä olla samaa mieltä [16, s. 55–56, 87–88] [46, s. 13–18], ja 1900-luvun loppupuolella integraatio sai vielä rinnakkaismerkityksen yhteisopetuksena, joka liittyy erityisopetuksen kenttään. [16, s. 87] Erilaisista nimityksistään huolimatta tässä tutkielmassa integroinnissa on kyse oppiainerajat ylittävien mielekkäiden opetuskokonaisuuksien muodostamisesta, mikä tuo opetettavat asiakokonaisuudet lähemmäksi vastaavia arkielämän kokemuksia. [32, s. 108] [50, s. 30, 38]

Integrointi voidaan jakaa vertikaaliseen ja horisontaaliseen integrointiin. Vertikaalinen integrointi tarkoittaa oppiaineen sisäistä integrointia, joka käytännössä vastaa opetuksessa hierarkiaa, jonka mukaan sisältöä käsitellään. Tällöin Suomen kaltaisessa oppiainepohjaisessa koulujärjestelmässä on kyse oppiaineen sisäisestä integroinnista. Eri aineiden opetus on erillään toisistaan ja opetus tapahtuu oman oppiaineen asiakokonaisuuksista ja näkökulmista. Horisontaalinen integrointi on se, mitä yleensä arkikielessä tarkoitetaan oppiaineintegroinnilla, jolloin eri oppiaineiden toisiinsa kytkeytyviä asiakokonaisuuksia yhdistetään. [32, s. 108–111] [46, s. 13–18] Silloin ylitetään oppiainerajat ja tarjotaan samasta opiskeltavasta asiasta uusia näkökulmia jonkin toisen oppiaineen tai oppiaineiden lähtökohdista. Perusopetuksen uusi opetussuunnitelma POPS 2014 antaa erityistä painoarvoa horisontaalisen integroinnin lisäämiselle suomalaisessa koululaitoksessa [?, s. 25–27].

3.2 Motivaatio oppiaineintegraatioon

Oppiaineintegrointia perustellaan sen tuomilla hyödyillä, hahmottamisen helpottumisella, oppilaan kokonaispersoonan kehittymisellä ja oppiaineiden pirstaloitumisen vähentymisellä. Tämä tutkielma keskittyy erityisesti fysiikan ja musiikin oppiaineiden integrointiin, joka kummankin aineen näkökulmasta näyttää mahdolliselta. [17, s. 109] Erityisesti taideaineissa nähdään hyödylliseksi teemakokonaisuuksien käyttö opetuksessa, mikä helpottaa hahmottamista ja sitoo elämän ilmiöt toisiinsa [14, s. 4], ja fysiikassa opiskeltava sisältö on jo valmiiksi jaettuna tiettyjä luonnonilmiöitä käsitteleviin teemoihin, kuten aalto-oppiin. Tämä antaa luontevan pohjan, josta oppiaineintegraatiota voidaan lähteä toteuttamaan. Oppiaineintegroinnin haaste opettajalle on usean aineen sisältöjen riittä-

vä hallinta, jotta käsittely ei olisi liian pinnallista. Muistettava on, että tarkoitus ei ole käsitellä kaikkia opetuksessa integroitavia aineita tyhjentävästi, vaan enemmän otetaan opetettavaan aineeseen uusi näkökulma toisen oppiaineen kautta. [14, s. 4] Oppiaineteegraation on tarkoitus luoda merkityksiä eri oppiaineiden sisältöjen välille arkielämän tilanteiden tapaan.

Fysiikan opetuksen tutkimus on paljastanut monia asioita fysiikan oppimisesta. Oppilaat tulevat kouluun arkielämästään, jossa he ovat jo kokeneet ympäristönsä ilmiöitä ja muodostaneet näistä omia teorioitaan maailman toimintamekanismeista. He ovat muodostaneet oman fysiikkansa – heillä on tyhjän ja avoimen mielen tilalla monia ennakkokäsityksiä fysiikasta, ja syntyneiden virhekäsitysten muuttaminen on vaikeaa. Miksi? Havainnoilla hankittu tietorakenne on sopusoinnussa heidän logiikkansa kanssa, ja käsityksien muuttaminen vaatisi ristiriidan aikaisemman tiedon kanssa. Käsitykset eivät yleensä muodosta yhtenäistä kokonaisuutta, vaan rikkonaiset faktat päätelmiseen tekevät arjen ilmiömaailman ymmärtämisen puutteelliseksi. Vallitsevien käsitysten kriittinen tarkastelu integroinnin keinoin on järkevää, sillä integrointi tuo oppiainekohtaiset sisällöt lähemmäksi käytännön elämän viitekehystä. [19, s. 43–45] [29, s. 17–19] [30, s. 25] Musiikki hyvin elämänläheisenä oppiaineena määrittää fysiikalle luonnollisen toimintaympäristön, jossa oppilaiden ennakkokäsityksiä pystyy haastamaan.

3.3 Fysiikan ja musiikin oppiaineiden integrointi peruskoulun ja lukion opetussuunnitelmissa

Tässä luvussa tutustutaan valtakunnallisiin opetussuunnitelmiin fysiikan ja musiikin sekä niiden integroinnin puitteissa. Ensiksi selvitetään peruskoulun musiikin ja fysiikan opetuksen tavoitteita ja aihesisältöjä, minkä jälkeen tarkastellaan niiden suhdetta lukion opetussuunnitelmaan. Opetussuunnitelmissa on kautta linjan viittauksia oppijan aikaisempien tietojen hyödyntämiseen opetuksen eteenpäin viemisessä, minkä takia peruskoulussa saatua tietopohjaa on kartoitettava.

3.3.1 1994 POPS

Opetussuunnitelmauudistuksessa vuonna 1994 siirryttiin keskusjohtoisten, valtakunnallisten mallien sijasta koulukohtaisiin opetussuunnitelmiin. Opettaja oman työnsä kehittäjänä ja koulu yhteisön vahvuuksien hyödyntäminen koettiin oleelliseksi opetussuunnitelman ja opetuksen onnistumisen kannalta. [42, s. 9]

Vuoden 1994 perusopetuksen opetussuunnitelman perusteissa integroinnista puhutaan aihekokonaisuuksien yhteydessä. Aihekokonaisuus on oppiainerajat ylittävien ja ajankohtaisien teemojen käyttöä opetuksessa. Koulut voivat itse suunnitella opetushallituksen esimerkkiaihekokonaisuuksien lisäksi omia projekteja, teemoja tai oppiaineyhteistyötä. Oleellista on aihekokonaisuuden liittäminen oppilaan arjen kokemusmaailmaan. [42, s. 34]

Ympäristö- ja luonnontiedon opetussuunnitelmassa korostetaan oppimisprosessin etenemistä ilmiöiden havaitsemisesta peruskäsitteiden jäsentämiseen ja opitun tiedon käyttämiseen arkielämän tilanteissa. Opiskelun tavoitteena on harjaannuttaa tekemään omien havaintojen kautta kysymyksiä, muodostamaan johtopäätöksiä, kuvaamaan tuloksia ja keskustelemaan niistä. [42, s. 81] Varsinainen fysiikka oppiaineena alkaa vasta yläkoulussa, mutta jo alakoulussa luodaan pohja luonnontieteeseen kuuluvalla tutkivalle ajattelutavalle. Fysiikan opetuksen suunnittelun ja opetuksen tehtävänä on edelleen syventää tätä

luonnontieteille ominaista ajattelutapaa ja tiedonhankintaa. Opetuksen tulee tällöin olla mielekästä ja oppilaiden aikaisemman tietotason huomioivaa. Sen tulee rohkaista myös sosiaaliseen yhteistyöhön muiden oppilaiden kanssa. Fysiikan opetuksen pitää tukea kokonaisuuksien hahmottamista yli oppiainerajojen, mikä vaatii monipuolisia ja erityisesti kokeellisia työtapoja. [42, s. 88–91]

Opetussuunnitelma antaa löyhän viitekehyksen fysiikan opetuksen suunnittelulle, jossa ei tarkemmin eritellä fysiikan osa-alueita vaan ainoastaan ilmiömaailmoja, joihin opetuksen tulisi antaa valmiuksia. Fysiikan keskeisistä sisällöistä musiikin integroinnin kannalta oleellisia ovat ihmisen aikaansaamien rakenteiden opiskelu: vuorovaikutusten, kuten voiman, liikkeen ja kosketusvoiman, ymmärtäminen. [42, s. 90]

Musiikinopetuksen tehtävä vuoden 1994 opetussuunnitelman perusteissa on antaa oppilaalle musiikillisen ilmaisun perustiedot ja -taidot. Hän oppii ymmärtämään musiikin merkityksen yksilölle ja yhteisölle sekä meitä ympäröivälle kulttuurille. Musiikilla on tärkeä tehtävä koulun sosiaalisessa kasvatuksessa, kun se tarjoaa mahdollisuuksia yhteistoimintaan ja vuorovaikutukseen musiikin keinoin.

Jo alakoulussa musiikki oppiaineena tutustuttaa oppilaat musiikin peruskäsitteisiin, kuten rytmiin, melodiaan, muotoon ja harmoniaan. Lisäksi toiminnallisessa oppimisessa pääpaino on leikin kautta oppimisella, oman äänen käytöllä, kuuntelulla sekä erilaisiin soittimiin tutustumisella. Yläkoulussa oppilaiden omatoimisuus yhteissuunnittelussa ja -toiminnassa on tärkeää alakoulun tietojen vahvistamisen ohessa. Tämän tarkoituksena on lisätä sukupuolien välistä yhteistoimintaa. Integroinnin osalta mainitaan musiikin sisältöjen kytkeminen toisiin aineisiin esimerkiksi dramatisoinnin, musiikkiteatterin ja tanssin kautta. [42, s. 100–101]

3.3.2 2004 POPS

Vuonna 2004 tehty, edelleen voimassa oleva perusopetuksen opetussuunnitelma seurasi vuoden 1994 opetussuunnitelman (luku 3.3.1) viitoittamaa linjaa, mutta oppiainesisältöjä oli erityisesti tarkennettu. Opetuksen eheyttäminen tuotiin aihekokonaisuuksien tueksi, ja eheyttämisen tavoitteeksi määriteltiin ilmiöiden tarkastelu eri tiedonalojen näkökulmista. [43, s. 38–43] Opetussuunnitelmassa fysiikan ja kemian opetus oppiaineina alkaa jo vuosiluokilla 5–6, mutta sitä ennen oppilaat opiskelevat ympäristö- ja luonnontietoa, jonka sisältö vastaa 1994 laaditun opetussuunnitelman henkeä. Aalto-oppia ei erikseen mainita, mutta luonnontieteellisen tutkimisen taitoja opetellaan. [43, s. 170–174] Oppilas oppii tekemään havaintoja, mittaamaan ja tulkitsemaan niitä, tekemään johtopäätöksiä tuloksistaan ja kuvaamaan tuloksiaan tieteenalan omilla käsitteillä. [43, s. 188–190]

Yläkoulun 7.–9. -luokkien fysiikassa laajennetaan käsitystä fysikaalisen tiedon luonteesta ja vahvistetaan kokeellisia taitoja. Edelleen lähtökohtana on oppilaan aikaisemmat tiedot, taidot ja kokemukset, joiden pohjalta opetusta toteutetaan. Luonnontieteelle ominainen ajattelu, tiedonhankitakeinot, tiedon käyttö, merkitykset ja tiedon luotettavuuden arviointi muodostavat opetuksen kulmakiven. Oppilaan on tarkoitus saada valmiuksia keskustella ja kirjoittaa alaan liittyvistä asioista ja ilmiöistä käyttäen alan käsitteitä. Opetus tähtää ilmiöiden ja niiden merkitysten ymmärtämiseen jokapäiväisessä elämässä. [43, s. 191]

Opetussuunnitelmassa on eritelty aalto-opissa keskeisinä erilaiset värähdys- ja aaltoliikkeen perusilmiöt, näiden synty ja vastaanotto, havaitseminen, heijastuminen ja taittumi-

nen, ominaisuudet ja erilaiset suureet. Opetukseen kuuluvat äänen ja valon merkitys, sovellukset sekä optisten laitteiden toimintaperiaatteiden ymmärtäminen. Tavoitteissa mainitaan vielä erityisesti kuulonhuolto ja melulta suojautuminen. Edelleen opetussuunnitelma antaa opettajalle vapaat kädet viedä eteenpäin omaa opetustaan, mutta nyt erityisesti äänen merkitys ja sovellukset tarjoavat opetussuunnitelman osalta suoran oikeutuksen oppiaineintegroinnille. [43, s. 192–193]

Musiikin opetussuunnitelmassa korostetaan oppilaan kokonaisvaltaisen kehityksen tukemista etsimällä yhteyksiä muihin oppiaineisiin. Oppilasta innostetaan musiikilliseen harrastamiseen ja käyttämään musiikkia ilmaisuvälineenä. Musiikin opetussuunnitelma keskittyy luokilla 1–4 vuoden 1994 opetussuunnitelman tapaan leikin kautta oppimiseen. Luokilla 5–6 ja yläkoulussa opitaan käyttämään musiikin merkintöjä ja käsitteitä kuuntelun ja musiikin tuottamisen yhteydessä. Tavoitteissa keskeisiä asioita ovat rytmin, melodian, harmonian, dynamiikan, sointiväriin ja muodon ymmärtäminen ja käyttö musiikin kuvailussa. [43, s. 232–234]

3.3.3 2014 POPS

Opetushallitus julkaisi 23.12.2014 uuden perusopetuksen opetussuunnitelman perusteet 2014, joka tulee voimaan porrastetusti vuosien 2016–2019 aikana. Uuden opetussuunnitelman keskeisenä arvoperustana on oppilaan hyväksyminen sellaisena kuin hän on. Koululaitoksen tehtävänä on auttaa oppilasta rakentamaan omaa identiteettiään ja määrittämään paikkansa maailmassa. Tasa-arvo ja oikeudenmukaisuus ovat opetussuunnitelman keskeiset arvot, ja opetuksen on tarkoitus kasvattaa oppilaasta sivistynyt, avoin, mutta toisaalta ympäristölleen kriittinen kansalainen. Suvaitsevaisuus ja kestävät elämäntavat nousevat esiin tärkeinä taitoina tulevaisuuden globalisoituvassa maailmassa. [44, s. 12–14] Uusi opetussuunnitelma pyrkii tietoisesti huomioimaan nopeasti muuttuvan ja globalisoituvan maailman tuomat uudet haasteet tulevaisuuden suomalaisille.

Oppimiskäsitykseltään opetussuunnitelma myötäilee edellisen opetussuunnitelman linjoja oppilaasta aktiivisena oppijana, joka pystyy ratkaisemaan ongelmia sekä itsenäisesti että ryhmän jäsenenä. Uutena ajatuksena on oppilaan itsereflektoinnin merkitys oppimisprosessissa, jolloin oppilas tunnistaa omat tapansa oppia. Oppimaan opettamisen merkitys on kirjoitettu auki selkeästi opetussuunnitelmassa ja suurena visiona on elinikäisen oppimisen mahdollistaminen jokaiselle. Vuorovaikutuksen ja sosiaalisten taitojen hallinnan merkitys oppimisessa kasvaa. Itsenäisen opiskelun lisäksi ryhmässä toisten ihmisten kanssa toimiminen on tärkeä osa oppimista, ja näissä tilanteissa omien tekojen seurauksien ja vaikutusten arviointi lisää itseohjautuvuutta. Kriittisen ajattelun taitojen kautta oppilas oppii käsittelemään erilaisia näkökulmia asioihin ja arvioimaan niitä. Tarkoitus on tukea kiinnostuksen kohteiden monipuolistumista tekemällä opetus monimuotoiseksi, mikä on sidottu ei vain opettavaan asiaan, vaan myös senhetkiseen aikaan ja paikkaan. Oppilaan käsitys itsestään oppijana ja henkilökohtaiset kiinnostuksen kohteet ohjaavat käytännön opetustyön suuntaa. [44, s. 14–15]

Integroinnin osalta uudessa suunnitelmassa esitellään uutena käsitteenä laaja-alainen osaaminen, joka tarkoittaa tietojen, taitojen, arvojen, asenteiden ja tahdon muodostamaa kokonaisuutta. Laaja-alainen osaaminen on jaettu seitsemään eri osaan, joista tämän tutkielman kannalta kiintoisimpia ovat ajattelu ja ajattelemaan oppiminen sekä monilukutaito. Ajattelu ja ajattelemaan oppiminen sisältää havaintojen tekemisen ja tiedonhankinnan taitoja, tiedon arvioinnin taitoja sekä johtopäätöksien tekemisen taitoja. Uuden

tiedon rakentaminen erilaisten näkökulmien tarkastelun ja kriittisen ajattelun kautta antaa oppilaille keinoja itsenäiseen oppimiseen. Tavoitteena on mahdollistaa hankitun tiedon soveltaminen ja edelleen uuden tiedon luominen vanhan pohjalta. Opettajan roolia oppilaiden motivoinnissa itsenäiseen toimintaan ja vaihtoehtoisten ratkaisujen etsintään korostetaan. Oppilaiden omalle ajattelulle ja pohdinnoille on annettava tilaa ja rohkaistava jakamaan omia ajatuksiaan toisten oppilaiden kanssa. Tällöin kriittisyys kasvaa omia ja toisten näkemyksiä kohtaan, joka ohjaa rakentamaan uutta, objektiivisempaa tietoa usean näkökulman pohjalta. Oppilaita autetaan tunnistamaan omat tapansa oppia ja kehittämään oppimisstrategioitaan jokaiselle ikäkaudelle soveliaalla tavalla. [44, s. 17–19] Toinen uusi käsite monilukutaito liittyy läheisesti ajatteluun ja ajattelemaan oppimiseen. Monilukutaito tarkoittaa tiedon hankkimisen, tuottamisen ja arvottamisen taitoja. Tarkoitus on ymmärtää erilaisia tapoja kerätä tietoa ympäröivästä maailmasta ja hyödyntää niitä omassa oppimisessa ja itseilmaisussa. Laaja-alaisen osaamisen taidot integroituvat kaikkiin oppiaineisiin, mutta erityisesti luonnontieteiden ympäristöä havainnoivan ja tutkivan luonteen takia taidot ovat keskeisessä osassa näiden aineiden opetusta. [44, s. 19–23]

Eheyttämisen yhteydessä aikaisemmat aihekokonaisuudet on korvattu monialaisilla oppimiskokonaisuuksilla, joissa tarkastellaan todellisen maailman ilmiöitä yhdistellen eri oppiaineiden tietoja. Tavoitteena on häivyttää oppiainerajoja ja osoittaa, että oppiaineet eivät ole irrallisia kokonaisuuksia, vaan pysyvästi liittyneinä toisiinsa arjen tilanteissa. Opetussuunnitelmassa listataan useita eheyttämisen tapoja, kuten saman teeman opiskelua yhtäaikaaisesti kahden oppiaineen näkökulmasta, monialaisia eri oppiaineita yhdisteleviä oppimiskokonaisuuksia ja jopa kaiken eheyttävänä kokonaisopetuksena. Monialaisten oppimiskokonaisuuksien suunnittelu ja toteutus vaativat yhteistyötä eri oppiaineiden välillä, ja on tärkeää löytää koulun arkitoimintaan sopivia teemoja, jotka ovat oppilaille kiinnostavia. Opetushallitus esittää, että tällaisia monialaisia integroivia kokonaisuuksia tulisi olla jokaisen oppilaan opinnoissa vähintään yksi joka lukuvuosi. [44, s. 29–31]

Ympäristöoppi integroi oppiaineena biologian, maantiedon, fysiikan, kemian ja terveystiedon sisältöjä. Vuosiluokilla 1–2 ympäristöopissa keskitytään oppilaiden välittömän ympäristön tutkimiseen ja päätavoite on tunnistaa eri tieteenalojen merkitys arkipäivän elämälle. Tässä vaiheessa ongelmanratkaisu- ja tutkimustehtävät perustuvat leikkeihin. Tavoitteissa eritellyissä sisältöalueissa ei mainita fysiikan käsitettä ääni ja se ei näytä olevan keskeinen sisältö näillä vuosiluokilla. [44, s. 138–141] Musiikin osalta opetus keskittyy toiminnallisuuteen, ja opetussuunnitelma kehottaa ottamaan huomioon yhteydet muihin oppiaineisiin. Sisältöalueessa *S2 Mistä musiikki muodostuu* mainitaan musiikin peruskäsitteiden tason, keston, voiman ja värin hahmottaminen, ja nämä käsitteet ovat integroitavissa ympäristöoppiin kuuluvan fysiikan kautta. Lisäksi sisältöalueessa *S3 Musiikki omassa elämässä, yhteisössä ja yhteiskunnassa* tutkitaan oppilaiden arkikokemuksia musiikista ja äänistä, jotka tarjoavat integrointimahdollisuuksia ainakin kuulonhuoltoon. [44, s. 149–151]

Vuosiluokilla 3–6 palataan takaisin integroituun ympäristöoppiin, jolloin fysiikkaa ja kemiaa ei enää eroteta vuosiluokilla 5–6 omiksi oppiaineiksi. Sisällöiltään opetussuunnitelma pysyy käytännössä muuttumattomana, ja päätavoitteena on edelleen kiinnostuksen herättäminen luonnontieteisiin ja omien havaintojen tekemiseen ympäröivästä maailmasta. Opetussuunnitelma listaa edeltäjänsä tarkemmin opetuksen tavoitteet, joissa on tällä kertaa mainittu äänen ilmiöihin tutustuminen sisältöalueessa *S5 Luonnon rakenteet, periaatteet ja kiertokulut*. [44, s. 266–269] Musiikissa päätehtävänä on vanhan opetussuunnitelman tapaan luoda pohja monipuoliseen musiikilliseen toimintaan ja aktiiviseen kult-

tuuriseen osallistumiseen. Musiikillisten taitojen kehittymistä vahvistetaan huomioimalla muun muassa muut oppiaineet ja erilaiset eheyttävät teemat. Musiikin opetussuunnitelman yhteydessä käytetään aiemmasta poiketen enemmän fysiikan termiä 'ääni' termin 'musiikki' rinnalla. Sisältöalueiden osalta laajennetaan vuosiluokilla 1–2 aloitettuja *S2 Mistä musiikki muodostuu* ja *S3 Musiikki omassa elämässä, yhteisössä ja yhteiskunnassa* sisältöjä, mikä edelleen antaa mahdollisuuksia fysiikan ja musiikin sisältöjen integrointiin. [44, s. 294–297]

Fysiikan sisällöissä vuosiluokilla 7–9 ei mainita enää ääntä ollenkaan, mutta äänen voidaan katsoa kuuluvan sisältöalueeseen *S2 Fysiikka omassa elämässä ja elinympäristössä*. *S3 Fysiikka yhteiskunnassa* antaa myös mahdollisuuden äänen käsittelyyn erityisesti musiikkiteknologian näkökulmasta, ja samalla tähän sisältöön liittyy löyhästi *S6 Sähkö*, jossa magnetismin kvalitatiivista ilmiömaailmaa voidaan tutkia sähkösoittimien avulla. Fysiikan ensisijaisena tehtävänä onkin opettaa luonnontieteelliseen ajatteluun, kvalitatiivisiin havaintoihin ja abstraktiin ajatteluun. Lisäksi opitaan luonnontieteelle ominaisia tiedonhankinnan, tutkimuksen ja tiedon luotettavuuden arvioinnin menetelmiä. Uuden opetussuunnitelman fysiikan sisältövalinnat ovat suurelta osin opettajan oman harkinnan varassa. Integrointia muihin oppiaineisiin ei suoraan mainita, mutta sisältöalueiden toteuttaminen vaatii integroituvien kokonaisuuksien käyttöä. [44, s. 447–453] Musiikissa vuosiluokilla 7–9 jatketaan siitä, mihin vuosiluokilla 3–6 jäätiin, eli kehitetään edelleen omaa musiikillista toimintaa. Oppiaineen tehtäväksi kerrotaan muun muassa mahdollisuuksien tarjoaminen äänen ja musiikin parissa toimimiseen, mikä viestii äänen luonteen ymmärtämisen tärkeydestä. Sisältöalueet pysyvät samana kuin aikaisemmin tarjoten mahdollisuuksia fysiikan integrointiin. [44, s. 488–493]

3.3.4 1994 LOPS

Lukion opetussuunnitelman perusteet tulivat vuonna 1994 jatkumoksi samana vuonna voimaan tulleelle perusopetuksen opetussuunnitelmalle (luku 3.3.1) ja on integrointilinjauksiltaan hyvin samankaltainen. Opetuksen tehtävänä on valmistaa opiskelijaa tiedon kriittiseen tarkasteluun ja soveltamaan tätä käytännössä ongelmien ratkaisuun. Koululta edellytetään avarakatseisuutta arkielämää kohtaan, ongelmanratkaisutaitojen harjoittelua ja eri tieteenalojen oppiaineiden yhteistyötä. Kuten perusopetuksessakin, oppilaan aktiivinen rooli oppimisensa eteenpäinviejänä on oleellinen. [36, s. 10–11] Aihekokonaisuudet ovat myös peruskoulun tapaan osa lukion opetussuunnitelmaa joko integroituna oppiaineiden kurssien muuhun sisältöön tai omina soveltavina kursseinaan. [36, s. 34]

Lukion fysiikan opetussuunnitelmassa korostetaan havaintoihin, mittauksiin tai kokeellisiin tutkimuksiin perustuvaa tiedon tutkimista. Tavoite on muodostaa luonnonlakeja ja edelleen soveltaa saatua tietoa arkielämässä. Lukiolainen hankkii ja arvioi kokeellista tietoa ympäristöstään. Nämä taidot opiskelijan toivotaan saavuttavan yhden pakollisen kurssin *Fysiikka luonnontieteenä* aikana. [36, s. 77–78] *Aaltoliikkeen* valtakunnallisen syventävän kurssin osalta tärkeitä kokonaisuuksia ovat värähtely- ja aaltoliikkeen perusteiden hallinta mekaanisen värähtelyn, äänen ja sähkömagneettisten sovellusten avulla. *Sähkön* ja *Sähkömagnetismin* syventävien kurssien sisällöissä ei erikseen mainita sovelluksia muihin oppiaineisiin, mutta musiikkiin integroituvat ilmiöiden ja käsitteiden hallinta sekä sähkömagneettinen induktio. [36, s. 78–79]

Lukion musiikinopetuksen tavoitteena on opiskelijan itsenäisen ajattelun, viestinnän ja luovan ilmaisun kehittäminen sekä musiikin arvostaminen. Opiskelijan oman aktiivisen

suhteen kehittyminen musiikin harrastajana ja kuluttajana on tärkeää sekä yksilönä että yhteisön jäsenenä. Sisältöjen valinnassa mainitaan eri aineiden välisen eheyttämisen huomioiminen. Musiikin kaksi pakollista kurssia *Musiikin työpaja* ja *Suomalaisen musiikin maailmassa* keskittyvät aktiiviseen musisointiin ja oman musiikillisen identiteetin kehittämiseen, mutta mitään integroivia sisältöjä ei suoraan mainita. Syventävien opintojen tehtävä on eheyttää opetussuunnitelmaa. Kurssit voivat integroida musiikkia muihin oppiaineisiin esimerkiksi esitettävien teosten suunnittelun kautta tai tutustumalla musiikkia sisältäviin taideteoksiin. [36, s. 101–102]

3.3.5 2003 LOPS

Uusimmassa vuoden 2003 Lukion opetussuunnitelman perusteissa lukiokoulutuksen tehtävä pysyy pääpiirteittäin samana kuin vuoden 1994 opetussuunnitelmassa (luku 3.3.4) ja vallitsevana oppimiskäsityksenä pidetään aktiivista oppimista. [37, s. 12–14] Opetusta integroidaan edelleen aihekokonaisuuksien kautta; opetussuunnitelmassa ei kuitenkaan suoraan esiinny musiikin ja fysiikan integrointiin sopivia teemoja lukuun ottamatta *Teknologia ja yhteiskunta* -aihekokonaisuutta, jossa olisi mahdollista integroida musiikkitekniologiaa fysiikkaan. [37, s. 24–29]

Vuonna 2003 fysiikan opetuksen tavoitteet pysyvät samoina kuin vuonna 1994, mutta nyt on erikseen eritelty fysiikan merkityksen hahmottaminen taiteessa ja sovelluksien käyttö arkielämässä. [37, s. 144] Fysiikan syventävän *Aallot*-kurssin keskeinen sisältö avautuu tarkemmin kokonaisuuksiksi: harmoninen voima ja värähdysliike; aaltoliikkeen synty ja aaltojen eteneminen; aaltoliikkeen interferenssi, diffraktio ja polarisoituminen; heijastuminen, taittuminen ja kokonaisuheijastuminen; valo, peilit ja linssit; ääni, melun terveysvaikutukset ja kovalta ääneltä suojautuminen. Syventävä kurssi *Sähkö* sisältää eriteltynä musiikkitekniologiaan ja sähköisiin soittimiin liittyvät kokonaisuudet: johtavuus, jännite, virta, yleisimmät virtapiirikomponentit sekä sähköenergia. *Sähkömagnetismin* kurssilla musiikkiin integroituvia kokonaisuuksia ovat magneettinen voima, magneettikenttä, aine magneettikentässä, induktio, sähköteho, sähkömagneettinen viestintä ja sähköturvallisuus. Kurssin tavoitteissa mainitaan erikseen sähkömagneettisten ilmiöiden yhteiskunnallisen merkityksen syventäminen. [37, s. 146–147]

Lukion musiikinopetus koostuu edelleen vuonna 2003 kahdesta pakollisesta kurssista, joiden tavoitteena on edistää opiskelijan musiikillista kasvua, kuten aikaisemmassa opetussuunnitelmassa. Opiskelija oppii ymmärtämään musiikin erilaisia ilmenemismuotoja, ja oppimisen tarkoitus on tarjota elämyksiä, jotka kasvattavat kiinnostusta musiikkiin. Tavoitteissa ei enää mainita suoraan eheyttämistä muiden oppiaineiden kanssa millään tapaa, mikä on suuri poikkeus aikaisempaan opetussuunnitelmaan. Musiikin kurssien *Musiikki ja minä* ja *Moniääninen Suomi* sisällöistä integroituu kuulonhuollon kokonaisuus; sen tarkemmin ei kurssisisällöissä integroituvia kokonaisuuksia mainita. [37, s. 196–198]

Sekä peruskoulun että lukion opetussuunnitelmissa kehoitetaan yleisesti integrointiin ja eheyttämiseen, mikä 1994 vuoden opetussuunnitelmassa näkyy myös oppiaineiden kurssikuvauksissa. Lukion vanhan opetussuunnitelman oppiaineiden sisältöjen erittely on kovin väljä, ja paljon vastuuta jätetään opettajalle. Tämä muuttui vuoden 2003 opetussuunnitelmassa, jossa fysiikan kurssien sisältöjä on eritelty tarkemmin, mutta samalla hävisivät musiikin suunnitelmista maininnat eheyttämisestä. Peruskoulun ja lukion opetussuunnitelmissa näkyy selvästi fysiikan aihepiirien tietty johdonmukaisuus, joka on paljolti peräi-

sin fysiikan historiasta. Musiikkikasvatuksen osalta erityisesti lukion opetussuunnitelma on sisällöltään lähes rajaamaton, mikä selittynee oppiaineen oppimateriaalin moninaisuudella ja työtapojen kirjolla. Lukiolaisen itsenäisyys musiikin tuottajana ja kuuntelijana vaikeuttaa entisestään vain tiettyjen aihekokonaisuuksien ja työtapojen käyttöä opetuksessa. On mielenkiintoista seurata miten tuleva lukion opetussuunnitelman uudistus vaikuttaa integroinnin toteuttamiseen, sillä perusopetuksen opetussuunnitelman perusteiden tuorein uudistus antaa integroinnille keskeisen aseman opetustyössä. Edellisten perusopetuksen sekä lukion opetussuunnitelmien samankaltaisuuden perusteella on syytä olettaa näin käyvän.

4 MUSIIKKI JA FYSIKKA OPPIAINEINA

Musiikki ja fysiikka kuulostavat oppiaineina erilaisilta, mutta pohjimmillaan kummassakin aineessa toimintatavat ovat samankaltaisia. Fysiikassa tietoa maailmasta etsitään kokeellisuuden kautta, musiikissa tämä tunnetaan improvisointina, kokeilemisena. Fysiikassa kokeiden perusteella luodaan teorioita, joiden pohjalta muodostetaan sääntöjä. Useiden vuosisatojen aikana on syntynyt teorioita selittämään erilaisia musiikin rakenteita. Fysiikassa teorioiden toimivuutta testataan uusilla kokeilla ja samalla tutkitaan teorian tuottamia ennustuksia. Musiikissa vastaava ilmiö on säveltäminen. Kumpikin oppiaine vaatii huolellisuutta ja pitkäjänteisyyttä, toisaalta kekseliäisyyttä ja luovuutta – erilaisiako?

4.1 Oppiaineiden luonteet ja ominaispiirteet

Musiikin ja fysiikan välisiä yhtymäkohtia on monia, ja niistä ehkä tärkein on ääni tutkimuskohteena. Musiikissa järjestellään ääntä ajallisesti ja tutkitaan, miten erilaisten äänten yhdistelmät tietyssä ajallisessa kontekstissa herättävät tunteita kuulijassa. Fysiikassa näkökulma on hieman objektiivisempi, sillä tarkoituksena on selvittää tunteista riippumattomia universaaleja faktoja, mutta joka tapauksessa on tarkoitus tulkita syiden ja seurausten ketjua. 1000-luvulta asti länsimainen musiikki on kokenut kahtiajaon, kun musiikkia alettiin merkitä muistiin improvisaatioperinteen lisäksi. Tätä voidaan pitää musiikin teorian syntyhetkenä, koska siitä lähtien musiikkia on kerätty muistiin myöhempää vertailua varten. [13, s. 97–99] Vastaavasti 1600-luvulla sai alkunsa klassisen mekaniikan ja sitä kautta kokeellisen ja analyyttisen tutkimuksen teorioiden kehittyminen. [21, s. 92–93]

Musiikin kirjaaminen loi pohjan musiikin teorioiden kehittämiselle samaan tapaan kuin matemaattisen koneiston kytkeminen fysiikan ilmiöihin mahdollisti luonnonlakien ja ilmiöiden tarkemman kuvaamisen. Fysiikan kokeellisuus on luovaa työtä, ja ilmiöön liittyvien teorioiden tunteminen on hyödyllistä, mutta ei missään nimessä pakollista. Musiikissa improvisointi vaatii täysin samoja lähtökohtia, ja seurauksena on usein ollut jotain poikkeavaa vallitseviin teorioihin nähden. [7, s. 3] Tällöin kummankin tieteen teorioita arvioidaan ja testataan, muodostetaan uutta teoriaa tai vahvistetaan vanhaa ja tehdään edelleen uusia kokeiluja. Silloin hahmotetaan maailmaa aistien kautta ja havaintoja tehdessä opitaan tunnistamaan erilaisia laatuja. [14, s. 4–5] Musiikin ja fysiikan ihmiselle asettamat vaatimukset uteliaisuudesta, sinnikkydestä ja avoimuudesta ovat selvät; toisaalta palkitsevuudeltaan ja elämyksellisyydeltään ne ovat samanlaisia.

4.1.1 Fysiikan luonteesta

Fysiikan päätehtävä on selvittää, kuinka meitä ympäröivä luonto toimii, ja muodostaa sääntöjä, joilla voidaan kuvata fysikaalisen tilanteen kehitystä ajan kuluessa. Luonnosta löydetyistä säännönmukaisuuksista yritetään löytää edelleen perustavanlaatuisia yleisiä sääntöjä, jotta ilmiömaailmaa voitaisiin selittää mahdollisimman yksinkertaisilla periaatteilla. Sääntöjä, luonnonlakeja, kuvataan fysiikassa matemaattisesti, mikä oman eksaktiutensa takia vaatii mahdollisimman tarkkaa käsitteiden määrittämistä. Käsitteiden tarkasta määrittelystä seuraava standardisointi muodostaa lähes oman fysiikan kielen ja mahdollistaa fysiikan ymmärtämisen riippumatta siitä, missä päin maapalloa ollaan. Luonto on yleistyksistään huolimatta käsittämättömän mutkikas järjestelmä, ja sen täydellinen kuvaaminen vaatisi monimutkaisia matemaattisia esityksiä, jotka voisivat antaa hyvinkin tarkkaa tietoa mutta olisivat samalla liian vaikeita käyttää. [9, s. 1–5]

Fysiikassa monimutkaisuuden ongelma ratkaistaan erilaisilla oikean elämän tilannetta yksinkertaistavilla malleilla, jotka säilyttävät ilmiön takana olevat periaatteet. Yksinkertaisuudet tuovat mukanaan rajoituksia sille, milloin ja millaisissa tilanteissa malli toimii riittävän tarkasti. Jotkut mallit voivat olla puhtaan matemaattisia teorioita, jotka tuottavat järkeviä fysikaalisia tuloksia, vaikka itse matemaattinen mekanismi ei kuvaa luontoa ollenkaan. Periaatteet, käsitteet, mallit ja postulaatit muodostavat yhdessä fysiikan teorioita, joiden tarkoitus on selittää suuria ilmiökokonaisuuksia lähtien yhteisistä alkuoletuksista ja malleista. Jotta tällaisilla teorioilla olisi merkitystä, niiden toimivuutta pitää testata kokeilla. Kokeet, niiden seurausten havainnointi ja saatujen havaintojen luotettavuuden arviointi ovat oleellinen osa fysiikkaa. Mittauksien, teorian hiomisen ja uudelleenmittaamisen oravanpyörä on fysiikan historia pähkinänkuoressa. Tiedon ja lakien tarkkuutta pyritään parantamaan toistojen ja muutosten kautta. [21, s. 2] [33, s. 8–9]

4.1.2 Musiikin luonteesta

Antiikin Kreikassa musiikki oli yksi tärkeimmistä tieteistä matematiikan ja sen ajan fysiikan rinnalla, joka keskittyi lähes kokonaan astronomiaan. Erityisesti Pythagoras piti musiikkia ja aritmetiikkaa erottamattomina, avaimena henkiseen ja fyysiseen universumiin. Ajan tieteessä uskottiin, että musiikkiin sidottu rytmin ja sävelten järjestelmä kuvasi suoraan kosmoksen sisäistä harmoniaa. Tietyt sävelet edustivat tiettyjä planeettoja, ja Platon puki kaiken runouden muotoon teoksessaan *Valtio* puhuessaan musiikin sfääreistä, taivaanpalloista. [13, s. 6–7] Musiikki oli kerran lähellä luonnontieteitä ja matematiikkaa, mutta nykyaikana musiikista puhutaan lähes pelkästään taiteena tai jopa viihteenä.

Meille tuttu länsimainen musiikki rakentuu antiikin aikoina syntyneen pitkän musiikillisen historiansa varaan. Hiljalleen aikojen saatossa musiikki on pilkottu osatekijöihinsä, ja siten on muodostunut länsimaisen musiikin teoria. Musiikki on ajasta riippuva tapahtumaketju, jota kuvaa musiikin nopeus eli tempo sekä musiikin sisäistä ajallista jakoa kuvaava rytmi. Teoksen ajallista rakennetta voidaan edelleen jäsentää rytmisiä kokonaisuuksia kuvaavan muodon kautta, joka auttaa hahmottamaan erilaisuutta ja samanaikaisuutta teoksen sisällä. Länsimainen musiikkimme koostuu kahdestatoista sävelestä, jotka liittyvät rytmiin ja tempoon melodian ja harmonian kautta. Melodia kuvaa perättäisten sävelien muodostamaa horisontaalista ja harmonia samanaikaisesti soivien sävelten vertikaalista musiikkia. Dynamiikka vastaa eri sävelten välisiä voimakkuuseroja, ja harmonian yhteydessä yksittäisten sävelten väliset voimakkuuserot muodostavat äänenväriin. [28, s. 7–59] Näiden peruselementtien kokonaisuuksia voidaan kutsua musiikiksi. [28, s. 7–59]

Musiikin kuulijaa tai muusikkoa kiinnostavat musiikin inspiroivat, rauhoittavat tai muutoin positiiviset kokemukset. Musiikki on yhtä aikaa henkilökohtaisia elämyksiä ja vuorovaikutteista sosiaalista toimintaa; ja tämä vaikuttaa vahvasti ihmisen mielentilaan ja tekoihin. [51, s. 37–40] Kulttuurintutkijan mielestä musiikki on kulttuurin muoto, jonka vaikutus historiassa on olennainen ja joka siten koskettaa meidän kaikkien arkipäivän ilmiöitä. Akustikon tai fyysikon mielestä musiikki on ääntä, ilmassa eteneviä painevärähtelyjä, joita korvan kuuloelimet osaavat tulkita. Musiikilla on merkityksellinen rakenne eri taajuuksien, rytmillisten rakenteiden ja erilaisten yläsävelien yhteisvaikutuksen kautta. Lisäksi musiikkiin liittyy oleellisesti erilaisten äänien aikakehitys. [17, s. 97]

5 TYÖTAVOISTA

Kirjallisuudessa on paljon erilaisia käsitteitä määriteltäessä opetuksessa tavoitteiden saavuttamiseksi käytettäviä menetelmiä. Opetusmenetelmä, opetusmetodi, opetuksen muoto, opetusmuoto, työmuoto ja työtapa -käsitteet tarkoittavat lähes samaa eri lähteissä. Tässä tutkielmassa käytetään käsitettä työtapa, kun puhutaan opetuksen toteuttamiseen käytettävistä menetelmistä. Työtavat ovat välineitä, joiden avulla toteutetaan opetussuunnitelman tavoitteita. Työtapojen valinnassa opettaja on keskeisessä asemassa ja opettajan oppilaantuntemus ohjaa opettajaa tekemään jokaiselle ryhmälle sopivia työtapavalintoja [40, s. 15].

Luonnontieteiden opetuksen päämääränä on antaa oppilaille sellaiset taidot ja tiedot, joilla he selviävät nykyaikaisessa tietoyhteiskunnassa. Tähän kuuluu taito arvioida saamaansa tietoa kriittisesti ja jopa kyky luoda kokonaan uutta tietoa. Jotta nämä päämäärät voitaisiin saavuttaa, oppilaille on opetettava luonnontieteellistä tietoa ja tärkeimpänä sitä soveltavaa luonnontieteellistä ajattelutapaa. Ongelmanratkaisutaidot ovat keskeisessä asemassa luonnontieteiden oppimisessa, mikä mahdollistaa luonnon rakenteiden hahmottamisen. Oppilas opetetaan ajattelemaan itse ja esittämään omia ajatuksiaan johdonmukaisesti ja luontevasti. [4, s. 25] Sahlberg [53] kertoo luonnontieteiden opetukseen sopivien työtapojen tavoitteiksi oppilaan ajattelun, luovan ongelmanratkaisun, sosiaalisuuden ja persoonallisuuden kehittymisen.

Työtapojen valinnan avulla voidaan vaikuttaa luonnontieteellisen ajattelutavan kehittymiseen sekä erilaisiin tiedonhankinnan ja oppimisen prosessien ymmärtämiseen. Luonnontieteissä keskeisenä lähtökohtana on luonnossa tapahtuva ilmiö ja siitä tehtävien havaintojen kriittinen tarkastelu. Ilmiön selitystä testataan erilaisten kokeellisten hypoteesien, induktioiden sekä teoriapohjaisten deduktioiden toistuvien ketjujen avulla. [4, s. 26]

POPS 2014:ssä mainittujen työtapojen tärkeimpänä tarkoituksena on tuottaa elämyksiä oppimistilanteissa, joka motivoi yksittäistä oppilasta ja toisaalta koko ryhmää. Tärkeää on antaa erilaisille oppijoille monipuolisia tapoja toteuttaa omaa oppimista sekä kantamaan vastuuta omasta ja muiden oppimisestaan. Työtapojen valinnassa on tärkeää huomioida oppiaineen ominaispiirteet laaja-alaisen osaamisen kehittämisen näkökulmasta. [44, s. 28–29]

5.1 Oppilaslähtöisiä työtapoja

Oppilaslähtöiselle työtavalle on ominaista oppilaan aktiivinen osallistuminen opiskelunsa suunnitteluun. Oppilaan aktiivisuus on etenemisen ja tavoitteiden saavuttamisen ehto, jolloin opettajan rooli opetuksen suunnittelussa ja ohjauksessa on tärkeää. Opettaja pyrkii ottamaan valmistelussaan huomioon oppijoiden erilaiset tarpeet ja sen pohjalta motivoi, ohjaa työskentelyä ja hoitaa opiskeltavan asian loppukoonnin. [1, s. 164] Parhaimmillaan oppilaslähtöisyys on oppilaan kannalta aktiivista toimintaa, jossa oppilaan esittämät kysymykset vievät opetusta eteenpäin. Opettaja ei ole luennoiva kone, vaan ohjaa oppilasta löytämään itse vastaukset omiin kysymyksiinsä. [2, s. 43]. Oppilaslähtöisiä työtapoja

sisältyy usein muihin työtapoihin, jotka eivät lähtökohtaisesti ole oppilaslähtöisiä. Siksi tarkastelemme näitä työtapoja tässä melko suppeasti.

Pohdintatehtävissä oppilas itse muodostaa oman käsityksensä ennalta annettuun ongelmaan. Pohdinta antaa usein vaihtoehdon erilaisiin näkökulmiin ja tulkintoihin sekä kehittää keskustelutaitoja ja oman mielipiteen perustelua. Esimerkiksi työssä (B.2.4) oppilas joutuu pohtimaan, mikä nokkahuilun sormireikien tarkoitus on, ja toisaalta miettimään, miten pystyy kertomaan tulkinnastaan käyttäen fysiikan sanastoa.

Erilaiset kirjalliset tuottamistehtävät ovat perinteisiä opettajan arvioinnin työkaluja. Kirjoitustehtäviä voivat olla esimerkiksi koevastaukset, esseet, mielipidetekstit, referaatit tai esitelmät. Usein nämä ovat yksilösuorituksia, mutta mikään ei estä pari- tai ryhmätyöskentelyä. Demonstraation (B.1.2) lopussa voisi olla tehtävänä kirjoittaa lyhyt yhteenveto, mitkä pianon kielen ominaisuudet vaikuttavat syntyvään taajuuteen.

Haasteena kirjoitustehtävissä on itsensä ilmaiseminen ymmärrettävästi ja johdonmukaisesti käyttäen opiskeltavaan asiakokonaisuuteen liittyviä käsitteitä. Erityisesti laajempien kokonaisuuksien hallintaa vaativat esitelmät, joissa voidaan jäsenellä suuria määriä tietoja tai sitten vaihtoehtoisesti pureutua kapean aiheen jokaiseen yksityiskohtaan. Fysiikan ja musiikin oppiaineintegroinnista löytyy runsaasti kirjoitustehtävien aiheita jo pelkästään oppiainerajoja ylittävistä aiheista, kuten ihmisen äänentuoton fysiikasta tai soittimien toimintaan liittyvistä aiheista. Fysiikan matemaattisesta luonteesta huolimatta ilmiömaailman ymmärtämiseen sekä syyn ja seurauksen pohdintaan erilaiset kirjoitustehtävät ovat toimivia työtapoja.

Kotitehtävä on tärkeä oppilaslähtöinen työtapo, koska se eroaa aikaisemmista työtavoista sijoittumalla ajallisesti koulupäivän ulkopuolelle. Tarkoituksena on koulupäivän aikana opittujen asioiden kertaus. Toisaalta kotitehtävät ovat arviointityökalu, josta näkee, onko opitut asiat ymmärretty. Kotitehtävien käytön haasteena on sopivan vaikeusasteen löytäminen, jotta tehtävä on tehokas oppimisen kannalta. Kotitehtäväksi oppiaineintegroinnin kannalta herkullisimpia ovat erilaiset sovellustehtävät, jotka liittyvät arjen ilmiöihin (D.2.1). Jos on opittu värähtelijän massan vaikutus värähtelystä syntyvään taajuuteen, on kotitehtävänä hyvä pohtia esimerkiksi, miksi hyttynen inisee mutta kärpänen surisee (B.1.2).

5.2 Yhteistoiminnallisia työtapoja

Yhteistoiminnallisissa työtavoissa korostuu toiminnallinen ja kielellinen vuorovaikutus. Vuorovaikutusta tapahtuu sekä oppilaiden että oppilaiden ja opettajan välillä. Pienryhmätyöskentelyssä tavoitteet sovitaan yhteisesti ja jokainen ryhmän jäsen vaikuttaa omalla työskentelyllään päämäärän ja tavoitteiden saavuttamiseen. Tällaisissa työtavoissa oppilaat oppivat ottamaan ja jakamaan vastuuta tavoitteiden suorittamisesta. He joutuvat huolehtimaan omasta oppimisestaan ja lisäksi muiden ryhmän jäsenten työskentelystä. Heterogeenisissä ryhmissä jokainen oppilas tuo omat vahvuutensa ja tietonsa ryhmän yhteiseen käyttöön. Näin ollen opitaan käyttämään hyödyksi paitsi omia, myös muiden ideoita ja ottamaan huomioon muiden käsityksiä ja mielipiteitä käsiteltävästä asiasta. Toisaalta oppilas saa välitöntä palautetta muilta oppilailta omasta osaamisestaan työskentelyn aikana. Opettajan pääasiallisena tehtävänä on työtapojen suunnittelun lisäksi osallistua oppilaiden välisiin keskusteluihin jäsentämällä ja ohjaamalla oppilaista lähtevää pohdintaa. [1, s. 164–166]

Parityö, ryhmätyö ja projekti

Oppilastöistä parityö on kaikista tavallisista tapa tehdä kokeita fysiikassa. Parityö on helppo toteuttaa luokissa, sillä pareittain istuminen on melko tavallista kouluissa. Osittain parityöskentelyn suosioon on johtanut oppikirjojen ja välinevalmistajien omat käytännöt työhjeiden ja välineiden valmistuksessa. Parityöskentelyssä työmäärä on fysiikan kokeiden kannalta sopiva, sillä molemmille oppilaille löytyy tarpeeksi työtä. Oppiaineintegrointi tuottaa usein vääjäämättä töitä, joissa kummankin aineen tietojen soveltaminen samaan ilmiöön on enemmän sääntö kuin poikkeus. Tiedon soveltaminen on oppimisen suurimpia tavoitteita mutta samalla myös haastavinta oppilaille, ja siksi parityöskentely on hyvä tapa toteuttaa fysiikan ja musiikin integrointia. Erityisesti soittimia hyödyntävien töiden pohdinnassa samanaikaisten ilmiöiden runsaus voi tehdä oleellisen havainnon tekemisen hankalaksi ja silloin kaksi päätä on parempi kuin yksi. Hyvä esimerkki työstä, jossa voi olla vaikea tehdä oikeat havainnot, on perinteinen äänirautojen resonanssityö kahden akustisen kitaran avulla (D.2.2).

Laajempien kokonaisuuksien tarkastelussa ryhmätyöt tarjoavat entistä sosiaalisemman ympäristön työskentelylle. Oppilastyö (B.2.1) on työmäärältään melko laaja, ja vaikka mittaukset tehtäisiin yksilö- tai parityönä, niin yhteenvedon ja pohdinnan kannalta ryhmätyö voisi olla sopiva työskentelymuoto. Ryhmätyön haasteena on, että kaikille on riittävästi työtä ja että ryhmäkemia toimii. Yhdessä työskenneltäessä oppilaat joutuvat selittämään toisilleen, kuinka itse ymmärtävät asiat ja kuinka ratkaisisivat niitä. Tällainen vertaisopetus pakottaa oppilaita arvioimaan omaa osaamistaan ja omien tietojensa paikkansapitävyyttä. Ryhmätyö voi myös tarjota matalamman kynnyksen sosiaaliseen vuorovaikutukseen oppilaiden välillä kuin tavallisemmassa opettaja-oppilas tilanteessa. Integroinnissa työtapaa voisi käyttää esimerkiksi tiettyjen soittimien toimintaperiaatteiden selvittämiseen.

Vertaisoppimisen tuomat edut, toisen mielipiteiden huomioiminen, oman tietotaidon arviointi, yhteisten vahvuuksien hyödyntäminen ja sosiaalisuus ovat kummankin edellä mainitun työtavan vahvuuksia. Tehtävien suunnittelussa on otettava huomioon, että työmäärä pitää jokaisen parin tai ryhmän jäsenet aktiivisena. Pohdintaan ja keskusteluun kannustava ja riittävän haastava tehtävänanto estää työtapojen muuttumista yksilösuorittamiseksi. Käytännön opetuksessa työtapojen valintaan vaikuttaa saatavilla olevat välineet ja opetustilojen koko.

Projektityöt keskittyvät pitempiaikaisesti jonkin tietyn ilmiön tutkimiseen. Pulmana työtavalle ovat aikatauluun liittyvät ongelmat, sillä projektit vievät paljon aikaa ja on mietittävä, miten projektilla saadaan katettua riittävästi esimerkiksi lukion kurssin sisältöä. Toisaalta projektityöskentely antaa oppilaille enemmän vapautta toteuttaa itseään avoimen tehtävänannon kautta. Työtapa on myös hyvin lähellä käytännön elämän ongelmia, joissa ratkaisu pitää etsiä empiirisen kokeilun kautta, vaikka teoria tunnettaisiin. Työ voi olla kilpailuhenkinen, jolloin lopputuloksen optimointi pakottaa testaamaan taustalla olevaa teoriaa sekä omaa ymmärrystä. Integroinnin kannalta sopivia kohteita projekteille voisi olla viritettyjen putkien tai poikkihuilun soitinrakentaminen (B.2.2) (B.2.3).

Yhteistoiminnallinen oppiminen

Yhteistoiminnallisessa oppimisessa oppilaat työskentelevät ryhmissä ja saavat tehtävään oppia jonkin aihekokonaisuuden. Aihe pilkotaan osiin, ja jokainen oppilas opiskelee itsensä asiantuntijaksi yhdessä osakokonaisuudessa. Sen jälkeen jokainen asiantuntija

opettaa muille ryhmän jäsenille oman vastualueensa. Tästä seuraa, että koko ryhmä osaa aihekokonaisuuteen liittyvät asiat ja jokainen jäsen on lisäksi asiantuntija jostain pienemmästä kokonaisuudesta.

Hyötynä tälle työtavalle on vastuunotto omasta ja muiden oppimisesta, mutta haasteena toisille opettaminen. Oppivatko kaikki kokonaisuuden vai jääkö jäljelle joukko vain yhden osa-alueen asiantuntijoita. Opettajan on hyvä valita käsiteltävä aihe niin, että yksilönä tehtävä erikoistuminen ei tule liian työlääksi jo ajankäytön kannalta. Erikoistumisen helpottamiseksi eri ryhmien saman osakokonaisuuden asiantuntijat voivat tehdä yhteistyötä, jolloin työtapa muistuttaa tässä vaiheessa tavallista ryhmätyötä. Tähän työtapaan sopisi esimerkiksi aalto-opin peruskäsitteiden, taajuuden, aallonpituuden, jaksonajan, ja amplitudin käsittely esimerkiksi kitaran avulla. Työt (B.1.1), (B.1.2) ja (B.1.3) voisi teettää kolmen hengen ryhmissä, jolloin jokaisella ryhmän jäsenellä olisi yksi työ vastualueenaan. Useammasta ryhmästä saman työn tekijät voisivat tehdä yhteistyötä selvittäessään omaa vastuualuettaan ryhmälleen.

Työpisteet

Työpisteissä voidaan tehdä paljon pieniä ja yksinkertaisia töitä lyhyessä ajassa. Ongelmana työtavassa on opettajan venyminen pisteeltä toiselle. Siksi töiden on oltava riittävän helppoja, että opettajan apua tarvitaan enintään oikeiden johtopäätösten tekemiseen. Opettajan rooli on ensisijaisesti työskentelyn ohjailijana. Työpisteet olisivat loistava sovellys yhteisopettajuudelle musiikinopettajan kanssa, mutta toistaiseksi resurssit ja aikataulut harvoin sallivat tällaisen järjestelyn. Yhteisopettajuus mahdollistaisi haastavimmat työt, mikä toisaalta kahden aineen asiantuntijuuden kautta tarjoaisi vaihtoehtoisia näkökulmia saman ilmiön pohtimiseen. Esimerkiksi monivaiheiseen työhön, kuten (D.2.1) voisi lisätä työn (D.2.2) ja muodostaa eri vaiheista työpisteitä. Jokaisessa pisteessä olisi omat välineensä yhden työvaiheen tekemiseen.

Opintokäynnit

Opintokäynnit ovat useimmissa kouluissa aikataulu- ja resurssikysymyksiä. Onko olemassa sopivaa vierailupaikkaa riittävän lähellä? Fysiikan ja musiikin integroinnin kannalta hyviä vierailupaikkoja olisivat soitinrakentajat, äänentoistolaitteistoja myyvät yritykset tai erilaiset musiikkiesitykset. Tutustuminen soittimiin ja musiikkitekologiaan liittyviin käytännön ongelmiin avaa alan ammattilaisten näkemyksiä ja lähestymistapoja erilaisiin pulmiin. Musiikkiesityksissä on mahdollista havaita monia äänen ilmiöitä interferenssistä huojuntaan. Opettajan haasteena on muodostaa opintokäyntiin liittyvä tehtävänanto niin, että elämyksien kokemisen lisäksi tapahtuisi myös oppimista.

5.3 Opettajajohtoisia työtapoja

Opettajajohtoisissa työtavoissa opettaja ohjaa toimintaa ja tarkoituksena on aktivoida oppilas, herättää kiinnostusta ja motivaatiota opiskeltavia asioita kohtaan. Opettajajohtoisien työtavan ei tarvitse passivoida oppilasta opettajan näennäisestä aktiivisuudesta huolimatta. Opettajajohtoisia työtapoja on hyvä käyttää silloin, kun opiskellaan hankalasti havainnoitavia tai tutkittavia asioita. [1, s. 166–167] Opettajajohtoiset työtavat ovat myös käytännöllinen tapa nopeuttaa tiettyjen asioiden käsittelyä, jotta voidaan käyttää enemmän aikaa jossain muualla opetuksessa.

Demonstraatio

Fysiikan opetuksessa yleisin opettajajohtoinen työtapa on erilaiset demonstraatiot. Demonstraatioiden etuna on nopeus ja yllätyksettömyys, koska opettaja tietää mitä demonstraatioissa tapahtuu. Tällöin myös tärkeän asian havainnointi on helpompaa, koska opettaja voi suunnitella demonstraation niin, että se johdattelee kohti oikeaa johtopäätöstä. Hyvä demonstraatioesimerkki on basson kielen seisova aalto (D.1.1), koska se on liian yksinkertainen ja toisaalta lyhyt oppilastyöksi. Ajankäytön ja opetuksen hyötysuhteen kannalta koe on parasta tehdä opettajajohtoisesti, jolloin se voisi helposti toimia johdantona työhön (B.1.3).

Kerronta

Kerronnan keinoja opettajat käyttävät huomaamattaan päivittäin. Integroinnin kannalta musiikin historia on täynnä tarinoita, joita voi käyttää johdantona fysiikan aiheisiin. Esimerkiksi pianon kehittyminen soittimena voi toimia johdantona työhön (B.1.2), koska se kertoo samalla pianon eri rakenneosia. Tarina viime viikonlopun heavy metal -keikasta ja siellä kuullusta hienosta kitarasoolosta voi jatkaa huiluäänidemonstraatioon (D.4.2). Fysiikan ja musiikin integroinnin kannalta kerrontaa helpottaa oma harrastuneisuus musiikkiin.

Videoiden näyttäminen

Saatavilla on runsaasti videomateriaalia erityisesti musiikkiin liittyvistä ilmiöistä. Erilaiset musiikkiesitykset, soittimien opetusvideot sekä tähystyskuvat äänihuulista tuovat opetukseen vaihtelua. Videoiden etu on, että ne voidaan pysäyttää kriittiseen kohtaan ja keskustelua voidaan käydä rauhassa. Koetilanteissa oleellinen havainto on usein sekunneissa ohi ja keskustelua täytyy käydä itse kunkin muistin varassa. Nykyään taulutietokoneiden avulla demonstraatioiden ja oppilastöiden videointi on helppoa ja tämä tarjoaa uuden mahdollisuuden katsoa tapahtumia jälkikäteen. Työssä (D.2.3) resonanssin huomaaminen voi olla vaikeaa, jos itse joutuu keskittymään soittamiseen. Tällöin videointi mahdollistaisi havainnoinnin jälkikäteen ilman motorisen suorittamisen tuomaa häiriötä.

6 INTEGROINNIN KÄYTÄNNÖN VAATIMUKSIA

Kahden oppiaineen integrointi tuo aina omat ongelmansa käytännön toteutukseen, eikä musiikin ja fysiikan suhde ole poikkeus. Harva edes tietää aineiden välisistä kytköksistä, ja nykyinen opetussuunnitelma vain vihjaa integroinnin mahdollisuuksista. Miten saadaan sekä oppilaat että opettajat toteuttamaan integrointia ja mitä haasteita se tuo opetuksen arkeen? Tämä luku pohtii integroinnin tuomia vaatimuksia kummankin aineen näkökulmasta nostoen esiin suurimpia kompastuskiviä ja tarjoten erilaisia näkökulmia ja ratkaisuja ongelmien selättämiseen.

6.1 Opetustiloista

Luonnontieteiden luonteeseen kuuluu kokeellinen tiedonhankinta, mikä asettaa vaatimuksia opetustiloille ja opetusvälineille. Nykyaikana tieto- ja viestintäteknikan hyödyntäminen luonnontieteiden opetuksessa on yksi opetussuunnitelmassa mainittu tavoite, ja se on otettava huomioon tilojen ja kokeellisten töiden suunnittelussa. [5, s. 12–13] Perinteisesti luonnontieteitä opetetaan luokassa, jossa on mahdollisuus märkälaborointiin, mutta opetusta voidaan viedä myös koulun pihalle ja jopa koulualueen ulkopuolelle. Jos tiloja on enemmän käytössä, osa niistä voidaan varustaa pelkästään kuivatyöskentelyyn. Fysiikka joutuu usein jakamaan opetustilansa muiden luonnontieteiden kanssa, mikä vaatii tiloilta muunneltavuutta ja varastointimahdollisuutta eri oppiaineiden välineille. Erityisesti kemikaalit ja säteilylähteet tarvitsevat oman varastotilansa. [5, s. 20–27]

Nykypäivän musiikinopetus vaatii opetustiloilta paljon, sillä soitinten lukumäärä on kasvanut ja musiikkiteknologia on tuonut studiotekniikan luokkahuoneeseen. Samalla luokkatilojen akustiikkaan ja äänieristykseen on kiinnitetty enemmän huomiota. [57, s. 8] Edelleen haasteita tuo opetustilan suuri käyttäjäkunta, mikä kattaa usein koko perusopetuksen oppilasmäärän ja joissakin kouluissa myös lukion. [57, s. 14–15] Musiikkiluokassa voidaan soittamisen, kuuntelemisen ja laulamisen lisäksi toteuttaa musiikkiliikuntaa, draamaa ja katsoa vaikka elokuvia. Musiikkitietoa opitaan usein tavanomaisena luokkatyöskentelynä, ja siksi opetus vaatii tiloilta paljon muunneltavuutta opetuksen työtapojen mukaan. [31, s. 34–37] Kouluissa on myös monia muita tiloja, kuten juhlasaleja, liikuntatiloja ja ulkoalueita, jotka usein kytkeytyvät musiikin opetukseen esimerkiksi koulun juhlissa.

Vaikka oppimisympäristöt olisivat kunnossa, integrointi asettaa opettajille paljon vaatimuksia. Jotta pystytään yhdistämään kahden aineen opettajien aikataulut ja oppisisällöt keskenään, on opettajien välinen yhteistyö välttämätöntä. Fysiikan ja musiikin opettajien koulutus tarjoaa minimaalisen määrän eväitä ainerajoja ylittävään sisällönhallintaan, ellei ole Suomessa harvinainen fysiikka-musiikki-aineenopettaja. Käytännössä integrointia voisi toteuttaa esimerkiksi yhteisprojekteina, yhteisopettajuutena, yhteisten laitehankintojen kautta, yhteisen opetusmateriaalin kehittämisenä tai teemapäivinä [50, 38–39]. Olen päässyt opettajakoulutuksessa kokeilemaan musiikin ja fysiikan yhteisopettajuutta, ja siitä sain vain hyviä kokemuksia. Valitettavasti tällainen järjestely kouluissa kaatuu usein resurssipulaan. Käytännössä suurien, yhteisten kokonaisuuksien toteuttaminen on usein hankalaa jo esimerkiksi lukion kurssien aikataulutuksen takia, jolloin on viisainta upottaa

integrointi osaksi kummankin aineen kurssien sisältöjä. Tällöin kumpikin opettaja voi toimia omalla osaamisalueellaan oman aineensa näkökulmasta, jolloin asiasisältöön saadaan erilainen tarkastelu siirryttäessä oppiaineesta toiseen.

6.2 Opetusvälineistä ja oppimateriaalista

Fysiikassa opetusvälineitä kutsutaan koelaitteiksi ja musiikissa soittimiksi, mutta pohjimmiltaan kummallakin on samanlainen käyttötarkoitus. Fysiikan luonteeseen kuuluva kokeellisuus vaatii ilmiöiden testaamista, ja sitä varten tarvitaan koelaitteita, jotka rajaavat arjen laajat ilmiöt käsittelemään vain pientä osaa kokonaisuudesta. Samaan tapaan musiikissa yksi soitin on useimmiten vain yksi osa musisoivaa rock-bändiä, suurta orkesteria tai kuunneltavaa äänitettä. Opetusvälineiden hyödyntäminen kummassakin oppiaineessa on etu kummankin aineen oppimistulosten kannalta. Näin ei ole vain pedagogisesti, vaan myös taloudellisesti, koska molempien oppiaineiden välineet ovat kalliita verrattuna monien muiden oppiaineiden välinetarpeisiin. Hyödyntämällä musiikkiluokan välineistöä fysiikan opetuksessa ja päinvastoin voidaan säästää rahaa muihin hankintoihin. Soittimet tarjoavat lisäksi selkeän edun fysiikan koelaitteisiin nähden, sillä oppilaille voi olla soittimia kotonaan. Yleensä fysiikan koevälineet ovat sellaisia, joita tapaa vain fysiikan välinevarastoissa kouluissa, mikä tekee niistä keinotekoisia arkielämän kannalta. On järkevää sitoa tällä tavoin oppiaineiden käsitteitä oppilaille merkittäviin asiayhteyksiin.

Fysiikassa kokeellinen tutkimus tehdään pääasiassa erilaisten koevälineiden avulla, joita hankitaan muutaman suuren yrityksen kautta kouluihin. Koevälineet on rakennettu niin, että ne nostavat mahdollisimman hyvin esiin tarkasteltavan ilmiön jättäen pois muut arkielämän tilanteissa havaittavat oheisilmiöt. Äänen tutkimisen kannalta oleellisia ja yleisiä koevälineitä ovat jouset, äänigeneraattori, kaiutin, ääniraudat, desibelimittari sekä mikrofonit tietokonejärjestelmiseen. Sähkösoittimiin ja musiikkitekologiaan liittyviä koevälineitä ovat oskilloskooppi, magneetit, magneettivuon tiheyden mittaussanturi, vaihtovirtageneraattorin malli ja käämit. [5, s. 12–13] Monet näistä koevälineistä ovat saatavilla nykyaikaisessa musiikkiluokassa soittimina ja musiikkitekologian sovelluksina, mikä mahdollistaa fysiikan kokeellisuuden integroinnin musiikkiin ja sen käyttämiin opetusvälineisiin.

Opetushallitus on tehnyt ehdotuksen 100 neliömetrin ja 20 oppilaan musiikkiluokan perusvarustuksesta, joka käsittää muun muassa pianon, erilaisia kitaroita, kanteleita, rumpusestin, monia erilaisia perkussioita ja ksylofoneja. Sähkösoittimista ehdotuksessa mainitaan kaikki yleiset yhtyesoittimet: sähkökitara, sähköbasso, syntetisaattori, sähköpiano, sähkörummut ja näiden vahvistukseen käytettävät instrumenttivahvistimet. Musiikkitekologian studio- ja äänentoistolaitteiston perusvarustus on kattava. Äänentoistossa mikseri, päätevahvistin ja kaiuttimet muodostavat rungon, johon voidaan lisätä esimerkiksi efektiprosessoreita ja ekvalisaattoreita. Äänilähteiksi luetellaan erilaisten mediasoittimien ja tietokoneen lisäksi sekä dynaamisia että kondensaattorimikrofoneja. Tarvitaan myös kaapelointia, eri instrumenttien tarvikkeita ja huoltovälineitä. [57, s. 134–135] Vaikka opetushallituksen ehdotus on suuntaa-antava, monissa musiikkiluokissa varustelu myötäilee esitettyä linjaa. Musiikkiluokka siis sisältää merkittävän määrän opetusvälineitä, joita voidaan käyttää fysiikan ja musiikin integroinnissa.

Erityisesti mobiililaitteet ja vapaan lähdekoodin ohjelmistot ovat tuoneet uusia koevälineitä fysiikan ja musiikin integrointiin. Puhelimiin ja taulutietokoneisiin löytyy runsaasti signaaligeneraattoreita, desibelimittareita, virittimiä ja spektrianalysioijia, joiden käyttö

opetuksessa on helppoa ja helposti sovellettavissa arjen tarpeisiin. Tietokoneet ovat olleet osa musiikkiteknologian ja musiikin tekemisen aallonharjaa jo pitkän aikaa. Studioteknologian jatkuva halpeneminen tuo jokaisen ulottuville tekniikkaa, joka vielä kaksikymmentä vuotta sitten oli vain rikkaiden studioiden käytettävissä. Musiikkiteknologia on jo niin monimuotoista, että sen ymmärtämiseen tarvitaan musiikin tietojen lisäksi yhtäläillä fysiikan tietoja, mikä on yksi hyvä syy integroida näitä oppiaineita toisiinsa.

Tutustuin kummankin oppiaineen peruskoulun, toisen asteen koulutuksen ja korkeakoulun oppikirjoihin. Fysiikan oppikirjoissa on vuosien mittaan ajauduttu tiettyihin asioiden oppimis- ja käsittelyjärjestyksiin, jotka ovat vakiintuneet peruskouluista korkeakouluihin asti. Kirjallisuus noudattaa lähes poikkeuksetta samaa käsittelyjärjestystä, johon ajaa fysiikan tietorakenteen kumulatiivisuus. Käsiteltävillä asioilla täytyy olla tietty looginen järjestys, jotta oppiminen on johdonmukaista. Musiikki on oppimateriaalin kannalta aarreaitta, sillä musiikkia on tehty suunnaton määrä. Edelleen musiikkiteknologian kehittyttyä materiaalia syntyy koko ajan lisää jopa oppilailta itseltään, ja internet tuo koko maailman musiikin kaikkien ulottuville. Oppikirjat keskittyvät pääasiassa erilaisten teosten nuottien ja musiikin historian kokoamiseen yksiin kansiin, ja maininnat äänestä fysiikan ilmiönä jäävät lähinnä kuulonhuoltoon kuuluvien käsitteiden ympärille. Korkeakoulukirjallisuus on huomattavasti perinpohjaisempaa musiikin fysikaalisen puolen käsittelyssä, mutta tätä ennen integrointia fysiikkaan ei juurikaan ole. Vanhemman kirjallisuuden tarkastelu edelleen vahvistaa päätelmää, että integraatiota oppimateriaalin suhteen on kautta linjan enemmän fysiikan suunnasta musiikkiin kuin päinvastoin. Mielenkiintoinen havainto on, että vanhemmissa fysiikan oppikirjoissa integrointia musiikkiin on huomattavasti enemmän kuin uusissa kirjoissa.

6.3 Ajankäyttö ja kustannukset

Integroinnin tuoma iso pulma on ajanhallinta kahden aineen yhteistyössä. Onkin tärkeää miettiä, millä tavalla integrointia toteutetaan, sillä opettajan mahdollisuuksia rajoittavat monet ulkoiset tekijät. Valtakunnallisesti opetussuunnitelma velvoittaa tiettyihin asioihin, vaikka sen sanelemat kehykset antavatkin paljon varaa integroinnille erityisesti uuden POPS 2014:n tapauksessa. Paikallisesti koulussa ajankäytön haasteita luovat koulun sisäiset aikataulut, kurssien aikataulut, opetustilojen ja välineiden saatavuus sekä myös opettajien henkilökohtaiset aikataulut. Erityisesti haluttaessa toteuttaa integrointia toisen opettaja kanssa esimerkiksi yhteisopettajuuden kautta aikatauluongelmat voivat olla ylivoimaisia. Integrointia olisi hyvä suunnitella jo hyvissä ajoin, jotta opetuksen aikataulut saataisiin sopimaan yksiin oppiaineiden välillä. Luokassa käytännön opetuksessa ajankäyttöön voivat vaikuttaa oppikirjavalinta ja sisältöjen valinta sekä asioiden käsittelyjärjestys. Lisäksi työtapojen ja mahdollisen eriyttämisen tuoma vaikutus ajankäyttöön pitää huomioida integrointia suunniteltaessa. Tällöin opettaja joutuu itse miettimään oman opetustyyhinsä ja osaamisensa sopimista valittuihin integrointimenetelmiin. Lopulta integroinnin onnistumiseen vaikuttaa myös oppilasryhmän sisäinen kemia ja opettajan ja ryhmän välinen suhde. Ajankäytön ongelmaa voitaisiin kiertää esimerkiksi järjestämällä erikseen fysiikkaa ja musiikkia integroiva syventävä kurssi, mutta usein tällainen järjestely on hankala enemmän rahallisten kuin ajanhallinnallisten syiden takia.

Lähtökohtaisesti fysiikan ja musiikin integrointi on kouluille taloudellisesti edullista, sillä kaikissa Suomen kouluissa on melko samankaltainen varustus musiikin välineiden osalta. Tarpeellisesta välineistöstä Opetushallituskin on antanut oman suosituksensa [31], mikä

standardisoi musiikin välineistöä samaan tapaan kuin fysiikan pitkät kokeellisen työn perinteet fysiikan välinevaraston sisältöä. Integrointi ei lähtökohtaisesti vaadi mitään laitehankintoja, vaikka niitä myöhemmin voidaan tehdä yhteistyössä musiikinopetuksen kanssa huomioiden molempien aineiden tarpeet. Tällöin on mahdollista yhdistää kahden oppiaineen hankintarahoja yhteisen hyödyn tavoittelemiseksi. Opettajan näkökulmasta integrointi voi olla rahallisesti kannattamatonta, jos integroinnin valmistelu kuluttaa kohtuuttomasti joko omaa tai musiikinopettajan aikaa. Onkin tärkeää valita integrointitavat niin, että työmäärä ei kasva kohtuuttomaksi, ja silloin on tärkeää eri aineiden opettajien välinen vuoropuhelu ja kummankin opettajan vahvuuksien hyödyntäminen. Yhteisopettajuus nähdään mahdollisesti monissa kouluissa liian kalliina ratkaisuna, mutta esimerkiksi opettajien vierailu toistensa tunneilla pitäisi opetustuntien määrän samana tarjoten silti molempien oppiaineiden näkökulmia.

7 SOITTIMIEN FYSIIKASTA

Tässä luvussa tarkastellaan koulumaailman ja oppiaineintegroinnin kannalta oleellisten soittimien fysiikkaa. Lisäksi mukana on yleisiä harrastamiseen liittyviä tärkeitä instrumentteja ja fysiikan näkökulmasta kiinnostavia soittimia. Luku on hyödyllinen myös fysiikan opettajalle, koska siinä kerrotaan lyhyesti oppiaineintegrointiin oleellisia tietoja, joita ei fysiikan oppikirjoissa mainita. Tarkoitus ei ole antaa tyhjentävää kuvausta valittujen soittimien toiminnasta, koska soittimien fysiikka ei ole yksinkertaista monien epälineaaristen ominaisuuksiensa takia [12]. Soittimien jaottelu perustuu Olsonin kirjaan [41, s. 108–109]: järjestyksen pohjaksi on otettu soittimien äänentuoton fysikaalinen perusta.

7.1 Kielisoittimet

Kielisoittimet ovat olleet historiallisesti tärkeimpiä soittimia. Jousisoittimet ovat olleet sinfoniaorkesterin tunnusmerkki kuten erilaiset näppäiltävät kielisoittimet ovat olleet kansanmusiikin ja nykyaikaisten musiikkityylien, muun muassa rockin ja bluesin, helposti tunnistettavia soittimia. [49, s. 187] Värähtelevä kieli on yksinkertaisimpia värähtelysystemejä, jossa on mahdollista synnyttää enemmän kuin yksi värähtelytaajuus, ja useimmat kielisoittimet voidaan perusrakenteeltaan palauttaa ontoksi laatikoksi, johon kielet kiinnitetään. [8, s. 165] Jännitetty kieli pystyy tuottamaan kaikki mahdolliset yläsävelet. Koska kieli värähtelynsä pienuuden ja pienen kokonsa puolesta aiheuttaa vähän värähtelyn siirtymistä ilmaan, kielet on kiinnitetty Helmholtzin resonaattorina toimivaan laatikkoon voimakkuuden lisäämiseksi. Syntyvien yläsävelten voimakkuus määräytyy suoraan kielen värähtelyn aiheuttavan häiriön suuruudesta; myös sitä mihin kohtaan kieltä häiriö vaikuttaa. [41, s. 110]

Kielten jännittäminen on tavallinen tapa virittää värähtelijä soittimissa tiettyyn taajuuteen. Käytetty rakenne ja materiaali ovat rajoittavana tekijänä sille, kuinka suurta mekaanista jännitystä värähtelijä kestää, ja asettavat rajat taajuuden vaihtelulle. Aallon nopeus $v = \sqrt{T/M}$ jännitetyssä kielessä riippuu jännityksestä T sekä kielessä käytetyn materiaalin määrittämästä massasta m pituusyksikköä L kohden $M = m/L$. [20, s. 145–147] [45, s. 29–30] Aaltoliikkeen perusyhtälön mukaan syntyvä taajuus $f = v/\lambda$, johon sijoittamalla kielen tapauksessa $\lambda = 2L$ ja $v = \sqrt{T/M}$, missä L on värähtelevän kielen pituus, saadaan $f = \sqrt{T/M}/2L$. [20, s. 161][45, s. 33–35]

7.1.1 Näppäilysoittimet

Näppäilysoittimien ääni tuotetaan kielen rajulla poikkeuttamisella, jonka jälkeen vaimenevan värähtelyn aikakehitys määrittelee syntyvän äänen laadun. Näppäily tapahtuu useimmiten soittajan sormien tai tarkoitukseen valmistetun plektran avulla, ja joissain soittimissa, kuten cembalossa, on käytetty jopa erilaisia mekaanisia ratkaisuja. Vaimenevan värähtelyn takia soittimissa on kiinnitetty erityistä huomiota vaimenemisen minimointiin, jotta soittimiin saataisiin pitkää sointia. Värähtelyn kesto ei ole ongelma jatkuvasti poikkeutettavien systeemien, kuten jousisoittimien tapauksessa. [56, s. 157]

Kieltä näppäiltäessä syntyvä värähtely on yhdistelmä värähtelyn ominaisvärähtelystä ja yläsävelistä. Koska eri yläsävelillä on eri taajuudet, tapahtuu summautuminen, joka tekee kielen värähtelystä hyvin kompleksista. Esimerkiksi keskeltä näppäilty kieli sisältää perustaaajuutensa lisäksi parittomat yläsävelet. Kohta, josta kieli saatetaan värähtelemään, vaikuttaa siis merkittävästi syntyviin yläsäveliin ja siten koko kompleksisen värähtelyn laatuun. [49, s. 189–190]

Akustinen kitara

Akustisen kitaran rungon muodostavat kaikukoppa ja siihen liitetty kaula. Kitaran kielet kiinnittyvät kaulan päässä virittimiin ja kaikukopan keskivaiheilla olevaan talleen, josta kieliin muodostuva seisova värähtely siirtyy pääasiassa kaikukoppaan. Värähtelijöinä toimivien kielten värähtelevää pituutta voidaan muuttaa kaulan otelautaan kiinnitettyillä nauhoilla. Kielen painaminen nauhaa vasten aiheuttaa uuden solmukohdan muuttaen seisovan aallon kokoa. Toimintaperiaate on samankaltainen kuin Pythagoraksen monokordissa. [8, s. 165–167] [41, s. 114–115]

Kitaran juuret ovat muinaisessa Egyptissä ja antiikissa, ja kitara polveutuukin luutusta ja vihuelasta. Nykykitara kehitettiin nykyiseen muotoonsa Espanjan Andalusiassa 1400-luvun lopulla erityisesti Antonio de Torresin toimesta. Kitarasta on nykyään olemassa lukuisia erilaisia rakenteellisia variaatioita, mutta yleensä kitarassa on kuusi kieltä, jotka on viritetty kvinttein ja kvartein sekä otelauta metallisilla nauhoilla. Kaikukopan kansi on usein kuusta ja muuten kitara valmistetaan jostain kovapuusta. Kitaran sointiin eli soitettaessa syntyvän yläsävelsarjan rakenteeseen vaikuttaa eniten kansi ja sitä tukeva rimoitus, joiden valmistus on soitinrakentajalle vaikein työvaihe. [49, s. 201–203]

Kitara voidaan ajatella kytketyistä värähtelijöistä muodostuvaksi systeemiksi. Kielet itessään siirtävät värähdysenergiaa ympäristöönsä häviävän vähän, ja siksi kielet kytketyvät kaikukoppaan tallan kautta. Kannen ja pohjan värähtely siirtää äänen ympäröivään ilmaan. Korkeat taajuudet säteilevät ympäristöön pääasiassa suoraan kannesta, mutta matalat taajuudet saavat kitaran muutkin osat värähtelemään. Kaikukopan matalin värähtelytaajuus on Helmholtzin resonanssi, jonka taajuus riippuu kaikukopan tilavuudesta ja kaikuaukon halkaisijasta. Matalataajuiset resonanssit syntyvät kannen, pohjan ja kaikukopan sisällä olevan ilman kytketystä värähtelystä, ja kyseiset resonanssit vaimenevat noin 400 Hz yläpuolella. Tätä korkeammilla taajuuksilla resonoi pelkästään kansi tai pohja ilman alempien taajuuksien voimakasta kytkentää. [49, s. 203–209]

Kantele

Kantele on Suomessa tunnettu kansanmusiikkisoitin ja yleinen koulusoitin. Perinteisessä kanteleessa on viisi kieltä, ja se on viritetty diatonisesti joko molliin tai duuriin. Isommassa suurkanteleessa on 18–39 kieltä riippuen siitä, mistä päin Suomea kantele on peräisin.

Nykyisen koneistokanteleen rekisteri on noin viiden oktaavin laajuinen. Rakenteeltaan kantele on kuin piano, jonka kieliä näppäillään sormin, tai se on kuin otelaudaton ja kaulaton kitara. Kantele viritetään pianon kaltaisten viritystappien avulla. [55, s. 5–6]

Kanteleen yksinkertainen rakenne tekee siitä hyvän soittimen integrointiin värähtelevän kielen ominaisuuksien tutkimisen sekä yläsävelten demonstroinnin helppouden vuoksi. Lisäksi Kantele on soitin, jonka valmistaminen on suhteellisen helppoa.

7.1.2 Jousisoittimet

Nykyaikaisen orkesterin jousisoitinperhe käsittää neljä soitinta: viulun, alttoviulun, sellon ja kontrabasson. Näistä kolme ensimmäistä poikkeaa toisistaan lähinnä kokonsa puolesta, ja kontrabasso polveutuu viola da gambasta [8, s. 179] [56, s. 157] ja on siten rakenteeltaan hieman erilainen muihin perheenjäseniin verrattuna. [56, s. 157] Jousisoittimia on perinteisen jousisektion ohella runsaasti niin kansanmusiikissa, kuin rock-konserteissa jousella soitettavana sähkökitarana.

Jousisoittimet kuuluvat soittimiin, joilla voidaan tuottaa aaltomuodoltaan kompleksista, mutta silti jatkuvaa ja suhteellisen vakaata ääntä. Tällaisen äänen tuottaminen esimerkiksi jousella ei ole triviaali suoritus, vaan vaatii paljon harjoittelua soittajalta. Jouhen oikea jännitys on tärkeää soittamisen kannalta, ja jouheen hierotaankin hartsia, jotta kitka saadaan kielen kanssa sopivaksi. [8, s. 167–169] Jousella soitettaessa kieli vaikuttaa värähtelevän ominaistuuksillaan, mutta todellisuudessa asia ei ole näin: ja Hermann von Helmholtz selvitti yli sata vuotta sitten, mitä soitettaessa todella tapahtuu. Kieleen muodostuu kitkan takia terävä mutka kohtaan, jossa jousi hankaa kieleen. Kieli liikkuu työnnön tai vedon aikana jousen mukana, kunnes kieli lipsahtaa jousesta ja ponnahtaa takaisin lepoasentoaan kohden ja tarttuu taas jousen mukaan. Kielen paikan kuvaaja ajan suhteen muodostaa tällöin sahalaita-aaltoa muistuttavan värähtelyn.

Pelkästään jousen ja kielen välinen kitka tekisi värähtelystä hyvin epäsäännöllistä, mutta kielessä liikkuva värähdyspulssi saa aikaan kielen säännöllisen lipeämisen jousesta. Lipeämisen ja tarttumisen rytmi riippuu ensisijaisesti soivan kielen pituudesta, mikä mahdollistaa voimaltaan hyvin vaihtelevat jousitekniikat ilman, että värähtelytaajuus kärsii. Koska kieli on kiinnitetty molemmista päistä, niin jousen vaikutuskohta kielellä rajoittaa mahdollista voimaa ja siten nopeutta, jolla joustusta voidaan työntää. Mitä lähempänä kiinnityskohtia ollaan, sitä suuremmalla alueella joustusta käytävä voima ja syntyvän värähtelyn amplitudi voi vaihdella. Jousisoittimen dynaaminen alue siis laajenee, kun lähestytään kielen kiinnityspistettä, mutta soittaminen käy vaikeammaksi. [41, s. 118–120] [49, s. 190–195] Jouhen vaikutuskohta vaikuttaa lisäksi tiettyjen yläsävelien korostumiseen ja siten soittimen äänenväriin. [8, s. 169–170]

Viuluperhe

Viulu vastaa rakenteeltaan nauhatonta kitaraa, mutta viulussa käytetään puisia viritystappeja, ja kansi ja pohja ovat mekaanisesti yhteydessä toisiinsa pönkän eli äänipinnan kautta. [8, s. 166–167, 170–173] Viulussa äänen tuottavat kielet, joita vasten jousen jouhi hankaa saaden, ne värähtelemään ja resonoiva kaikukoppa vahvistaa kielten vaatimattoman värähtelyn. Kielet on kiinnitetty kaikukoppaan useimmiten vaahterasta valmistetun tallan ja kieltenpitimen kautta. Kaulaan kielet kiinnittyvät viritystappien avulla. Viulun rakenteen kehittämisessä on nähty suuri vaiva sopivien materiaalien ja geometrian löytämiseksi. Pohja tehdään yleensä jostain kovasta puusta, jonka syyt kulkevat poikittain kieliin

nähden. Kansi tehdään tiheäyisistä, mutta keveästä puulajista, kuten kuusesta, ja puun kuitu jää kielten suuntaiseksi. Sekä pohja että kansi viritetään ohentamalla puuta sopivista kohdista. Näin saadaan kannen ja pohjan resonanssi sopivaksi halutun äänenvärin kannalta. Pohjan ja kannen värähtely yhdistyvät kompleksisesti värähteleväksi systeemiksi bassopalkilla, joka on puupala kannen ja pohjan välissä tallan alla. Tavoitteena viulunrakennuksessa on rakentaa suhteellisen tasasointinen soitin, mutta jokaiseen soittimeen jää taajuusalueita, jotka korostuvat. Näitä korostuneita alueita kutsutaan soittimissa yleisesti formanteiksi, ja ne ovat eräs tekijä, joka erottaa erilaiset viulut toisistaan. [8, s. 173–174] [49, s. 190–195] [56, s. 157–160]

Viuluja käytetään usein joukkoina esimerkiksi sinfoniaorkestereissa, jolloin virityseroista johtuva huojunta aiheuttaa halutun sävyn viulujen yhteissointiin. Huojuntailmiön tuoma sävymuutosta käytetään laajalti myös muiden orkesterisoittimien kanssa. Erilaisista viulun ääneen vaikuttavista syistä liikkuu monia tarinoita, joiden totuus pohjaa tutkitaan edelleen, mutta monien sokkotestien tuloksien mukaan edes ammattiviulistit eivät osaa luotettavasti erottaa modernia viulua vanhasta Stradivariuksesta pelkän soinnin avulla. [8, s. 177–179]

Viuluperheeseen kuuluvat viulun lisäksi alttoviulu, sello ja kontrabasso. Soittimien selvä kokoero toistensa suhteen ei ole lineaarinen, vaikka niin voisi luulla. Linearisesta skaalauksesta seuraisi käytännön ongelma soittimen koon takia – soittimet olisivat liian suuria soitettavaksi. Käytetty epälineaarinen skaalaus vaatii muutoksia soittimien rakenteeseen, jotta saataisiin säilytettyä samat resonanssit kuin viulussa. Soitinten kehittymisessä viulu on saanut etulyöntiaseman muihin perheensä soittimiin nähden, ja siksi jousisektion muiden soittimien äänensävy ja hyötysuhde ovat pitkään olleet poikkeavia viuluun verrattuna. Näiden soittimien optimointityö on viety loppuun vasta nykypäivinä tutkimalla alttoviulun, sellon ja kontrabasson akustisia ominaisuuksia moderneilla tekniikoilla. Skaalaamiseen liittyvien soittimien rakentamisen pulmien ratkettua on syntynyt paljon parannettuja ja kokonaan uusia jousisoittimia, joiden on todettu olevan soinniltaan parempia kuin edeltäjänsä. [8, s. 179–182] [20, s. 136–139]

Yleensä jousisoittimia soitetaan jousella, mutta poikkeuksia on muutamia. Esimerkiksi kampiliira kehittyi aikaisen keski-ajan organistrumista 1400-luvulla. Kammella pyöritettiin hartsilla päällystettyä puukiekkoa, joka hankasi kielisiin jousen tapaan, mutta pyörivä kiekko piti äänentuoton tasaisena verrattuna suuntaa muuttavaan jouseen. Sävelkorkeutta muutettiin soittimessa olevilla koskettimilla, ja kiekkonsa ansiosta kampiliirassa oli mahdollista käyttää borduunakieliä melodiakielten lisäksi. [13, s. 92]

7.1.3 Piano ja flyygeli

Piano on useimmille tutuin soitin klassisen kitaran ohella. Piano on fysiikan opetusvälineenä mainio, koska useimpiin pianoihin näkee sisälle poistamalla irroitettavat levyt pianon rungosta. Tällöin runko, kielisarjat, kaikupohja ja koskettimet mekanismeimeen ovat näkyvissä ja mahdollistavat soittamisesta aiheutuvien ilmiöiden havainnoimisen. Muun muassa Mozart, Beethoven ja Chopin tekivät pianon pysyväksi instrumentiksi länsimaisessa klassisessa musiikissa. [22, s. 16–19]

Pianon keksi Bartolomeo Cristofori Firenzessä vuonna 1709. Pianosta on tullut erityisen monipuolinen ja suosittu soitin suuren rekisterinsä ja laajan dynamiikkaansa ansiosta. Piano rakentuu koskettimestosta, rungosta, vasarakoneistosta, kielistä, kaikupohjasta ja valurautaisesta kehyksestä. Kielet viritetään viritystukkiin kierrettyjen viritystappien

avulla, ja kielen toinen pää on kiinnitetty talleen. Kun kosketinta painetaan, niin kielen sammutin irtoaa kielestä ja vasara iskee kieleen saaden kielen värähtelemään. Värähtely siirtyy tallan kautta pianon kaikupohjaan, kuten kitarassa kaikukoppaan. Kaikupohja on lähes aina valmistettu kuusesta, ja se on vahvistettu rimoituksella kitaran kannen tapaan. [20, s. 88–91] [41, s. 123–127] [49, s. 287–290]

Kielten pituus lyhenee ja kieli on ohuempi, mitä ylemmäs pianon rekisterissä siirrytään. Värähtelijää ohentamalla vältetään suurten jännitysten käyttöä virityksessä. Vastaavasti alarekisterissä kielet ovat paksumpia ja pitempiä, jotta matalat taajuudet pystytään toistamaan ilman kielten liiallista löystymistä. Nykyaikaisessa pianossa on keskimäärin 230 kieltä, ja nämä yhteensä tuottavat noin 30 tonnin rasituksen pianon rungolle: sen takia pianon runko on nykyään valmistettu valuraudasta. Pianossa on yleensä vain 88 kosketinta, mutta suuri kielten määrä selittyy kielipareilla ja -trioilla. Huomattiin, että käyttämällä useampaa kieltä samalle nuotille ylä- ja keskirekisterissä pianon ääni saatiin täyteläisemmäksi huojuntailmiön takia. Huojunta syntyy kieliryhmien välisistä vire-eroista, ja silloin kuullaan niin sanottu beating-taajuus $f_b = |f_1 - f_2|$, mikä on värähdystaajuuksien f_1 ja f_2 erotuksen suuruinen. [8, s. 236–238]

Kieliin iskevät vasarat vaikuttavat pianon sointiin muotonsa, huopalaatunsa sekä kuntonsa osalta. Virittäjä voi muuttaa huovan ominaisuuksia pistelemällä sitä neulalla, jolloin huopa pehmenee. Vasaran iskukohta kieleen on tärkeä, sillä se vaikuttaa muodostuvaan yläsävelsarjaan, kuten muissakin kielisoittimissa. Usein vasaran iskukohta on $1/7$ tai $1/8$ kielen pituudesta, missä sen on kokeellisesti huomattu tuottavan parhaan äänen, koska se vaimentaa riitasointuisimpia yläsäveliä. [8, s. 240–241] Epäharmonisia yläsäveliä pyritään välttämään käyttämällä mahdollisimman ohutta teräslankaa – myös punottujen kielen ydinlankana. Juuri tästä syystä pianoon kohdistuu niin valtava jännitys, koska ohutta kieltä on pakko jännittää enemmän kuin paksua kieltä.

Ideaalinen kieli värähtelisi harmonisen yläsävelsarjan mukaan, mutta oikeasti kielen jäykkyys aiheuttaa palauttavan voiman, josta syntyy epäharmonisia yläsäveliä. Jos f_1 on värähtelevän kielen perustaaajuus, niin yläsävelet määräytyvät relaation $f_n = nf_1[1 + (n^2 - 1)A]$ mukaan, jossa $A = \frac{\pi^3 r^4 E}{8TL^2}$. Tekijässä A r on kielen halkaisija, E on Youngin modulus, T on kielen jännitys ja L kielen pituus. Tästä nähdään, että epäharmonisuus on pienin ohuilla ja pitkillä kielillä, joiden jännitys on suuri. Epäharmonisuutta bassokielillä vähennetään pituuden lisäksi punomalla kieli, mikä tekee kielestä joustavamman kuin vastaavan paksuisesta teräslangasta. Pieni epäharmonisuus on silti tärkeää pianon ominaiselle äänenväriin. Epäharmonisuudesta johtuva vähäinen huojunta myös auttaa piilottamaan epävireisyyttä, jota pianoon joudutaan kompromisseina viritettäessä jättämään oktaaveja venytettäessä. Tämä yhdistettynä yhden koskettimen kielisarjojen väliseen tietoiseen epävireeseen saa aikaan pianolle ominaisen äänenväriin. [8, s. 242–243] [49, s. 290–294]

7.2 Puhallinsoittimet

Puhallinsoittimet koostuvat resonaattorista, joka on kytketty jonkinlaiseen mekanismiin, jolla resonaattoriin saapuvaa ilmavirtaa voidaan katkoa. Kun ilmavirtaa saadaan sykkimään ihmisen kuuloalueella olevan taajuuden mukaan, kuullaan ääni. Sykkimisen voi aiheuttaa terävä reuna, vapaalehdykkä, lehdykkä, soittajan huulet tai laulajan äänihuulet. [41, s. 128–129] Katkovan ilmavirran resonaattoriin tuottama värähtelevä ilmapatsas on puhallinsoittinten akustinen perusta, kuten värähtelevä kieli on kielisoittimille. Puhaltimiin syntyvää pitkittäistä seisovaa aaltoa pidetään jatkuvasti yllä tuomalla systeemiin lisää energiaa puhaltamalla. Sävelkorkeutta voidaan muuttaa joko soittimeen tehdyillä rei'illä muokaten seisovan aallon pituutta tai muuttamalla soittimen soivaa pituutta venttiilien tai liukuvan luistin avulla. Avoimeen putkeen perustuu esimerkiksi poikkihuilu, toisesta päästä suljettuun klarinetti ja kartiomaiseen toisesta päästä suljettuun putkeen oboe ja fagotti. Vaskipuhaltimissa hyödynnetään erityisesti yläsävelsarjaa ja sen yläsäveliä eri taajuuksien tuottamisessa. Ilmapatsaan muodon määrävällä soittimen sisäisellä geometrialla on tärkeä musikaalinen merkitys tarkasteltaessa soitinten äänenväriä. [8, s. 182]

Puhallinsoittinten fysiikka voidaan aina karkeasti palauttaa avoimen tai toisesta päästä suljetun putken ongelmaksi. Ilmaa täynnä olevassa putkessa ilma voi värähdellä pitkittäisesti, kuten kieli voi värähdellä poikittaisesti. Täysin suljetussa putkessa tapahtuva seisova värähtely pakottaa putken päissä olevan ilman pysymään paikallaan aiheuttaen painemaksimit. Tämä puhaltimien tapauksessa musiikillisesti merkityksetön tilanne vastaa esimerkiksi kielessä tapahtuvaa värähtelyä, jossa värähtelyn solmukohdat muodostuvat kielen päihin. Nyt suljetussa putkessa tapahtuvan värähtelyn perustaaajuus f_1 saadaan aalto-opin perusyhtälöstä $v = f\lambda$, jossa v on äänen nopeus väliaineessa, f on taajuus ja λ on aallonpituus. Jos suljetun putken pituus on L , niin silloin perustaaajuudeksi f_1 saadaan $f_1 = v/2L$, mikä vastaa kielelle saatua tulosta. Yleisesti partiaaleille suljetussa putkessa $f_n = nv/2L$, jossa n on kokonaisluku. Molemmista päistä avoin putki noudattaa samaa matemaattista mallia, sillä ainoastaan paineen maksimien ja minimien paikat vaihtuvat. Putkeen muodostuvan perustaaajuuden aallonpituus on siis kaksinkertainen putken pituuteen nähden.

Jos putken toinen pää avataan, niin seisovan aallon tapauksessa putken päässä täytyy paineen vastata ulkoista painetta. Tämä aiheuttaa seisovaan aaltoon putken suuaukolle kuvun eli paineminimin. Koska putken avoimeen päähän ei voi muodostua painemaksimia, niin putkeen voi syntyä vain parittomia yläsäveliä. Käyttäen suljetun putken merkintöjä perustaaajuudeksi f_1 saadaan $f_1 = v/4L$ ja yleisesti partiaaleille $f_n = nv/4L$, jossa n on pariton. Putkeen muodostuvan perustaaajuuden aallonpituus on siis nelinkertainen putken pituuteen nähden ja taajuus puolet verrattaessa yhtä pitkään, molemmista päistä avoimeen putkeen.

Putken muotoisten soitinten sovelluksissa joudutaan ottamaan huomioon edellä esitettyyn teoriaan putken halkaisijasta r riippuva korjaustermi $C = 0,61r$, joka johtuu seisovan aallon ulottumisesta putken suuaukon ulkopuolelle. Aalto on tällöin korjaustermin verran pitempi kuin putken pituus. Virheen vaikutus on mitätön, jos putken halkaisija on huomattavasti pienempi kuin käytetyn putken pituus.

Kartiomaisten putkien yläsävelten fysiikka on monimutkaista, eikä sen tarkempi käsittely ole tarpeen tämän tutkielman kannalta. [8, s. 61–65] [20, s. 44–47]

7.2.1 Lehdettömät puhallinsoittimet

Lehdettömien puhallinsoittimien historia juontaa esihistoriallisiin aikoihin, jolloin luolamiehet tekivät primitiivisiä huiluja eläinten ontoista luista. Vuosien kuluessa soitin kehittyi, äänireikiä lisättiin ja erilaisia materiaaleja kokeiltiin. Lehdettömässä puupuhaltimessa värähtely syntyy, kun ilmavirta ylittää terävän reunan, joka turbulenssin takia aiheuttaa ilmavirtaan sykkimistä. Oleellista tällaisissa soittimissa on ilmavirran nopeus eikä syntyvä paine ja sen aiheuttama takaisinkytkentä soittajalle, kuten esimerkiksi vaskeissa. Päänvas-toin, paineen minimissä saadaan soittimesta paras ääni, koska silloin soittimeen syntyvä seisova aalto vaimentaa muita kilpailevia värähtelyjä. Jos puhalletaan riittävän kovaa, tapahtuu ylipuhallus, joka saa taajuuden hyppäämään noin kaksinkertaiseksi oktaavilla tai oktaavilla ja kvintillä seuraavaan värähtelymoodiin. Tällöin soitin soi keskimäärin oktaavin korkeammalla. [8, s. 186] [20, s. 208–209] [41, s. 129] [49, s. 250–251] Ylipuhallus ja siihen liittyvä fysiikka on monimutkainen ilmiö, ja siitä ei tämän tutkielman tekovaiheessa ole olemassa fysiikan teoriaa.

Nokkahuilu ja poikkihuilu

Nokkahuilu on ollut suosittu soitin jo viimeiset 400 vuotta, ja se on kehittynyt keskiajalla monista muista puhaltimista, joissa on ollut seitsemän sormireikää sekä oktaavireikä laajentamassa rekisteriä. Nokkahuilun suosio hiipui 1900-luvulla, mutta soitinrakentaja Arnold Dolmetsch on saanut soittimen suosion palaamaan erityisesti koulu-soittimena. Nokkahuilun esiintulon aikaan panhuilun suosion laskun myötä poikkihuilusta tuli suosittu soitin 1200-1300-luvulla. Suurimman suosionsa soitin sai 1700-luvulla, kun suuret ranskalaiset ja saksalaiset säveltäjät alkoivat hyödyntää sitä teoksissaan. [20, s. 226–227]

Nokkahuilu on rakenteeltaan käänteinen suppeneva kartio, ja sen päässä on pillinkaltainen suukappale. Huilun sisällä olevan ilmapatsaan pituutta voidaan muuttaa nokkahuilussa olevien äänireikien avulla, joita peittämällä käytännössä pidennetään ehyen putken mit-tää. Avoimet äänireiät kytkevät soittimen sisällä olevan ilman ympäröivään ilmaan, mikä rajoittaa painevaihtelua muodostaen paineen solmukohdan lähelle reikää. Samassa kohdassa on värähtelyn maksimi, kupu, jolloin soittimesta syntyvä ääni säteilee ympäristöön reiän kohdalta. Suukappaleen ääniaukko on geometrialtaan kiinteä, mikä tekee soittimen puhaltamisesta helpompaa. Nokkahuilu on siitä huolimatta vaikea soittaa vireisesti dynamiikan ääripäissä, sillä esimerkiksi laskeva paine tekee huilun helposti alavireiseksi hiljaa soitettaessa. Epävireisyyttä voi korjata muuttamalla ansatsia eli huuliotetta, kuten poikkihuilulla ja muilla puhallinsoittimilla. Poikkihuilussa ilmapatsaan koon muuttamiseen on vain kahdeksan äänireikää, joten kaikkien kahdentoista sävelen soittamiseen tarvitaan haarukkaotteita, jolloin suljettujen reikien väliin jää avoimia reikiä. [8, s. 188] [20, s. 215–218] [41, s. 131–132, 134–136] [49, s. 253]

Poikkihuilussa ilmavirta puhalletaan nokkahuilusta poiketen putken poikki. Huulien avulla kohdistettu ilmavirta törmää huilussa olevan reiän reunaan ja saa sisällä olevan ilmapatsaan värähtelemään, kuten lasipullon suun yli puhallettaessa. Poikkihuilut valmistetaan yleensä metallista tai puusta. Soittaja pystyy muuttamaan ilmavirtaa monin tavoin esimerkiksi huulillaan, ja se tekee poikkihuilusta monipuolisemman soittimen kuin nokkahuilusta, jossa soittimen rakenne rajoittaa puhallustekniikkaa. Putki on sylinterin muotoinen, paitsi suukappaleen päästä, jossa muoto on hieman kartiomainen. Tällä muutoksella korjataan ylärekisterin intonaatiota. Värähtelevän ilmapatsaan kokoa säätelevät reiät on peitetty läpillä, joita ohjataan joko suoraan sormilla tai vipumekanismien kautta. Läpät sulkevat reiät varmemmin ja tiiviimmin kuin pelkät sormenpäät. [8, s. 187–188]

[41, s. 133–134] [56, s. 161] Poikkihuilun, kuten nokkahuilun, soitossa on tärkeää löytää ilmapatsaan impedanssinimit, jolloin paine voidaan minimoida ja ilmavirran sykkeen amplitudi maksimoida. [49, s. 251–252]

Urut

Urkupillit eivät ole varsinaisesti puupuhaltimia, mutta niiden äänentuottomekanismi on niin samankaltainen, että urkupillin käsittely tässä vaiheessa on paikallaan. Urkupillit ovat joko lehdettämiä tai sisältävät yhden lehdykän, jolla putken sisäinen ilmapatsas saadaan värähtelemään. Kumpikin näistä mekanismeista vastaa rakenteeltaan nokkahuilua tai klarinettia. Urkupillin pituus on tärkein ominaisuus, joka määrittää urkupillin soivan taajuuden. Äänenväriin kannalta pillin geometria ja erityisesti pituuden ja halkaisijan suhte ovat tärkeimmät tekijät. Jos pillin halkaisija on pieni verrattuna pillin pituuteen, pillin suun vaikutus äänenväriin on vähäinen ja tämä tuottaa runsaasti eri yläsäveliä. Kun putken halkaisija kasvaa, ylemmät yläsävelet ovat entistä enemmän pois vireestä, sillä yläsävelten aallonpituus tulee suuremmaksi kuin pillin fyysinen pituus. Tämä korostaa pillin perustaaajuutta. Lehdykkää käyttävät urkupillit luonnollisesti saavat äänenväriinsä myös lehdykän ominaisuuksien perusteella. [8, s. 209–211] [20, s. 212–214] [41, s. 129–131, 143–144] [49, s. 299–301]

Uruissa ei tarvitse tehdä kompromisseja soittimen rakentamisessa, koska jokaisella nuotilla on oma värähtelijänsä. Urut koostuvat useimmiten useista pienistä uruista, äänikerroista, jotka on yhdistetty toisiinsa yhdellä tai useammalla sormiolla. Pillit on jaettu äänikertoihin sävyjensä mukaan, ja soittaja voi valita, mitkä äänikerrat haluaa soittaessaan käyttöönsä. Äänikertojen pillejä peittäviä ovia voidaan sulkea ja avata polkimella, jolloin voidaan säätää voimakkuutta. Käytännön soitinrakentamisessa syntyvän äänen laatuun vaikuttavat pillin geometrian lisäksi käytetyt materiaalit, pillijärjestelmän paine ja tapa, jolla pillille syötetään ilmaa. [41, s. 154–161] [56, s. 169–173]

7.2.2 Vapaalehdykkäsoittimet

Vapaalehdykkäsoittimessa ääni muodostuu joustavan kieliliuskan värähtelystä. Kieliliuska on sovitettu kehykseen, jonka liuska peittää, ja ilman virratessa liuskan ohi syntyy värähtelyä, jossa on runsaasti yläsäveliä jopa ultraääniin asti. Liuska värähtelee suoraan ympäröivään ilmaan, eikä se tarvitse jonkin geometrian sisään suljettua ilmapatsasta. [20, s. 210] [41, s. 223] Vastaaviin äänentuottomekanismeihin törmää usein soitinten lisäksi lasten ja lemmikkieläinten lelujen yhteydessä yksinkertaisen ja edullisen valmistustapansa vuoksi.

Harmonikka ja huuliharppu

Harmonikka koostuu jokaiselle nuotille omasta värähtelevästä lehdykästään, joiden läpi kulkevaa ilmavirtaa säädellään näppäinten tai koskettimien avulla. Lehdykän materiaali ja geometria vaikuttavat syntyvän värähtelyn taajuuteen ja äänenväriin. Ilmavirtaa ylläpidetään palkeiden avulla, joita soittaja käsillään pumpkaa soittaessaan. Ilmavirran suunta vaihtuu puhalluksesta imuksi palkeiden liikesuunnan mukaan, ja sen takia jokaisella nuotilla on kaksi lehdykkää. Joissain harmonikoissa puhallus ja imu saattavat soittaa eri nuotteja, ja toisissa harmonikoissa voidaan valita äänikertoja kuten uruissa. Tällöin yksi näppäin tai kosketin soittaa useampaa lehdykkää yhtäaikaaisesti. Oikean käden puoli on yleensä melodiaa varten, ja tavallisen pianon koskettimiston lisäksi näppäinharmonikan näppäimet pystyvät tarjoamaan monipuolisempia vaihtoehtoja melodiasoittoon.

Vasen puoli harmonikkaa sisältää yleensä vain näppäimiä, ja yksittäisten bassosävelten lisäksi näppäimistä voidaan soittaa kokonaisia sointuja aina nelisointuihin asti. Tällöin yksi näppäin avaa ilmapirran useampaan eri taajuudella värähtelevään lehdykkään. [41, s. 140–142]

Huuliharppu on mekanismiltaan samankaltainen harmonikan kanssa. Ilmapirta, puhallus tai imu, tuotetaan lehdyköihin huuliharpassa suoraan soittajan keuhkoista. Soittimen rungossa on kanavia, joissa jokaisessa on kaksi lehdykkää kumpaakin virtaussuuntaa varten. Useimmiten harppu tuottaa eri sävelet puhalluksen muuttuessa imuksi. Huuliharppuja on kolmea erilaista päätyyppiä: kromaattisia-, diatonisia- ja konserttiharppuja. Kromaattisessa harpassa on nimensä mukaan käytettävissä kaikki kaksitoista säveltä, ja harpassa on vipu, millä voidaan muuttaa koko harpun säveltasoa puolella sävelaskeleella. Diatoninen harppu on viritetty suoraan johonkin tiettyyn sävellajiin, kuten D-duuriin. Konserttiharpassa on kaksi huuliharppua samassa rungossa päällekkäin. Ylemmät kanavat tuottavat tällöin oktaavin korkeammat äänet kuin alemman rivin lehdykät. Konserttiharput on myös viritetty diatonisesti asteikkojen mukaan. [41, s. 142–143]

7.2.3 Yksilehtiset puupuhaltimet

Lehdyköitä käyttävät puupuhaltimet ovat kouluissa melko harvinaisia ongelmallisen soitotekniikkansa takia, mutta esimerkiksi klarinetti on suhteellisen yleinen puupuhallin harastussoittimena. Näiden instrumenttien äänenmuodostuksen periaatteiden ymmärtäminen ei ole monimutkaista, ja ne ovat helposti sovellettavissa opetustilanteissa. Aivan teorian lopuksi tutustutaan lyhyesti klarinetin ja saksofonin erityispiirteisiin.

Puupuhaltimissa soittaja aiheuttaa seisovan aallon soittimen sisällä olevaan ilmapatsaaseen. Tällöin värähtelevän lehdykän päähän syntyy solmukohta ja kupu suunnilleen ensimmäisen avoimen äänireiän kohdalle. Soittaja tuottaa puhalluksellaan lisää energiaa värähtelyn ylläpitämiseen, ja suuri osa tästä energiasta menee ilman ja soittimen sisäpinnan välisen kitkan voittamiseen. [8, s. 197] Lehdykän värähdellessä syntyy vahva mekaaninen takaisinkytkentä ilmapatsaaseen, joka pitää yllä värähtelyä. Soittimen sisällä olevalla ilman massa on sen verran merkittävä, että ilman värähtely pakottaa keveän lehdykän värähtelemään putken resonanssitaajuudella. Soittaja pystyy muuttamaan syntyvää resonanssitaajuutta enää hyvin vähän huuliotteellaan. Vaskipuhaltimissa värähtelevällä soittajan huulilla on huomattavasti suurempi massa, ja silloin huulet voivat vaikuttaa sopivan resonanssitaajuuden valintaan. [20, s. 210] [49, s. 238–240]

Puupuhaltimissa äänireikiä käytetään ilmapatsaan koon muuttamiseen. Jos lisäksi useampi äänireikä on auki yhtä aikaa, muodostavat ne eräänlaisen akustisen hilan, joka toimii ylipäästösuotimena. Tällä hilalla on merkittävä vaikutus puupuhaltimien äänenväriille. Myös useammat suljetut reiät saavat putken vaikuttamaan pidemmältä, kuin mitä se oikeasti on, ja muuttamaan virityksen matalammaksi. [20, s. 218–222] [56, s. 160–161] [49, s. 241–243] Useimpien soittimien tapaan puupuhaltimetkin ovat hyötysuhteeltaan huonoja käyttäessään äänen muodostamiseen vain 1 – 2 prosenttia soittajan tuottamasta energiasta. Riittävän äänenvoimakkuuden tuottamiseen tarvitaan onneksi vain vähän energiaa. [8, s. 197]

Soitettaessa kuulija ei kuule soittimen sisälle muodostuvaa seisovaa aaltoa, vaan ympäristöön säteilevän värähtelyn. Helposti voisi luulla, että ääni syntyy soittimen suukappaleessa värähtelevässä lehdykässä ja matkaa soittimen läpi kuultavaksi. Näin tapahtuu ainoastaan, kun soittimen kaikki äänireiät on tukittu ja seisova aalto ulottuu koko soittimen

mitalle. Värähtely siirtyy ympäröivään ilmaan pääasiassa sen äänireiän kohdalla, joka on suukappaletta lähinnä avoinna. Tätä voi kokeilla itse peittämällä nokkahuilun päässä olevan reiän ja soittamalla sen jälkeen ylärekisterin säveliä. Värähtely pakenee ympäristöön parin ensimmäisen äänireiän kohdalla, ja vasta parilla matalimmalla nuotilla huomaa peittämisen vaikutuksen. [8, s. 197–198]

Vaikka puupuhaltimien ilmapatsaat ovat teoriassa sylinterin tai kartion mallisia, käytännössä näin harvoin on. Poikkeamat näistä muodoista ovat musikaalisesti tärkeitä intonaation ja äänenvärin kannalta. Sormireiät, jotka ovat vireisiä soittimen yhdessä rekisterissä, ovat yleensä epävireisiä jossain toisessa saman soittimen rekisterissä. Tämä on pakottanut soitinrakentajat kompromisseihin, jotta soitin saadaan soimaan riittävän vireisesti koko rekisterinsä läpi. [8, s. 198–202]. Äänenvärin kannalta soittajan puhalluksen voimakkuus vaikuttaa suuresti syntyvään yläsävelsarjaan, sillä kovempaa puhallettaessa soittimen epälineaariset ominaisuudet korostuvat. Esimerkiksi keveällä puhalluksella lähes yläsävellettömästi ja siniaaltomaisesti värähtelevä klarinetti tuottaa kovalla puhalluksella runsaasti yläsäveliä, joilla on selvä vaikutus soittimen äänenväriin dynamiikan vaihtuessa. Puupuhaltimien epälineaarisuus johtuu pääasiassa lehdykän ja suukappaleen vuorovaikutuksesta soittamisen aikana. [8, s. 197–209]

Klarinetti

Klarinetti on poraukseltaan lähes sylinterimäinen, toisesta päästä avoin putki lukuun ottamatta lyhyttä kelloa. Sisällä oleva ilmapatsas saa värähtelyenergiänsä suukappaleessa olevan lehdykän värähtelystä. [56, s. 163] Lehdykät valmistetaan jostain riittävän joustavasta materiaalista, kuten bambusta, ruo'oilta tai nykypäivänä muovista. Lehdykkä kiinnitetään suukappaleeseen ligatuuralla, joka on metallista valmistettu, letkunkiristintä muistuttava kiinnitin. Suukappaleessa on aukko, jonka lehdykkä peittää suurimmaksi osaksi jättäen pienen raon ilmapuolelle. Puhallettaessa ilmapuolta saa ensiksi lehdykän värähtelemään toisin kuin lehdettömissä puupuhaltimissa, joissa sykkivä ilmapuolta saa ilmapatsaan värähtelemään suoraan. Värähtelevä lehdykkä päästää ilmaa sykkyksinä edemmäs soittimeen saaden aikaan seisovan värähtelyn. Lehdykkä vaatii riittävän suuren ilmapuolta värähtelyn aikaansaamiseksi, mikä tekee hiljaisesta soittamisesta haastavaa.

Soittaja säätää soitettaessa ilmapuolta ja siten värähtelyä puristamalla lehdykkää suukappaletta vasten huulillaan. Samalla säädellään ilmapuolta voimakkuutta, jota rajoittaa lopulta soittimen suukappaleen geometria. Soittimessa olevien reikien avulla värähtelevän ilmapatsaan kokoa voidaan muuttaa, jotta kaikki nuotit pystytään soittamaan. Klarinetissa paineen solmukohta syntyy putken suljettuun päähän, ja syntyvän äänen taajuus on puolet siitä, mitä se olisi molemmista päistä avoimella putkella. Tästä syystä klarinetti soi noin oktaavin matalammalla taajuudella kuin poikkihuilu, vaikka soittimet ovat ulkomitoiltaan lähes samat. Lisäksi suljetussa putkessa voi syntyä vain parittomia yläsäveliä, mikä antaa klarinetille sille ominaisen äänenvärin. [8, s. 188–194] [41, s. 144–145] [49, s. 244–246]

Saksofoni

Belgialainen Adolphe Sax kehitti uutta soitinta korvaamaan sotilasmusiikissa puupuhaltimia, jotka olivat jäämässä uudet venttiilit saaneiden vaskien jalkoihin. Saksofonin toivat ihmisten tietoisuuteen 1900-luvun alkupuolen jazz-yhtyeet, jotka vaikuttivat myöhempään soittimen kehitykseen merkittävästi. Saksofoni on soittimena hybridi, jossa yksilehtiseen soittimeen on yhdistetty oboelle ominainen kartiomainen ilmapatsas. Soittimen ilmapat-

saan mittaa muutetaan sulkemalla äänireikiä läppäjärjestelmällä, kuten poikkihuilussa. Rakenteellisesti saksofoni muistuttaa klarinettia, ja suurin ero onkin soittimen suurempi halkaisija suukappaleen kohdalla. Tämä pienentää akustista impedanssia, mikä heikentää lehdykän ja ilmapatsaan välistä kytkentää tehden lehdykän värähtelyn syttymisestä erityisen nopean. Tästä seuraa saksofonille ominainen terävä aluke. Soitinta soitetaan sormituksen osalta kuin klarinettia, mutta ylipuhallettuna se tuottaa oktaavia korkeamman sävelen, kuten oboe ja fagotti. [8, s. 197] [20, s. 231–232] [41, s. 146–147]

7.2.4 Kaksilehtiset puupuhaltimet

Tunnetuimmat kaksilehtiset puupuhaltimet, kuten oboe, englannintorvi, fagotti ja kontrafagotti, ovat poraukseltaan kartiomaisia. [49, s. 247] Kaksoislehdykkä ei merkittävästi eroa yksilehtisestä puupuhaltimesta, sillä puhallettaessa kaksoislehdykän väliin jäävä aukko sulkeutuu ja avautuu mekaanisen takaisinkytkennän vaikutuksesta saaden aikaan sykkivän ilmapuon. Kartiomaisen geometriansa takia ne tuottavat kaikki yläsävelet ja ylipuhaltavat oktaavin, mikä eliminoi sormitusongelmia verrattuna klarinettiin. Soittimissa on selvä aluke verrattuna yksilehtisiin puupuhaltimiin sekä vahvat formantit, mikä tekee soittimet helposti tunnistettaviksi. [56, s. 164] Koska äänentuottomekanismi ei merkittävästi eroa yksilehtisistä puupuhaltimista, käsitellään tunnetut kaksilehtiset puupuhaltimet, oboe ja fagotti, suppeasti.

Oboe

Oboe muodostuu kolmesta puisesta osasta, jotka yhdessä muodostavat kartion muotoisen ilmapatsaan. Kaikissa soittimen osissa on ilmapatsaan muotoa muuttavia läppiä. Värähtely syntyy kaksoislehdykän avulla, ja äänialaltaan oboen perustaajuus on lähes sama poikkihuilun kanssa ja oktaavin klarinettia ylempänä. [8, s. 195] [41, s. 150–152] Oboen äänen spektri sisältää merkittävästi yläsäveliä, ja lisäksi soittimella on vahva formantti 1000 Hz:n ja 3000 Hz:n taajuuksilla. Ominaisen äänenvärin antavat formantit syntyvät pääasiassa lehdyköiden mekanisista ominaisuuksista. [49, s. 247–248]

Fagotti

Fagotti on melko pitkä puhallin, 254 senttimetriä. Jotta soitin ei olisi pituutensa takia epäkäytännöllinen soittaa, on se taitettu kaksinkerroin. Soittimen sisäinen rakenne on oboen tapaan kartiomainen, ja ilmapatsas saadaan värähtelemään kaksoislehdykän avulla. [8, s. 195–197] [41, s. 152–152] Kuten oboella, fagotilla on spektrissä paljon yläsäveliä sekä erityisen vahva, lehdyköistä johtuva formantti 440 Hz – 494 Hz taajuudella. Fagotti tuottaa fortissimossa huomattavasti enemmän yläsäveliä kuin pianissimossa. [49, s. 248–249]

7.2.5 Vaskipuhaltimet

Vaskipuhaltimien historia on pitkä. Jo alkuihmiset huomasivat, että kun sopivan muotoiseen eläimen sarveen tai simpukkaan puhalsi huulet sopivassa asennossa, syntyi voimakas ääni. Alun perin näiden soittimien tarkoitus ei ollut tuottaa musiikkia, vaan todennäköisemmin niitä käytettiin naapuriheimojen pelotteluun. Nykyiset vaskipuhaltimet ovat kehittyneet tästä merkittävästi niin rakenteensa kuin materiaaliensa puolesta. Vasket eivät ole kovin yleisiä kouluissa, joten käsitellään ensisijaisesti äänentuoton fysikaalista perustaa ja katsotaan suppeasti muutamaa tunnetuinta vaskiperheen soitinta.

Vasket ja puupuhaltimet voidaan luokitella puhallinsoittimiksi, mutta vasket ovat sen ver-

ran poikkeavia äänenmuodostukseltaan, että ne ansaitsevat oman mainintansa. Vaskeissa soittajan huulien värähtely pitää yllä ilmapatsaan värähtelyä sykkivän ilmavirran tai lehdyköiden sijaan. Koska huulet ovat massaltaan huomattavasti suurempia kuin esimerkiksi lehdykät, ne pystyvät helpommin vaikuttamaan ilmapatsaan värähtelyyn. Seurauksena vaskien soittajat käyttävät suurempaa määrää soittimen yläsävelistä kuin puupuhaltajat – osassa vaskista soittaminen tapahtuu pelkästään yläsävelillä.

Kun soittaja asettaa huulensa suukappaletta vasten ja puhalttaa, värähtelevät huulet tuottavat massansa takia melko matalan taaajuuden. Huulien kireyttä muuttamalla taaajuutta saadaan muutettua, kunnes värähtely osuu vasken ominaistaaajuuteen tai johonkin sen yläsävelistä. Kun puhaltaja kasvattaa riittävästi huulien amplitudia, ilmapatsaassa tapahtuva paineen nousu huulien avautuessa iskee takaisin soittajan sulkeutuviin huuliin auttaen huulia jälleen avautumaan. Tällainen mekaaninen takaisinkytkentä lisää soittimeen virtaavaa ilman määrää ja vakioi amplitudin. Tämän jälkeen systeemi toimii kuten puupuhaltimen värähtelevä lehdykkä muodostaen seisovan aallon solmukohdan huulien luokse.

Vaskeissa ei ole sormireikiä, jolloin vaskeissa eri yläsävelien väliin jäävät nuotit saadaan soitettua muuttamalla ilmapatsaan pituutta venttiilien ja lisäputkien avulla. Tämä siirtää partiaalien taajuuksia ja mahdollistaa kaikkien sävelien tuottamisen. Puupuhaltimissa soittimen intonaation ja toimivuuden kannalta oli tärkeää pitää rakenne lähes sylinterimäisenä tai kartiomaisena. Jos puupuhaltimen muoto muuttuu liikaa näistä, niin silloin syntyvän yläsävelsarjan viritys siirtyy ja soittimesta tulee epävireinen. Koska vaskeissa ei ole sormireikiä, soittimen geometrian muuttaminen on ainoa tapa korjata esimerkiksi viritystä sekä intonaatiota, ja lisäksi muutoksilla on suuri vaikutus vaskien äänenväriin. [8, s. 215–223] [20, s. 48–52] [41, s. 161] [49, s. 221–223]

Vaskien kellon tehtävänä on toimia impedanssisovittimena soittimen sisällä olevan suuren paineen ja ympäröivän matalan paineen välillä. Lisäksi kello tekee soittimesta suuntaavan ja muokkaa spektriä vaikuttamalla formantin sijaintiin. Samaan tapaan toimii myös soittimen toisessa päässä oleva suukappale muokatessaan soittimen äänenväriä. [49, s. 223–225] [56, s. 165–169]

Trumpetti ja pasuuna

Trumpetti rakentuu suorasta, taivutetusta putkesta, joka hitaasti avautuu kelloaan kohti. Suukappale on muodoltaan kuppimainen. Soittaja painaa yhteenpuristetut huulensa suukappaleeseen ja saa huulet värähtelemään puhaltamalla ilmaa niiden välistä. Puhalluksen aikana putkessa hetkellisesti kasvava paine aiheuttaa takaisinkytkennän, mikä kohdistaa huuliin sulkevan voiman. Käytännössä huulien täytyy värähdellä hyvin lähellä torven resonanssitaajuuksia, koska mekaaninen kytkentä huulien ja torven välillä on heikko. Soittaja pystyy huulien kireydellä vaikuttamaan jonkin verran syntyvään värähdystaaajuuteen ja siten mahdollistaa intonoinnin soiton aikana. Trumpetissa on yleensä kolme venttiiliä, joilla soittimen mittaan voidaan lisätä ylimääräisiä putkia ja tarjota soittajalle yhteensä kahdeksan pituusvaihtoehtoa. Tällöin muutetaan trumpetin soivaa pituutta ja siten yläsävelten sijaintia, mikä mahdollistaa kaikkien nuottien soittamisen. Lisäksi trumpetissa on kaksi pientä luistia virituksen hienosäätöön muiden soittimien kanssa soitettaessa. [8, s. 227] [20, s. 57–60] [41, s. 162–164]

Pasuunalla on yhteisiä piirteitä trumpetin kanssa: suurimpia rakenteellisia eroja ovat kaksinkertaistunut pituus ja luistin käyttö trumpetin venttiilien tilalla. Tämä tekee pasuu-

nasta ainoan soittimen viuluperheen lisäksi, jolla voidaan soittaa portaattomasti mikä tahansa rekisterin taajuus. [8, s. 228] [20, s. 56–57] [41, s. 165] [49, s. 229]

7.3 Lyömäsoittimet

Lyömäsoittimien tapauksessa soitinten luokittelua voidaan tehdä niiden tuottaman värähtelyn spektrin avulla. Jotta voidaan tarkastella paremmin sävelen ja hälyn käsitteitä, tarvitaan tietoja äänen spektristä. Osaaäänekseksi tai pelkästään äänekseksi kutsutaan yhtä värähtelytaajuutta sisältävää sinivärähtelyä, ja tällaista värähtelyä vastaa fysiikassa hyvin harmoninen oskillaattori. Jos jokin kappale saadaan värähtelemään tietyn taajuisella sinivärähtelyllä, kappaleeseen syntyy tämän sinivärähtelyn perustaaajuuden lisäksi kokoelma muita värähtelytaajuuksia, joita nimitetään yläsäveliksi. Yläsäveliä kutsutaan myös nimillä ylävärähtely tai ylä-äänes. Nämä voidaan edelleen luokitella harmonisiksi yläsäveliksi, jos ne ovat perustaaajuuden monikertoja, ja vastaavasti epäharmonisiksi, jos ne eivät ole. Perustaaajuutta ja sen yläsäveliä kutsutaan yhteisesti partiaaleiksi ja näitä yhdessä yläsävelsarjaksi. Äänen ja musiikin yhteydessä partiaaleja kutsutaan myös osaaääneksiksi ja yläsävelsarjaa osaaäänistöksi. Seurauksena yläsävelsarjan eri partiaalit interferoivat keskenään ja muodostavat kompleksisen värähtelyn, jolla musiikissa on sävelen lisäksi äänenväri. Kuten käsitteiden nimistä huomataan, fysiikassa ja musiikissa käytetään samoista asioista erilaisia nimityksiä. [8, s. 94–99] [41, s. 171]

7.3.1 Sävelkorkeus määrittely

Häly ja sävel ovat musiikissa käytettyjä termejä, jotka kuvaavat, miten selkeästi yksittäinen taajuus erottuu jonkin soittimen synnyttämästä äänestä. Kyse on äänen spektrin rakenteesta, eri yläsävelten suhteellisista voimakkuuksista. Lyömäsoittimista on syytä hieman avata sävelkorkeuden havainnointiin vaikuttavia seikkoja. Hälyistä ei havaita selvää säveltasoa, koska niillä on epäharmonisia yläsäveliä, jotka ovat eri taajuisia kuin äänen perustaaajuus. Toisaalta sävelet sisältävät harmonisia yläsäveliä, jotka ovat alkuperäisen perustaaajuuden monikertoja ja siten vahvistavat säveltuntua. Rumpusetissä erilaiset symbolit tuottavat idiofoneina pelkästään hälyääniä, joissa ei ole säveltasoa, ja vastakohtana esimerkiksi karibialaisessa peltirummussa on kovin selkeä sävel.

Hälyn ja sävelen ero ei ole täysin mustavalkoinen, ja sitä tutkittaessa on otettava huomioon värähtelyn aikakehitys. Esimerkiksi rumpusetin tomtom-rummut ovat lyöntitiheällä spektriltään täyttä hälyä, koska isku kehittää lukemattomia yläsäveliä. Kun rumpu saa hetken soida, häly vähenee merkittävästi erityisesti epäharmonisien yläsävelten osalta. Epäharmoniset yläsävelet eivät pysty muodostamaan seisovaa aaltoa tomtomiin, kuten harmoniset yläsävelet, ja hukkaavat näin energiansa nopeammin. Jäljelle jää harmonisen yläsävelsarjan värähtelyjä, ja lopulta pitäisi erottua säveleksi tulkittava ääni. Useimpien soittimien tuottamat äänet voidaan jakaa seuraavasti: hälyääniä sisältävä aluke, säveltasosta kertova sointiosa ja tilantunnun tekevä lopuke, joka seuraa vaimenemisesta. [8, s. 99–109, 253–255] [41, s. 171]

Ksylofoni

Ksylofoni on idiofoninen lyömäsoitin, joka koostuu puulaatoista ja näitä kannattelevasta puulaatikosta. Puulaatikko toimii kaikukoppana, mutta sen tilalla voidaan käyttää resonattorina jokaiselle laatalle erikseen viritettyä putkea. Reunojen ja laattojen välissä käytetään jotain joustavaa materiaalia, kuten kumia. Ksylofonia soitetaan nuijilla, jotka voivat olla valmistetut muovista, kumista tai puusta. Puulaatat vastaavat akustisen ki-

taran kaikukopan yli jännitettyjä kieliä. Koska laattoja ei ole kiinnitetty kummastakaan päästä, niin värähtely muistuttaa avoimessa putkessa tapahtuvaa ilmapatsaan värähtelyä. Kuvut syntyvät laatan päihin ja laatikkoon värähtelyä siirtävät kohdat osuvat ominaisvärähtelyn solmukohtiin. Syntyvän värähtelyn taajuus on riippumaton laatan leveydestä, sillä laatikon ja laatan välissä oleva kumi vaimentaa tehokkaasti laatan poikki kulkevat värähtelyt. Koska puun sisäinen rakenne vaimentaa värähtelyä nopeammin kuin metalli, ksylofonin ääni vaimenee nopeammin kuin esimerkiksi metallilaattaisessa metallofonissa tai kellopelissä. [8, s. 253–254] [41, s. 172–173]

Laattojen pitkittäisen värähtelyn tuottamat taajuudet $f_n = nv_L/2L$, missä n on kokonaisluku, v_L on äänen nopeus laattamateriaalissa ja L on laatan pituus. Äänen nopeus v_L määräytyy Youngin moduluksen E ja aineen tiheyden ρ avulla $v_L = \sqrt{E/\rho}$. Laatta värähtelee samanaikaisesti myös poikittain, ja tällöin syntyvät taajuudet $f_n = \frac{\pi v_L K}{8L^2} m^2$, missä n on kokonaisluku. Edellä esiteltyjen lisäksi hitaussäde K on kanttisen laatan paksuus jaettuna $\sqrt{12}$:lla sekä vakio m on $3, 0112, 5, 7, \dots, (2n+1)$. Kuten huomataan, niin poikittainen värähtely eroaa pitkittäisestä pituuden L toisen potenssin verran. Lisäksi syntyvät yläsävelet eivät selvästi ole harmonisia poikittaisessa värähtelyssä vakion m^2 takia sekä taajuus riippuu hitaussäteestä, joka puolestaan riippuu laatan geometriasta. Erityisesti poikittaisesta värähtelystä johtuvat epäharmoniset yläsävelet antavat laattasoittimille niille ominaisen äänenväriin. [49, s. 258–260]

Äänirauta

Äänirauta koostuu taivutetusta metallitangosta ja taivutuskohtaan kiinnitetystä kädensijasta. Taivutettu kohta toimii kuin jousi, joka saa poikkeutetut ääniraudan päät värähtelemään niitä iskettäessä. Äänirauta tuottaa lähes sinimuotoista värähtelyä ilman yläsäveliä, mikä tekee siitä loistavan työkalun virittämiseen, sillä se säilyttää taajuutensa hyvin ympäristön olosuhteista riippumatta. Syntyvän värähtelyn taajuus määräytyy ääniraudan päiden massan perusteella. Yleensä äänirautaa ei ole kiinnitetty mihinkään resonoivaan kaikukoppaan, mikä vähentää merkittävästi syntyvän äänen voimakkuutta mutta samalla tekee ääniraudasta huomaamattoman työkalun esimerkiksi kuoronjohtajalle kuoron virittämässä ennen laulun aloittamista. [8, s. 30–31] [41, s. 171–172]

7.3.2 Sävelkorkeus määrittelemätön

Lyömäsoittimet ovat yleensä soinniltaan lyhyitä ja hetkellisiä. Isku, jolla värähtelijä saadaan värähtelemään, tuottaa usein epäharmonisia yläsäveliä ja saa aaltomuodon muuttamaan jatkuvasti ajan kuluessa. Tällöin ei ole erotettavissa selkeää säveltä. [8, s. 250] [41, s. 177–180] Rumpusetti on koulusta tuttu esimerkki soittimesta, jonka sävelkorkeus on käytännössä määrittelemätön.

Erilaiset rummut ovat kaikista vanhimpia soittimia, ja nykyaikainen rumpusetti on kouluissa jo tavallinen soitin. Rumpusetti sisältää itse rumpujen lisäksi metallisia lautasia ja muita perkussiivisiä soittimia. Rummut ovat perusrakenteeltaan putkia, joiden toiseen tai molempiin päihin on viritetty värähtelevä rumpukalvo. Esimerkiksi patarummussa on yksi kalvo ja rummun runko on toisesta päästä suljettu, djembessä putki on puolestaan toisesta päästä avoin.

Rumpujen rakenne, erityisesti kalvon laatu ja geometria, vaikuttavat syntyvään ääneen. Rumpukalvon voi ajatella olevan kuin kaksiulotteinen kieli. Rumpukalvot ovat yleensä pyöreitä ja silloin perustaajuudelle $f_1 = \frac{0,766}{D} \sqrt{\frac{T}{\sigma}}$, jossa D on kalvon halkaisija metreissä,

T on kalvoon kohdistuva jännitys newtoneina metriä kohden ja σ on käytetyn kalvon tiheys neliometriä kohden. Lisäksi syntyy soitettaessa joukko epäharmonisia yläsäveliä, joista ensimmäiset suhteutuvat perustaaajuuteen seuraavasti: $f_2 = 1,59f_0$; $f_3 = 2,13f_0$; $f_4 = 2,29f_0$; $f_5 = 2,65f_0$; $f_6 = 2,91f_0$. [8, s. 250–251]

Rumpusetti

Rumpusetti sisältää yleensä bassorummun, virvelirummun, tomtom-rumpuja, hi-hatin sekä lautasia. Rummuissa värähtelijänä toimii viritetty kalvo, joka kapulan lyönnillä saadaan värähtelemään. Rumpukalvon iskeminen on läheistä sukua kitaran kielen näppäilylle, mutta rumpukalvossa värähtely on kaksiulotteista, perustaaajuus korostuu ja kalvo kantaa suurimman osan värähtelyn energiasta ympäristöön. Värähtely on aluksi voimakasta ja perustaaajuus vaimenee nopeasti. Jäljelle jäänyt energia jakaantuu yläsävelten kesken, ja yläsävelet soivat huomattavasti kauemmin kuin perustaaajuus. Yläsävelien vaihe-erot saavat aikaan kumoutumista, mikä hidastaa energian siirtymistä ympäröivään ilmaan pidentäen sointia.

Käytännössä rumpukalvon eri värähtelymoodien määrittely ei ole suoraviivaista, koska kalvojen jännitys on harvoin symmetrinen jokaisen virittimen osalta. Nykyään kalvot ovat melko tasalaatuisia, koska ne on usein valmistettu muovista, mutta esimerkiksi nahkaiset rumpukalvot eivät ole ominaisuuksiltaan yhteneviä. Värähtelyn kaksiulotteisuus lisäksi tekee syntyvistä seisovista aalloista epäintuitiivisia ja jo lähtökohtaisesti matemaattisesti haastavia. Tavallisen rumpusetin rummuissa on kaksi kalvoa, mikä tekee värähtelystä paljon kompleksisempää sen vuorovaikuttaessa molempien kalvojen kanssa. Rumpusetti eroaa esimerkiksi pianosta siten, että sitä ei ensisijaisesti ole tehty melodian eikä harmonian tuottamiseen, vaan rytmin luomiseen. Rummun äänessä ei yleensä ole selvästi erottuvaa sävelkorkeutta, mikä nostaa tärkeään asemaan syntyvän värähtelyn aikakehityksen, sillä se erottaa rumpusetin eri osat toisistaan. [8, s. 250–255] [20, s. 262–265]

Rumpusetin lautaset ovat värähteleviä metallilevyjä, joiden käyttäytymisen ennustaminen on vaikeaa pelkästään niiden haastavan geometrian takia. Lautaset tuottavat suuren määrän epäharmonisia yläsäveliä ja yläsävelten määrään vaikuttaa ensisijaisesti käytetyn rumpukapulan materiaali. [8, s. 254–255]

Rumpujen teorian puutteista huolimatta kompleksisella värähtelyllä on musikaaliset sovelluksensa, sillä kaksikalvoisen rummun yläsävelet ovat harvoin harmonisia ja siksi muun muassa rumpusetti sulautuu musiikkiin sävellajista riippumatta. Syntyvää spektriä voidaan muuttaa sopivaksi kalvojen suhteellista jännitystä muuttamalla. [49, s. 271]

7.4 Sähkösoittimet

Transistoreiden yleistyttyä tietotekniikka alkoi edetä aimo harppauksin ja oli vain ajan kysymys, milloin teknologia tulisi musiikkiin. Nykyään perinteisten akustisten soittimien rinnalle on tullut moninkertainen määrä uusia soittimia, jotka hyödyntävät uusia teknologioita ratkaisuja. Fysiikan sovellukset sähköistivät perinteiset soittimet 1930-luvun jälkeen, ja näistä saatuja signaaleja vahvistettiin kaiuttimien kautta ääneksi. Sitten soittajan mahdollisuudet vaikuttaa soittimesta syntyvään ääneen kohosivat aivan uudelle tasolle, ja nykyään syntetisaattorien kautta muusikko voi luoda täysin ainutkertaisella äänellä soivan virtuaalisoittimensa. Tutkielmassa ei juuri käsitellä sähkösoittimien sovelluksia oppiaineintegroinnissa, mutta joihinkin merkittäviin ja kiinnostaviin esimerkkeihin tutustutaan seuraavaksi.

Sähkökitara

Ensimmäisen sähkökitaran kehitti George Beauchamp vuonna 1931 jazz-muusikoiden tarpeisiin. Sähkökitara on hyvä esimerkki perinteisen klassisen kitaran evoluutiosta, jossa uuden teknologian kautta luodaan lähes uusi instrumentti. Sähkökitaran toimintaperiaate on mekaanisesti sama kuin akustisessa kitarassa, mutta värähtely ei vahvistu kaikukopassa, vaan se poimitaan sähköiseksi signaaliksi induktiota hyödyntävän mikrofonin avulla. Induktio soitinten vahvistamisessa on ollut yksi tärkeimmistä sovelluksista modernien soittimien kehityksessä.

Sähkökitaran toiminnan kannalta oleelliset osat ovat ferromagneettisesta materiaalista valmistetut kielet ja näiden värähtelyt poimiva mikrofoni. Kitaramikrofoni on fysiikan termein vaihtovirtageneraattori, jossa kestopagneetilla luodaan kelan läpi kulkeva magneettikenttä, jota magneettikentässä värähtelevät kielet muuttavat. Näin syntyy sähkömagneettisen induktion kautta värähtelystä riippuva jännite, jota voidaan edelleen vahvistaa sopivilla vahvistimilla. Sähkökitaran sointiin vaikuttavat ensisijaisesti mikrofonin ominaisuudet, sillä indusoituvaan jännitteeseen vaikuttaa esimerkiksi mikrofonin kelan kierrosten lukumäärä, käytetyn johtimen ominaisuudet, kestopagneetin ominaisuudet sekä mikrofonin geometria. [39, s. 1–2]

Kitaran mikrofoni synnyttää suuruudeltaan noin sadasta millivoltista jopa yhteen volttiin vaihtojännitteen riippuen mikrofonin rakenteesta. Mikrofonin synnyttämää jännitettä voidaan manipuloida monella tapaa jo kitaran sisällä. Kitaroissa on yleensä useampi mikrofoni, jotka voidaan kytkeä eri tavoin kitaran ulostuloon. Useimmiten mikrofonien kelat kytkeytyvät rinnan, mutta joissakin tapauksissa myös sarjaan. Tällaiset kelat ovat komponentteina monimutkaisia, koska rakentuessaan pitkistä johdosta niillä on kelan induktanssin lisäksi resistanssia ja ne käyttäytyvät osittain kuten vastus. Toisaalta kelalle kierretty johdin muodostaa pieniä kondensaattoreita vierekkäisten johtokierrosten kanssa ja käyttäytyy siten myös kuin kondensaattori. Tämä tekee muiden ominaisuuksien kuin jännitteen mittaamisen vaikeaksi. Kitaran sisäiseen sähköjärjestelmään kuuluu voimakkuudensäädin, joka koostuu säätövastuksesta eli potentiometrillä. Voimakkuuden säätö tapahtuu käytännössä jännitteenjaon avulla, jolloin vain osa jännitteestä päätyy vahvistettavaksi. Lisäksi kitaroissa on yleensä äänenvärinsäädin, joka koostuu potentiometrillä ja kondensaattorista muodostaen sähköisesti passiivisen alipäästösuojimen. [10, s. 257–258] [41, s. 188]

Hammond-urut ja Mellotron

Sähköurut löivät itsensä läpi 1950-luvulla, vaikka eivät pystyneetkään matkimaan oikeita pilliurkuja. Jo 1930-luvulla kehitetyt elektromekaanisesti toimivat Hammond-urut olivat tällöin suuressa suosiossa. Hammondissa ääni tuotettiin pyörivän metallirattaan aiheuttaman induktion avulla. Toimintaperiaate oli samanlainen kuin sähkökitaran induktiomikrofonin tapauksessa, mutta kielen tilalla oli hammastettu metalliratas, jonka hampaiden lukumäärä ja pyörimisnopeus määrittivät syntyvän taajuuden. Yhteiselle akselille ladotuilla rattaila pystyttiin tuottamaan jopa 90 erilaista signaalia – kaksitoista säveltä ja niiden seitsemän ensimmäistä yläsäveltä. Eri oktaavit saatiin alkuperäisestä signaalista elektronisesti puolittamalla tai kaksinkertaistamalla signaalin taajuus. Hammond-uruissa käytettiin pilliurkujen äänikertoja matkivia liukutankoja, joilla voitiin sekoittaa eri yläsäveliä toisiinsa yläsävelsarjaksi. Soitin oli aikanaan eräänlainen syntetisaattorin esiaite ja nykypäivänäkin hyvin suosittu soitin kevyessä musiikissa. [8, s. 274–277] [20, s. 306–307] [41, s. 185–186] [49, s. 522–524]

Hammond-urkujen lisäksi Mellotron oli urauurtava sähkösoitin. Kyseessä oli syntetisaattorin esiaste, jolla pystyttiin soittamaan etukäteen nauhoitettuja ääniä, varhaisia sampleja, koskettimien avulla. Käytettyjen nauhojen nopeutta muuttamalla pystyttiin tuottamaan nauhalla oleva ääni eri taajuisena. Tämä antoi mahdollisuuden käyttää akustisista soittimista nauhoitettuja ääniä uudella tavalla. Teknisenä ongelmana oli nauhojen rajallinen pituus, mikä piti ottaa huomioon nauhojen kelautumisena lähtöpisteeseensä koskettimien noustessa. Mellotron kuitenkin mahdollisti polyfonian, mikä varhaisilla syntetisaattoreilla ei ollut mahdollista. [8, s. 278–280]

Syntetisaattori

Elektroniikan kehittymisen myötä pystyttiin rakentamaan sähköisiä oskillaattoreita, joilla pystyttiin tuottamaan monenlaisia värähtelyjä. Pian nämä analogiset värähdyspiirit, jänniteohjatut oskillaattorit, valjastettiin musiikin tarpeisiin. Oskillaattoreita voitiin käyttää sellaisenaan äänisignaalin tuottamiseen tai niitä voitiin kytkeä eri tavoin toisiinsa, jolloin yksi oskillaattori ohjasi signaalillaan seuraavaa. Tällä tavoin voitiin tuottaa kompleksisia värähtelyjä, joihin eivät aikaisemmat soittimet ollenkaan kyenneet.

Elektronisen signaalin voimakkuuteen pystyttiin vaikuttamaan jänniteohjatulla vahvistimella, verhoikäyrageneraattorilla ja kohinageneraattorilla. Jänniteohjatulla signaalisuodattimella pystyttiin edelleen muokkaamaan tuotettua signaalia. Nämä syntetisaattorin eri osat voitiin rakentaa moduuleiksi, ja ensimmäiset analogiset syntetisaattorit olivatkin täysin modulaarisia. Nykyaikana syntetisaattorit ovat pääasiassa digitaalisia ja modulaarisuudesta on siirrytty integroituihin piireihin. Nykyisin syntetisaattoriksi voi valjastaa tavallisen tietokoneen, jolloin syntetisaattori tarjoaa käytännössä rajattomat mahdollisuudet erilaisten signaalien luomiseen. Näin voidaan matkia akustisia soittimia tai sitten luoda kokonaan uusia ja uniikkeja äänimaailmoja. [8, s. 277–278, 280–282] [20, s. 313–315] [49, s. 522–524]

7.5 Ihmisääni ja soittimet

Ihmisiäni on soittimena ja kommunikaation välineenä ainutlaatuinen. Vaikka ihmisääni on vanhin instrumentti, on se silti vähiten ymmärretty. Ongelmana on ollut ihmisen sisällä olevan soittimen rakenteen tutkiminen. Keuhkot ovat energiavarasto, josta tuotetulla ilmavirralla saadaan äänihuulet värähtelemään aiheuttaen ääntöväylään seisovan aallon. Akustisen resonanssin kannalta oleellisia tiloja ovat kurkunpää, nielu, suu- ja nenäontelot. Äänihuulista syntyvä värähtely leviää ympäristöön nenän ja suun kautta, jolloin värähtelyn taajuus määräytyy ensisijaisesti äänihuulten massan ja jännityksen mukaan. Ääntöväylän tehtävänä on toimia suodattimena ja resonaattorina samaan tapaan kuin esimerkiksi trumpetin tai oboen putket, mutta ilman voimakasta takaisinkytkentää värähtelyn lähteeseen. Toisin kuin orkesterin torvet, ääntöväylä luo formanttinsa pääasiassa muuttamalla geometriaansa. Äänihuulet pitävät huolen äänen taajuudesta ja ääntöväylä äänenväristä muuttamalla syntyvän äänen spektriä.

Miesten äänihuulet ovat yleensä suuremmat kuin naisten ja naisten taas suuremmat kuin pienten vauvojen, mikä selittää ihmisten erilaiset äänenkorkeudet ja äänenvärit. Lisäksi yksilöiden väliset kehityserot tekevät jokaiselle ihmiselle ominaisen ja tunnistettavan äänenkorkeuden ja -värin. Ihmisääni pystyy tuottamaan paljon erilaisia ääniä pelkästään muuttamalla syntyvän värähtelyn aikakehitystä, kuten konsonanttien tapauksessa ilmavirran nopealla säätelyllä. Vokaalien tapauksessa äänen formantit, yläsävelsarjan koros-

tuvat osat, erottavat eri äänteet toisistaan. Koulutettujen laulajien formantti sijoittuu 2500 – 3000 Hz:n väliin, mikä on samalla korvakäytävän resonanssitaajuus. Formantti pysyy samana riippumatta siitä mitä lauletaan, mikä antaa merkittävän äänenvoimakkuuden laulajalle, jota tarvitaan esimerkiksi suurissa oopperasaleissa. [8, s. 211–214] [41, s. 167–171] [49, s. 317–320, 347–350]

8 LUKION INTEGROINTIMAHDOLLISUUKSIA

Tässä kappaleessa tutustutaan lukion fysiikan valtakunnallisen syventävän *Aallot*-kurssin tarjoamiin musiikin integrointimahdollisuuksiin. Koska opetussuunnitelma antaa vain karkeat raamit opetuksen sisältöjen valintaan, niin avataan tarkempia sisältöjä kolmen käytössä olevan kirjasarjan pohjalta. Näin saadaan riittävästi yleistävä kuvaus kurssin sisällöstä, jota voidaan soveltaa myös myöhemmin tulevaisuudessa. Fysiikassa käsittelyjärjestys on joka tapauksessa vahvasti sidottu tiedon kumulatiiviseen luonteeseen ja vakiintuneisiin, historiallisiin käytäntöihin. *Aallot*-kurssi sisältää myös valo-opin, jota ei tämän työn puitteissa ole syytä analysoida ollenkaan. Fysiikan ja musiikin integrointimahdollisuudet eivät rajoitu pelkästään *Aallot*-kurssin sisältöihin; kappaleen lopussa mainitaan lyhyesti muiden lukion fysiikan kurssien integroituvia sisältöjä.

8.1 Fysiikka 3: Aallot

Yleisesti aalto-opin käsittely aloitetaan esittelemällä mekaanisen värähtelyn aiheuttaja eli värähtelijä, jolloin on tarkoitus selvittää, missä arkielämässä kohtaa jaksollisia ilmiöitä. Ääni ja erityisesti musiikki tarjoavat esimerkkejä jaksollisista ilmiöistä. Olkoon kyseessä sitten kirkonkellojen toistuva kumahtelu, metronomin naksutus tai laulajan tasaisesti sykkivä vibrato, erilaisten esimerkkien rajana on vain mielikuvitus. Välillä äänen ilmiöiden havaitsemiseen ei tarvitse edes kuuloaistia, sillä kuurojen keskuudessa musiikista nautitaan bassotaajuuksien kehoa ravastelevan rytmin tahdissa. Värähtelyn seurauksia voidaan havainnoida myös näköaistilla, kun yökerhon tasaisesti polkeva dubstep saa lasissa olevan nesteeseen pinnan aaltoilemaan. Sama musiikki naapurin teinipojan Toyota Corollassa pistää hattuhyllyn pölyn pomppimaan musiikin tahtiin tavaratilaan piilotetun bassokaiuttimen ansiosta.

8.1.1 Aalto-opin käsitemaailma

Kun on ensin tutustuttu jaksollisiin ilmiöihin ja niiden aiheuttajiin, ollaan valmiita kuvailemaan ilmiötä fysiikan käsittein. Seuraavaksi kurssilla esitellään fysiikan käsitteet taajuus, aallonpituus, jaksonaika, jakso ja amplitudi. [18, s. 9–10] [15, s. 12–13] [35, s. 9] Aalto-opissa erilaisten termien määrä on suhteellisen rajattu ilmiöiden monimuotoisuuteen nähden, mutta määritelmien ymmärtäminen on silloin erityisen tärkeää. Taajuuden, aallonpituuden ja amplitudin käsittelyyn integroituvat parhaiten erilaiset kielisoittimet, koska niistä voidaan suoraan nähdä ja kuulla käsitteiden fysikaaliset merkitykset.

Kitara ja piano ovat ehkä helpoimmin fysiikkaan integroituvat soittimet runsautensa ja suosionsa vuoksi. Kitara on helposti liikuteltava koeväline fysiikan tunneille, ja niitä soittimia yleensä saatavilla koko opetusryhmälle. Soittimen toimintaperiaatteen selvittäminen mahdollistaa värähtelijän taajuuteen vaikuttavien ominaisuuksien, massan ja jännityksen, tutkimisen (B.1.1). Erityisesti soivan kielen pituuden ja värähtelyn aallonpituuden välisen yhteyden löytämiseen soitin on mitä parhain. Soitettaessa soittaja vaikuttaa suoraan kitaran kielen pituuteen, mikä on suurimpia eroja pianoon, jossa jokaiselle nuotille on oma kielensä.

Piano pystyy suuremman kielimääränsä takia havainnollistamaan kielen massan ja pituuden vaikutusta syntyvään ääneen (B.1.2) (B.1.3). Laajasta rekisteristä on etua myös monissa muissa kurssin ääneen liittyvissä sisällöissä. Pianon sisälle pääsee katsomaan irtottamalla runkoa peittävät kannet, jolloin koko soittimen kattavat kielisarjat ovat nähtävissä ja koskettavissa. Haittana pianon käytössä on soittimen huono liikuteltavuus, ja soittimia on useimmiten yksi luokkatilassa.

Jakson ja jaksonajan abstraktin luonteen takia niiden ymmärtämistä voidaan helpottaa integroinnin keinoin. Metronomi on musiikin harrastajan paras ystävä ja pahin vihollinen. Tasaista tahtia naksuttava pakotettu värähtelijä pitää harjoittelun sykkeen tasaisena, ja toistuvaa pulssia voidaan hyödyntää jaksonajan käsitteen opiskelussa (B.3.1). Toisaalta musiikissa on myös jaksollisia rytmisiä elementtejä, tahteja, joiden avulla musiikkia jäsenellään ja merkitään muistiin. Usein musiikissa on melodioita, rytmejä tai harmonioita, jotka toistuvat monta kertaa peräkkäin. Värähdysliikkeen käsittelyssä jakso on kuin valokuva, jossa näkyy värähdyn koko toistuva osuus. Ei ole vaikea hahmottaa analogiaa musiikissa toistuviin elementteihin, joista voidaan tehdä samankaltaisia ajasta riippuvia havaintoja kuin metronomin heilurin jaksonajasta.

8.1.2 Yleisiä aalto-opin ilmiöitä

Kirjasarjasta riippuen varsinainen ilmiömaailman tarkastelu aloitetaan joko harmonisesta voimasta sekä harmonisesta värähtelystä [18, s. 13–16] [15, s. 14–17] tai poikittaisesta ja pitkittäisestä aaltoliikkeestä sekä aaltoliikkeen perusyhtälöstä [35, s. 8–10]. Aiheiden käsittelyjärjestys vaihtelee kirjasarjasta toiseen.

Harmonisen värähtelyn tärkeä oletus on, että värähtelyn aiheuttava voima on riippuvainen vain värähtelevän massan etäisyydestä tasapainoasemaan. Yleisesti fysiikassa harmonista värähtelyä käsitellään langasta ja siitä riippuvasta massasta koostuvalla heilurilla. Musiikin välineistä samaan tarkoitukseen voidaan käyttää metronomia, joka pitää amplitudinsa sekä taajuutensa vakiona metronomin sisällä olevan jännitetyn jousen avulla. Tällöin metronomin käsitteleminen matemaattisena heilurina antaa hyviä tuloksia metronomin varren pituudesta lasketulle jaksonajalle ja taajuudelle (B.3.2). Lisäksi metronomi mahdollistaa yksikkömuunnoksien harjoittelun musiikista tutun tempoyksikön iskua minuutissa ja fysiikan hertsin välillä.

Poikittaisen ja pitkittäisen aaltoliikkeen havainnollistaminen soittimilla täydentää hyvin esimerkiksi perinteistä The Slinky -jousella tehtävää demonstraatiota. Esimerkiksi käyttämällä sähköbassoa ja vahvistinta voidaan havaita basson kielen värähtelyn olevan poikittaista aaltoliikettä. Vahvistimen kaiuttimen liikettä tarkastellessa huomataan kalvon liikkeen olevan pitkittäistä, mikä aiheuttaa pitkittäistä aaltoliikettä ympäröivään ilmaan – siis ääntä. Pitkittäin värähtelevä ääni aistitaan korvassa tärykalvolla jälleen poikittaisena aaltoliikkeenä, joka välittyy eteenpäin aivojen tulkittavaksi. Sähköä ja sähkömagnetismia käsittelevillä kursseilla voidaan pureutua tarkemmin systeemin sähköisiin ilmiöihin, instrumenttijohtossa, vahvistimessa, kaiuttimessa sekä kuulijan aivoissa.

Mekaanisten aaltoliikkeiden yhteisvaikutuksen tutkiminen jatkuu kytkettyjen värähtelyjen ja superpositioperiaatteen, heijastumisen ja taittumisen sekä diffraktion ja interferenssin kautta [18, s. 28–39] [15, s. 35–44] [35, s. 34–51, 92–109]. Eri kokonaisuuksien käsittelyjärjestyksessä on hienoisia eroja kirjasarjojen välillä, mutta useimmiten sisällöt seuraavat toisiaan.

Superpositioon ja interferenssiin törmätään musiikissa heti soittimien ja ihmisäänen yhteydessä. Jokaisessa soittimessa värähtelijä tuottaa perustaaajuutensa lisäksi joukon yläsäveliä, joiden keskinäisien voimakkuuksien suhde määräytyy soittimen rakenteesta (D.4.1). Se, miten soitin on rakennettu, vaimentaa tiettyjä yläsäveliä ja toisaalta voimistaa toisia resonanssin takia. Yläsävelsarjan rakenne määrittää tällöin soittimelle ominaisen äänenvärin. Samoin toimii ihmisten äänihuulet, joiden värähtelyn yläsävelsarjan muoto riippuu äänihuulten ja ääntöväylän geometriasta antaen jokaiselle ihmiselle tunnistettavan äänensävyn. Yläsävelsarjalla on lisäksi tärkeä tehtävä kommunikaatiossa, koska esimerkiksi vokaalit erottuvat toisistaan yläsävelien intensiteettien muutoksen avulla (D.4.3).

Musiikin voidaan ajatella koostuvan erilaisten värähtelyjen superpositiosta ja interferoinnista. Melodian muodostavat sävelet koostuvat perustaaajuudesta ja soittimelle ominaisesta yläsävelsarjasta, joiden summana syntyy kompleksinen värähtely. Harmonia on useamman melodiaäänen summa muodostaessaan esimerkiksi sointuja. Musiikissa on lisäksi paljon epäharmoniseen värähtelyyn perustuvia perkussiivisiä elementtejä sekä ajasta riippuvia voimakkuuden vaihteluja.

Interferenssin vaikutuksen kuulohavaintoon huomaa helposti kahden pistelähteen, kuten kaiuttimen, värähtelyjen summautuessa (D.3.1). Vaihe-erojen yhdistyessä esimerkiksi musiikki voi kuulostaa oudolta tai äänenvoimakkuus vaihdella merkittävästi eri kohdissa tilaa. Pelkästään yhden äänilähteen kanssa törmätään interferenssin vaikutuksiin, jos tilassa on kovia pintoja, mikä aiheuttaa äänen heijastumista ja sekoittumista äänilähteen alkuperäiseen aaltorintamaan.

Seuraavaksi käsitellään jokaisessa kirjassa seisova aalto [18, s. 40–41] [15, s. 45–46] [35, s. 129–136], ja se on tärkeä kokonaisuus musiikkiin liittyvien sovellusten kannalta. Jokaisessa akustisessa soittimessa äänentuoton perustana on seisovan aallon muodostuminen soittimen johonkin osaan: kitarassa ja pianossa kieliin, huilussa ja oboessa ilmapatsaaseen sekä virvelirummussa ja djembessä rumpukalvoon. Seisovaa aaltoa on erityisesti puhaltimissa vaikea nähdä, koska ilman liikettä ei silmällä havaitse, mutta esimerkiksi sähköbasson kielissä seisovan aallon näkee selvästi (D.1.1). Seisovan aallon käsittelyyn löytyy siis runsaasti soitinesimerkkejä, ja tutkimusretki musiikkiluokkaan voisi olla hyvä tapa tutustua ilmiöön.

8.1.3 Äänen fysiikkaa

Viimeistään tässä vaiheessa kirjojen sisältö peilaa vahvasti ääneen arkielämän sovelluksena, koska seisova aalto on äänen ja musiikin tuottamisen perusta. Kaikissa kirjasarjoissa on erotettu selvästi ääntä käsittelevä luku [18, s. 46–76] [15, s. 54–81] [35, s. 145–152], joka seuraa aikaisempaa, yleisempää aalto-opin teoriaa. Luvun lopussa käsitellään ääniaaltojen vuorovaikutusta ja esitellään resonanssi, huojunta ja Dopplerin-ilmiö. Erityisesti resonanssilla ja huojunnalla on merkittäviä sovelluksia musiikissa. Tämä osio on hyvin vaihteleva sisällöltään ja käsittelyjärjestykseltään kirjasarjojen välillä riippuen siitä, paljonko äänen eri ilmiöitä on jo avattu aikaisemmin kirjassa. Opettaja voi halutessaan lähestyä tähän asti aalto-oppia pelkästään fysiikan näkökulmasta ja lisätä musiikin integrointimahdollisuuksia vasta äänen käsittelyn yhteydessä.

Äänen käsittely alkaa mekaanisesta värähdysliikkeestä ja sitä kuljettavan väliaineen paineerojen tutkimisesta. Seisovan aaltoliikkeen soveltaminen äänen tuottamiseen soittimissa ilmapatsaan avulla on vahva teema [18, s. 51–54] [15, s. 62–65] [35, s. 136–143], ja ope- tus integroituu helposti puhallinsoittimien fysiikkaan. Puhallinsoittimet perustuvat avoi-

men tai toisesta päästä avoimen putken fysiikkaan, mikä tekee kvalitatiivisten päätelmien tekemisestä helppoa. Ilmapatsaan värähtelyyn perustuvien soittimien, kuten poikkihuilujen, saksofonien tai viritettyjen putkien, rakentaminen on edullista ja suhteellisen helppoa (B.2.2) (B.2.3). Rakennusprojekteissa voidaan hyödyntää teoriaa vaivattomasti yksinkertaisella matemaattisella käsittelyllä, joka helpottaa soittimien rakentamista. Rakentaminen antaa lisäksi vilkaisun ominaisuuksiin, joita teoria ei ennusta, kuten soittimen muodosta johtuvan korjaustermin. Ongelmana soitinrakentamisen integroinnissa on ajankäyttö, ja siksi rakentamisen oheen kannattaa yhdistää muitakin asiaan liittyviä fysiikan kokonaisuuksia. Vierailu soitinrakentajan luona antaa myös vaihtoehdoisen tavan tutustua soittimien valmistukseen ja siihen liittyviin käytännön ongelmiin.

Resonanssi on arkielämän ilmiönä oppilaille ehkä tutuin. Musiikissa ilmiötä hyödynnetään jokaisessa akustisessa soittimessa seisovan värähtelyn vahvistamiseen kuultavaksi ääneksi, ja vasta sähkösoittimet ovat mahdollistaneet resonaattorittomat instrumentit. Ilmiönä resonanssi on kiitollinen soitinintegroinnissa, sillä akustinen kitara on koevälineenä hyvin monipuolinen (D.2.1). Uhkarohkein oppilas saa kitaran soimaan pelkästään oman äänensä, ei niinkään sormiensa, avulla. Perinteinen äänirautoja käyttävä resonanssikoe voidaan uudistaa vaihtamalla äänirautojen tilalle kaksi akustista kitaraa (D.2.2). Sympaattisen värähtelyn vaikutuksia voidaan tutkia myös pelkästään kitaran kielten välisenä ilmiönä, jos soittimia ei ole tarpeeksi saatavilla (D.2.3).

Huojunnan yhteydessä musiikin tarjoamat sovellukset antavat paljon mahdollisuuksia integrointiin. Ilmiöllä on tärkeä tehtävä äänenväriin luojana (D.5.2) ja toisaalta soitinten virittämisen apuvälineenä (D.5.1). Äänenväriin liittyen huojuntaa hyödynnetään esimerkiksi pianossa, kuorolaulussa ja sinfoniaorkesterissa. Pianossa käytetään lähes identtisiä kolmen kielen ryhmiä ylärekisterissä, kuorossa laulaa samaa stemmaa useampi laulaja ja sinfoniaorkesterissa erityisesti jousisoittimet soittavat useamman soittajan ryhminä. Koska käytännössä soittimien ja laulajien välillä on pieniä taajuuseroja, josta syntyy huojunta äänilähteiden soidessa yhdessä. Jos huojunta pidetään riittävän pienenä, beating-taajuus pysyy riittävän korkeana aiheuttaen rikkaan soinnin. Beating-ilmiö auttaa myös virittäjää, sillä beat-taajuus kasvaa mitä lähemmäksi kahden värähtelijän taajuudet saadaan toisiaan. Virittäjä odottaa, että ilmiö häviää ja silloin värähtelijöiden taajuudet ovat samat.

8.1.4 Kuulonhuollosta ja äänenvoimakkuudesta

Ääntä käsittelevään lukuun kuuluu lisäksi kuulonhuollon teemoja [18, s. 65–67] [15, s. 74–75] [35, s. 149], jotka integroituvat helposti musiikkiin. Tärkeä osa musiikin kuuntelua tai harrastamista on kuulohavaintojen tekeminen. On kyseessä sitten orkesterin harjoitukset, soittotunnit, koulun musiikin tunnit tai mp3-soittimen kuuntelu, korvat ovat mekaaninen systeemi, jolla on rajansa. Kuulon rasittuminen ja vaurioituminen voi tuottaa pysyviä kuulohaittoja, joiden kanssa elää lopun elämänsä. Fysiikassa äänen intensiteetin mittauksia on tehty desibelimittareilla iät ja ajat, mutta musiikki tarjoaa mahdollisuuksia tehdä mittauksia erilaisista näkökulmista. Kiinnostavia mittauskohteita voisi olla yhtyeen eri jäsenten kokema äänenvoimakkuus esiintymisissä, joissa mahdollisesti rumpali saa valtaosan äänienergiasta. Toisaalta tavallisen korvanapin työntäminen korvakäytävään tekee pienestä kaiuttimesta hyvin suuntaavan, jolla helposti rasittaa korviaan musiikkia kuunnellestaan (C.2.2). Kuulon suojaamisessa kyse on korvan saaman energiamäärän, intensiteetin, rajoittamisesta ja tähän on kuulosuojaimien ja voimakkuuden laskemisen lisäksi keinona etäisyyden kasvattaminen (C.2.1). Opintokäynti jonkin paikallisen yhtyeen musiikkiesityk-

seen antaisi mahdollisuuden vertailla käytännössä voimakkuuden muutoksia siirryttäessä kauemmaksi kaiutintorneista. Samalla huomaa kaiuttimien suuntaavuuden vähenevän ja stereokuvan parantuvan. Aivan viimeisenä asioina kirjoissa on lyhyet kappaleet infra- ja ultraäänestä ja niiden sovelluksista, mutta näissä aiheissa ei käytännössä ole yhtymäkohtia musiikkiin kuuloualueen käsittelyn ulkopuolella.

8.2 Muiden fysiikan kurssien integrointimahdollisuuksia

Fysiikan ja musiikin oppiaineintegrointia voi toteuttaa erityisesti musiikkiteknologian puitteissa myös muilla lukion kursseilla. Muista syventävistä kursseista *Sähkö* ja *Sähkömagnetismi* sopivat sisällöiltään parhaiten integrointiin, mutta integrointimahdollisuuksia on niukasti vain muutaman ilmiön ympärillä. Tutkielmassa keskitytään pääasiassa akustisten soittimien kautta tapahtuvaan integrointiin, joten tässä esitellään vain lyhyesti muiden kurssien tarjoamia mahdollisuuksia.

Sähkö-kurssin sisältö antaa mahdollisuuden integroida jännitteen ja virran käsitteet sähköisiin soittimiin, kuten sähkökitaraan. Sähköiset soittimet toimivat tavalla tai toisella jännitelähteinä, joiden tuottamaa signaalia käsitellään, muunnetaan ja vahvistetaan kuultavaksi ääneksi. Sähkökitara tuottaa induktion avulla vaihtojännitettä, jonka suuruus sekä taajuus riippuvat kielen värähdysliikkeestä. Pienen jännitteen ja mitättömän virran suuruutta voidaan mitata yleismittarilla tai parhaassa tapauksessa oskilloskoopilla. Tasa- ja vaihtosähkön eroa voidaan demonstroida tekemällä jännitemittauksia kondensaattorimikrofonin johdosta. Kondensaattorimikrofoni tarvitsee toimiakseen 48 voltin phantomjännitteen, jonka mikseri syöttää signaalijohtoa myöten. Sekä vaihtovirtana kulkeva äänisignaali että phantom-tasajännite kulkevat samanaikaisesti johdossa, josta molemmat voidaan mitata käyttämällä oskilloskooppia. Virtapiireissä käytettäviin peruskomponentteihin voi tutustua niin ikään sähkökitaran yksinkertaisen sähkökytkennän avulla. Sen jälkeen oppiaineyhteistyönä voitaisiin esimerkiksi huoltaa musiikin luokan soittimien elektronikkaa. Kaiuttimet keloineen ovat hyvä reaali maailman esimerkki siitä, miten resistanssi, kapasitanssi ja induktanssi ovat osa jokaista virtapiiriä, vaikka usein tehdään oletus, että vain yksi suureista esiintyy kytkennässä. Vahvistinten yhteydessä voidaan integroida äänentoistolaitteistoon tehon ja sähköenergian käsitteet, sillä vahvistimien valmistajat ilmoittavat laitteidensa tehot. Toisaalta vahvistimen kaiuttimelle antamaa ulostulotehoa voidaan mitata suoraan kaiutinlähdestä ja tutkia valmistajan väitteen paikkaansapitävyyttä.

Sähkömagnetismin kurssilla tärkeä musiikkiin integroitava kokonaisuus on induktion käyttö sähkösoittimissa ja mikrofoneissa sekä toisaalta äänentoistojärjestelmien kaiuttimissa. Sähkökitara tarjoaa turvallisen alustan induktioon liittyvien jännitteen ja virran mittausten tekemiseen, sillä indusoituvat jännitteet ovat alle yhden voltin luokkaa ja virraltaan mitättömiä. Sekä kaiutin että dynaaminen mikrofoni perustuvat induktioon, jossa liikkeen avulla tuotetaan jännitettä tai vaihtoehtoisesti jännitteellä liikettä. Ero laitteiden välillä on fysiikan mielessä pieni ja kumpakaan voidaan onnistuneesti käyttää toistensa tehtävissä. Häiriösuojauksen kannalta esimerkiksi mikrofoni johdoissa käytetty balansoitu kytkentä on hyvä sovellus, jossa induktion ja vaiheen käsitteet yhdistyvät.

9 PÄÄTELMÄT

Tässä tutkielmassa on etsitty erilaisia mahdollisuuksia toteuttaa fysiikan ja musiikin oppiaineintegroitua lukion oppimäärän sisällä. Aiheesta ei löytynyt aiempaa tutkimusta ainakaan suomalaisen koulujärjestelmän näkökulmasta. Mahdollisuuksien tarkastelu aloitettiin opetustyötä ohjaavasta opetussuunnitelmasta ja lukio-opetuksen tulevaisuudennäkymiä päästiin arvailemaan tuoreen POPS 2014:n pohjalta. Opetussuunnitelmat eivät integrointimyoenteisyydestään huolimatta tarjonneet valmiita integrointiratkaisuja. Seuraavaksi olikin tutustuttava soittimien fysiikkaan, jotta nähtäisiin yhtymäkohdat paremmin. Ennen soittimien toiminnan takana oleviin ilmiöihin perehtymistä pohdittiin kummankin oppiaineen erityispiirteitä: fysiikkaa ja musiikkia yhdistää sama ilmiöiden ymmärtämisen perinne. Kokeilemisen, teorian ja soveltamisen kiertokulku tunnetaan musiikissa improvisointina, musiikin teoriana ja säveltämisenä. Lisäksi mietittiin opetuksen eri työtapoja ja niiden soveltuvuutta integrointiin sekä muita integroinnin tuomia pulmia käytännön opetustyössä. Soittimien fysiikan tutkimisen jälkeen pystyttiin ehdottamaan, mihin sisältöihin lukion aalto-opissa voidaan integroitua soveltaa. Integroituvien sisältöjen pohjalta kehitettiin työohjeita oppiaineiden yhdistelemisen helpottamiseksi ja näiden ohjeiden vaikutusta testattiin kahdella pienellä opetuskokeilulla.

Tutkielmassa vain raapaistiin fysiikan ja musiikin oppiaineintegroinnin pintaa kartoitettaessa opetussuunnitelman, koulun resurssien, oppiainesisältöjen ja työtapojen tarjoamia mahdollisuuksia. Tarkoituksena onkin antaa ideoita ja motivoida opettajia kokeilemaan fysiikan ja musiikin yhdistämisen tarjoamia mahdollisuuksia. Integrointia pystyy toteuttamaan opetuksessa monin eri tavoin, ja keskeisenä tekijänä integroinnin toteutumisessa on opettajan omat taidot. Käytännön työssä integroinnin joutuu toteuttamaan toistaiseksi suurimmaksi osaksi oman oppiaineen sisällä, mutta tilanne muuttunee, kun lukion opetussuunnitelmaa uudistetaan. Tämänhetkinen lukion opetussuunnitelma korostaa oppiaineiden sisältöjen sitomista opiskelijoiden arkielämään, mistä seuraava motivaatio on integroinnin kantava voima.

Fysiikan ja musiikin yhtymäkohdat tarjoavat monia mahdollisuuksia oppiaineintegrointiin. Lisäämällä integroitua juuri tämän aineparin yhteydessä voidaan kummankin aineen osalta hyötyä opettajien tietotaidosta, yhteisistä opetusvälineistä ja sitä kautta toteuttaa opetussuunnitelmaan kuuluvaa eheytyä. Kahden, toisistaan normaalisti etäisiltä vaikuttavan oppiaineen yhdistäminen mahdollistaa uusien sosiaalisten tilanteiden muodostumisen oppitunneilla ja voi sitä kautta vähentää oppiaineisiin kohdistuvia ennakkoluuloja.

Tutkielman aikana tehtiin kaksi lyhyttä opetuskokeilua Perhon keskuskoulun seitsemännellä luokalla sekä Jyväskylän yliopiston fysiikan laitoksen Fysiikka II -kurssilla. Kokeilun tavoitteena oli hankkia käytännön kokemusta oppiaineintegroinnista sekä havainnoida integroinnin vaikutusta oppilaiden motivaatioon. Perhon kokeilussa oppilaille opetettiin fysiikan aalto-oppia ja erityisesti äänen fysiikkaa kaksi tuntia viikossa yhteensä kuuden oppitunnin verran. Työtapoina soitinintegroinnissa käytettiin demonstraatioita sekä pistetyöskentelyä, joita varten tutkielman työohjeita sovitettiin yläkoulun oppimäärään (Liite E). Jyväskylässä fysiikan peruskurssin luennolla tehty opetuskokeilu käsitti noin 40

minuuttia demonstraatioita, joilla opetettiin avoimen ja toisesta päästä suljetun putken fysiikkaa sähköputkesta valmistetun poikkihuilun ja saksofonin avulla (B.2.3).

Opetuskokeiluista kerättiin oppilailta sekä opiskelijoilta lyhyt palaute, joka ei ole tilastollisesti merkittävä, mutta tukee oppiaineintegrointia näiden ryhmien puitteissa. Sekä Perhon että Jyväskylän kokeiluissa suurin osa vastaajista koki oppiaineintegroinnin tekevän opetuksen kiinnostavammaksi ja monipuolisemmaksi sekä selkeyttävän opittavia asioita. Opettajilta saamani palaute myötäili oppilaiden ja opiskelijoiden linjaa: fysiikan ja musiikin integrointi mahdollistaa uusia tapoja lähestyä aalto-opin ilmiöitä. Kokonaisuutena kokeilu koettiin tervetulleeksi ja toimivaksi vaihteluksi tavalliseen opetukseen sekä fysiikan ja musiikin yhdistelyn todettiin toimivan myös lukion ulkopuolella niin peruskoulussa kuin yliopistossa.

Jotta integroinnista olisi hyötyä oppilaille, oppilaiden täytyy olla motivoituneita tutkimaan fysiikan ja musiikin yhteisiä piirteitä. Nykyajan oppilaat ovat median suurkuluttajia, ja tätä tulee käyttää motivointikeinona oppiaineintegrointia toteutettaessa. Oppilaiden motivaation lisäksi opettajien oma kiinnostus integrointiin on tärkeää oppiaineiden yhdistämisessä, sillä vaikka integroinnista seuraa opetuksen suunnitteluun ja toteutukseen pulmia, monet niistä ratkeavat hyvissä ajoin aloitetulla aktiivisella valmistelutyöllä. Opetuskokeiluissa opettajat mainitsivat integroinnin kiinnostaviksi piirteiksi asioiden käsittelytapojen monipuolistumisen musiikin näkökulman kautta sekä erilaiset mahdollisuudet soitinten hyödyntämiseen kokeellisessa työskentelyssä. Taulutietokoneisiin saatavien ilmaisohjelmien, kuten virittimien, taajuusanalysointilaitteiden ja äänigeneraattoreiden, käyttöä integroinnin yhteydessä pidettiin hyvänä asiana.

Opettajat totesivat oman osaamisen, erityisesti musiikin alalta, vaikuttavan paljon siihen mitä käytännön opetustyössä voidaan integroida. Yhteistyö musiikinopettajan kanssa nähtiin tarpeellisena, lähes välttämättömänä, jos integroinnista haluttaisiin saada kaikki irti. Tällä hetkellä oppiaineintegrointia käsitellään kohtuullisen suppeasti aineenopettajakoulutuksessa ja fysiikan opettajille suunnatuilla kursseilla. Painopisteen siirtäminen integroinnin suuntaan saattaa tulevaisuudessa olla tarpeen opetussuunnitelmien nykyistä kehityssuuntaa tarkasteltaessa. Integroinnin ongelmiksi nousivat omien taitojen riittävyyden lisäksi aikataulujen sovittelu, opetustilojen järjestäminen sekä palkkaan tai työaikaan liittyvät huolet.

Opetustyö on sosiaalista kanssakäymistä opettajakollegoiden ja oppilaiden kanssa. Fysiikan ja musiikin integrointi vaatiikin paljon yhteistyötä fysiikan ja musiikin opettajilta, jolloin heidän henkilökohtainen suhteensa on tärkeä. Vaikka opettajat kykenisivät yhteistyöhön, on syytä miettiä, miten integroinnin työmäärää jaetaan, että opetustyö pysyy opettajalle taloudellisesti kannattavana. Työnjaossa on myös huomioitava kunkin osaamisen taso eri aineissa, sillä fysiikan ja musiikin aineyhdistelmä on toistaiseksi opettajalla harvinainen.

Kahden oppiaineen yhteistyö mahdollistaisi yhteisiä projekteja, erilaisia integroivia teemapäiviä, laitehankintoja kummankin aineen tarpeisiin ja jopa yhteisen opetusmateriaalin valmistamista. Kokonaisten lukion kurssien kehittäminen integrointia varten on vielä todennäköisesti epäkäytännöllistä ja voisi sopia paremmin musiikkilukioiden kurssitarjontaan, mutta tuleva lukion opetussuunnitelma saattaisi suosia tällaista opetustapaa tulevaisuudessa, tarjoavathan jotkut yliopistotkin musiikin fysiikkaa käsitteleviä kursseja.

Kummankin aineen opettajien asiantuntemuksen hyödyntämisen kannalta ihanteellisin

ratkaisu tunneilla olisi yhteisopettajuus, mutta tällä hetkellä koulujen taloudellinen tilanne tekee yhteisopetuksen hankalaksi. Parempi vaihtoehto olisi esimerkiksi opetusryhmien vaihtaminen muutamaksi oppitunniksi, mikä siirtäisi fysiikan opettajan musiikin maailmaan ja päinvastoin. Tällä hetkellä integrointi aineiden välillä on käytännön opetustyössä helpointa sulauttaa osaksi tavallista kurssiopetusta, mutta tutkielman havaintojen perusteella fysiikan aineenopettajien olisi syytä tarttua musiikkiluokan tarjoamiin mahdollisuuksiin opetustilana sekä musiikinopettajan asiantuntemuksen hyödyntämismahdollisuuksiin aalto-opin käytännön sovelluksissa. Jos lukion tuleva opetussuunnitelmauudistus tuo integroivat kokonaisuudet myös lukion opetukseen, tämä tutkielma tarjoaisi hyvän pohjan fysiikan ja musiikin aineyhteistyön kehittämiseen.

Oppiaineintegroinnin ehdottomana vahvuutena on musiikkiluokan soittimien käyttäminen fysiikan koevälineinä, sillä soittimet löytyvät jo jokaisesta Suomen koulusta. Lisäksi musiikkiteknologia ja soittimet ovat halvempia kuin koskaan, mikä tekee mahdollisista laitehankinnoista suhteellisen edullisia. Edulliset soittimet ovat päätyneet myös monien oppilaiden koteihin, jolloin soittimien käyttö pystyy antamaan useimmille oppilaille tutun viitekehysten, jossa fysiikan ilmiöillä on selkeä tarkoitus ja ennustettavia seurauksia. Konkreettiset havainnot ilmiöiden sovelluksissa saavat oppijat arvioimaan omia käsityksiään, ehkä myös löytämään ristiriitoja päättelyssään ja korjaamaan niitä oikeammiksi.

Erityisesti fysiikassa virhekäsityksiä luonnon ilmiöistä voi syntyä, kun niiden kokeellinen testaaminen jää fysiikan luokan rajoitettuun näkökulmaan irti arjesta. Fysiikan koelaitteet on tarkoituksella suunniteltu niin, että ne eristävät mahdollisimman hyvin yhden ilmiön, mutta samaan aikaan yhteydet käytännön sovelluksiin jäävät oppilaan mielikuvituksen varaan. Soittimet pystyvät antamaan käytännöllisempää tarttumapintaa fysiikan sisältöihin, mutta opettajan pulmaksi jää soittimien epälineaaristen ominaisuuksien ja muiden ohessa tapahtuvien ilmiöiden käsittely. Oppilaiden oikeiden havaintojen varmistaminen on siirtynyt soitinintegroinnissa koelaitteistolta opettajalle.

Integrointi ei ole täysin mutkatonta, vaan on mietittävä, miten kahden aineen sisällöt saadaan kohtaamaan koulun omassa aikataulussa ja opetussuunnitelmassa. Ajanhallinnan kannalta suurimmat ongelmat löytyvät opettajien henkilökohtaisten aikataulujen, kurssien ajankohtien sekä kurssisisältöjen sovittamisesta. Resurssien osalta opetustilojen saatavuus sekä musiikinluokan varustelu voivat tuoda ongelmia käytännön opetustyöhön, mikä tarkoittaa, että integroinnin suunnittelu pitää aloittaa hyvissä ajoin. Kummankin oppiaineen yhdistelymahdollisuuksia kartoitettaessa huomattiin integrointiin sopivan oppimateriaalin kehittäminen kummallekin aineelle tarpeelliseksi, koska erityisesti musiikin oppikirjat eivät suoraan tarjoa riittäviä eväitä integroinnin toteuttamiseen. Fysiikan kirjojenkin osalta integrointimahdollisuuksia musiikkiin voisi avata vielä enemmän, sillä se helpottaisi opettajien valmistelutyötä, koska tällä hetkellä kaiken materiaalin joutuu tekemään itse.

Tutkielmassa nousseiden havaintojen pohjalta jatkotutkimusta fysiikan ja musiikin yhdistämisestä voisi tehdä oppimateriaalien osalta esimerkiksi oppikirja-analyysinä tai integrointiin sopivan oppimateriaalin valmistuksena. Erilaiset opetuskokeilut integroinnin näkökulmasta esimerkiksi yhteisopetuksesta, piilo-opetussuunnitelmista, lukion syventävistä kursseista tai teemapäivistä tarjoaisivat tarkempaa käytännön tietoa erilaisista mahdollisuuksista ja hankaluuksista. Soitinintegroinnin tuomat mahdollisuudet arviointityökaluna tarjoaisi kinesteettiselle oppijalle erilaisen tavan osoittaa osaamistaan esimerkiksi koetilanteessa. Musiikkiteknologiassa on lähes loputtomasti mahdollisuuksia oppiainein-

tegroinnin toteuttamiseen sähkösoittimien soitinintegroinnista tai mobiililaitteiden sovel-
luksista puhumattakaan. Erityispedagogiikan näkökulmasta fysiikan ja musiikin yhdistä-
minen voisi tarjota kiinnostavia opetusmenetelmiä erityisopetuksen tarpeisiin. Mielenkiin-
toisin ja ehkä tällä hetkellä hedelmällisin näkökulmaero olisi saada musiikkikasvattajan
näkemys integroinnista oman oppiaineensa ja asiantuntijuutensa valossa. Tällä hetkellä
näyttäisi siltä, että fysiikalla on oppiaineena enemmän ammennettavaa musiikista kuin
musiikilla on fysiikasta.

LÄHTEET

- [1] L. Aho, S. Havu-Nuutinen, H. Järvinen. *Opetus, opiskelu ja oppiminen ympäristö- ja luonnontiedossa*. Helsinki: WSOY, 2003.
- [2] M. Ahtee, P. Sahlberg. Ajattelun kehittäminen. Teoksessa P. Sahlberg (toim.). *Luonnontieteiden opetuksen työtapa*. Helsinki: Valtion painatuskeskus, 1990.
- [3] M. Ahtee. Luonnontieteiden opettaminen ja konstruktivismi. Teoksessa J. Lavonen, M. Erätuuli (toim.). *Tuulta purjeisiin. Matemaattisten aineiden opetus 2000-luvulle*. Juva: Atena Kustannus, 1998.
- [4] M. Ahtee. Työtavat ja luonnontieteiden opetus. Teoksessa P. Sahlberg (toim.). *Luonnontieteiden opetuksen työtapa*. Helsinki: Valtion painatuskeskus, 1990.
- [5] H. Anttalainen, J. Tulivuori (toim.). *Luonnontieteiden opetustilat, työturvallisuus ja välineet. Peruskoulu ja lukio*. Oppaat ja käsikirjat 2011:6. Opetushallitus.
http://www.oph.fi/download/137890_Luonnontieteiden_opetustilat_tyoturvallisuus_ja_valineet_2.up.PDF
Viitattu 2.7.2014.
- [6] M. Anttila, A. Juvonen. *Musiikki koulussa ja nuoren elämässä. Kohti kolmannen vuosituhanen musiikkikasvatusta, osa 3*. Joensuu: Joensuu University Press Oy, 2006.
- [7] K. Backlund. *Improvisointi pop/jazzmusiikissa*. Saarijärvi: F-kustannus Oy, 2003.
- [8] J. Backus. *The Acoustical Foundations of Music*. Iso-Britannia: W.W. Norton & Company, Inc., 1970.
- [9] H. Benson *University Physics. Revised Edition*. Yhdysvallat: John Wiley & Sons, Inc., 1995.
- [10] G. Davis, R. Jones. *Sound Reinforcement Handbook*. 2nd edition. Amerikan Yhdysvallat: Hal Leonard Corporation, 1990.
- [11] Y. Engeström. *Perustietoa opetuksesta*. Helsinki: Valtiovarainministeriö, 1988.
- [12] N. H. Fletcher. *The nonlinear physics of musical instruments*. Research School of Physical Sciences and Engineering, Australian National University, Canberra, Australia, 1999.
- [13] D. J. Grout, C. V. Palisca. *A History of Western Music*. 4. painos. New York: W.W. Norton & Company, Inc., 1988.
- [14] I. Grönholm. Taito- ja taideaineiden opetuksen integraatioseminaarin avaus. Teoksessa A. Puurula (toim.). *Taito- ja taideaineiden opetuksen integrointi. Kokemuksia, käytäntöjä ja teoriaa*. Helsinki: Helsingin yliopisto, 1998.
- [15] J. Hatakka, H. Saari, J. Sirviö, J. Viiri. *Physica 3. Aallot*. 4. uudistettu painos. Helsinki: Sanoma Pro Oy, 2013.

- [16] M. Hellström. *Sata sanaa opetuksesta. Keskeisten käsitteiden käsikirja*. Juva: PS-kustannus, 2008.
- [17] M. Huutilainen. Musiikin oppimisen erityisyys neurotieteen näkökulmasta. Teoksessa P. Jordan-Kilki, E. Kauppinen, E. Korolainen-Viitasalo (toim.). *Musiikkipedagogin käsikirja. Vuorovaikutus ja kohtaaminen musiikinopetuksessa*. Tampere: Juvenes Print - Suomen Yliopistopaino Oy, 2013.
- [18] K. Hämeri, R. Jokinen, P. Ketolainen, M. Sallinen, M. Sloan. *Empiria 3. Aallot*. 1.-2. painos. Keuruu: Otavan Kirjapaino Oy, 2012.
- [19] O. Ikonen. *Oppimisvalmiudet ja opetus*. Jyväskylä: PS-kustannus, 2000.
- [20] I. Johnston. *Measured Tones, The Interplay of Physics and Music*. Englanti: Institute of Physics Publishing, 1989.
- [21] E. R. Jones, R. L. Childers *Contemporary College Physics*. Yhdysvallat: Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1990.
- [22] E. Juutilainen, T. Kukkula. *Musiikin aika 2. Yläaste*. Juva: WSOY, 1996.
- [23] E. Juutilainen, T. Kukkula. *Intro*. Porvoo: WSOY, 2003.
- [24] Jyväskylän yliopisto. *Matemaattisluonnontieteellisen tiedekunnan opinto-opas 2013-2014*.
<http://opinto-opas.jyu.fi/science/2013>
 Viitattu 18.6.2014.
- [25] Jyväskylän yliopisto. *Musiikkikasvatuksen opetussuunnitelma 2013-2015*.
<https://www.jyu.fi/hum/laitokset/musiikki/oppiaineet/opsma2013>
 Viitattu 18.6.2014.
- [26] H. Järveläinen. Musiikin ryhmittäminen ja kuulema-analyysi. Teoksessa J. Louhivuori, S. Saarikallio (toim.) *Musiikkipsykologia*. Jyväskylä: Bookwell Oy, 2010.
- [27] H. Järveläinen. Psykoakustiikka. Teoksessa J. Louhivuori, S. Saarikallio (toim.) *Musiikkipsykologia*. Jyväskylä: Bookwell Oy, 2010.
- [28] S. Järvinen, T. Kotilainen, M. Väkevä. *Viva la Musica. Lukion musiikki*. Keuruu: Otava, 1988.
- [29] R. A. Kaupila. *Opi ja opeta tehokkaasti. Psykkinen valmennus oppimisen tukena*. Juva: PS-kustannus, 2000.
- [30] R. D. Knight. *Five Easy Lessons. Strategies for Successful Physics Teaching*. Addison Wesley, 2002.
- [31] Kari Kuivamäki, Miro Mantere, Matti Ruippo ja Juha Unkari. Teoksessa J. Unkari (toim.). *Musiikin opetustilojen suunnitteluopas. Peruskoulu ja lukio*. Oppaat ja käsikirjat 2012:8. Opetushallitus.
http://www.oph.fi/download/143053_musiikin_opetustilojen_suunnitteluopasi.pdf
 Viitattu 2.7.2014.
- [32] E. Lahdes. *Peruskoulun uusi opetusoppi*. Helsinki: Otava, 1977.
- [33] H. Lehto, T. Luoma. *Fysiikka 1. Fysiikka luonnontieteenä*. Helsinki: Tammi, 2003.

- [34] H. Lehto, T. Luoma. *Fysiikka 2. Fysiikka yhteiskunnassa. Aaltoliike*. Helsinki: Tammi, 2003.
- [35] H. Lehto, R. Havukainen, J. Maalampi, J. Leskinen. *Fysiikka 3. Aallot*. 1. painos. Latvia: Tammi, 2009.
- [36] *Lukion opetussuunnitelman perusteet 1994*. 3. korjattu painos. Helsinki: Opetushallitus, 1994.
- [37] *Lukion opetussuunnitelman perusteet 2003*. Vammala: Opetushallitus, 2003.
- [38] J. Marjanen. *Musiikin ja matematiikan oppisisältöjen integrointi*. Maisterintutkielma, musiikkikasvatus. Jyväskylän yliopisto, 17.6.2013.
- [39] K. T. McDonald. *Electric Guitar Pickups*.
<http://www.physics.princeton.edu/~mcdonald/examples/guitar.pdf> Joseph Henry Laboratories, Princeton University, Princeton, 5.6.2007.
 Viitattu 17.7.2014.
- [40] V. Meisalo. Koulun tavoitteet ja työtavat. Teoksessa P. Sahlberg (toim.). *Luonnontieteiden opetuksen työtavoja*. Helsinki: Valtion painatuskeskus, 1990.
- [41] H. F. Olson. *Music, Physics and Engineering, Second Edition*. Yhdysvallat: Dover Publications, Inc., 1967.
- [42] *Peruskoulun opetussuunnitelman perusteet 1994*. Helsinki: Opetushallitus, 1994.
- [43] *Peruskoulun opetussuunnitelman perusteet 2004*. Vammala: Opetushallitus, 2004.
- [44] *Perusopetuksen opetussuunnitelman perusteet 2014*.
http://www.oph.fi/download/163777_perusopetuksen_opetussuunnitelman_perusteet_2014.pdf Opetushallitus, 19.9.2014.
 Viitattu 23.12.2014.
- [45] J. R. Pierce. *The Science of Musical Sound, Revised Edition*. Yhdysvallat: W. H. Freeman and Company., 1983.
- [46] A. Puurula. Integrointi taidekasvatuksessa - monitahoisuus tavoitteena. Teoksessa A. Puurula (toim.). *Taito- ja taideaineiden opetuksen integrointi. Kokemuksia, käytäntöjä ja teoriaa*. Helsinki: Helsingin yliopisto, 1998.
- [47] T. Raatikainen. Eheyttämisen historiaa. Teoksessa R. Laukkanen, E. Piippo, A. Salonen (toim.). *Ehyesti elävä koulu. Kohti kokonaisvaltaista oppimista*. Helsinki: Valtion painatuskeskus, 1990.
- [48] J. Reeve. A Self-determination Theory Perspective on Student Engagement. Teoksessa S. L. Christenson, A. L. Sandra, C. Wylie (toim.) *Handbook of Research on Student Engagement*. Yhdysvallat: Springer, 2012.
- [49] T. D. Rossing. *The Science of Sound, Second Edition*. Yhdysvallat: Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1989.
- [50] H. Ruismäki. Musiikki osana taidekasvatusta ja elämää - näkökulma musiikkikasvatuksessa. Teoksessa A. Puurula (toim.). *Taito- ja taideaineiden opetuksen integrointi. Kokemuksia, käytäntöjä ja teoriaa*. Helsinki: Helsingin yliopisto, 1998.

- [51] S. Saarikallio. Musiikki on kokemuslaji. Teoksessa P. Jordan-Kilkki, E. Kauppinen, E. Korolainen-Viitasalo (toim.). *Musiikkipedagogin käsikirja. Vuorovaikutus ja kohtaaminen musiikinopetuksessa*. Tampere: Juvenes Print - Suomen Yliopistopaino Oy, 2013.
- [52] H. Saarikko. Fysiikan ja luonnonfilosofian historia osana inhimillistä kulttuuria, erityisesti opetuksen näkökulmasta. Teoksessa J. Lavonen, M. Erätuuli (toim.). *Tuulta purjeisiin. Matemaattisten aineiden opetus 2000-luvulle*. Juva: Atena Kustannus, 1998.
- [53] P. Sahlberg. *Luonnontieteiden opetuksen työtapoja*. Helsinki: Valtion painatuskeskus, 1990.
- [54] A. Salonen. Oppiminen elämisen taitona. Teoksessa R. Laukkanen, E. Piippo, A. Salonen (toim.). *Ehyesti elävä koulu. Kohti kokonaisvaltaista oppimista*. Helsinki: Valtion painatuskeskus, 1990.
- [55] I. Söphanen. *Suomalaisen suurkanteleen opas*. Ilmajoki: Oy Finnpublishers, 1987.
- [56] C. A. Taylor. *The Physics of Musical Sounds*. Englanti: The English Universities Press Ltd., 1965.
- [57] J. Unkari (toim.). *Musiikin opetustilojen suunnitteluopas. Peruskoulu ja lukio*. Opetus- ja koulutusministeriön julkaisuja 2012:8. Opetushallitus.
http://www.oph.fi/download/143053_musiikin_opetustilojen_suunnitteluopasi.pdf
Viitattu 2.7.2014.
- [58] K. Vanhala. *Musiikin vaikutus ikääntyneiden asukkaiden hyvinvointiin kahdessa jyväskenläläisessä palvelutalossa*. Maisterintutkielma, musiikkikasvatus. Jyväskenlän yliopisto, 11.3.2010.

A TYÖOHJEISTA

Liitteet B-D sisältävät lyhyitä työohjeita musiikin integroimiseksi fysiikan opetukseen. Työt on jaoteltu karkeasti aaltoliikkeen perusyhtälön, aaltoliikkeen kuljettaman energian ja aaltojen välisen vuorovaikutuksen käsittelyyn liittyviin ilmiöihin ja yksittäiset työt on jaoteltu niille sopivimman työtavan mukaan. Ohjeiden aiheet on valittu lukion oppikirjojen sisältöjen ja useimmissa kouluissa saatavilla olevien tai vaihtoehtoisesti helposti hankittavien välineiden mukaan. Vaikka ohjeet on tässä esitetty hyvin irrallisina, monia niistä voidaan yhdistellä toisiinsa tutkittavan ilmiön tai käytettävien välineiden mukaan.

Työohjeet eivät ole tyhjentyviä, suoraan opetukseen kelpaavia, koska jokainen opettaja joutuu soveltamaan töitä oman tilanteensa mukaan riippuen esimerkiksi oppilasryhmästä, omasta osaamisesta, käytettävissä olevasta ajasta tai sisältöjen painotuksesta. Integrointitapaan vaikuttavia muuttujia on niin paljon, että pikkutarkkojen työohjeiden valmistaminen tämän tutkielman puitteissa ei palvele tarkoitustaan. Toisaalta useimmat käsiteltävät ilmiöt ovat fysiikaltaan yksinkertaisia ja eivät välttämättä vaadi työohjeita laisinkaan. Vaikka ohjeet on tehty lukion oppimäärän pohjalta, niin mikään ei estä käyttämästä töitä myös muilla kouluasteilla, koska töiden pääpaino on fysiikan ilmiömaailman ymmärtämisessä matematiikan sijaan.

Työohjeet on kirjoitettu työtä tekevän henkilön näkökulmasta, koska monet työt ovat sovellettavissa erilaisiin työtapoihin, eikä ohjeen ole tarkoitus pakottaa tietyn työtavan käyttöön. Ohjeet noudattavat samaa rakennetta, jossa ensin lyhyesti esitellään työn taustaa sekä tarvittavat välineet. Sen jälkeen työn kulku on esitetty pääpiirteittäin kommentoiden tärkeitä yksityiskohtia. Lopussa olevat keskustelukysymykset ja lisätiedot tarjoavat ideoita käytännön opetustyön valmisteluun ja toteuttamiseen. Fysiikkaa ja musiikkia integroitaessa on tärkeää töiden yhteydessä kokeilla töitä huolellisesti, sillä soittimien epälineaarisuudet ja yleisesti monimutkainen rakenne voivat tuottaa yllättäviä tuloksia. Toisaalta soittimien käyttöön ja soittamiseen liittyvät motoriset haasteet vaativat harjoittelua etukäteen.

Lisätietoa soittimien takana olevaan fysiikkaan löytyy runsaasti tämän tutkielman lähdeluettelon teoksista sekä esimerkiksi internetistä.

B AALTOLIIKKEEN PERUSYHTÄLÖ

Aaltoliikkeen perusyhtälö on ensimmäisiä teorioita, mitä lukiolainen oppii aaltoliikkeestä. Yhtälössä esiintyvien taajuuden, jaksonajan ja aallonpituuden käsitteitä pyritään havainnollistamaan seuraavissa töissä soitinten avulla. Teoriaan liittyvien käsitteiden havainnointi käytännössä auttaa fyysikaaliseen ajatteluun liittyvän intuition muodostumisessa.

B.1 Taajuus

B.1.1 Demonstraatio: Kitaran kielten virityksen riippuvuus jännityksestä

Tässä demonstraatioissa esitellään kielisoittimien kielten värähtelytaajuuden riippuvuutta kieliin kohdistuvasta jännityksestä (luku 7.1: kielisoittimet). Instrumenttina käytetään akustista kitaraa (luku 7.1.1: akustinen kitara), mutta vaihtoehtoisesti voidaan käyttää myös sähkökitaraa tai jopa sähköbasso. Sähkösoittimien kanssa vahvistimen käyttö on välttämätöntä kuulohavaintojen tekemiseksi. Ensiksi työssä tutkitaan virittimien osuutta kielten taajuuden muuttamiseen ja sen jälkeen demonstroidaan kitaransukuisten soittimien kielten venytykseen perustuvaa soittotekniikka.

Virityskoneistoihin ja viritystekniikkaan kannattaa tutustua hyvissä ajoin etukäteen tai sopia soittimen soittoa harrastavan oppilaan kanssa yhteisdemonstraatiosta. Taajuuden muuttamista havainnoidaan käytännöllisimmin kuuloaistilla sekä viritysmittarilla. Viritysmittarin sijoittaminen esimerkiksi dokumenttikameran alle on hyvä idea, jolloin myös oppilaat näkevät virittimen näytön. Vaihtoehtoisesti esimerkiksi taulutietokoneella voidaan viritinohjelman kuva syöttää suoraan videotykkille. Oppilaat voivat halutessaan toimia taajuuden mittaajina lataamalla esimerkiksi puhelimiinsa jonkin ilmaisen viritinohjelman.

Välineet

- akustinen kitara, sähkökitara tai sähköbasso
- viritysmittari tai vaihtoehtoisesti viritinohjelma taulutietokoneessa tai puhelimesta

Vaiheet ja havainnot

1. Selvitä, miten kitaran virityskoneisto toimii.
 - Virityskoneisto muodostuu hammasrattaan ja matopyörän muodostamasta alenusvaihteesta.
 - Kitaran virityskoneisto yleensä kiristyy myötäpäivään ja löystyy vastapäivään.
2. Valitse jokin kitaran kieli ja soita sitä.
 - Huomioi kielen viritys, nuotti, viritysmittarin avulla.
 - Vireisen kitaran kielten vireet ovat matalimmasta vapaasta sävelestä korkeimpaan E-A-D-G-B-e.

- Anna kielen soida tarpeeksi kauan, jotta viritysmittari saa riittävän hyvän näytteen.
3. Muuta kielen soivaa taajuutta virityskoneiston avulla.
 - Kielen löysääminen laskee ja kiristäminen vastaavasti nostaa viritystä.
 - Tarkkaile taajuuden muutosta korvan lisäksi viritysmittarilla.
 4. Soita jokin nuotti otelaudalta painamalla edellä soittamasi kieli otelaudan nauhaa vasten.
 - Huomioi viritysmittarilla painetun kielen vire.
 - Puhtaimman soinnin saat painamalla kieltä juuri otelautanauhan takaa.
 5. Soita painamaasi kieltä ja edelleen painaen kieltä otelautaan venytä kieltä poikittain otelautaan nähden.
 - Äänen taajuus nousee, koska kielen jännitys kasvaa vedettäessä.
 - Tekniikkaa kutsutaan kielten venyttämiseksi, joka on yleistä erityisesti sähkökitaran soitossa.
 - Huomaa, että vire palaa takaisin normaaliksi, kun venytys loppuu. Joskus vetäminen tekee kitaran epävireiseksi, koska kieli venyy tai se lipsuu virityskoneistosta ja tallasta.
 6. (Sähkökitara:) Venytä kieltä painamalla alaspäin satulan ja viritystappien välissä olevaa lyhyttä kielen osuutta.
 - Havainto taajuuden muutoksesta on paras tehdä kuulon perusteella.
 - Vastaa täysin kielen venyttämistä otelaudalla.
 - Venytys ei onnistu, jos sähkökitarassa on kielilukot satulassa.
 7. (Sähkökitara:) Venytä kieltä painamalla alaspäin tallan ja kielenpitimen välissä olevaa lyhyttä kielen osuutta.
 - Variaatio edellisestä, jos kitarassa on erikseen talla ja kielenpidin.
 8. (Sähkökitara:) Muuta viritystä käyttämällä kitaran tallassa olevaa vibrato-mekanismia.
 - Painamalla tallassa olevaa kampea alas viritys laskee ja nostamalla ylös viritys nousee.
 - Tallassa oleva mekanismi vaikuttaa kaikkiin kieliin yhtä aikaa.
 - Mekanismilla voidaan matkia esimerkiksi laulajan vibratoa.

Keskustelukysymyksiä

- Miten jännityksen nostaminen vaikuttaa värähtelevän kielen ominaistajuuteen?
- Miten lämpötilan muutokset vaikuttavat soitinten viritykseen?
- Miksi kieli pitää jännittää, jotta se soisi?
- Mikä ongelma seuraa, jos paksu kieli halutaan virittää hyvin korkealle taajuudelle?

- Mikä ongelma seuraa, jos ohut kieli yritetään virittää hyvin matalalle taajuudelle?
- Miten ihminen pystyy muuttamaan äänensä korkeutta äänihuulten avulla?
- Missä olet kuullut venytystekniikkaa käytettävän musiikissa?

Lisätietoa

- Jos kitaran virityskoneiston toiminta ei ole tuttu, esittele se ensin oppilaille. Akustisen kitaran avoimista virittimistä näkee suoraan koneiston toimintamekanismin. Virityskoneiston nuppi on kiinni matoruuvissa, joka pyörittää viritystapin akseliin kiinnitettyä hammasratasta. Useimmat välitykselliset virittimet toimivat tällä rakenteella; poikkeuksena ovat harvinaisemmat planeettavaihteistot esimerkiksi banjolle. Pianossa ja kanteleessa välitystä ei ole ollenkaan, jolloin kyseessä on pelkkä viritystappi.
- Demonstraatio voidaan tietysti tehdä millä tahansa kielisoittimella, jossa viritys tehdään kielen jännitystä muuttamalla. Akustinen kitara on valittu kielen pienen jännityksen takia, jolloin virityksen muuttaminen ei rasita niin paljon kitaran ja kielen rakennetta kuin esimerkiksi sähköbassossa.
- Kitaran kieliä painettaessa kielen jännitys nousee hieman tehden kitarasta epäviereisen. Epäviereisyys korjataan siirtämällä kitaran tallan paikkaa hieman tavallista taaemmaksi, jolloin kieliin jää painettaessa venymisvaraa. Tämän intonoinnin tunnetun säädön voi sähkökitarassa tehdä jokaiselle kielelle erikseen, koska jokaisella kielellä on oma tallapalansa.
- Soitinten lämpölaajenemisen takia esimerkiksi yhtyeet tuovat soittimensa lavalle hyvissä ajoin, jotta lämpölaajenemisesta johtuva virityksen muutos ei tapahdu soittamisen aikana. Lämpölaajeneminen muuttaa muun muassa kielisoittimien kielen jännitystä. Ilmiöstä kärsivät kitaroiden lisäksi muutkin soittimet kuten piano, rummut ja soittimet, joissa viritys tapahtuu värähtelijöitä jännittämällä. Esimerkiksi puhallinsoittimet ja elektroniset soittimet eivät kärsi tästä ilmiöstä.
- Erilaisia variaatioita venytystekniikasta voi kuulla monissa populaarimusiikin kappaleissa. Hyvä esimerkki kielen venytyksen tarjoamista musiikillisista mahdollisuuksista on Steve Vain For The Love of God. Kappaleessa on kuultavissa lähes kaikki mahdolliset sähkökitaran venytystekniikat. Ikonisessa Black Sabbathin Iron Manin introssa käytetään erityisesti satulan takaa tapahtuvaa venytystekniikkaa. Amerikkalaisessa kansanmusiikissa voi törmätä pesusoikkobassoon, jonka äänenmuodostustekniikka perustuu pelkästään kielen jännityksen muuttamiselle siirryttäessä nuotista toiseen.

B.1.2 Demonstraatio: Kielen massan vaikutus värähtelytaajuuteen

Demonstraatiossa tutkitaan miten kielen eri ominaisuudet vaikuttavat syntyvään taajuuteen ja miten valinnat näkyvät pianossa (luku 7.1.3: piano ja flyygeeli). Kieliin kohdistuvan jännityksen vaikutuksesta taajuuteen on käsitelty aikaisemmin demonstraatiossa (B.1.1). Piano on valittu demonstraatiovälineeksi, koska pianon sisälle näkee, kun kaikki kannet on avattu. Laajan rekisterinsä takia pianossa on nähtävillä hyvin erilaisia kieliä ja äänen tuoton ääripäiden väliset erot kielissä ovat ilmeiset ilman erityistä asiantuntemusta. Jos piano ei ole tuttu soitin, kannattaa käyttää hetki eri osiin ja vasaramekanismin toimintaan tutustumiseen.

Välineet

- pystypiano tai flyygeeli

Vaiheet ja havainnot

1. Avaa pystypianon kannet tai flyygelin kansi nähdäksesi kielet.
 - Pystypianossa on yleensä omat irrotettavat kantensa koskettimien ylä- ja alapuolella. Lisäksi koskettimien kannen voi irrottaa.
 - Pianon kielet kulkevat tallan ylitse viritystappiin, joka on funktioltaan identtinen kitaran vityskoneiston kanssa.
 - Tilan säästämiseksi kielisarjat usein kulkevat toistensa yli ristiin.
2. Tutki kielten ulkoisia ominaisuuksia.
 - Kielet ovat pituudeltaan, vahvuudeltaan ja materiaaliltaan erilaisia.
 - Pääosa kielistä on jousiteräksestä tehtyä pianolankaa, mutta osassa kielistä teräslangan ympärillä on lisäksi kuparipunos massan kasvattamiseksi. Kielimateriaalilla on vaikutus pianon sointiväriin.
 - Osa kielistä ei ole yksinään, vaan muodostaa kahden tai kolmen samanlaisen kielen sarjoja. Lähes identtisesti viritetyissä kielisarjoissa hyödynnetään huojuntaa äänenväriin luojana.
3. Soita pianon eri koskettimia ja seuraa, mihin pianon vasarat iskevät.
 - Mitä oikeammalla kosketin on, sitä ohuempisiin ja lyhyempiin kieliin vasara iskee tuottaen koko ajan korkeamman äänen.
 - Mitä vasemmalla kosketin on, sitä paksumpiin ja pidempiin kieliin vasara iskee tuottaen koko ajan matalamman äänen.
 - Kielen pituuden ja paksuuden määräämä kielen massa vaikuttaa syntyvään taajuuteen.
 - Samanlaisen kielimateriaalin kielten kohdalla voidaan arvioida taajuuden, aallonpituuden ja kielen pituuden välistä yhteyttä.

Keskustelukysymyksiä

- Miten kielen massa vaikuttaa värähtelytaajuuteen?
- Miksi pianon kaikkia kieliä ei ole valmistettu saman vahvuisesta kielimateriaalista?

- Miten käytetty materiaali vaikuttaa kielen massaan?
- Mitä materiaalia punottujen kielten punos voisi olla?
- Missä muissa soittimissa käytetään eri vahvuisia kieliä?
- Missä soittimissa kaikki kielet ovat saman paksuisia?
- Osa pianon vasaroista lyö samalla kertaa useampaa kieltä. Vaikuttaako iskettävien kielten lukumäärä syntyvän äänen korkeuteen?
- Miksi hyttynen inisee ja karpänen pörisee?

Lisätietoa

- Internetissä on saatavilla animaatioita pianon vasaramekanismin toiminnasta.
- Säveltäjä John Cage sävelsi teoksia preparoidulle pianolle, jossa pianon kieliin oli kiinnitetty erilaisia esineitä syntyvän äänen muuttamiseksi.

B.1.3 Oppilastyö: Kielen pituuden vaikutus värähtelytaajuuteen

Oppilastyössä harjaannutetaan aallonpituuteen ja taajuuteen liittyvää intuitiota. Kun kieleen soitettaessa syntyy seisova aalto, nähdään yksi kupu, mikä tarkoittaa kielen olevan puolikkaan aallonpituuden mittainen. Matemaattisena mallina toimii aaltoliikkeen perusyhtälö, mutta on syytä huomioida, että kielessä aallon nopeus on jotain muuta kuin äänen nopeus ilmassa. Työn aikana kielen jännityksen ei pitäisi kumminkaan merkittävästi muuttua, mikä mahdollistaa alku- ja lopputilojen välisen vertailun teorian puitteissa. Tärkeä havainto on värähtelevän massan muuttuminen, kun kieli painetaan otelaudan nauhaan, ja sitä seuraavat taajuuden ja aallonpituuden muutokset.

Välineet

- akustinen kitara
- mittanauha
- viritysmittari

Vaiheet ja havainnot

1. Selvitä vapaan A-kielen värähtelevä pituus.
 - Vapaan värähtelevän kielen pituutta rajoittavat kaulan puolelta satula ja kakkukopan puolelta tallat.
2. Selvitä vapaan A-kielen perustaajuuden aallonpituus.
 - Vapaaseen kieleen muodostuu puolen aallonpituuden mittainen värähtely, jolloin perustaajuuden aallonpituus on kaksinkertainen kielen pituuteen nähden.
 - Vaikka aallonpituus tunnetaan, taajuuden laskemista ei voida tehdä suoraan aaltoliikkeen perusyhtälöllä, koska kielen jännitystä ei tunneta.
3. Etsi nauhaväli, josta painamalla kielen taajuus kaksinkertaistuisi.
 - Kahdennestatoista nauhavälistä painamalla kieli soi kaksinkertaisella taajuudella, koska aallonpituus puolittuu.
 - Havainnon voi tehdä korvakuulolta tai käyttämällä viritysmittaria.
 - Huomaa, että vaikka kieli viritetään kielen jännitystä muuttamalla, niin jännitys säilyy lähes vakiona kieliä painettaessa.

Keskustelukysymyksiä

- Onko kielen soiva pituus sama kuin aallonpituus?
- Miksi ei voida laskea kielen värähdystaajuutta suoraan aaltoliikkeen perusyhtälöllä, vaikka aallonpituus tunnetaan?
- Mitä värähtelijän fysikaalista ominaisuutta kielen pituuden muuttaminen itse asiassa muuttaa?
- Missä muissa soittimissa äänen korkeutta säädellään muuttamalla värähtelijän pituutta?
- Miten kitara eroaa soittimena pianosta aallonpituuden muuttamisen osalta?

- Mitä hyötyä ja haittaa on soittimessa olevista otelautanauhoista?
- Miksi vauvalla ja aikuisella on taajuudeltaan erilaiset äänenkorkeudet?

Lisätietoa

- Vapaa A-kieli on taajuudeltaan 110 Hz.
- Kahdennentoista nauhan löytää kitarassa helposti, sillä nauhavälissä on yleensä kaksi otelautamerkkiä vierekkäin.
- Kaikissa soittimissa ei ole nuottien paikkoja määrääviä nauhoja, vaan kielen pituus ja syntyvän värähtelyn taajuus voi muuttua portaattomasti, kuten viulussa tai sellossa.

B.2 Aallonpituus

B.2.1 Oppilastyö: Putken pituus ja aallonpituus

Työn tavoitteena on tutustuttaa oppilaat avoimen ja toisesta päästä suljetun putken seisovien aaltojen fysiikkaan (luku 7.2: puhallinsoittimet). Koevälineenä käytetään viritettyjä putkia, joita myydään kauppanimellä Boomwhackers. Jos tällaisia putkia ei ole käytettävissä, ohjeet vastaavien valmistamiseksi on projektiohjeessa (B.2.2).

Välineet

- Boomwhackers-putkia
- mittanauha

Vaiheet ja havainnot

1. Määritä avoimeen putken muodostuvan seisovan aallon aallonpituus sekä taajuus.
 - Avoimen putken tapauksessa aallonpituus on kaksinkertainen putken pituuteen nähden.
 - Taajuus saadaan laskettua aaltoliikkeen perusyhtälöstä.
2. Pohdi, miksi saatu tulos ei täysin vastaa putkessa ilmoitetun nuotin taajuutta.
 - Äänen nopeuden arvo on lämpötilasta riippuva suure.
 - Putken halkaisijasta ja seinämän vahvuudesta riippuva seisovan aallon pituuden korjaustermi vaikuttaa tulokseen.
 - Valmistuksessa ei ole kiinnitetty tarkasti huomiota putkien vireisyyteen.
3. Lisää korkki putken päähän ja määritä seisovan aallon aallonpituus.
 - Aallonpituus on nyt nelinkertainen putken pituuteen nähden.
4. Päättelä korkin lisäämisen vaikutus syntyvän värähtelyn taajuuteen.
 - Värähtelyn taajuus kaksinkertaistuu eli nuotti on oktaavin korkeampi kuin avoimen putken tapauksessa.

Keskustelukysymyksiä

- Noudattavatko putket aaltoliikkeen perusyhtälöä?
- Mihin kohtaan seisovan aallon värähtelyn solmukohta muodostuu, kun putki on avoin?
- Mihin kohtaan seisovan aallon paineen solmukohta muodostuu, kun putki on avoin?
- Mihin kohtaan seisovan aallon värähtelyn solmukohta muodostuu, kun putki on suljettu korkilla toisesta päästä?
- Mihin kohtaan seisovan aallon paineen solmukohta muodostuu, kun putki on suljettu korkilla toisesta päästä?
- Jos putki soi liian matalalla taajuudella, mitä putkelle pitäisi tehdä vireen korjaamiseksi?

- Missä soittimissa hyödynnetään avoimessa putkessa tapahtuvaa värähtelyä?
- Missä soittimissa hyödynnetään toisesta päästä suljetussa putkessa tapahtuvaa värähtelyä?

Lisätietoa

- Äänen nopeus väliaineessa on riippuvainen väliaineen lisäksi lämpötilasta, mikä on eräs virhelähde tuloksissa.
- Värähdystaajuus voidaan määrittellä mille tahansa putkelle. Taajuus voidaan selvittää nauhoittamalla putken iskemisestä kuuluva ääni ja tekemällä sille taajuusanalyysi tietokoneella esimerkiksi vapaassa levityksessä olevalla Audacity-ohjelmistolla.

B.2.2 Projekti: Boomwhackersien rakentaminen

Työssä (B.2.1) esiteltiin viritettyihin putkiin perustuva soitin, ja tämän projektin aiheena on rakentaa itse vastaava soitin. Materiaalina käytetään muoviputkea. Ensin lasketaan teoreettinen arvio ensimmäisen putken pituudelle, jonka nuotti on keski-C (luku 7.2: puhallinsoittimet). Koska putkeen syntyvä seisova aalto on aina hieman pitempi kuin putken fyysinen pituus, joudutaan laskemaan käytetylle materiaalille korjaustermi. Helpoiten korjaustermi selviää virittämällä yksi putki oikeaan vireeseen, jonka jälkeen verrataan viritetyn putken pituutta teorian ennustamaan pituuteen. Näin saadaan selville korjaustermi loppuja putkia varten. Puukäsityöluokka on tilana paras mahdollinen projektiin, mutta tavallinen luokkakin käy, sillä putkien sahaamisesta ja hiomisesta syntyy verrattain vähän roskaa. Projektin toteuttamisessa haastavin vaihe on ensimmäisen putken onnistunut virittäminen, ja aikaa oppilaiden kanssa säästääkseen tämän voi valmistaa etukäteen, jolloin oppilaat määrittävät korjaustermin ja pääsevät valmistamaan muita asteikon putkia.

Välineet

- muoviputkea
- rautasaha
- työntömitta
- mittanauha
- tussi
- viila
- hiekkapaperia

Vaiheet ja havainnot

1. Ennusta aaltoliikkeen perusyhtälöllä 262 Hz keski-C:tä vastaavan avoimen putken pituus.
 - Avoimen putken pituus on perusvärähtelytaajuuden aallonpituuden puolikas.
 - Keski-C:n avoimen putken pituus on noin 65,5 senttimetriä ilman korjaustermiä, kun ilman lämpötila on 20°C.
 - Lisää putken pituuteen putken halkaisijasta r riippuva korjaustermi $C = 0,61r$.
2. Leikkaa muoviputkesta hieman tätä pidempi pätkä ja viritä se jonkin vireisen soittimen keski-C:n kanssa.
 - Virittäminen tapahtuu hiomalla putkea lyhyemmäksi.
 - Jos lyhennät putken vahingossa ylävireiseksi, säästä se myöhemmin valmistettavia, korkeammalta soivia putkia varten.
3. Mittaa viritetyn putken pituus ja määritä pituuden korjaustermi muita putkia varten.
 - Pituuden poikkeama teorian ennusteesta käy suoraan korjaustermiksi muidenkin sävelten putkien valmistuksen kanssa.

4. Rakenna keski-C:n yläpuolisen oktaavin putket ennustamalla niiden pituudet teoriasta huomioiden korjaustermin vaikutuksen.
 - Teoriassa keski-C:tä seuraavan oktaavin C:n putken tulisi olla puolet keski-C:n pituudesta.
 - Valmistus kannattaa aloittaa pisimmästä putkesta, jolloin virityksen epäonnistuksessa putkea voidaan käyttää seuraavan nuotin valmistuksessa.

Lisätietoa

- Äänen nopeus väliaineessa riippuu lämpötilasta, ja se saattaa aiheuttaa mittauksiin virhettä. Lämpötilariippuvuudesta saa lisätietoa esimerkiksi taulukkokirjoista tai internetistä.
- Tärkeämpää projektissa on saada putket soimaan toistensa kesken vireisesti, vaikka putkisarjan yhteinen viritystaso olisikin epätarkka.
- Putkista valmistetuista soittimistaan on tunnettu teatteriryhmä Blue Man Group, joilta voi saada lisää ideoita soitinrakentamiseen.
- Tällaisen soittimen voi rakentaa myös musiikkiluokan käyttöön, jolloin projektin tekemisessä on lisäksi ulkoinen motivaatio.
- Soittimista voidaan muodostaa putkisoitinorkesteri toteuttamalla projektin useampana vuotena erilaisilla putkimateriaaleilla.

B.2.3 Projekti: Poikkihuilun ja saksofonin valmistus

Nykyisin soittimien osien hankkiminen on suhteellisen edullista ja siksi soitinten valmistaminen on myös koulumaailmassa mahdollista. Tässä projektissa valmistetaan yksinkertainen saksofoni ja poikkihuilu alttosaksofonin suukappaleesta sekä sähköputkesta. Koska saksofoni on toisesta päästä suljettu putki ja poikkihuilu molemmista päistä avoin putki, voidaan säveltaso ennustaa teoriasta, kun putken pituus tunnetaan (luku 7.2: puhallinsoittimet). Ensiksi valmistetaan poikkihuilu, jonka perusteella viritetään saksofoni tasan oktaavin matalammalle taaajuudelle. Tämä tarkoittaa, että kummankin instrumentin soivan pituuden tulisi olla sama. Ongelmallista on saksofonin suukappaleen epäsymmetrinen muotoilu, mikä pakottaa selvittämään kokeellisesti sopivan soittimen pituuden.

Välineet

- alttosaksofonin suukappale, lehdykkä ja ligatuura
- 16 mm:n sähköputkea
- sähköteippiä
- kuumaliimaa ja kuumaliimapistooli
- rautasaha
- 8 mm:n pora ja akkuporakone
- vitysmittari

Vaiheet ja havainnot

1. Leikkaa alle puolen metrin mittainen pala sähköputkea poikkihuilua varten.
 - Rautasaha on havaittu hyväksi sähköputken siistiin leikkaamiseen.
 - Putken karkeat päät kannattaa hioa sileäksi tässä vaiheessa.
 - Mitä lyhyempi poikkihuilu on, sitä helpompi sitä on soittaa.
2. Sulje putken toinen pää kuumaliimalla.
 - Putkeen voi kiilata pienen palan paperia, mikä estää kuumaliiman valumisen syvälle putkeen.
3. Poraa putken kylkeen 8 mm:n reikä muutama sentti suljetusta päästä.
 - Reikä toimii poikkihuilun ääniaukkona, johon soittaessa puhalletaan.
 - Poraa reikä mahdollisimman tarkasti, sillä ääniaukon reunojen laatu vaikuttaa soitettavuuteen merkittävästi.
4. Viritä poikkihuilu johonkin lähellä putken pituutta olevaan nuottiin.
 - Virityksessä auttaa, jos poikkihuilun ääntä voi nauhoittaa ja sen jälkeen tehdä siihen taajuusanalyysin esimerkiksi Audacity-ohjelmistolla.
5. Leikataan toinen pala sähköputkea, joka on pituudeltaan sama kuin juuri valmistettu poikkihuilu.
 - Putki leikataan aluksi liian pitkäksi ja viritetään myöhemmin, koska suukappale lisää soittimeen pituutta.

- Putken karkeat päät kannattaa hioa sileäksi tässä vaiheessa.
6. Kierrä yksi kerros sähköteippiä putken päähän, jotta se istuu tiiviisti suukappaleeseen.
- Suukappaleen mukaan voit joutua lisäämään toisen kerroksen.
7. Kiinnitä putki suukappaleeseen, vertaa syntyvää ääntä poikkihuiluun ja viritä saksofoni samaan nuottiin.
- Huomaa, että saksofoni soi oktaavin matalammalta kuin poikkihuilu, mutta sävel on sama.

Lisätietoa

- Poikkihuilua soitetään asettamalla alahuuli aivan ääniaukon reunaa vasten ja tästä puhalletaan ääniaukkoon. Huilu soi melko keveällä ilmavirralla, ja tärkeämpää on oikean kulman löytäminen aukkoon osuvalle ilmavirralle.
- Saksofonia soitetään laittamalla suukappale suuhun niin, että huulet ympäröivät suukappaleen tiivisti, ja sen jälkeen alahuulen läpi painetaan keveästi hampailla lehdykkää puhallettaessa. Suukappaleen oikealla sijainnilla on suuri merkitys äänentuotossa.
- Esimerkiksi Youtube tarjoaa runsaasti videomateriaalia, joista voi oppia oikean soitotekniikan.
- Saksofoni toimii jopa täysimittaisella kahden metrin sähköputkella saaden aikaan todella matalan äänen. Toisaalta poikkihuilun soittaminen käy hankalaksi jo puolen metrin pituuden jälkeen.
- Valmistettavat putket voi tarkoituksella virittää esimerkiksi duuriasteikon mukaan, jolloin soittimilla voidaan kokeilla soittaa yhdessä yksinkertaisia melodioita, kuten kaikille tutun Ukko-Noonan.
- Työssä valmistettava saksofoni muistuttaa Xaphoonia, mikä on saksofonin ja klarinetin risteytys.

B.2.4 Oppilastyö: Nokkahuilun reikien vaikutus

Työssä tutkitaan nokkahuilun reikien vaikutusta soittimeen muodostuvaan seisovaan aaltoon (luku 7.2.1: nokkahuilu ja poikkihuilu). Kun tiedetään nokkahuilun sisälle muodostuvan soitettaessa seisova aalto, kvalitatiivisen taajuuden muutoksen perusteella voidaan päätellä lyheneekö vai piteneekö värähtelevä ilmapatsas. Taajuutta muutetaan sormireikien avulla ja lisäksi tutkitaan mistä ympäristöön leviävä ääni soittimessa tulee.

Välineet

- nokkahuilu
- maalarinteippiä

Vaiheet ja havainnot

1. Peitä nokkahuilun alla oleva oktaavireikä sormella tai maalarinteipillä.
 - Jatkossa oletamme oktaavireiän olevan aina peitettynä, jolloin nokkahuilu soiton kannalta oikealla korkeudella.
2. Soita nokkahuilua peittäen sormireikiä järjestyksessä suukappaleesta lukien.
 - Syntyvän äänen taajuus laskee, kun enemmän reikiä peitetään. Reikien peitto kasvattaa resonoivan ilmatilan tilavuutta ja siten massaa laskien syntyvän värähtelyn taajuutta.
3. Soita nokkahuilua peittäen sormireikiä päinvastaisessa järjestyksessä.
 - Huomaat nokkahuilun äänen pysyvän samana, kunnes pääset aivan viimeisien reikien kohdalle. Kahden pään avoin värähtelevä ilmapatsas muodostuu siis huilun suukappaleen päähän.
4. Aseta pala maalarinteippiä tiiviisti nokkahuilun päässä olevan reiän päälle.
 - Huolehdi, että teipistä ei jää liimajälkiä soittimeen.
5. Soita nokkahuilua ja peitä yksitellen sormireikiä madaltaen nokkahuilun ääntä.
 - Huomaat, että nokkahuilun ääni ei muutu ennen kuin aivan viimeisten sormireikien peiton yhteydessä.
 - Nokkahuilun tuottaman värähtelyn siirtymisen osalta soittimen päässä olevaa reikää tarvitaan vain parilla matalimmalla nuotilla.
 - Nokkahuilun, kuten muidenkin puupuhaltimien, ääni pakenee soittimesta ensimmäisten avoimien reikien kautta.
 - Koska ääni karkaa ensimmäisistä avoimista rei'istä, puupuhaltimet eivät ole samaan tapaan suuntaavia kuin vasket.

Keskustelukysymyksiä

- Mitä sormireikien peittäminen tekee värähtelevän ilmapatsaan pituudelle?
- Mistä ääni ensisijaisesti tulee ulos?
- Mitä tapahtuu värähtelevän ilmapatsaan paineelle avoimen sormireiän kohdalla?

B.3 Jaksonaika

B.3.1 Oppilastyö: Jaksonajan mittaus

Työssä hyödynnetään musiikista tuttua metronomia, jonka tahtiin usein harjoitellaan soittamista. Metronomi pakotettuna värähtelijänä on oiva laite jaksonajan määrittämiseen, koska metronomissa on annettu tempomerkinnät iskuina minuutissa. Tämä mahdollistaa vertailun ja virhearvioinnin mitatun ja ilmoitetun arvon välillä. Tässä työssä mitataan jaksonaikaa, ja metronomissa on usein mahdollisuus valita tahtilaji. Metronomin tavallisen naksumisen ohessa kuuluu välillä kellon kilahdus. Oppilasryhmän kanssa voidaan mitata nyt kahta eri jaksonaikaa: naksautusten ja kellojen tai pelkkien kellojen jaksonaikaa. Musiikista tutumpi tempomerkintä iskua minuutissa antaa hyvän mahdollisuuden harjoitella yksikkömuunnosta hertseiksi.

Välineet

- metronomi
- sekuntikello

Vaiheet ja havainnot

1. Aseta metronomi iskemään tiettyä tahtia.
 - Parityönä aseta metronomi tuottamaan naksautusten lisäksi kellon kilahduksia, jolloin saat teetettyä kaksi mittausta samanaikaisesti.
2. Mittaa metronomin naksahdusten tai kellon kilahdusten määrä minuutin aikana.
 - Parityönä toinen pareista mittaa aikaa ja toinen laskee naksahduksia tai kilahduksia.
3. Määritä metronomin jaksonaika ja taajuus mittaustesi perusteella.
 - Jaksonajan voi ilmoittaa musiikin kannalta oleellisina iskuina minuutissa ja fysiikan kannalta oleellisina iskuina sekunnissa, joista taajuuden laskeminen on helppoa.
4. Vertaa tulostasi metronomin tempomerkintään.
 - Mahdollisia virhelähteitä ovat metronomin valmistuksen epätarkkuus ja mitausvirhe. Mittauksen tarkkuutta voidaan parantaa tekemällä otanta pitemmältä aikaväliltä.

Keskustelukysymyksiä

- Onko mitattu ja ilmoitettu jaksonaika sama?
- Mistä voi syntyä eroja mitatun ja ilmoitetun jaksonajan välille?
- Miksi musiikissa käytetään tempomerkinnän yksikkönä iskua minuutissa hertsien sijaan?

Lisätietoa

- Tietokoneeseen saatavilla rumpukoneohjelmilla voi luoda vielä monipuolisemman perkussiokuvion työtä varten.

B.3.2 Oppilastyö: Metronomi heilurina

Työssä hyödynnetään musiikista tuttua metronomia, jonka tahtiin usein harjoitellaan soittamista. Metronomi pakotettuna värähtelijänä on oiva laite jaksonajan määrittämiseen, koska metronomissa on annettu tempomerkinnät iskuina minuutissa. Tämä mahdollistaa vertailun ja virhearvioinnin mitatun ja ilmoitetun arvon välillä. Tässä työssä metronomi oletetaan matemaattiseksi heiluriksi, jonka jaksonaika T riippuu vain heilurin pituudesta. Tällöin $T = 2\pi\sqrt{l/g}$, missä l on heilurin pituus ja $g = 9,81\text{m/s}^2$ on gravitaation aiheuttama putoamiskiihtyvyys. Matemaattisen heilurin tapauksessa heilurin varsi oletetaan massattomaksi ja massa on pistemäisesti keskittynyt varren päähän. Tämä approksimaatio ei ole metronomille kovin hyvä, mikä pakottaa arvioimaan teorian tuottamien tulosten luotettavuutta.

Välineet

- metronomi
- viivoitin
- sekuntikello

Vaiheet ja havainnot

1. Aseta metronomi hitaimmalle iskuluvulle ja laske tempomerkinnän perusteella metronomin varren teoreettinen pituus.
2. Metronomin ollessa hitaimmalla iskuluvulla mittaa metronomin varren pituus.
 - Varren pituus kannattaa mitata akselista siihen kohtaan vartta, mihin metronomin asteikon tempomerkintä osuu.
 - Arvioi, miten hyvin matemaattinen heiluri kuvaa metronomia.
3. Laske heilahdusaika mitatusta varren pituudesta.
 - Muista muuntaa heilahdusaika heilahduksiksi minuutissa.
4. Vertaa laskemaasi heilahdusaikaa metronomin merkintään.
5. Mittaa metronomin heilahdusaika sekuntikellon avulla ja vertaa tulosta metronomin merkintään.
 - Heilahdusajan mittaustarkkuus paranee, mitä pitemmältä ajalta heilahdusten määrää mitataan.
6. Laske mittaamastasi heilahdusajasta metronomin varren teoreettinen pituus.
7. Vertaa laskemaasi tulosta metronomin varren pituuteen.
 - Metronomin tempomerkinnät ovat suuntaa antavia ja eivät välttämättä pidä täysin paikkaansa riippuen metronomin laadusta.

Keskustelukysymyksiä

- Miten hyvin matemaattisen heilurin teoria kuvaa metronomia?
- Miten metronomi poikkeaa tavallisesti riippuvasta heilurista.
- Vaikuttaako värähtelyä ylläpitävä jousi värähtelytaajuuteen?

C AALTOLIIKKEEN ENERGIA

C.1 Amplitudi

C.1.1 Demonstraatio: Amplitudin vaikutus äänenvoimakkuuteen

Demonstraatiossa arvioidaan kvalitatiivisesti soittimeen syötetyn energian ja syntyvän äänen voimakkuuden yhteyttä. Ksylofonin laatalle pudotetaan kimmoisaa kumipalloa kasvavalta korkeudelta, jolloin kumipallon liike-energia lisääntyy pudotuskorkeuden kasvaessa. Samaan aikaan syntyvän äänen intensiteetti nousee, koska soittavan iskun aiheuttama amplitudi on entistä laajempi energian lisääntyessä. Energian siirtymistä kumipallosta laattaan voidaan pitää lähes vakiona, kun pudotuskorkeus ole liian suuri. Energiaa kuuluu pääasiassa hukkaan kumipallon muodonmuutoksiin ja ksylofonin laatan alla olevan kumipehmusteen muodonmuutoksiin.

Välineet

- ksylofoni
- kumipallo

Vaiheet ja havainnot

1. Pudota pallo suhteellisen matalalta ksylofonin laatalle ja kuuntele syntyvää ääntä.
 - Palloa ei kannata pudottaa liian korkealta, koska laattaan osuminen silloin vaikeutuu.
2. Pudota pallo uudestaan kaksinkertaiselta korkeudelta ja vertaa syntyvää ääntä matalampaan pudotukseen.
 - Jälkimmäinen pudotus tuottaa kovemman äänen, koska systeemiin tuodaan enemmän energiaa, joka saa laattaan aikaiseksi suuremman värähtelyn amplitudin.

C.2 Intensiteetti

C.2.1 Oppilastyö: Etäisyyden vaikutus intensiteettiin

Työssä tutustutaan intensiteetin muuttumiseen etäisyyden kasvaessa. Kaiuttimen toistaman siniaallon intensiteettiä mitataan desibelimittareilla, jotka oppilaat voivat vaihtoehtoisesti ladata puhelimiinsa. Jos käytössä on taulutietokoneet, niitä voidaan käyttää myös puhelinten tapaan desibelimittareina. Taulutietokoneisiin saa ilmaisia ja laadukkaita siniaaltogeneraattoreita, jotka ovat nopeampia käyttää kuin perinteiset analogiset välineet.

Välineet

- kaiuttimet
- siniaaltogeneraattori
- desibelimittari tai vastaava ohjelma puhelimeen tai taulutietokoneeseen

Vaiheet ja havainnot

1. Toista kaiuttimesta siniaaltoa.
 - Pidä voimakkuus reilusti taustamelun yläpuolella kauimmaisessa mittauspisteessä.
 - Valitse mittaussuunta niin, että kaiku ei vääristä tuloksia.
 - Kaiun vaikutuksen voi eliminoida lähes kokonaan tekemällä työn ulkona.
2. Mittaa äänenpaine desibelimittarilla joltain etäisyydeltä kaiuttimesta.
 - Ole tarpeeksi kaukana kaiuttimesta, sillä lähellä kaiutinta toiston voimakkuus ei ole homogeeninen kaiutinelementtien suuntaavuuden takia.
3. Toista mittaus, kun etäisyys kaksinkertaistuu.
 - Huomaat desibelimittarissa 6 desibelin laskun aina, kun etäisyys kaksinkertaistuu.
4. Toista mittaus, kun etäisyys nelinkertaistuu.
 - Edelleen desibelimittarin lukema putoaa jälleen 6 desibeliä.
 - Äänenvoimakkuus laskee etäisyyden neliön funktiona.
5. Ennusta, millä etäisyydellä voimakkuus on taas pudonnut 6 desibeliä.
 - Kuuden desibelin putoaminen tapahtuu, kun etäisyys on kahdeksankertaistunut.
6. Pohdi, kuinka kaukana äänilähteen voimakkuus on pudonnut taustamelun tasolle.
 - Tällä etäisyydellä äänilähdettä ei erota taustamelusta.

Keskustelukysymyksiä

- Mikä on intensiteetin määritelmä?
- Miksi desibelimittarin lukema putoaa, kun siirrytään kauemmas kaiuttimesta?
- Minkä muotoisena äänirintama liikkuu pois päin kaiuttimesta?

- Mitä tapahtuu kaiuttimen ilmaan siirtämälle äänienergialle, kun ollaan hyvin kaukana kaiuttimesta?
- Miksi rock-keikoilla ei kannata seisoa aivan kaiutintornien vieressä?
- Miksi musiikkiesityksissä usein eturivissä voimakkuus on liian kova ja takarivissä ei kuule mitään?

Lisätietoa

- Työ on hyvä tehdä kuulonhuollon yhteydessä, sillä etäisyyden kasvattamisella voi merkittävästi vähentää korvien saamaa äänienergiaa.
- Todellisuudessa eri taajuudet vaimenevat eri tavalla: korkeat taajuudet nopeiten ja bassot hitaiten, ja desibelimitari mittaa vain energian keskiarvoa.

C.2.2 Demonstraatio: Desibelit ja korvanapit

Korvanappien käyttö on yleistynyt räjähdysmäisesti puhelinten korvattua mp3-soittimet. Korvanapit voivat aiheuttaa kuulolle merkittävää vaaraa, koska korvakäytävä toimii suuntaavana kanavana äänelle keskittäen energian suoraan tärykalvolle. Demonstraatiossa verrataan korvanapin säteilemää äänienergiaa ilmassa ja keinotekoisessa korvakäytävässä. Koe tarjoaa hyvän mahdollisuuden kuulonhuollon käsittelylle.

Välineet

- nappikuulokkeet
- desibelimittari tai vastaava ohjelma puhelimeen tai taulutietokoneeseen
- noin viiden senttimetrin mittainen lyhyt putki, johon nappikuuloke mahtuu sisään

Vaiheet ja havainnot

1. Soita musiikkia korvanapeista kohtuullisella voimakkuudella ja mittaa toisen korvanapin äänenpainetta ilmassa viiden senttimetrin etäisyydeltä.
 - Viisi senttimetriä on keskimääräinen ihmisen korvakäytävän pituus.
2. Aseta sama korvanappi putkeen ja mittaa putken päästä äänenpainetta.
 - Korvakäytävää matkiva putki tekee korvanapista entistä suuntaavamman nostan äänenpainetta putken suulla.
3. Säädä korvanapit omasta mielestäsi riittävän suurelle voimakkuudelle musiikin kuunteluun.
 - Tässä ei oteta huomioon kuulon turtumista pitkään kuunneltaessa, mikä usein nostaa kuunteluvoimakkuuksia ajan kuluessa.
4. Aseta sama korvanappi putkeen ja mittaa putken päästä äänenpainetta. Vertaa saamaasi tulosta melusuositukseen.
 - Näin voit selvittää, kulutatko kuuloasi korvanappeja käyttäessäsi.

Keskustelukysymyksiä

- Mistä korvanappien tuottama äänienergia on peräisin?
- Miksi intensiteetti kasvaa, kun nappi asetetaan putken päähän?
- Mitä vaaraa korvalle voi olla liian suuresta voimakkuudesta?
- Mikä hyvä puoli on korvanappien sijainnissa korvakäytävässä?
- Mitä huomaat, kun otat korvanapit pois korvista kuunneltuasi musiikkia kovalla voimakkuudella?
- Miksi ihmiset laittavat kädet suunsa ympärille, kun yrittävät huutaa kaukana olevalle ystävälleen?

Lisätietoa

- Työhön tarvittavat korvanapit ja mp3-soitin tai puhelin on jo oppilaasi taskussa.

D VUOROVAIKUTTAVAT AALLOT

D.1 Seisova aalto

D.1.1 Demonstraatio: Seisova aalto

Sähköbasson paksut kielet ovat omiaan kielessä olevan seisovan aallon demonstrointiin, sillä kielet näkyvät hyvin hieman kauempaakin. Muodostuva seisova aalto on aallonpituudeltaan kaksinkertainen kielen pituuteen nähden (luku 7.1.1: akustinen kitara).

Välineet

- sähköbasso

Vaiheet ja havainnot

1. Soita basson kieltä ja havainnoi värähtelyä.
 - Huomaat kieleen syntyvän seisovan aallon, jossa on yksi kupu ja solmukohdat ovat kielen kiinnityspisteissä.
2. Vertaa värähtelyä johonkin toiseen kieleen.
 - Huomaat seisovan aallon olevan saman muotoinen, vaikka toinen kieli onkin erilaisessa vireessä.
3. Päättelö syntävän perusvärähtelyn aallonpituus.
 - Aallonpituus on kaksinkertainen värähtelevän kielen pituuteen verrattaessa.

Keskustelukysymyksiä

- Mikä on seisovan aallon aallonpituus ilmaistuna basson kielen pituuden avulla?
- Voidaanko basson kieleen syntyvää värähdystaajuutta laskea suoraan, kun tunnetaan aallonpituus?
- Mistä voi tietää, että juuri yhden kuvun käsittävä seisova aalto täytyy olla kielen perustaajuus?
- Mitä yhteistä on suljetun putken sisällä tapahtuvalla seisovalla värähtelyllä ja kielen seisovalla värähtelyllä?

D.2 Resonanssi

D.2.1 Oppilastyö: Resonoiva kaikukoppa

Työssä tutustutaan useassa soittimessa vahvistimena toimivaan kaikukoppaan. Kaikukoppa resonoi usealla taajuudella, joka yleensä kattaa kyseisen soittimen rekisterin. Ensiksi tutkitaan akustisessa kitarassa tapahtuvan resonanssin tuntemista ja näkemistä, kun kitaraa soitetaan tai kitara viedään musiikkia soittavan kaiuttimen eteen. Kitaran kaikukopan saa resonoimaan jopa laulamalla sen sisään. Seuraavaksi sama toistetaan sähkökitaralla ja verrataan tehtyjä havaintoja akustiseen kitaraan.

Välineet

- akustinen kitara
- sähkökitara
- kaiuttimet
- muoviämpäri

Vaiheet ja havainnot

1. Koske akustisen kitaran kanteen ja soita kitaran kieliä.
 - Huomaat kannen resonoivan.
2. Koske edelleen kitaran kanteen ja vie kitara musiikkia toistavan kaiuttimen eteen.
 - Kaiuttimen tuottama ääni saa kaikukopan resonoimaan.
 - Äänenvoimakkuudesta riippuen voi nähdä kielten värähtelevän musiikin tahdissa.
 - Kaikukoppa resonoi usealla taajuudella, jotta se voisi vahvistaa koko kitaran rekisteriä.
3. Etsi kitaran kaikuaukkoon laulamalla kaikukopan resonanssitaajuuksia.
 - Kitara jää soimaan, kun löydät sopivan resonanssitaajuuden.
 - Resonanssitaajuuksia voi etsiä myös muista kaikukoppaa muistuttavista esineistä kuten muoviämpäristä.
4. Toista edelliset vaiheet vahvistamattomalla sähkökitaralla ja selvitä, mikä on kaikukopan tehtävä akustisessa kitarassa.
 - Sähkökitarassa rungon resonanssi pyritään pitämään minimissään, koska liika resonanssi saa sähkökitaran kiertämään vahvistettaessa.

Keskustelukysymyksiä

- Miksi kaikukoppa värähtelee, kun kieliä soitetaan?
- Miksi kitaran kaikukoppa värähtelee, vaikka se ei koske kaiuttimeen?
- Miksi kaikki äänet eivät saa kaikukoppaa värähtelemään?
- Miten sähkökitaran ääni eroaa akustisen kitaran äänestä?

- Miksi sähkökitara on rakennettu kokonaan puusta?
- Miksi muoviämpäristä löytyy vain pari taajuutta, jolla ämpäri saadaan resonoi-
maan?

Lisätietoa

- Sähkökitaran heikompi resonanssi tarkoittaa, että energiaa jää enemmän kielten värähtelyyn, jolloin soinnin kesto paranee. Lisäksi umpipuinen runko estää kiertoilmiötä, joka vaivaa helposti resonoivia kaikukoppia kitaraa sähköisesti vahvistettaessa. Sähkökitaran hallittu kierto ei ole mahdollista akustisella kitaralla.
- Erityisesti viulunrakennuksessa kaikukopan pikkutarkka virittäminen on tärkeää soinnin kannalta.

D.2.2 Oppilastyö: Kitarasta kitaraan

Tämä oppilastyö on fysiikanopettajien klassikon, äänirautojen resonanssin, vaihtoehtoinen versio. Akustisten kitaroiden avulla voidaan tehdä sama työ oppilaiden kanssa, koska kitaroita on yleensä enemmän saatavilla kuin äänirautoja. Kaksi värähtelijää pystyy siirtämään energiaa toisilleen, jos niillä on sama resonanssitaajuus. Vireiset akustiset kitarat sisältävät kumpikin kuusi värähtelijää, joilla on samat resonanssitaajuudet.

Välineet

- kaksi akustista kitaraa
- capo
- viritysmittari

Vaiheet ja havainnot

1. Viritä molemmat kitarat mahdollisimman hyvin samaan vireeseen.
 - Kitaroiden vireisyys on oleellista työn onnistumisen kannalta.
2. Aseta samanvireiset akustiset kitarat kyljelleen kannet vastakkain noin kymmenen senttimetrin päähän toisistaan.
 - Aseta kitarat kyljelleen niin, että kaulat tulevat yli pöydän reunalta.
3. Soita toisen kitaran kieliä ja tarkkaile viereisen, soittamattoman kitaran kieliä.
 - Näet kielten liikkuvan resonanssin takia.
4. Soita edelleen kitaran kieliä ja vaimenna kielet kämmenellä tarkkaillen viereistä kitaraa.
 - Viereinen kitara jää soimaan resonanssin takia.
5. Toista työ, kun toisessa kitarassa on capo ensimmäisessä nauhavälissä.
 - Resonanssia ei tapahdu, koska capon käyttö muuttaa toisen kitaran virettä puoli sävelaskelta.
 - Kitarassa saattaa tapahtua pieni resonointi ja tämä johtuu yleensä yläsävelistä.
 - Capon voi korvata esimerkiksi maalarinteipillä, kumiremmillä tai hiuslenkillä.

Keskustelukysymyksiä

- Miksi kitarat saavat toisensa soimaan?
- Mitä capo tekee kitaran viritykselle?
- Mitä tapahtuu, jos kitarat eivät ole samassa vireessä?
- Miten capoa käytetään musiikissa?
- Miten resonanssi ilmenee basistin soittaessa rumpusetin lähellä?

Lisätietoa

- Käytettävät kitarat kannattaa virittää etukäteen, jotta viritys ehtii tasaantua oppitunnille.

D.2.3 Oppilastyö: Kitaran kielten välinen resonanssi

Työssä tutkitaan resonanssin vaikutuksia sähköbasson tai akustisen kitaran kielten välillä. Kielisoittimissa usein oktaavit ja unisonot resonoivat keskenään, mikä voi olla sekä hyvä että huono asia. Pianossa sympaattinen värähtely on osa äänenväriä, mutta esimerkiksi sähköbasson tapauksessa sympaattinen värähtely tekee soitosta epäselvää. Erityisesti nauhoitettaessa bassoa soittajan vaimennustekniikkojen on oltava kunnossa. Työssä soiteetaan nuotin A unisono ja huomataan, että vapaa A-kieli alkaa värähdellä sympaattisesti, kun nuotti A soitetaan E-kieleltä. Ilmiö ei toistu, jos E-kieleltä soitetaan jokin muu sävel. Tässä työssä käytettävää unisonoa käytetään usein soittimen virittämisessä korvakuulolta.

Välineet

- sähköbasso tai akustinen kitara

Vaiheet ja havainnot

1. Soita matalaa E-kieltä voimakkaasti viidenneltä nauhalta ja tarkkaile viereistä vapaata A-kieltä.
 - Vapaa kieli alkaa värähdellä E-kieltä soitettaessa.
 - E-kielen viidennellä nauhalla on sama nuotti A kuin viereisellä vapaalla kielellä.
 - Basson paksuilla kielillä resonanssi näkyy erityisen hyvin.
2. Toista koe neljänneltä ja kuudennelta nauhaväliltä.
 - Resonanssia ei tapahdu, koska kielet eivät ole samassa vireessä.

Keskustelukysymyksiä

- Mitä yhteistä E-kielen viidennen nauhan nuotilla ja vapaalla A-kielellä on?
- Miksi neljäs ja kuudes nauha eivät aiheuta resonanssia?
- Mitä haittaa resonanssista voi olla esimerkiksi bassoa nauhoittaessa studiossa?
- Mistä vapaa A-kieli saa resonanssissa energiansa?

Lisätietoa

- Musiikin oppikirjoissa on usein kaavioita kitaran otelaudan nuottien paikoista.
- Löydät lisää tietoa muista unisono-pareista kitaran otelaudalla etsimällä esimerkiksi internetistä erilaisia kitaran virityskeinoja.

D.3 Interferenssi

D.3.1 Demonstraatio: Interferenssi

Interferenssin demonstrointi kahden kaiuttimen avulla on helppoa, jos käytettävissä oleva tila ei kaitu liiaksi. Kaksi pistelähdettä ja niiden lähettämien aaltorintamien summa aiheuttaa tilaan interferenssikuvion. Toisissa paikoissa aaltorintamat vahvistavat ja toisissa heikentävät toisiaan. Interferenssi on ongelma äänentoistojärjestelmien kanssa, koska useampi pistelähde aiheuttaa aina ei-toivottuja voimakkuuden ja äänenlaadun vaihteluja.

Välineet

- kaksi kaiutinta
- signaaligeneraattori tai syntetisaattori

Vaiheet ja havainnot

1. Sijoita kaiuttimet eri puolille luokkaa.
 - Liika kaiku voi tehdä interferenssin havaitsemisesta hyvin vaikeaa.
2. Soita kaiuttimista siniaaltoa.
 - Kokeile etukäteen, millä taajuudella saat hyvän interferenssikuvion aikaiseksi.
3. Kulje luokassa ja havainnoi siniaallon voimakkuutta.
 - Interferenssin takia äänenvoimakkuudessa voi havaita maksimeja sekä minimejä eri puolilla luokkaa.
 - Maksimien ja minimien paikkoja voi merkitä jättämällä esimerkiksi vihreän paperin maksimikohtaan ja punaisen minimikohtaan.
4. Muuta siniaallon taajuutta ja tutki, miten voimakkuuden maksimien ja minimien paikat muuttuvat.
 - Taajuuden kasvaessa maksimit ja minimiit ovat lähempänä toisiaan.
 - Taajuuden pienetessä maksimit ja minimiit ovat kauempana toisistaan.

Keskustelukysymyksiä

- Mitä huomaat äänenvoimakkuudessa, kun kuljet luokassa?
- Miten taajuuden muutos muuttaa maksimien ja minimien paikkaa?
- Oletko huomannut saman ilmiön musiikkiesitysten aikana?

D.4 Yläsävelsarja

D.4.1 Oppilastyö: Kanteleen yläsävelet

Kantele on melko yleinen koulusoitin ja yksinkertaisen rakenteensa takia omiaan fysiikan työvälineeksi. Oppilastyössä valitaan jokin kanteleen kieli, mitataan kielen pituus ja laskeaan kielen yläsävelten solmukohtien paikat (luku 7.2: puhallinsoittimet). Sen jälkeen yritetään soittaa mahdollisimman monta yläsäveltä teorian perusteella.

Välineet

- kanteleita
- mittanauha

Vaiheet ja havainnot

1. Valitse kanteleesta jokin kieli ja mittaa sen soiva pituus.
 - Soittamalla kieltä näet missä kohdalla kielen seisovaan aaltoon muodostuu solmukohdat. Nämä solmukohdat määrittävät kielen soivan pituuden.
2. Laske, mihin kohtaan kieltä eri yläsävelien solmukohtien pitäisi muodostua.
 - Yläsävelen muodostama seisova aalto jakaa aina kielen yhtä pitkiin osiin. Ensimmäinen yläsävel jakaa kielen kahteen yhtä suureen osaan, kolmas kolmeen ja niin edelleen.
3. Etsi yläsävelet soittamalla huiluääniä kanteleella.
 - Yläsävelen saa soitettua painamalla kieltä keveästi sormella solmukohdasta samalla, kun toinen käsi soittaa kieltä.
 - On tärkeää huomata, että ensimmäistä yläsäveltä soitettaessa ei vaimene kolmas tai viides yläsävel, koska niiden solmukohdat ovat samassa kohdassa. Tästä huolimatta ensimmäinen yläsävel on voimakkuudeltaan niin merkittävä, että korkeammat yläsävelet eivät juuri erotu.
 - Mitä ylemmäksi yläsävelsarjaa mennään, sitä hiljaisempia yläsävelet ovat.
 - Kuultavien yläsävelten määrä riippuu käytettävän soittimen rakenteesta, mutta useimmiten ensimmäiset kolme yläsäveltä ovat kuultavissa.

Keskustelukysymyksiä

- Miksi kuvun kohdalta ei voi painaa yläsäveliä soitettaessa?
- Miksi solmukohdasta painamalla saadaan aina yksi yläsävel kuulumaan selkeästi?
- Mitä muita yläsäveliä kuuluu yhtä aikaa toisen yläsävelen kanssa?

Lisätietoa

- Yläsävelten käytöstä musiikissa hyvä esimerkki on Andy McKeen kappale Drifting, jossa toistuvana elementtinä on ensimmäisen yläsävelen tuottaminen kieliä lyömällä.
- Kirkuvat yläsävelet ovat erityisesti sähkökitaran tehokeino. Katso demonstraatio (D.4.2).
- Vaskipuhaltimet tuottavat äänensä lähes pelkästään yläsävelien avulla.

D.4.2 Demonstraatio: Yläsävelsarja huiluäänien avulla

Säröllä kuorutettu sähkökitara on jokaisen yläsävelsarjan demonstroijan unelma. Säröyttäminen saa aikaan sähkökitaran signaalin kompressointia, joka tekee hiljaisetkin yläsävelet kuultaviksi. Demonstraatiossa on syytä etukäteen laskea ja etsiä yläsävelten paikat sekä harjoitella huiluäänitekniikkaa.

Välineet

- sähkökitara
- plektra
- kitaravahvistin

Vaiheet ja havainnot

1. Kytke kitara vahvistimeen, jossa on särökanava.
 - Käytä paljon säröä, sillä se kompressoii signaalia vahvistaen yläsäveliä tehden huiluäänien soitosta helpompaa.
2. Soita yläsävelsarjan huiluääniä.
 - Yläsävelet saadaan huiluääninä painamalla kieltä keveästi sormella jokaisen yläsävelen solmukohdasta samalla kun kieltä näpätään.
 - Miksi yksittäinen huiluääni ei kuulu, kun kieltä soitetaan normaalisti?
 - Missä olet kuullut kitaran huiluääniä?
 - Mitä huomaat perussävelen ja ensimmäisen yläsävelen taajuuserosta?

Lisätietoa

- Kohtuuton määrä säröä kompressoii signaalia ja saa heikotkin huiluäänit kuulumaan paremmin.
- Kirkuvat yläsävelet ovat erityisesti sähkökitaran tehokeino.
- Huiluäänien käyttöä musiikissa voi kuulla runsaasti esimerkiksi Joe Satrianin kapaleessa Satch Boogie.

D.4.3 Demonstraatio: Vokaalien erottaminen

Puheessa ja laulamissa vokaalien erottaminen on olennainen osa ymmärtämisen kannalta. Tässä demonstraatioissa tutkitaan miten yläsävelsarja liittyy vokaalien erottamiseen toisistaan. Jokainen vokaali korostaa tiettyä osaa yläsävelsarjasta muodostaen formantteja – vahvistuneiden yläsävelten alueita. Vokaaleilla on kaksi formanttialuetta, joista toinen liikkuu taajuuksiltaan ylös, kun toinen liikkuu alas käytäessä läpi vokaaleja. Yläsävelsarjassa korkeampien taajuuksien formantti laskee alas seuraavassa vokaalijärjestyksessä: I-E-O-A-U. Samaan aikaan matalilla taajuuksilla on toinen formantti, joka nousee vokaalien mukana. Nämä ääntöväylästä johtuvat pienet äänenvärien muutokset saavat korvan erottamaan mistä vokaalista on kyse. Vokaalien ääntämiseen ei tarvita huulia ollenkaan, mitä on syytä itse kokeilla. Sävyerojen tuntee syntyvän ääntöväylän geometrian muuttumisesta.

Välineet

- taulutietokone taajuusanalyysiohjelmalla
- äänirauta

Vaiheet ja havainnot

1. Käynnistä taajuusanalyysiohjelma.
 - Pidä taulutietokonetta esimerkiksi dokumenttikameran alla, jotta äänen spektri näkyy hyvin.
 - Voit esitellä ohjelmaa soittamalla jotain soitinta, jolloin yläsävelsarja näkyy selvästi.
2. Laula vokaalit läpi järjestyksessä I-E-A-O-U pitämällä äänen korkeuden samana siirryttäessä vokaalista toiseen.
 - Tässä vaiheessa äänirauta auttaa sävelkorkeuden pitämisessä. Pidä soivaa äänirautaa korvaasi vasten samalla, kun laulat.
3. Seuraa äänen spektrissä korkeampien taajuuksien formantin liikkumista matalammille taajuuksille vokaalin vaihtuessa.
 - Korkeampien taajuuksien formantti erottuu helpommin, koska se on huomattavan leveä.

Keskustelukysymyksiä

- Tarvitseeko vokaalien laulamissa huulia?
- Miltä vokaalien vaihtaminen laulaessa tuntuu?
- Missä kohdin suuta mikäkin vokaali tuntuu muodostuvan?
- Mitä tapahtuu vokaalien erottamiselle, kun naislaulaja laulaa oikein korkeita säveliä?

Lisätietoa

- Vokaalien laulujärjestys I-E-A-O-U on yleinen äänenavausharjoitus.

- Tutkielmaa tehdessä eräs hyvä taajuusanalyysiohjelma taulutietokoneelle oli Frequencee.
- Harmoninen laulu on tekniikka, jossa laulaja saa laulullaan soimaan yhtä aikaa yläsäveliä melodiansa lisäksi.

D.5 Huojunta

D.5.1 Demonstraatio: Huojunta virityskeinona

Demonstraatiossa esitellään huojunta ilmiönä ja sen sovellus virityskeinona (luku 7.1.3: piano ja flyygeli). Esittelyssä hyödynnetään säröytyneen sähkökitaran kompressoitunutta signaalia, joka antaa pitemmän soinnin ja tuottaa selkeämmän huojuntailmiön. Aloitetaan laskemalla kitaran matalan E-kielen virettä, kunnes se lähestyy vapaan D-kielen virettä oktaavin alemmaa. Hyvissä ajoin ennen kuin sävelet ovat samat, kuuluu huojunta ensin hitaana voimakkuuden nousuna ja laskuna. Kun D-sävelet ovat lähes samat, alkaa beating taajuus kasvaa niin, että se on kuin oma kolmas sävelensä. Kun sävelet ovat vireessä, huojunta loppuu välittömästi, ja tällä tavoin ilmiötä hyödynnetään soitinten virittämisessä korvakuulolta.

Välineet

- sähkökitara
- viritysmittari
- kitaravahvistin

Vaiheet ja havainnot

1. Kytke sähkökitara vahvistimeen ja valitse särökanava.
 - Käytä paljon säröä, sillä se kompressoii signaalia tehden huojunnan huomaisesta helpompaa.
2. Soita yhtä aikaa matala E-kieli ja D-kieli peukalolla ja etusormella.
 - Kielten näppäämiseen käytettävä liike on samanlainen kuin poimisit nuppineulaa pöydältä.
3. Laske E-kielen virettä hitaasti virityskoneistosta, kunnes se on sama kuin D-kielen, mutta oktaavia alempana.
 - Kitaran virityskoneisto yleensä kiristyy myötäpäivään ja löystyy vastapäivään.
4. Huomaa huojunnasta johtuva beating, kun lähestyt D-säveltä.
 - Beating on aluksi nopeaa, koska vire on vielä kaukana vapaan D-kielen vireestä, mutta hidastuu lähestyttäessä.
 - Oikeasti työssä kuullaan ensimmäisen yläsävelen ja vapaan D-kielen välinen huojuntailmiö, koska kitaravahvistimet harvoin toistavat riittävän voimakkaasti matalia taajuuksia.
 - Kun huojunta lakkaa, niin kielet ovat silloin samassa vireessä oktaavin päässä toisistaan.

Keskustelukysymyksiä

- Miltä huojunta kuulostaa?
- Miten huojuntaa voidaan käyttää soitinten virittämiseen?

Lisätietoa

- Viritys, johon lopulta työssä päädytään on nimeltään pudotettu-D -vire, joka on suosittu viritys esimerkiksi heavy metalissa.
- Matalasta D:stä kuuluu perustaajuuden sijaan suhteellisen voimakkaana ensimmäinen yläsävel, koska kitaravahvistimen kaiutin ei toista perustaajuutta hyvin. Tämä tekninen rajoitus korostaa huojuntaa entisestään ensimmäisen yläsävelen ja vapaan D-kielen unisonon välillä.

D.5.2 Demonstraatio: Huojunta äänensävyn luoja.

Pianon ylärekisterin kieli-triot huojuvat jonkin verran ja saavat pianon soinnista rikkaan kuulaisen (luku 7.1.3: piano ja flyygeli). Sama ilmiö tavataan kuoroissa ja sinfoniaorkesterin jousisektiossa. Tässä demonstraatioissa tutkitaan miltä huojunta kuulostaa äänenväriin luoja pianossa. Vaimentamalla sormella kaksi kieltä pianon kieli-triosta huojunta katoaa.

Välineet

- pystypiano tai flyygeli

Vaiheet ja havainnot

1. Avaa pystypiano tai flyygeli niin, että näet sisällä olevat kielet.
 - Pystypianossa riittää kielen näkeminen koskettimien yläpuolelta.
2. Etsi pianon oikealta laidalta ylärekisterin kieli-triot.
 - Pianossa käytetään kolmen, lähes identtisesti viritetyn kielen sarjoja luomaan äänenväriä.
3. Pidä sormea kolmesta kielestä kahden päällä niin, että ne eivät soi, ja soita kieliä vastaavaa kosketinta.
 - Vain yksi kieli soi ja huojuntaa ei pitäisi syntyä.
4. Soita pianoa niin, että kaikki kolme kieltä triosta soivat.
 - Huomaa syntyvä huojunta ja sen vaikutus äänenväriin.

Keskustelukysymyksiä

- Ovatko kieli-trion kielet samassa vireessä?
- Muuttuuko soiva taajuus, kun kieliä on useampia?
- Missä muissa soittimissa huojuntaa käytetään äänensävyn luoja?

Lisätietoa

- Huojunta saadaan usein aikaan musiikissa tarkoituksella käyttämällä useampaa kappaletta samaa soitinta. Hyviä esimerkkejä tästä ovat kuorot ja sinfoniaorkesterit. Myös musiikkia nauhoitettaessa esimerkiksi kitara saatetaan nauhoittaa kymmenen kertaa ja näiden toisistaan hieman poikkeavien nauhoitusten huojunta tuottaa halutun äänenväriin.

D.6 Dopplerin ilmiö

D.6.1 Demonstraatio: Dopplerin ilmiö

Nokkahuiluilla voidaan luoda Dopplerin ilmiö luokkatilassa, kunhan tila ei kaiu liiaksi. Vierekkäin soivat huilut soivat unisonossa tai huojuvat äärimmäisen vähän. Jos toinen huilisti lähtee liikkumaan, kuullaan huojunnan muutos yhteissoinnissa, joka katoaa kun huilisti taas pysähtyy. Ilmiö on tuttu F1-autoista ja hälytysajoneuvoista, mutta sen luominen soittimilla onnistuu myös.

Välineet

- kaksi nokkahuilua

Vaiheet ja havainnot

1. Pyydä kaksi avustajaa vierekkäin puhaltamaan nokkahuiluista samaa säveltä.
 - Voidaan soittaa myös pelkillä nokkahuilujen suokappaleilla.
 - Vireisyys nokkahuilujen välillä on suotavaa.
2. Kuuntele syntyvää yhteissointia.
 - Nokkahuilujen välisestä vireestä riippuen ääni voi huojua.
3. Pyydä toista puhaltajaa kävelemään rauhallisesti eteenpäin ja sitten pysähtymään vähän matkan päähän.
 - Toisen nokkahuilun liikkeessa syntyy huojunta tai jo olemassa olevan huojunnan määrä muuttuu, mikä johtuu Dopplerin-ilmiöstä.
 - Jos tilassa kaikuu paljon, huojunnan muutosta voi olla mahdoton havaita.

Keskustelukysymyksiä

- Mitä tapahtuu nokkahuilut soivat yhtä aikaa, mutta kumpikaan soittaja ei liiku?
- Mitä tapahtuu yhteissoinnille, kun toinen soittaja lähtee liikkeelle?
- Missä arjessa olet kuullut Dopplerin-ilmiön?

Lisätietoa

- Demonstraatio vaatii akustoidun tilan, koska kaiku sotkee kuulohavainnon helposti. Ulkona kaiusta ei pitäisi olla ongelmia.
- Demonstraatiossa voidaan käyttää myös pelkkiä nokkahuilun suokappaleita.

E PERHON KESKUSKOULUN OPETUSKOKEILUN PISTETYÖOHJEET

E.1 Kitaran fysiikkaa

Välineet

- akustinen kitara

Tutkimustehtävät

- Mikä kitarassa värähtelee eli toimii värähtelijänä?
- Mikä vaikuttaa kitarasta kuuluvan äänen voimakkuuteen?
- Millä eri tavoin kitarassa voidaan muuttaa syntyvän äänen korkeutta?
- Millä kitara viritetään? Mitä tämä osa kitarassa tekee kielille?
- Pitääkö väite paikkaansa vai ei?
 - Kielten jännitys vaikuttaa syntyvän värähtelyn taajuuteen.
 - Kielen pituus ei vaikuta syntyvän äänen korkeuteen.
 - Kitaran matalin ääni saadaan paksuimman kielen soidessa vapaana.
 - Kielen kiristäminen laskee kielen värähdystaajuutta.
 - Kitaran kielen värähtely on poikittaista aaltoliikettä.
- Jos kitaran kieltä painetaan viidennestä nauhavälistä, jakaa se kielen kahteen osaan.
 - Kummalla kielen puolikkaalla on suurempi aallonpituus?
 - Kummalla kielen puolikkaalla on suurempi taajuus?

E.2 Pianon fysiikkaa

Välineet

- pystypiano

Tutkimustehtävät

- Mitä pianon sisällä tapahtuu, kun kosketinta painetaan?
- Mikä pianossa värähtelee eli toimii värähtelijänä?
- Etsi kolme eroavaisuutta pianon sisällä olevien kielten välillä.
- Mitä muuta erikoista huomaat kielten lukumäärässä, kun vertaat pianon vasemman reunan kieliä oikean reunan kieliin?
- Pitääkö väite paikkaansa vai ei?
 - Pianon kielten värähtely on pitkittäistä aaltoliikettä.
 - Kielen pituus vaikuttaa syntyvän äänen korkeuteen.
 - Pitkästä kielestä saadaan korkeampi ääni kuin lyhyemmästä kielestä.
 - Lyhyen kielen värähdystaajuus on pienempi kuin pitkän kielen.
 - Kielen massa ei vaikuta syntyvään ääneen.
 - Raskaampi kieli värähtelee matalammalla taajuudella kuin kevyt kieli.
- Pianon vasemman reunan koskettimet iskevät paksuihin kieliin. Miksi tässä ei voida käyttää samaa ohutta kieltä kuin oikeassa reunassa pianoa?
- Kitarassa on kuusi kieltä ja pianossa paljon enemmän. Miksi kielten vähäinen määrä kitarassa ei tuota ongelmia soittamiseen?
- Miksi hyttynen inisee ja kärpänen surisee?

E.3 Värähtelijän massan vaikutus

Välineet

- akustinen kitara
- ukulele
- agogo
- putkipenaali

Tutkimustehtävät

- Ukulele ja kitara:
 - Mikä on värähtelijä kummassakin soittimessa?
 - Kumpi soitin pystyy tuottamaan matalamman äänen?
 - Kumman soittimen värähtelijät ovat raskaampia?
- Agogo
 - Mikä ero agogon kahdella kellolla on?
 - Kumpi kelloista on ääneltään korkeampi?
 - Onko kyseinen kello raskaampi vai keveämpi?
- Putkipenaali
 - Miten putkipenaalin päät eroavat toisistaan?
 - Mikä vaikutus tällä on syntyvän ääneen?
- Edellisestä päätellen täydennä seuraavaan tekstiin sanat: matalamman, korkeamman, massa, massa, värähtelijä.

Mitä raskaampi _____ on sitä _____ äänen se tuottaa, koska sillä on suuri _____ . Pienellä värähtelijällä on pieni _____ ja silloin se tuottaa _____ äänen kuin samanlainen isompi värähtelijä.

E.4 Resonanssi kitarassa

Välineet

- akustinen kitara
- sähkökitara
- sähköbasso ja vahvistin
- muoviämpäri

Tutkimustehtävät

- Akustisen kitaran rungon muodostaa kaikukoppa. Kosketa kitaran kantta ja soita kitaran kieliä. Mitä huomaat?
- Aseta akustinen kitara bassovahvistimen eteen. Kosketa kitaran kantta ja soita bassoa. Mitä huomaat?
- Laita akustinen kitara soimaan laulamalla tai huutamalla kitaran kaikuaukosta kitaran sisään. Soiko kitara millä tahansa äänenkorkeudella?
- Toista edellinen koe ämpäriin avulla. Millä tavoin äänenvoimakkuus muuttuu, kun osut resonanssin aiheuttavaan taajuuteen?
- Miten akustisen kitaran ja vahvistamattoman sähkökitaran äänenvoimakkuus eroavat?
- Kosketa sähkökitaran kantta ja soita kitaran kieliä. Minkä eron huomaat akustiseen kitaraan?
- Aseta sähkökitara bassovahvistimen eteen. Kosketa kitaran kantta ja soita bassoa. Minkä eron huomaat akustiseen kitaraan?
- Saatko sähkökitaran soimaan laulamalla? Miksi et?
- Mikä on akustisen kitaran kaikukopan tehtävä?