



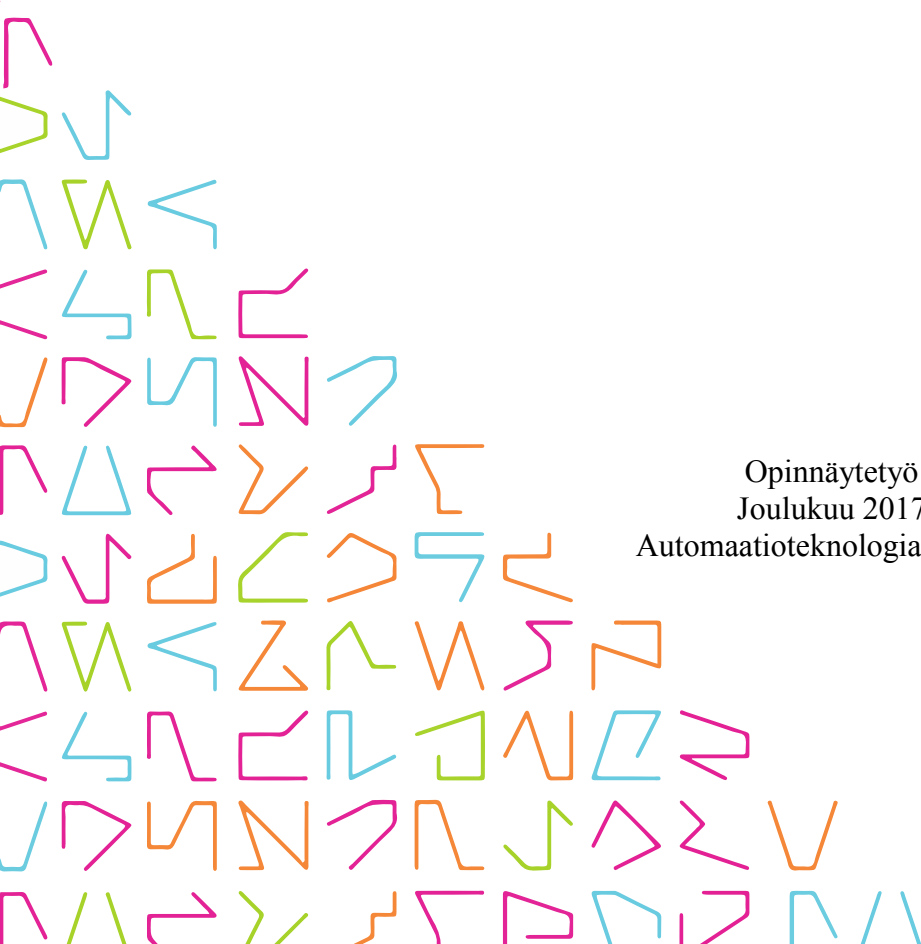
TAMPEREEN  
AMMATTIKORKEAKOULU

# MATERIAALIA LISÄÄVÄ TULOSTUSTEKNIikka SOITINTEOLLISUUDESSA

Materiaali- ja menetelmäsuunnittelu

Tero Siromaa

Opinnäytetyö  
Joulukuu 2017  
Automaatioteknologia YAMK



## TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Automaatioteknologia YAMK

SIROMAA, TERO:

Materiaalia lisäävä tulostustekniikka soitinteollisuudessa, Materiaali- ja menetelmäsuunnittelu

Opinnäytetyö 66 sivua, joista liitteitä 15 sivua  
Joulukuu 2017

---

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää, soveltuuko materiaalia lisäävä tulostustekniikka soitinrakennusteollisuuden valmistusmenetelmäksi ja kuinka tulostettujen komponenttien rakenne kestää kitaran kielten aiheuttaman jännityksen. Menetelmään kohdistuu valmistavassa teollisuudessa suuria odotuksia ja eri toimialat ovat tämän tutkimuksen kirjoittamisen aikana voimakkaasti investoimassa tulostuslaitteisiin. Kilpailu tulostinmarkkinoilla on kovaa ja tulostinlaitteiden laatu vaihtelee. Valmistavan teollisuuden näkökulmasta on tärkeää, että uuteen menetelmään saadaan luotettavuutta esimerkiksi tulostamisen standardointia kehittämällä. Tulostinlaitteistot ovat jakaantuneet edullisiin kuluttajatulostimiin sekä teollisuuden käyttämiin kalliisiin tulostimiin. Olennaisena erona ovat tulostettavat materiaalit, joista teollisuudessa käytetään metalleja, keraameja sekä muoveja, kun kuluttajatulostimet tulostavat pääasiassa erilaisia muoveja.

Tässä kehittämistutkimuksessa tulostettiin PLA-muovista akustisen teräskielisen kitaran komponentit, soitin kasattiin ja valmiista soittimesta mitattiin sen perusresonanssitaajuudet. Resonansseja verrattiin Leonardo Guitar Research Projectin kansainvälisen tutkimushankkeen aikana valmistettuihin, samalla työpiirustuksella, perinteisellä puuntyöstömenetelmällä ja puumateriaalista valmistettuihin kitaroihin. Tulostettavan materiaalin ominaisuudet eivät vastaa puumateriaalin ominaisuuksia, jolloin tutkimuksessa havaittiin rakenteen tarvitsevan lisätukea, jotta kielten aiheuttamasta jännityksestä ei aiheutuisi plastisia muodonmuutoksia rakenteelle. Jatkotutkimukseksi jää esimerkiksi kitaran rakenteellisten ratkaisujen optimointi, jolloin voidaan tarkemmin suunnitella soittimen värähtelyominaisuuksia kielten vedossa. Samoin eri materiaalien jatkuva tuotekehitys tuottaa jossain vaiheessa tulostettavia materiaaleja, jotka ratkaisevat tässä tutkimuksessa havaittuja ongelmia.

Tutkimuksessa kehitettiin yksinkertainen laadunvarmistusmenetelmä, jossa perusresonanssien mittaamisella pyritään tasapainottamaan alkavien yritysten akustisten teräskielisten kitaroiden valmistusprosessia. Menetelmän vaiheet esitellään ja vertailuaineisto on tutkimuksen liitteenä. Menetelmän käyttöönotto yrityksissä sekä kehittäminen on rajattu tämän tutkimuksen jatkokehittämiskohteeksi.

Asiasanat: tuotekehitysverkosto, soitinrakennus, kitaranrakennus, materiaalia lisäävä tuotanto, 3D-tulostaminen, takaisinmallinnus

## ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Tampere University of Applied Sciences  
Automation Technology, Master's Degree

SIROMAA TERO:

Material additive technology in musical instrument making business, Material- and methodological design

Master's thesis 66 pages, appendices 15 pages  
December 2017

---

The purpose of this Master's Thesis was to study if the material additive manufacturing technique is suitable for the instrument making business. The manufacturing industry holds great expectations while huge investments are being made in different business sectors towards this technology. The additive manufacturing equipment market is highly competitive and the quality varies greatly - the business has been roughly divided into low desktop and high industrial standard 3D printers. For the manufacturing industry it is imperative to be able to rely on the accuracy of the equipment. This could be ensured by participating in standardization processes. One main difference between standards are printer filaments. Low cost printers are capable of printing mainly different plastics, whereas highly priced industrial printers can also manufacture ceramics or metals.

This thesis reports the 3D printing process of acoustic flat-top guitar components out of PLA. The wooden guitars built during the International Leonardo Guitar Research Project were used as a comparison for both the printed guitar as well as the measured main resonances. The printed guitar was carefully modelled using the same blueprint as the Project guitars.

The features of used material don't correspond with their wooden counterparts so the structure needed some additional support to withstand the tension of the strings. Without the support it would be clear that the guitar top will be destroyed by plastic deformation after a while. Further research is needed to remodel and optimize top structures to intensify resonances simultaneously while keeping the forces of the string tension towards the guitar top stable. Also in time filaments will be developed towards the point where all challenges described in this study will be solved and the process is worth reproducing.

A simple quality control method for unexperienced guitar makers was developed during the study. By measuring guitars' main resonances it is possible to control acoustic flat top guitar manufacturing processes and thus maintain better balance between batches. The stages of the aforementioned method are described in this study and are fully implementable in any further research.

---

Key words: research and development, instrument making, guitarmaking, material additive manufacturing, 3D printing, reverse engineering

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	5
2	KITARAN TUTKIMUSMENETELMÄT.....	7
2.1	Tekninen tutkimus .....	7
2.1.1	Alkuperäinen malli.....	8
2.1.2	Takaisinmallinnus .....	10
2.2	Akustinen tutkimus .....	13
2.2.1	Akateeminen tutkimus .....	14
2.2.2	Simulointi.....	15
3	KITARAN VALMISTAMINEN TULOSTAMALLA.....	17
3.1	Kitaran komponenttien valmistaminen.....	17
3.1.1	Mallintaminen .....	19
3.1.2	Tulostaminen.....	21
3.2	Kitaran kokoonpano.....	23
3.2.1	Komponenttien liittäminen.....	24
3.2.2	Pintakäsittelyt.....	25
3.2.3	Osakokoonpano.....	30
3.2.4	Viimeistely .....	31
4	KITARAN VERTAILEVA TUTKIMINEN.....	33
4.1	Kitaran akustiset mittaukset.....	33
4.1.1	<Kitaran perusresonanssien mittaus.....	36
4.1.2	Komponenttien perusresonanssien mittaus .....	37
4.2	Kitaran mekaaniset mittaukset.....	40
4.2.1	Kitaran osien rasitus kielten vedossa .....	41
4.2.2	Kannen jäykkyyden mittaus.....	42
4.2.3	Kitaran massa .....	43
5	YHTEENVETO JA POHDINTA .....	45
	LÄHTEET.....	48
	LIITTEET .....	50
	Liite 1. Leonardo Guitar Research Projektikitaroiden mittaustaulukko 1(16).....	50

## 1 JOHDANTO

Digitalisaatio ja teollinen internet on muuttamassa tuotteiden suunnittelua ja valmistusta pysyvästi kaikilla valmistavan teollisuuden sektoreilla. Muutosnopeus on voimakkaasti kiihtyvää ja läntiset teollisuusmaat julkaisevat kilpaa kansallisia kehitysohjelmiaan pysyäkseen muutoksessa mukana. Valmistavan teollisuuden näkökulmasta työvoima-, varastointi-, ja kuljetuskustannukset heikentävät yritysten kannattavuutta ja tuotteiden digitaalinen valmistaminen on eri ennusteiden mukaan osaltaan ratkaisemassa ongelmaa. Materiaalia lisäävä tulostus on eräs keskeisimmistä valmistustekniikoista, jonka avulla teollisuuden yritykset pyrkivät kasvattamaan kilpailukykyään markkinoilla.

Puutuoteteollisuuden investoinnit Suomessa robotiikan ja automaation osalta ovat erittäin pienet verrattuna metallituoteteollisuuden yrityksiin. Puutuoteteollisuuden alaisuudessa toimivan soitinteollisuuden näkökulmasta materiaalia lisäävä tulostustekniikka on verrattain uutta ja sen konkreettiset hyödyt vielä tuntemattomia yrityksille sekä suurelle yleisölle. Tässä tutkimuksessa pyritään selvittämään voidaanko tulostamalla valmistaa kelvollinen kitara, sekä onko materiaalia lisäävällä tulostusteknologialla tulevaisuudessa vahva jalansija soitinrakennuksen toimialalla?

Tämän tutkimuksen menetelmänä on kehittämistyö. Tutkimuksen tavoitteena on pilotoida uutta teknologiaa valmistamalla akustinen tasakantinen teräskielinen kitara materiaalia lisäävällä tuotantomenetelmällä ja verrata tuotosta vastaaviin perinteisellä menetelmällä puusta valmistettuihin kitaroihin. Tutkimuksessa esitellään yksinkertainen menetelmä akustisten kitaroiden keskinäiseen vertailuun ja niiden akustisten ominaisuuksien tutkimiseen. Yhteistyö tulostimia valmistavan yrityksen ja samalla opinnäytetyön toimeksiantajan Prenta oy:n kanssa on paras keino yhdistää toimialan vaatimukset materiaali- sekä laitetekniseen osaamiseen.

Tutkimus tehtiin yhteistyössä Leonardo Guitar Research Projektin sekä SASKY – koulutuskuntayhtymään kuuluvan Ikaalisten Käsi- ja taideteollisuusoppilaitoksen (IKATA) kanssa. IKATA on Pohjoismaiden suurin alan oppilaitos. Oppilaitoksessa on koulutettu soitinrakentajia 30 vuotta ja suuri osa toimialan tämänhetkisistä 160:sta yrityksestä Suomessa on saanut alkunsa juuri koulutuksen ansiosta. Soitinrakennusosaston toiminta antaa erinomaisen alustan tämän tutkimuksen kaltaiselle tuotekehitystyölle, sillä osaston tilat, laitekanta sekä varustelu on suunniteltu soittimien

valmistusta varten. Lisäksi IKATA:ssa tarjottava alan koulutus on tunnustettu ja tunnustettu kansainvälisesti yhteistyökelpoiseksi eurooppalaisessa soitinrakennuskoulutuksen yhteisössä. Eurooppalaisen koulutuksen sekä yritys yhteistyön myötä materiaalia lisäävä tulostustekniikka saa toimialalla parhaan mahdollisen yleisön, ja aikanaan työn laadullinen arviointi tulee kansainvälisen koulutus kentän huomion kohteeksi.

## 2 KITARAN TUTKIMUSMENETELMÄT

### 2.1 Tekninen tutkimus

Yhdysvalloissa perustetut yhdistykset Association of Stringed Instrument Artisans (ASIA, 1988) sekä Guild of American Lutherie (GAL, 1972) loivat perustamistensa myötä toimialalle käsityö-, ja ammattisalaisuusperinteestä poikkeavan kulttuurin jakaa tietoa kaikkien alalla toimivien kesken, sekä tavoitteen yhdessä ymmärtää soittimien toimintaan liittyviä ilmiöitä. Yhdistykset ovat julkaisseet vuosien varrella lukemattomia artikkeleita sekä tutkimuksia alalla arvostetuissa jäsenlehdissä ja näinollen tieto on jakaantunut soitinrakentajien käyttöön ympäri maailman. Ennen yhdistysten perustamista kitaroita valmistavat suuryritykset päättivät omasta tuotannostaan omien tuotantostrategioidensa varassa joiden pohjalta vasta myöhemmässä vaiheessa alalla herättiin käytettyjen materiaalien sekä tuotantomenetelmien vaikutuksesta paremmin ja huonommin soiviin kitaroihin. Kitaroiden elinkaariajattelu oli 1900 luvun alkupuolella erittäin paljon pragmaattisempaa kuin se on nykyään; tuotteet valmistettiin 20–30 vuoden elinkaareen, jonka jälkeen ne voitiin heittää roskiin. 1970 luvun lopulla alkaneen vanhojen kitaroiden keräily, entisöinti sekä myynti-innostuksen johdosta vanhat soittimet nousivat korkeaan rahalliseen-, sekä keräilyarvoon. Tämän buumin johdosta suosituimpia kitaramalleja kopioimaan perustettiin uusia yrityksiä ja trendi on jatkunut pitkälle 2010 luvulle saakka.

Monimutkaisen energiansiirtoketjun myötä myös tiede ja tutkimustahot ovat olleet kauan kiinnostuneita kitaran fysikaalisista ominaisuuksista. Värähtelevien kappaleiden akustiikka kiinnosti jo Pythagorasta, jonka tiedetään kokeellisesti havainnoineen värähtelevän kielen harmonisia osasäveliä. Kitaran tutkimus voidaan hyvin rinnastaa muiden akustisten soitinten fysikaalisten ominaisuuksien tutkimuksen kanssa, sillä samat lainalaisuudet yhdistävät eri puolilla maailmaa kehitettyjen soitinten akustiikkaa.

Alan kirjallisuudessa sekä tutkimuksissa mainitaan usein lähteeksi Thomas Rossingin *The Science of Stringed instruments* (Rossing T.D. 2010), joka on laajalti tunnustettu alan tutkimuksen perusteos. Kirja käsittelee eri soitinten avulla laajan joukon akustiikan tutkimuksen peruskäsitteistöä ja sisältö on ymmärrettävissä ilman syvällistä matematiikan tai fysiikan tuntemusta. Kirjaa on päivitetty vuosien varrella muutamaan

otteeseen ja uusin painos sisältää paljon tärkeitä akustiikan tutkimuksen kehityksen mukanaan tuomia uudistuksia sekä tutkimusmenetelmiä. Kitaratutkimuksen osalta Rossing on julkaissut tutkimusartikkeleita mm. 1983-1984 Guild of American Luthiery yhdistyksen julkaisemassa American Lutherie -lehdessä. Lehdessä julkaistuista artikkeleista on myöhemmin koostettu viiden kirjan artikkelikokoelma The Big Red Book Of American Lutherie. (Rossing T.D. 2001)

Tukholman kuninkaallisen korkeakoulun tutkija Erik Janssonin tutkimus kitaran akustiikasta on julkaistu alun perin jo vuonna 1977, mutta on edelleen eräs tärkeimmistä alan perustutkimuksista. Tutkimus esittelee seikkaperäisesti kitaran toimintaa fyysikaalisena värähtelijänä ja erittelee kitaran eri komponenttien värähtelyjen vaikutusta konstruktion. (Jansson, E.V. 1988)

Suurten yritysten tuotantotietojen lisäksi alan työtekniikoista sekä materiaaleista ovat vuosien varrella myös yksittäiset kitaranrakentajat julkaisseet kirjoja omista lähtökohdistaan. Irving Sloanen Classic Guitar Construction (Sloane, I. 1966) -kirjan on maininnut innoittajakseen lukuisa määrä nykyisistä pitkän linjan kitaranrakentajista ja uudempien alalla toimivien yrittäjien ja rakentajien kirjallisuuden esikuvina ovat toimineet mm. klassisen kitaran rakennukseen keskittyvä Making Master Guitars (Roy Courtnall) sekä kaarevakantisten jazz-kitaroiden rakentamistekniikoita käsittelevä Making of Archtop Guitar, (Bob Benedetto) kitaroiden rakennetta sekä toimintaa syväluotaava The Responsive Guitar (Erving Somogyi) tai analyttinen ja moderniin tutkimukseen nojaava Contemporary Guitar Design and Build (Gilet/Gore). Huolimatta siitä, että kirjan kirjoittajalla on lähes poikkeuksetta ollut samalla tuotteidensa myynnin ja markkinoinnin edistäminen kirkkaana mielessä, ovat nämä kirjat olleet suurena teknisenä apuna aloitteleville itsenäisille kitaranrakentajille, joiden lukumäärä on vuosien varrella kasvanut niin ulkomailta kuin kotimaassakin.

### **2.1.1 Alkuperäinen malli**

Soitinrakennusmaailmassa on aina ollut vahva mielikuva, että vanhat mestarit olisivat omistaneet erityisiä teknisiä tietoja sekä taitoja, joiden avulla rakentamansa soittimet olisivat yliverkaisia verrattuna nykytietämyksen mukaisesti valmistettuihin soittimiin. Samoin asiakaskunnalla on erittäin vahvat ja osin pinttyneet mielikuvat vanhojen



soitinten ylivertaisuudesta. Historiallisesti kuitenkin kunakin aikakautena valmistetut soittimet on valmistettu kysynnän mukaan soittajien tarpeisiin tuotannollisesti ja tehokkaasti aikakauden tyypillisten valmistusmenetelmien mukaisesti, eikä todellisia eroja ole pystytty juurikaan todentamaan (Cho.A. 2017). Osittain siis mielikuvien perusteella myös takaisinmallintamisen perinne on kasvanut erittäin vahvaksi soitinrakennusalalla. Alkuperäisten soitinten materiaaleja, mittoja, muotoja sekä pintakäsittelyaineiden reseptejä pyritään kopioimaan sekä toistamaan mahdollisimman tarkasti, jotta tuote hyväksyttäisiin markkinoilla.

Samoin myös kitaranrakennusalalla yleinen käytäntö on verrata valmistettavaa tuotetta alan perinteikkäämpien valmistajien malleihin jolloin myynnissä ja markkinoinnissa luodaan vahvaa mielikuvaa historialliseen, hyväksi havaittuun ja perinteitä kunnioittavaan jatkumoon. Tutkimuksessa tulostettu kitaramalli on Englannissa toimivan Lincoln Collegen kitaranrakennusalan opettajan Adrian J. Lucasin mitoittama tekninen piirustus Martin Guitar Companyn 00 –mallista, jota on yrityksessä valmistettu eri variaatioin 1877 vuodesta alkaen (The Vintage Guitar Info)



KUVA 1. Martin 00-21 , Nazareth, PA., 1943 (<http://www.christies.com>)

### 2.1.2 Takaisinmallinnus

Takaisinmallinnuksella (reverse engineering) tarkoitetaan valmiin tuotteen tai sen komponentin mittatarkkaa kopioimista sekä sen saattamista digitaaliseen muotoon, josta malli on helppo siirtää koneistettavaksi tai muulla tavoin valmistettavaksi. Tyypillisimmillään tämä tarkoittaa esineen mitoittamista ja tekemällä siitä mallinnusohjelmalla alkuperäistä vastaava CAD-malli. Edelläkävijöinä takaisinmallinnuksella voidaan katsoa olevan auto,- avaruusteknologia ja ortopediateollisuudella. Kyseisten teollisuudenalojen suunnittelijoilla ja muotoilijoilla on vahvat perinteet muotoilla komponenteista sekä suuremmista kokonaisuuksista savi-, ja puumalleja tarkemman esteettisen, toiminnallisen sekä rakenteellisen tutkimuksen käyttöön. Teollisen valmistuksen vaatimukset ovat kehittäneet CAD-ohjelmistoja sekä mittalaitteita, joilla teollisesti muotoillut mallit muunnetaan digitaaliseen muotoon. Teollisuudessa menetelmän käytön kasvaminen on ollut suurinta konseptisuunnittelussa (concept modeling), prototyyppien pikavalmistuksessa (rapid prototyping) sekä pikavalmistustuotannossa (rapid manufacturing) (Raja, Fernandes, 2008).

Takaisinmallinnuksen historia kulkee käsi kädessä CAD-suunnitteluohjelmistojen kehityksen kanssa, jossa olennaisessa roolissa voidaan pitää tietokoneiden laskentatehojen eksponentiaalista kasvamista vuosien varrella. Samalla tietokoneiden näyttöjen ja näytönohjainten kehitys on mahdollistanut yhä tarkempien ja luonnonmukaisempien yksityiskohtien tarkastelemisen näyttöruudulta, ennen kuin varsinaista tuotetta on vielä valmistettu. Modernien mallinnusohjelmien ominaisuuksien kehittymisen myötä tuotteen eri komponenttien yhteensopivuutta toisiinsa voidaan arvioida ja jopa suurien kokoonpanojen liiketarkastelua sekä yksittäisten komponenttien rasiustarkastelua voidaan simuloida jo hyvinkin tarkasti ennen valmistusta. Mallinnusohjelmistojen lisäksi on aiemmin olleet erilliset ohjelmat mm. skannatun pistepilvitiedon käsittelyä, tuotannon CAM työkalu,- ja työstöratatiedon käsittelyä, tai mallin geometrian viipalointitiedon käsittelyä tulostamista varten (Raja, Fernandes, 2008). Suurimmat ohjelmistotoimittajat ovat nykyään integroineet eri työvaiheet mallinnusohjelman sisällä toimiviksi ominaisuuksiksi tai ohjelmiston eri lisäsovelluksiksi, jolloin on varmistuttu mallin nopeasta ja joustavasta siirtymisestä suunnittelusta tuotantoon.

Takaisinmallinnuksen etuna on, ettei tuotetta tai sen osaa tarvitse suunnitella alusta asti, vaan voidaan hyödyntää aiemmin hyväksytyä ja toimivaksi todettua osaa tai mekanisme, jolloin tuotesuunnittelun resursseja voidaan kohdentaa enemmän tuotteelle lisäarvoa tuoviin osa-alueisiin. Tuotteen suunnittelu on aikaa vievää ja työlästä ja suurten kokoonpanojen kohdalla takaisinmallinnuksella saavutetaan kustannustehokkuutta sekä tuottavuutta yrityksen tuotekehitysyksikössä (Raja, Fernandes, 2008).

Monimutkaisten kappaleiden ja yhä suurempien kokoonpanojen mallintaminen vaatii tarkkuutta sekä ammattitaitoa, jotta kappaleesta tulisi käyttötarkoitukseensa toimiva sekä kustannustehokkaasti valmistettava. On ymmärrettävä koko takaisinmallintamisen ketju, jotta voidaan valita tarkoituksenmukaisimmat menetelmät, ohjelmat ja laitteet, joilla prosessi suoritetaan valmiiksi tuotteeksi saakka. Mitta ja muototarkkuus asettavat menetelmän valinnalle omat vaatimuksensa, mutta tarkimmankaan menetelmän hyödyntäminen ei johda tyydyttävään lopputulokseen, mikäli menetelmää ei täysin ymmärrä. On osattava kiinnittää riittävästi huomiota menetelmän kriittisiin pisteisiin, joissa tuotteelle määritellään pinnan, muodon tai mitan tarkkuudet.

Tuotekehitysvaiheiden nopeuttamiseksi manuaalisen mallintamisen avuksi on kehittynyt mittausdataan perustuvia menetelmiä, joissa mitattavan kappaleen mittatiedoista muodostetaan pistepilven avulla ohjelmistossa kolmiulotteinen malli. Kappaleen valmistuksen mittatarkkuusvaatimuksista lähtöisin olevien laaduntarkkailun sekä laadunvarmistuksen laitteistojen kehittymisen myötä mittaustiedolle on keksitty monipuolista käyttöä ja linkittää valmiista tuotteesta mitatun datan hyödyntäminen uusien kappaleiden suunnitteluprosesseihin.

Perinteisten kosketuksesta mittatiedon saavien koordinaattimittauslaitteiden rinnalle on kehitetty 3D laserkeilausmenetelmä, jossa kolmiomittausmenetelmän avulla voidaan skannata valmistettava komponentti mittatarkasti sekä nopeasti joko käsivaralta skannaten tai laite kiinnitettynä työkalun keventimeen. Skannattavaan kappaleeseen kiinnitetään referenssitäplätarrat, joiden avulla varmistetaan mittasuhteiden tarkka kopioituminen. 3D skannaus muodostaa valmistettavasta komponentista lopulta jopa miljoonia pisteitä sisältävän pistepilven, joka siirretään suoraan, tai erillisen ohjelmiston kautta mallinnusohjelmaan siivottavaksi ja edelleen muokattavaksi. Ohjelmiston avulla pistepilven pisteistä muodostetaan tiheä kolmio,- tai monikulmioverkko, joka yhdistää

yksittäiset pisteet yhtenäiseksi pinnaksi. Modernit 3D skannerit kopioivat alkuperäisen mallin muodot aina värejä ja pinnanlaatua myöten, jolloin mallintajan tehtäväksi jää määrittellä tarkkuuden ja valmistuksen kannalta olennaiset yksityiskohdat. Valmis pinta voidaan mallinnusohjelmassa pursottaa solidiksi malliksi ja jatkaa mallintamista manuaalisesti.

3D laserkeilausmenetelmää hyödynnetään paitsi yksittäisten komponenttien valmistuksessa, myös suurien tehtaiden ja tuotantolaitosten layoutsuunnittelussa. Tehtaan tuotannon skannaus ei vie kauaa aikaa ja esimerkiksi modernisoinnin suunnittelua varten saadaan reaaliaikaista tietoa mm. tuotantokappaleiden tai lastauslavojen sijoittumisesta tuotannon aikana, joka perinteisellä menetelmällä mallinnettaessa jäisi mahdollisesti huomioimatta.

Skannereiden mittatarkkuus on olennainen osa luotettavan skannaustiedon siirtoa mallinnusohjelmaan. Kansainvälinen laajasti käytössä oleva Geometrinen tuotemäärittelyn standardikokoelma (ISO GPS, Geometrical Product Specifications) määrittelee mm. valmistettavien kappaleiden geometriset mittatoleranssit sekä monia muita tuotemäärittelyyn liittyviä vaatimuksia. GPS kokoelman rinnalle on laadittu puhtaasti 3D tuotetietoihin perustuva tuotemäärittelyn menetelmä MBD (Model Based Definition), jonka käyttöönoton myötä 2D tietoon perustuva tuotemäärittely vähitellen poistuu kokonaan valmistavasta teollisuudesta. Laserskannereita koskevat tuotevaatimukset ovat määritelty standardissa SFS-EN ISO 10360–10:en. Näiden standardien vaatimustason perusteella esimerkiksi mielenkiintoiset nousevat trendit älypuhelinien 3D skannausapplikaatiot tai muut fotogrammetriaan perustuvat menetelmät eivät toistaiseksi täytä valmistavan teollisuuden standardien vaatimuksia mittatarkkuuden osalta vaikka menetelmiä jo käytetään esineiden digitaalisessa valmistamisessa. Käytännössä teollisuuden valintoja ovat erilaiset optiset taso-, varsi- ja käsivaraskannerit, joiden hinnat laskevat kaiken aikaa tarkkuuden kasvaessa. 3D skannereiden valmistajilla on käytäntö kalibroida mittalaitteensa yrityksen sisäisen standardin mukaisesti ja hyväksyttää tulokset kansallisilla sertifioiduilla standardointielimillä, jolloin ne saavat tuotteille myös kansainvälisen hyväksynnän. (METSTA. 2016)

Mallipohjainen tuotemäärittely on yrityksen moderni ratkaisu tuotetiedon hallintaan. Valmistettavasta tuotteesta ei tallenneta mitään dokumentaatiota teknisinä 2D kuvina,

vaan kaikki tarvittava tieto on sisällytetty tuotteen 3D malliin. Tarpeen mukaan mallista voidaan tulostaa raportteja sekä dokumentteja mm. tarjouskilpailua, komponentti- ja materiaalihankintaa, tai rakenteen lujuustarkastelua varten. Yrityksen MBD-valmiutta kuvataan kuusiportaisella asteikolla, jossa alimmalla portaalla kaikki tuotetieto on tallennettu teknisinä 2D-tiedostoina ja yrityksen ja alihankintaketjun osat ovat tuotedokumentoinnin osalta toisistaan irrallaan. Kehittyneimmällä tasolla kaikki tuotteeseen liittyvä tieto on liitetty 3D mallin yhteyteen, eikä muunlaista tuotedokumentaatiota sallita omassa eikä alihankintaketjun valmistusketjussa. (METSTA. 2016)

## 2.2 Akustinen tutkimus

Kitaroiden rakentamisen suosion kasvun myötä myös tutkimus on saanut tuulta alleen eri puolilla maailmaa. Samanaikaisesti kun eri soitinryhmien fysikaalista toimintaa ymmärretään yhä paremmin tarkentuneilla mittalaitteilla, on alettu ymmärtää myös soittajan sekä kuulijan psykofyysisiä ominaisuuksia, jotka aiheuttavat aiempaa käsitystä suuremman vaikutuksen ihmisen käsitykseen soittimen hyvyydestä tai huonoudesta.

Yleisölle sekä soittajille suunnatut sokkotestausmenetelmät, joita on järjestetty eri puolilla maailmaa mm. uusien ja vanhojen viulujen, tai kalliiden ja halpojen viulujen vertailemiseksi toteavat saman tuloksen; etteivät soittimen fysikaaliset värähtelyominaisuudet ole ainoa tekijä keskustelussa hyvistä tai huonoista instrumenteista. Sokkotestauksessa kuulija ja/tai soittaja arvioi soitinta ilman näköhavaintoa instrumenttiin, jolloin tutkimuksessa tarkoituksellisesti poissuljetaan henkilön ennakoasenteiden sekä soittimen ulkonäön vaikutus kuuntelukokemukseen. Tutkimustulokset ovat ravistelleet koko musiikkimaailmaa ympäri maailman, sillä maailman arvostetuimpien viulujen valmistajan Antonio Stradivarin ja modernien viulujen välille ei sokkoteisteissä ole pystytty tekemään eroa, eikä soittajat tai yleisö ole pystynyt erottamaan vanhaa soitinta uudesta pelkästään kuulokokemuksen perusteella (American Association for the Advancement of Science, 2017).

Kitaroiden akustinen tutkiminen on jakautunut pitkään akateemiseen mittaamiseen ja laskennallisiin tuloksiin pohjautuvaan-, sekä yritysten ja yksittäisten kitaravalmistajien kokemusperäiseen tutkimukseen. Akateemisten tutkimusten implementointi tuotteiden

valmistukseen ja laadun parantamiseen on osoittautunut usein käytännössä hyödyttömäksi tai tulkinta liian vaikeaksi, koska laskennallisten mallien avulla on hankala huomioida kaikkia muuttujia monimutkaisessa energiansiirtoketjussa. Suurilla yrityksillä on omat tutkimusyksikkönsä, jotka voivat tehokkaasti hyödyntää akateemisen tutkimuksen tuloksia ja soveltuvin osin hyödyntää tuloksia tuotteissaan. Pienten yritysten rajalliset resurssit eivät usein riitä räätälöimään akateemisten tutkimusten tuloksia yritystä hyödyntävään muotoon, vaan pitäydytään kyllin hyväksi havaituissa menetelmissä, joiden pohjalta nykyinen asiakaskunta on muodostunut.

Tästä muodostuu eräänlainen paradoksi, jossa suurilla yrityksillä on parhaat mahdollisuudet hyödyntää tutkimusta ja siten tuottaa parhaiten soivia instrumentteja, mutta se tarkoittaisi kitaroiden rakenteen oleellista heikentämistä kielen värähtelystä aiheutuvan energiansiirtoketjun optimoimiseksi. Tähän ei heillä kuitenkaan ole liiketaloudellisista syistä tarkoituksenmukaista pyrkimystä, sillä samalla se tarkoittaisi asiakaspalautusten kasvua niiden soitinten kohdalla, joiden heikompilaatuiset materiaalit eivät rakenteellisesti kestä optimoinnin vaikutuksia kielten vedosta aiheutuvaan rakenteelliseen kestävyYTEEN.

### **2.2.1 Akateeminen tutkimus**

Pitkäaikaisen kokemukseni pohjalta olen todennut, että suurimmassa osassa lukemiani kitaroita koskevia akateemisia tutkimuksia pohjalla on vahva tieteellisen tutkinnan teoreettinen viitekehys, jolloin fysikaalisia ilmiöitä esitetään ja mallinnetaan matemaattisesti. Värähtelevien kappaleiden, kuten ilmatilan resonanssitaajuuksien matemaattinen mallintaminen on kuitenkin käytännössä ongelmallista, koska malliin joudutaan tekemään sarja laskemista helpottavia olettamuksia. Eräs olettamuksista on rakenteen määrittely joustamattomaksi. Tällaisten olettamusten vuoksi linkki reaali maailmaan valitettavasti katkeaa ja laskennasta saatu hyöty ja vertailukelpoisuus käytännön tasolla ovat mitättömät. Soittimen joustavien rakenteiden vuoksi ilmatilan resonansseissa laskennallisia muuttujia on niin paljon, että kokeelliset tulokset tutkimuksen kohteena olevasta soittimesta poikkeavat niin paljon, ettei tuloksista juurikaan ole hyötyä.

Mikäli tutkimuksen tarkkuutta halutaan kasvattaa, matemaattisten mallien muuttujia on soittimen energiansiirtoketjussa huomioitava enemmän ja tämä tekee laskennasta raskasta. On siis varsin perusteltua, että asiaa lähestytään 3D mallin pohjalta, jolloin kitaran komponenttien ominaisuuksia sekä muuttujia voidaan tarkastella, muuttaa ja manipuloida kulloisenkin tarpeen mukaan ja tietokone laskee mm. jäykkyyden, massan tai materiaalin vaihdon aiheuttamat muutokset mallissa. Tietokonepohjainen tutkimus on toki myös laskennallisesti raskasta ja tutkimus on jokseenkin riippuvainen tehokkaista tietokoneista, eli tietokoneiden laskentatehon yleisesti kasvaessa, myös tutkimuksen avulla 3D malleista tulee entistä paremmin reaali maailmaa vastaavia.

Soitintutkimuksessa tarvitaan vielä paljon enemmän eri alojen yhteistyötä, jotta tutkimuskohteista saataisiin enemmän tietoa. Tarkkojen 3D mallien pohjalta signaaliprosessoinnin, insinööritiedon, soitinrakennuksen ja materiaalitutkimuksen yhdistelmällä tutkittavasta tiedosta jalostuu yhä käyttökelpoisempaa dataa, jonka perusteella voidaan rakentaa parempilaatuisia soittimia.

### **2.2.2 Simulointi**

Simuloinnissa olemassa olevasta tai kehitteillä olevasta järjestelmästä luodaan riittävän tarkka tietokonemalli, jonka käyttäytymistä voidaan tarkastella manipuloimalla sen eri muuttujia. Järjestelmän simuloinnilla pyritään saamaan tietoa eri muuttujien vaikutuksesta kokonaisuuteen ilman, että varsinaiseen järjestelmään tarvitsee fyysisesti tehdä muutoksia. Kitaran äänen simulointimalli poikkeaa vielä jokseenkin autenttisesta kitaran äänestä, mutta menetelmä on moderni tapa tuottaa vertailtavaa tietoa mm. eri rakenneratkaisujen vaikutuksesta äänenlaatuun. Tietokonemallista on mahdollista mitata esimerkiksi tallan kykyä johtaa äänen värähtelyjä kitaran muihin osiin. (Woodhouse, Manuel, Smith, Wheble, & Fritz, 2012). Kitaran äänen simuloinnilla voidaan ratkaista soittajan soittotyylin vaikutus soittonäytteeseen vertailevien kokeiden aikana. Leonardo Guitar Research Projectissa saatujen tulosten pohjalta havaittiin, että järjestettyjen kuuntelukokeiden suurin ongelma oli, ettei paraskaan soittaja kykene soittamaan soittonäytettä kahta kertaa samalla tavalla. Tämä aiheuttaa vaikeuksia soittonäytteiden vertailussa ja siten ongelmat heijastuvat tutkimustuloksiin.

Kitaran äänen simulointi asettaa myös materiaalitutkimukselle aivan uusia haasteita sillä järjestelmän simulointi on täsmälleen niin tarkka, kuin tietokonemalliin asetetut parametrit vastaavat materiaalin todellisia ominaisuuksia. Yleisesti tiedetään, ettei kitaroissa käytetyt puumateriaalit ole täsmällisen tasalaatuisia ja taitava kitaranrakentaja pystyy intuitionsa avulla säätämään rakennusprosessiaan siten, ettei materiaalin epätasalaatuisuus haittaa lopputulosta. Tutkimuksen ja simuloinnin toteuttamiseksi on kuitenkin tehtävä tiettyjä yleistyksiä ja keskityttävä tutkimaan vain sellaisia ennalta valittuja muuttujia, joiden on todettu vaikuttavan eniten kitaran äänen laatuun.

Kitaran äänen simuloinnilla ja rakenteellisella 3D-mallintamisella on selvä yhteys järjestelmätasolla ja tarvitaan lisää tiivistä yhteistyötä kitaranrakentajien, tutkijoiden sekä insinöörien välillä, jotta kitaran monimutkainen energiansiirtoketju ymmärretään täysin. Kun mukaan lisätään topologisen optimoinnin työkalut sekä ennakkoluulotonta asennetta, on mielestäni mahdollista synnyttää uusia tuotteita, jollaisia ei kitaramaailmassa ole vielä nähty. Toistaiseksi kitaran äänen simulointityökalut ovat olleet vain alan tutkijoiden käytössä, mutta vähitellen aihe on avautumassa myös kitaranrakennusyhteisölle.



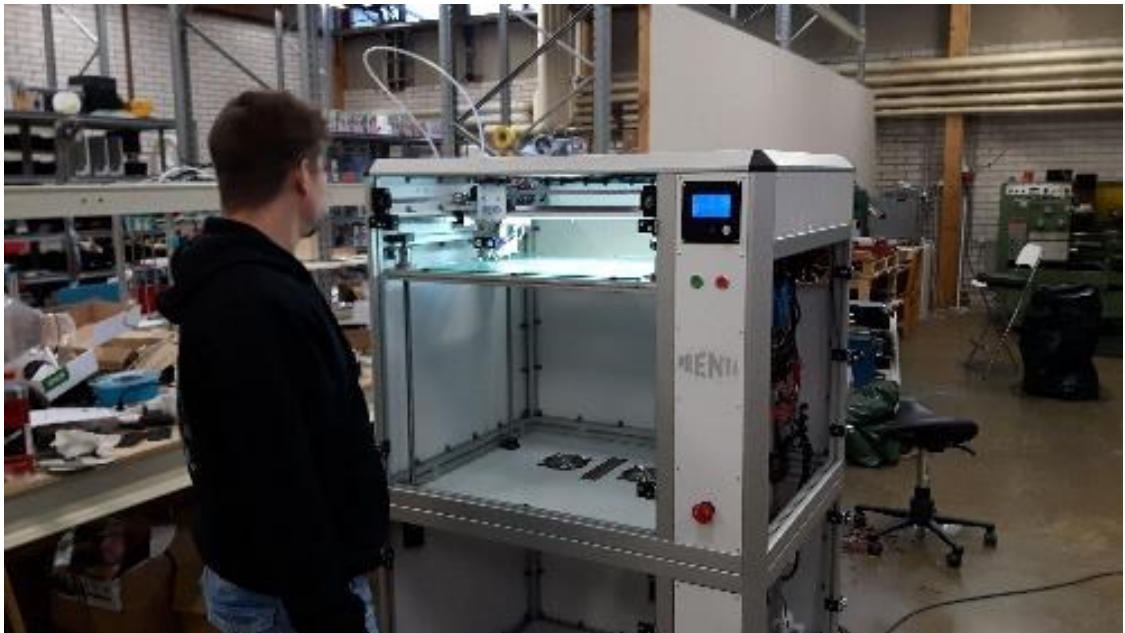
### 3 KITARAN VALMISTAMINEN TULOSTAMALLA

#### 3.1 Kitaran komponenttien valmistaminen

Projektin ensimmäisessä vaiheessa aiheeseen tutustuminen oli aloitettava yksinkertaisesta tulostettavasta tuotteesta, jolla voitiin arvioida tulostettujen komponenttien mittatarkkuutta, materiaalin ominaisuuksia sekä käyttäytymistä rakennusprosessin aikana. Yhdessä opinnäytetyön toimeksiantajan kanssa vertailimme mahdollisia vaihtoehtoja ja työstettäväksi valikoitui eräs maailman perinteisimmistä sähkökitaramalleista.

Tasan 70 vuotta sitten Fender Musical Instruments Corporation aloitti Yhdysvalloissa Kalifornian Fullertonissa Stratocaster -sähkökitaramallin sarjavalmistuksen. Tuotekehitysvaiheessa 1943 Leo Fender istutti valmistamansa mikrofonin suorakaiteen muotoiseen lankkuun, kiinnitti kaulan ja kielet, ja tietämättään osoitti kitaranvalmistuksen tiekartan vuosikymmeniksi eteenpäin. Oudonmuotoista, sittemmin vallankumoukselliseksi osoittautunutta kitaraa kutsuttiin nimellä The Log – lankku. Suuren yleisön vakuuttamiseksi lankkuun kiinnitettiin myös kaarevat kylkipalat, jotta soitin näyttäisi enemmän perinteiseltä kitaralta.

Toteutimme periaatteessa saman idean SASKY –koulutuskuntayhtymän Ikaalisten käsi- ja taideteollisuusoppilaitoksen (IKATA) Kitaranrakennusosaston silloisen oetetuksessani olleen opiskeluryhmän opiskelijatyönä. Mallinsin alkuperäisten Fullertonin tehtaan piirustusten pohjalta Stratocaster -sähkökitaran. Mallinnoksen pohjalta toimeksiantajayritys Prenta Oy tulosti rungon sekä muut muovikomponentit PLA filamentista, jonka ominaisuudet arvelimme parhaiten vastaavan käyttötarkoitusta. Koska menetelmä sekä materiaalin käyttäytyminen oli vielä tässä vaiheessa uutta, jouduin muokkaamaan alkuperäistä mallia siten, että kaikki rasituksenalaiset komponentit kiinnitettäisiin perinteisiin puukomponentteihin.



KUVA 2. Soittimien osat tulostettiin Prenta OY:n tuotantotiloissa Kangasalla

Kitaranrakennusosaston oppilaiden kanssa istutimme tulostettuun runkoon lankun, kaulan ja muut osat – aivan kuten Leo Fender aikoinaan teki. Kitara pintakäsiteltiin alkuperäisen mallin mukaisesti auto/huonekaluteollisuuden pintakäsittelyaineilla, ja väriksi valikoitui alkuperäisten mallien mukaisesti Ford Fairlane 1954 -vuosimallin Fiesta Red. Sähkökitaran kokonaispainoksi mittasin noin 2600 g, joka vastaa hyvin vastaavien perinteisellä menetelmällä valmistettujen puisten sähkökitaramallien kokonaispainoa. Modernin valmistusmenetelmää korostamaan kitaraan asennettiin viritinautomaatiojärjestelmä, jonka anturi mittaa värähtelevän kielen ominaistajuutta, vertaa sitä esiasetusarvoon ja mikroservomoottori säättää kielen kireyden haluttuun vireeseen. Kitara julkaistiin näyttävästi Nordic 3D 2016 -messuilla Espoossa sekä saman vuoden Suomi Areenan Robottiikkalavalla.



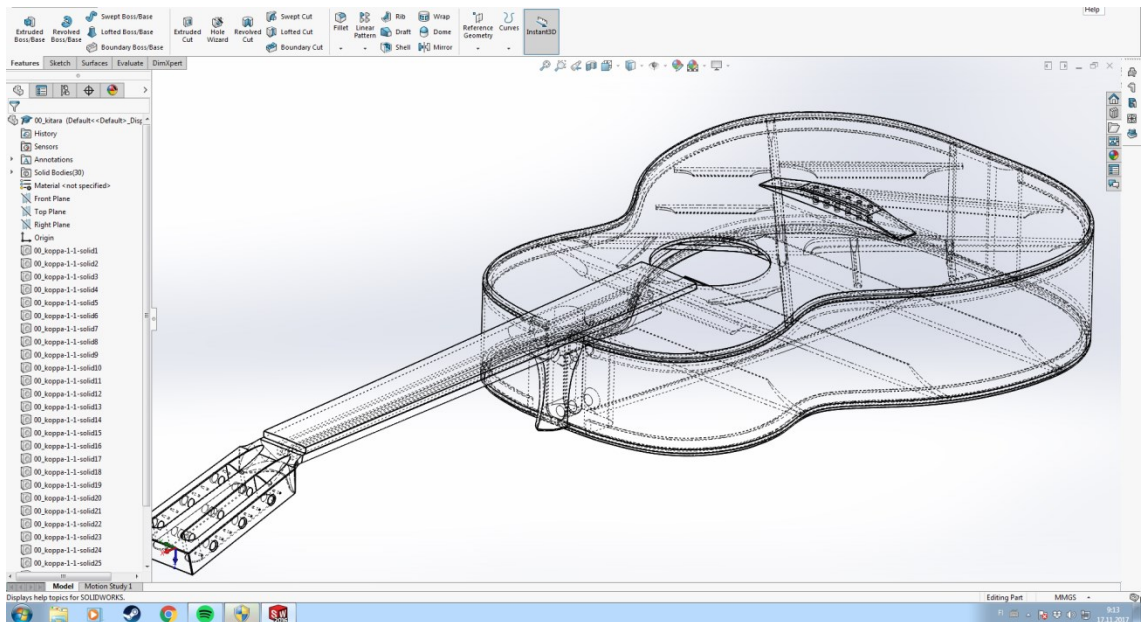
KUVA 3. Stratocaster –kitaramallin rungon komponentit tulostettuna

Komponenttien valmistusmenetelmä sekä onnistunut lopputulos rohkaisi miettimään seuraavaa kehitysaskelta, jossa tulostetuille komponenteille jakaantuisi enemmän kielten vedosta aiheutuvaa rasitusta, ja siten paremmin vastaisi todellista käyttötilannetta. Luonnollinen seuraava askel oli tulostaa kokonainen akustinen kitara.

### 3.1.1 Mallintaminen

Mallintaminen tarkoittaa valmistettavan tuotteen digitaalisen kaksoiskappaleen luomista ohjelmiston avulla, jota tarkastelemalla voidaan todentaa komponenttien mitoituksia sekä kokoonpanojen toiminnallisia yksityiskohtia ilman, että fyysisistä tuotteita tarvitsee ensin valmistaa. Digitaalinen versio on myös oltava olemassa, jotta komponentteja voidaan valmistaa laser, vesileikkuu tai CNC työskeskuksesta. Myös teollisuuden robottisolu-, sekä muu automaattinen valmistusjärjestelmä tarvitsee digitaalista informaatiota tuotteesta toimiakseen.

Tuotetietoa on valmistavassa teollisuudessa tallennettu sitkeästi teknisten 2D piirrustusten muodossa, vaikka mallinnusohjelmistoja on aktiivisesti käytetty parin vuosikymmenen ajan. Standardien vakiinnuttua suurteollisuuden, kuten lentokone- ja autoteollisuuden perässä 3D tuotedokumentaatioon siirtyy vähitellen myös muu valmistava teollisuus. Modernissa tuotanto-organisaatiossa ja sen alihankintayrityksissä 3D tuotedokumentaatio läpi leikkaa koko tuotannon prosessit, arvoketjun sekä tuotteen elinkaaren aina tarjouslaskennasta tuotteen kierrätykseen saakka. Teollisuuden tuotekehitys vaatii tuotteilta yhä nopeampaa siirtymää markkinoille, joten mallintamisen ohessa myös tuotteiden toiminnallisuuden simuloiminen jo ennen kuin yhtään komponenttia on valmistettu, on noussut merkittävään rooliin.



KUVA 4. Mallinnettu kokoonpanokuva tulostettavasta kitarasta

Kitaran kokoonpanon ja osien mallintamisesta vastasi IKATA:n Kitaranrakennusosastolle opinnäytetyönsä aiheesta tehnyt Santeri Halminen. Mallia jouduttiin muokkaamaan alkuperäisestä tulostusteknisten syiden takia hieman, mutta tavoitteena oli pitäytyä mahdollisimman lähellä alkuperäistä mallia, kuin mahdollista, jotta lopullista tulostettua tuotetta olisi mahdollista verrata vastaaviin perinteisellä menetelmällä valmistettuihin kitaroihin.

### 3.1.2 Tulostaminen

Materiaalia lisäävä valmistus on yhteinen nimitys menetelmille, joilla fyysinen kappale valmistetaan geometriakuvauksen perusteella ainetta lisäävillä tekniikoilla. Näitä menetelmiä käytetään laajasti eri sovelluksissa teknologiateollisuudessa, mutta myös yhteiskunnan muilla sektoreilla kuten lääketieteessä, koulutuksessa, arkkitehtuurissa, kartografiassa sekä lelu- ja viihdeteollisuudessa. (SFS-EN ISO/ASTM 52900:2017)

Tuotteen valmistaminen aloitetaan luomalla tuotteesta mittatarkka 3D malli. Ohjelman avulla malli viipaloidaan n. 0.02 – 0.10 mm. ohuiksi kerroksiksi, jolloin yksi viipale vastaa yhtä tulostuskerrosta. Tulostaminen tapahtuu kerros kerrokselta ainetta lisäävän tulostuspään pursottaessa sulaa tulosteainetta edellisen kerroksen päälle, jolloin kolmiulotteinen tuote rakentuu kokonaisuudeksi yhteen sulautuneista materiaalikerroksista. Tulostinaine syötetään tulostinpäähän kelalta, jolloin tulostamisprosessi on keskeytymätön koko tuotteen valmistuksen ajan. Olennaista tuotteen hyvälle tulostukselle on uuden ainekerroksen hyvä kiinnittyminen edelliseen kerrokseen.

Kitaran rungon suuren koon vuoksi päädyimme tulostamaan ja kokoamaan sen erillisistä osista, jolloin esimerkiksi kannen ja pohjan väliin jäävää tyhjää tilaa ei tarvitsisi täyttää tulostettaessa tukimateriaalilla. Suuren tyhjän tilan täyttäminen tukimateriaalilla on oleellista tulostettaessa ns. tyhjän päälle, jotta tarkkuus tulostusprosessissa voidaan säilyttää. Suuren pinta-alan tulostamisessa on myös tulostusmateriaalin jäähtymisen aiheuttama kylmäliitosongelma, sillä materiaalin kiinnittyminen edelliseen tulostuskerrokseen vaatii sen, ettei edellinen kerros ole vielä täysin ehtinyt jäähtyä ja lujittua lopulliseen kovuuteensa, jotta uusi kerros tarttuisi siihen mahdollisimman hyvin. Useimmiten on järkevää ylläpitää sopivaa lämmitystä tulostimen tulostusalueella, jolloin tuloste ei pääse liiaksi jäähtymään tulostamisen aikana.

Näistä seikoista johtuen oli siis perusteltua koota runko erillisistä osista, vaikka tulostimen koon puolesta kitaran rungon yhtenä kappaleena tulostaminen olisi ollutkin teknisesti mahdollista.



KUVA 5. Tulostaminen alkaa



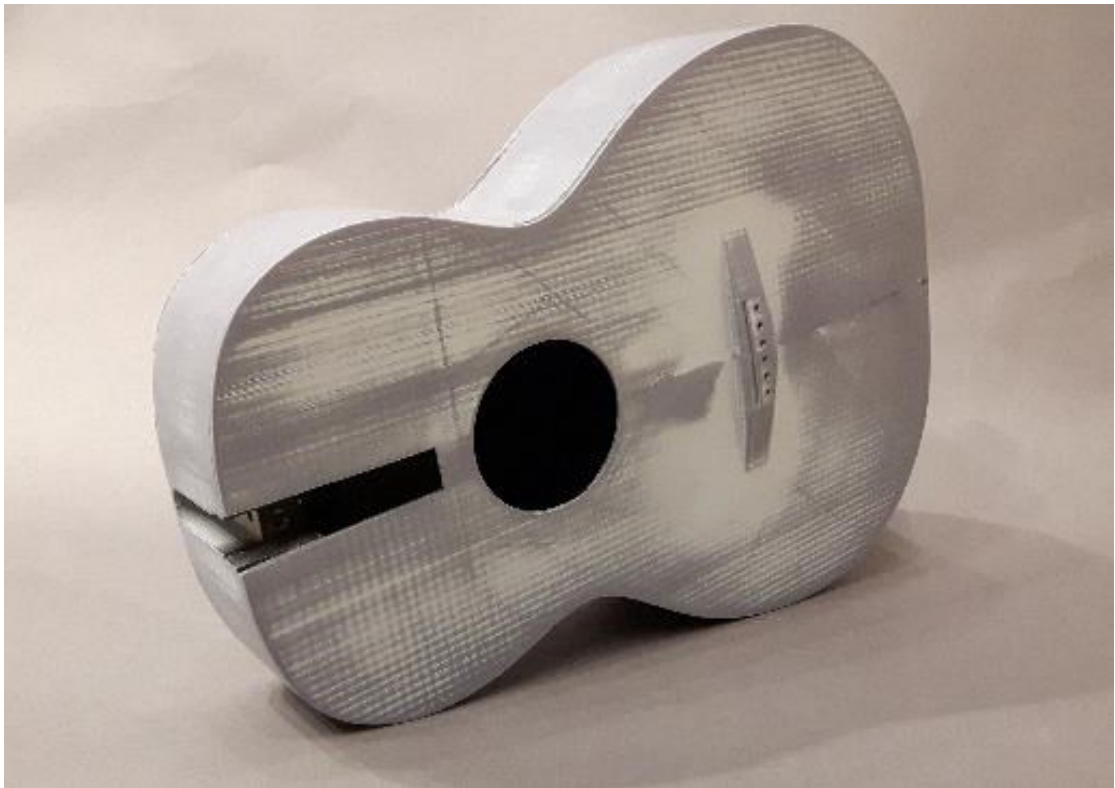
KUVA 6. Tulostettuja komponentteja verrataan alkuperäiseen työpiirustukseen



### 3.2 Kitaran kokoonpano

Kitaran kokoonpanossa oli erillisiä tulostettuja komponentteja, jotka liitettiin yhteen joko liimaliitoksella välittömästi tulostamisen jälkeen tai vasta pulttikiinnityksellä pintakäsittelyjen jälkeen. Liimaliitosten lujuutta testattiin eri valmistajien liimoilla ja testitulosten perusteella valittiin käyttökohteeseen parhaiten soveltuva liima. Olennainen havainto komponenttien liimaamisessa yhteen oli, että varsinainen liimaliitos on lopulta vahvempi, kuin tulostettavan komponentin murtolujuusominaisuudet. Ominaisuuksia testattiin komponentteja käsin taivutteleamalla.

Kerroksellinen tulostaminen luo tuotteen rakenteeseen tulostussuuntaisia pitkittäisiä ns. syykuvioita, joita myöten rakenne on rasituksen alaisuudessa taipuvainen rikkoontumaan. Lopullisessa tuotteessa tällaisia rasituksia ei tarvitse huomioida, mutta rakenteen tutkiminen rikkomalla lisää usein ymmärrystä sen käyttäytymisestä rasituksen alaisuudessa.



KUVA 7. Erillisistä komponenteista kasattu rungon osakokoonpano

### 3.2.1 Komponenttien liittäminen

Paras menetelmä tulostettujen komponenttien liittämiseen toisiinsa liimaliitoksella oli kokeiden perusteella käyttää Würthin pikaliimaa sekä aktivaattoria. Suurin osa liittämiseen käytetystä ajasta kuluu komponenttien sekä liimausasetuksen valmisteluun, jolloin itse liimaaminen on nopeaa ja tulos paras mahdollinen. Komponenttien tarkka kohdistaminen toisiinsa sekä kunnollisen liimauksen onnistuminen kerralla, oli erityisen tärkeää, sillä uuden komponentin tulostaminen pilalle menneen tilalle olisi aina kestänyt n. 8 tuntia.

Komponenttien sekä kokoonpanojen jatkokäsittelyn kannalta oli myös tärkeää, että liimasaumat ovat mahdollisimman tarkasti tehty, sillä mitä enemmän korjattavaa pintakäsittelijällä on pinnan epätasaisuuksien johdosta, sitä enemmän työtä sekä tasoitemateriaalia joudutaan lisäämään tasaisen ja laadukkaan lopputuloksen saavuttamiseksi. Kitaran kohdalla kaikenlainen materiaalin lisääminen rakenteisiin luonnollisesti lisää kitaran massaa, ja näinollen vähentää sen värähtelyherkkyyttä ja heikentää laadukasta sointia.



KUVA 8. Otelauta valmiina liitettäväksi tulostettuun kaulaan



### 3.2.2 Pintakäsittelyt

Soittimen laadukas pintakäsittely ei eroa auton komponenttien teollisesta pintakäsittelystä oikeastaan muulla tavoin, kuin että loppuvaiheessa on maali sekä lakkakerrosten ruiskutuksen jälkeen vielä suoritettava oikaisuhionta sekä loppukiilloitus. Käytännössä tulostamisen jäljiltä pinnan urat on kitattava umpeen, hiottava sekä pohjamaalattava niin moneen kertaan, että savutetaan pintamaaleille mahdollisimman tasainen pinta. Pintamaalien päälle on ruiskutettava kiiltävä pintakerroslakka, jolloin myös sävykerrokset tulevat parhaiten esiin.

Mahdollisimman näyttävän lopputuloksen varmistamiseksi otin yhteyttä Koulutuskeskus Salpauksessa autoalan pintakäsittelykoulutuksen opettajana työskentelevään Jari Välkkyeseen joka toimii myös Pintakilta -digitaalisen oppimisympäristöverkoston käynnistäjänä. Kitaran pintakäsittely suoritettiin suurelta osin oppilasprojektina, jolloin mahdollisimman monella opiskelijalla oli mahdollista seurata projektin etenemistä ja oppia jatkuvasti lisääntyvän tulostusteknologian erityispiirteistä pintakäsittelyn suhteen.

Jari Välkkyinen kuvaa 3D tulostetun kitaran pintakäsittelyprosessin vaiheita ja oppimisprosessia seuraavassa teksti- ja kuvasarjassa:

Uudet menetelmät vaativat aina avarakatseista lähestymistapaa. 3D-tulosteet ovat tulleet oppilaitoksiin ensin lähinnä teknisen piirtämisen apu- ja motivointivälineiksi mutta nopeasti uudella menetelmällä on aloitettu vaikeasti saatavien osien, mm. Autojen erilaisten merkkien ja listojen mallinnus.

Pohjustustyöt: Aluksi kappale puhdistettiin liuotinhenteisellä pesuliuksella, jonka jälkeen muovipohjuste ruiskutettiin kappaleen pintaan. Muovipohjusteen jälkeen kappaleeseen ruiskutettiin välitäyteväri kittaustöitä varten. Välitäyteväri hiottiin P240 hiomapaperilla. Mittavat kittaustyöt suoritettiin ensin lasikuituvahvisteisella kitillä, jonka jälkeen jatkettiin hienokittausta polyesterikitillä. Hiomakarkeudet vaihtelivat tässä vaiheessa P180-P240. Tämän jälkeen kappaleeseen ruiskutettiin hiomaväri, kappale hiottiin ja siihen ruiskutettiin suorakiiltomaali (akryyli).

Havaitsimme heti puhdistusvaiheessa, että kappaleen materiaali on huokoista ja alkoholipohjaisen puhdistusnesteen haihtuminen kesti kauemmin kuin vastaavien muovien haihdutusaika keskimäärin.

Ensimmäinen hionta tehtiin hiomahuovalla (punaruskea, karkea) muovipohjusteen tartunnan varmistamiseksi pesun jälkeen. Muovitartuntamaali on erittäin paljon nopeasti haihtuvia orgaanisia liuotteita sisältävää ja sen tehtävänä on poistaa pintakerroksesta muovin rakenteessa olevat polymeerit (ts. rasvaisuus)

Tartuntamaalin ohenne omalta osaltaan liuottaa ja pehmentää pintaa hieman, luoden näin pintaan seuraavan pinnoitteen tarttuvuudelle soveltuvan alustan. Tässä työvaiheessa on tärkeätä pitää riittävä haihdutustauko ennen seuraavan pinnan ruiskuttamista, mutta myös toisaalta pitää huoli siitä, että muovin pintaan ei ala kertyä uudestaan polymeerejä (rasvaisuutta).

Välitäytevärin tehtävänä on toimia pohjustemaalina ja eristeenä ennen kittausta. Tämä vaihe tehdään ns. Märkää märälle-menetelmällä suoraan muovitartuntamaalin päälle. Kun välitäyteväri on kuivunut, se hiotaan P240 hiomapaperilla tartunnan varmistamiseksi. Tämän jälkeen aloitettiin normaalit pohjustetyöt. Kun pinta oli saatu halutunlaiseksi ja silmämääräisesti suoristetuksi, oli vuorossa hionta 100-karkeusasteen välein aina P800 paperiin asti. Seuraavaksi kappale maalattiin Spies Heckerin automaalilinjaston 2-K suorakiiltomaalilla (sideaineena akryyli/polyuretaani).

CosmiChrome-menetelmä: Alunperin kitaraan oli tarkoitus tehdä ruiskukromausta eli hopeapinnoite, jonka lakkausvaiheessa lisätään hieman sinistä sävyä lakan sekaan, jolloin pinta näyttää lähes erehdyttävästi kromipinnoitteelta. Ruiskukromausta on esineiden ja erilaisten auton osien pinnoitusmenetelmänä alati kehittyvä, sen kehittäminen ja tutkiminen alkoivat Pintakillassa vuonna 2007 (itse menetelmää on kehitetty 2000-luvun alusta lähtien). (<https://goldtouchinc.com/> 11.12.2017)

Kohtaamme ongelmia 3D-tulostettujen osien kanssa: CosmiChrome-menetelmään kuuluu ns. Plasmakäsittely primerin ruiskuttamisen ja kuivaamisen jälkeen. Tämä tarkoittaa käytännössä kaasuliekillä pyyhkäisyä osan joka kohtaan. PLA-muovi kutistuu hyvin herkästi liiallisesta lämmöstä, joten plasmakäsittely osana CC-prosessia sai kitaran rungon pinnan poimuilemaan. Myös tulostuksen pintakerrosten välinen kennorakenne tuli näkyviin ja jouduimme lopettamaan käsittelyn, koska hopeapinnoite olisi peilannut esiin tulleet pinnan muutokset selkeästi näkyviin. Aloitimme pohjustetyöt uudelleen kittamalla kitaran rungon yli kokonaan.

Rungon maalaus: Päädyimme erikoismaalauksen tekemiseen kitaran runkoon. Keskustelutuamme aiheesta päädyimme Art Deco-tyyliseen maalauskaavioon. Kitaran runko maalattiin pohjustetöiden jälkeen kirkkaalla hopeamaalilla. Hopeamaalin alareunaan tehtiin kuultavalla automaalilla häivytyks, jonka jälkeen runko lakattiin akryylimaalilla. Akryylimaaali hiottiin P800 ja P1000 karkeuksilla ennen raidoituksen teippaamista. (Välkkynen 2017)



KUVA 9. Runko hiottuna P800 karkeudella. (Jari Väykkynen)



KUVA 10. Malliksi tulostettiin Art Deco tyyliä raidoituksia. Käsitelimme ensin raidoitukset Corel Photopaint-ohjelmassa. (Jari Väykkynen)

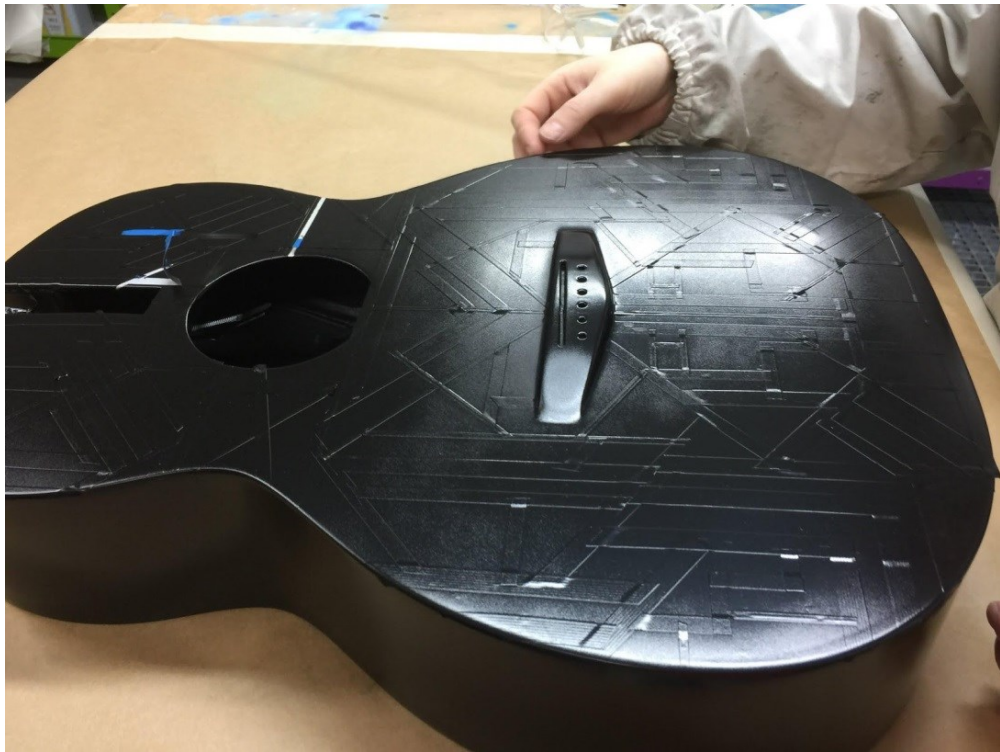


KUVA 11. Nelli Majamaa, opiskelijamme teippasi raidoituskuvion kitaran runkoon.  
(Jari Väikkynen)

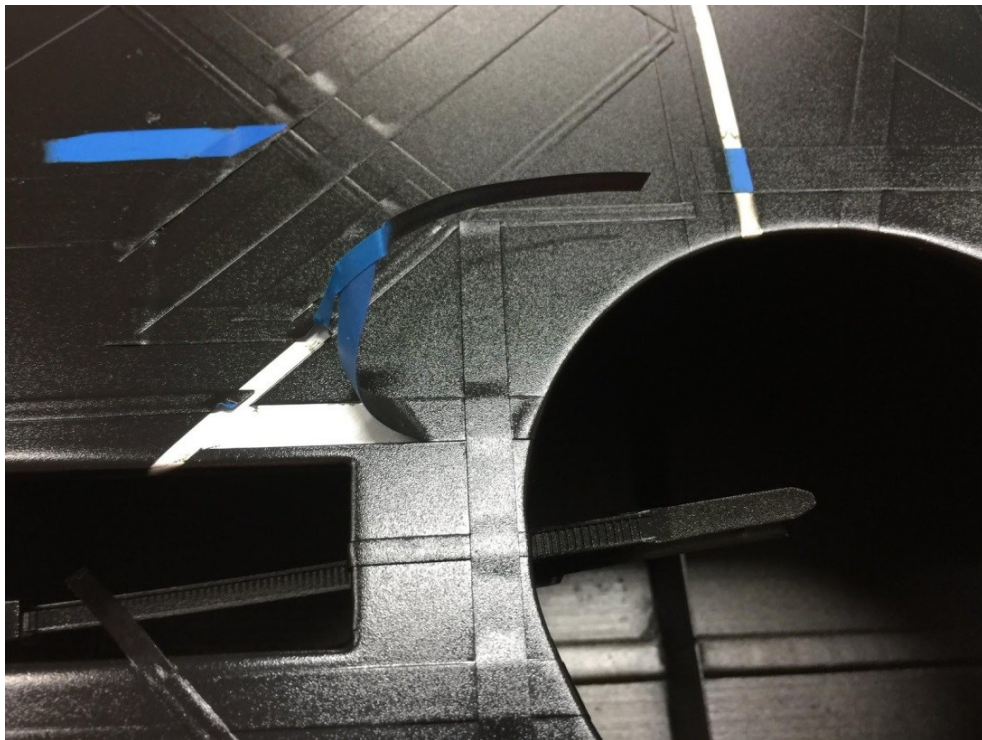


KUVA 12. Kitaran raidoitusmalli valmiina pinnoitusta varten. (Jari Väikkynen)

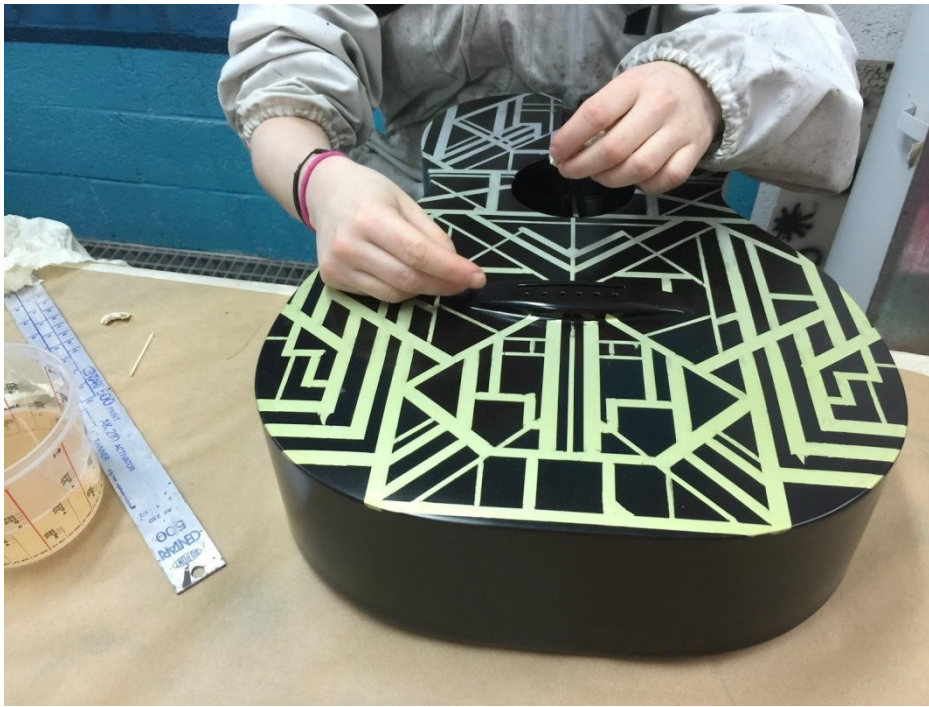




KUVA 13. Kitaraan ruiskutettiin musta, vesiohenteinen automaali. (Jari Väykkynen)



KUVA 14. Teippien poisto, huomaa “vuotaneet kohdat” jotka opiskelija puhdistaa suurta huolellisuutta käyttäen puutikulla ja ohenteella. (Jari Väykkynen)



KUVA 15. Seuraavaksi kitaran runkoon ruiskutetaan kuultoväriä reunoille. Raidoitustyylillä peittää myös tulevaisuudessa 3D-tulosteiden rajat, jos materiaaleihin tulee esim. Lämmönvaihtelusta johtuvia fyysisiä muutoksia. (Jari Väykkynen)

### 3.2.3 Osakokoonpano

Tulostetut ja pintakäsitellyt komponentit pitää liittää toisiinsa tukevasti, jotta kokonaisuus kestä kielten aiheuttaman rasituksen. Kiinnitysmenetelmä sekä käytettävien komponenttien mitoitus on jo mallinnusvaiheessa määritelty, jolloin kokoonpanon aikana ei jouduttaisi liikaa käyttää aikaa asetteluun. Kuitenkin komponenttien liittämisen sekä pintakäsittelyn myötä joidenkin komponenttien toisiinsa sovitettujen mittojen mittatarkkuus oli muuttunut ja kokoonpanovaiheessa jouduttiin asettelemaan ja sovittamaan osia eri menetelmin toisiinsa.

Pintakäsittelyprosessin aikana on tavallista kiihdyttää pintakäsittelyaineiden kuivumista jälkilämmittämällä komponentteja. Autojen muoviosien pintakäsittelyprosessiin olennaisesti kuuluva työvaihe kuitenkin aiheutti tulostetun PLA –muovin muodonmuutoksen alueelle, jossa kitaran kaula kiinnittyy runkoon. Muodonmuutos oli siksi kiusallinen ilmiö, että se aiheutti ongelmia kaulan kiinnitysreikien

yhteensovitukselle sekä kaulakulman asettumiselle automaattisesti mallinnuksen mukaisesti oikeaksi.

### 3.2.4 Viimeistely

3D tulostetun kitaran viimeistelyvaiheet eivät varsinaisesti poikkea millään tavoin puusta valmistettujen kitaroiden viimeistelyprosessista. Tavoitteena on saada kitara mahdollisimman hyväksi soittotuntumaltaan sekä vireisyydeltään, jotta soittajan ei tarvitse mukauttaa omaa soittotyyliään totutusta, vaan voi keskittyä itse musiikkiin. Erityishuomiota kuitenkin oli kiinnitettävä kitaran rasituksenalaisiin komponenttien käyttäytymiseen kielten vedon aiheuttamassa jännitystilassa, sillä tulostusmateriaalin käyttäytyminen poikkeaa näiltä osin puun käyttäytymisestä.

Kaulaan kohdistuva jännitys on soittotuntumaan oleellisesti vaikuttava seikka. Kielet pyrkivät vääntämään kaulaa vedon suuntaan, jolloin kielet nousevat kauemmaksi otelaudasta hankaloittaen soittotuntumaa. Tulostusmateriaalin ominaisuuksien ennakointi aiheutti suunnitteluvaiheessa kaulaan lisävahvistuksen tarpeen sillä kaulan vääntyminen yhdistettynä muovin virumisilmiöön seurauksena olisi ollut kaulan plastinen muodonmuutos, joka olisi tehnyt kielten vedossa kaulasta käyttökelvottoman. Tätä riskiä ei kannattanut ottaa. Kaulan sisään asennetut hiilikuitujäykisteet sekä kaulan suoruutta ohjaava säädettävä kaularauta varmistivat kaulaan riittävän vastavoiman kielten vedolle ja kaula pysyi suorana kielten vedon vaikutuksen alaisena.

Pintakäsittelyn seurauksena osa rei'istä oli täytynyt eri vaiheiden pintakäsittelyaineista ja reikien mittatarkkuus piti palauttaa avartamalla ja senkata reiät niihin asennettavien komponenttien mukaisiksi. Toimenpide ei ole poikkeuksellinen puukitaroiden valmistuksessakaan, vaan on osa huolellista viimeistelyä. 3D tulostettuun kitaraan oli kaikki reiät mallinnettava jo valmiiksi, koska tulostusmäärityksissä oli mahdollista asettaa lisävahvistus reiän ympärille, jotta tavalliset puukierreruuvit saavat riittävän pidon tulostusmateriaalista. Materiaalin ominaisuuksista johtuen on erittäin tärkeää mitoittaa ruuville oikeankokoinen reikä, sillä tuloste ei anna kiinni ruuvattaessa juuri lainkaan periksi ruuvien kierteiden alla ja vaarana on tulostetun kappaleen halkeaminen.





KUVA 16. Valmis kitara



## 4 KITARAN VERTAILEVA TUTKIMINEN

### 4.1 Kitaran akustiset mittaukset

Mittausmenetelmän kehittämisen perustana voidaan pitää Erik Janssonin Acoustics for the guitarmaker, Function, Construction and Quality of the guitar, jossa esitellään seikkaperäisesti kitaran äänenmuodostuksen rakenne ja siihen olennaisesti vaikuttavat kitaran komponentit. Kokemuksellisesti voidaan tutkimuksessa todetuista kitaran resonansseista poimia kaikkein olennaisimmat ja keskittyä tutkimaan vain niitä ja pyrkiä yksinkertaistamaan prosessia siten, että menetelmä voidaan käyttöönottaa tavallisissa verstaolosuhteissa. Menetelmän kummisetänä on alusta alkaen toiminut Soitinrakentajamestari Ari-Pekka Paasonen Jyväskylästä, jonka kanssa käytyjen keskustelujen myötä menetelmä on toteutunut tässä tutkimuksessa esitellyllä tavalla. Mittausmenetelmää yksinkertaistamalla myös menetelmän toistettavuus korostuu, jolloin eri puolilla maailmaa rakennettujen soitinten vertailukelpoisuus helpottuu.

Tutkittavien komponenttien ominaisresonanssien tulisi Paasonen mukaan osua sopiville etäisyyksille toisistaan, jotta soittimen soinnista tulisi tasapainoinen ja dynaaminen. Tämän lisäksi on myös joukko muita valmistusteknisiä muuttujia, jotka vaikuttaa soittimen lopulliseen laadukkuuteen. Liitetiedoston resonanssitaulukoinnissa on huomioitu Paasonen ehdottamat 00 –kokoisen kitaran ominaisresonanssialueet kullekin komponentille.

Jotta tulostettua kitaraa voidaan luotettavasti verrata vastaaviin perinteisillä valmistustekniikoilla valmistettuihin kitaroihin, on tutkittava kaikkien kitaroiden ominaisuuksia samalla menetelmällä. Akustisten mittausten vertailuaineisto pohjautuu kansainväliseen kitaratutkimushanke Leonardo Guitar Research Projektiin ja sen Ikaalisten käsi- ja taideteollisuusoppilaitoksessa valmistettujen kitaroiden mittaustuloksiin. Jokainen Projektiin osallistunut oppilas rakensi kaksi saman työpiirustuksen mukaan valmistettua kitaraa, toisen trooppisista puusta-, sekä toisen ei trooppisesta puusta. Sama menetelmä toteutettiin myös muissa LGRP osallistuneessa eurooppalaisissa kitaranrakennuskoulussa; CMB Puursissa Belgiassa and Newark Collegessa Isossa Britanniassa. Valmistuttuaan kitarat testattiin ammattikitaristeilla monivaiheisella sokkotestausmenetelmällä, jotta saataisiin tietoa, kuinka käytetyt

puulajit vaikuttavat soittajan kokemukseen sekä arviointiin vaihtoehtoisista puista valmistettujen kitaroiden soundista.



KUVA 17. Tutkimuksessa mukanaolleet kitarat Leonardo Guitar Research Projektin päätöstapahtumassa Belgiassa. (Kuva: Jacky Walraet, 2016)

Tutkimuksen tavoitteena on ollut laatia yksinkertainen menetelmä, jolla kitaroiden komponenttien perussäveltaajuuksia voidaan tutkia ilman kalliita laitteistoja. Menetelmän avulla saadaan olennaista tietoa kitaran fysikaalisista värähtelyominaisuuksista. Tämän tiedon avulla saavutetaan syvempää ymmärrystä soittimen käyttäytymisestä joka parantaa rakentajan työprosessia ja tasapainottaa tuotteiden laatua. Muuttujien suuren määrän vuoksi tätä tutkimusta ei voida pitää varsinaisena tieteellisen tutkimuksen menetelmänä, mutta se on kenen tahansa toistettavissa ja sitä voidaan käyttää kitaranvalmistajan modernina työkaluna, jolla tavoitellaan tuotteiden laadun jatkuvaa parantamista.

Kaikki tutkimuksessa käytetyt välineet on helposti saatavilla ja ladattavissa ilmaisista lähteistä ja menetelmä on helposti sovitettavissa jokaiseen verstaaseen. Tämä on erittäin tärkeää, sillä hankalat testausmenetelmät ja kalliit laitteistot eivät ole aiemmin olleet pienyrittäjille helposti saatavilla eikä laitteistoja kannata sijoittaa pölyisiin ja ahtaisiin

työtiloihin ja siksi usein testaaminen ja dokumentointi laiminlyödään. Tämä tutkimus on pääosin toteutettu kannettavan tietokoneen, Android -älypuhelimien sekä keittiövaajan avulla.

Tässä tutkimuksessa keskityn kitaran kustakin komponentista löytyvän perustaajuuden mittaamiseen, joiden monimutkaisen keskinäisen vaikutuksen ansiosta kitaran muiden komponenttien kanssa syntyvät kitaran äänen olennaisimmat luonteenpiirteet. Kunkin komponentin perustaajuutta seuraa sarja taajuuskerrannaisia, joiden riippuvuus perustaajuudesta sekä takaisinkytkennästä kitaran muiden komponenttien kanssa tekee kokonaisuudesta erittäin vaikeasti mitattavan, eikä näinollen taajuuskerrannaisten tutkiminen tai manipulointi ole lopputuloksen kannalta mielekästä. Mikäli kitarassa ilmenee soitettavan sävelen kohdalla nk. taajuuksien kertaantuminen eli interferenssi, voi olla hyödyllistä kartoittaa kitaran komponenttien taajuudet tarkemmin jotta interferenssin vaikutus voidaan poistaa. Kokenut rakentaja ratkaisee ongelman säätämällä kyseisellä taajuudella värähtelevän komponentin massaa, jolloin ongelmanaiheuttajan resonanssi siirtyy juuri sen verran, ettei interferenssiä enää synny.

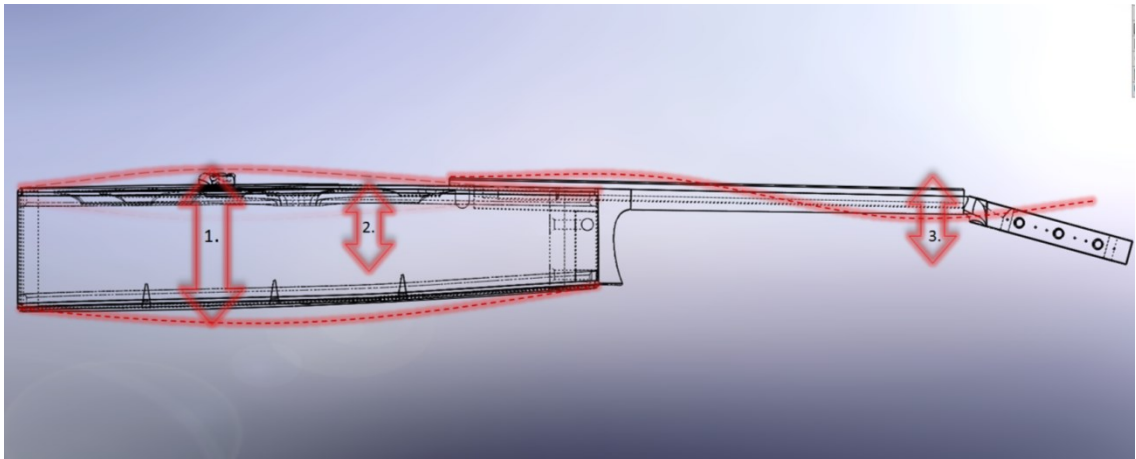
Tässä tutkimuksessa ei ole mielekästä laittaa kitaroita mihinkään tiettyyn arvojärjestykseen, vaan pikemminkin yrittää ymmärtää onko tutkimuksen avulla saatavan datan, sekä kuulohavainnointiin perustuvan tiedon välillä konkreettista yhteyttä. Tutkimuksessa todennetaan, ovatko kitaroiden perustaajuudet niiden oletetuilla paikoillaan ja onko komponenttien perustaajuuksien suhde sopiva toisiinsa nähden.

Aloittelevan rakentajan on usein vaikea säätää kitaranrakennusprosessiaan etukäteen siten, että resonanssit asettautuisivat oikeille paikoilleen. Tällöin on hyvä jos rakennusprosessista on olemassa mitattavaa dataa, johon tarpeen vaatiessa voidaan palata. Kun ensin on määriteltä hyvä tai erinomaisen kitaran perusresonanssien sijoittautuminen taajuusasteikolle, voidaan myös meneillään olevaa rakennusprosessia säätää siten, että myös aloittelevan kitaranrakentajan tuotteen lopputulos vastaisi hyvän tai erinomaisen kitaran reseptiä.

Tällä tutkimuksella rohkaisen samalla kitaranrakentajia sekä kitaranrakennuksen opiskelijoita keräämään yksinkertaista mitattavaa dataa rakentamistaan soittimista. Yksinkertaisten mittausrutiinien avulla rakentajan on mahdollista kasvattaa tuotteidensa laadullista tasoa erittäin hyvästä erinomaiseksi.

#### 4.1.1 Kitaran perusresonanssien mittaaminen

Mikäli kitaran valmistuksessa on käytetty laadukkaita materiaaleja, sekä kitaran valmistusprosessi on huolellinen, voidaan tehdä johtopäätös että kitaran eri komponenttien perusresonanssit asettuvat tietyille taajuusalueille. Taajuusalueet riippuvat pääosin kitaran mallista ja fyysisestä koosta. Resonanssien sijoittumisesta sekä niiden suhteesta toisiinsa voidaan myös päätellä potentiaalisia rakenteellisia ongelmia, kuten joidenkin sävelten kohdalla esiintyvät interferenssit, jotka aiheutuvat liian läheltä tai liian kauaksi toisistaan muodostuneet perusresonanssit tai niiden kerrannaiset. Samoin voidaan tehdä myös karkeita johtopäätöksiä kitaran laadukkuudesta, mikäli resonanssit sijaitsevat ennakoituilla paikoillaan. Mikäli rakenteellisesti halutaan tuoda esiin joitain ääneen liittyviä erityispiirteitä, kuten mm. äänen suuntaavuus eteenpäin, voidaan resonanssien keskinäistä suhdetta muuttaa rakennusprosessin aikana tarkoituksenmukaisella perusteella.



KUVIO 1. Energiansiirtoketjun värähtelevät komponentit

Olenaiset kitarasta mitattavat värähtelevät komponentit ovat kieli, kansi, pohja, ilmatila sekä koko kitara. Kuviossa 1. voidaan yksinkertaistettuna havaita punaisella merkittyjen nuolten ja linjojen osoittamana kielen näppäilystä aiheutuvien värähtelevien komponenttien käyttäytymistä energiansiirtoketjussa. Nuoli 1. kuvastaa energian välittymistä kitaran kannen sekä pohjan välillä. Nuoli 2. kuvastaa kitaran kannen sekä ilmatilan välistä värähtelysuhdetta. Nuoli 3. kuvastaa värähtelyjen välittymistä kaulan sekä kitaran kopan välillä. Huomioitavaa on myös kokonaisuus, jossa kielen värähtelyn energia takaisinkytyttyy kustakin komponentista ja aikaansaa eräänlaisen vähitellen

vaimenevan ketjureaktion, jossa osa värähtelyistä vaimentuu materiaalin sisäisten vaimennusten vuoksi ja osa värähtelyistä vahvistuu, kunnes kaikki energia on kulunut loppuun. Kunkin komponentin perusresonanssien yhteisvaikutus siis muodostaa kitarasta kuultavan äänen, kun kieleen näppäiltävä energiasiirtoketju kulkeutuu ja muokkaantuu soittimen eri osien ja ilman välityksellä kuulijan korvaan. Tämän kuulohavainnon pohjalta kuulija tekee päätöksen omien kokemusten ja mieltymysten perusteella, onko kyse hyvästä vai huonosta äänestä. Suuri vaikutus resonanssien voimakkuuteen, sekä siten kuulohavaintoon on myös sillä, kuinka lujaa ja mistä kohtaa kieltä näpätään.

Huoneakustiikalla on myös tärkeä merkityksensä kuultavaan ääneen. Sama kitara kuulostaa erilaiselta tyhjässä konserttitalissa, kuin kotisohvalla. Havaitsin ilmiön konkreettisesti vieraillessani korkealaatuisia kitaroita myyvässä Mandolin Brothers soitinkaupassa Staten Islandilla, New Yorkissa. Kitarat olivat sijoitettu pienehköihin huoneisiin roikkumaan seinille ja jos soitti yhtä kitaraa, niin kaikki seinälläolleet kitarat värähtelivät mukana ja aikaansaiivat ilmiön, jossa mikä tahansa testikitara kuulosti melko hyvältä. Nerokas myynninedistämisasetelma varmistaa asiakkaan palaamisen liikkeeseen uusille kaupolle, kun soitin ei sitten kotisohvalla välttämättä enää kuulostakaan yhtä hyvältä, kuin kaupassa.

#### **4.1.2 Komponenttien perusresonanssien mittaus**

Resonanssien esille saamiseksi käytettiin tutkimuksessa huopamaton palalla pehmustettua muovipäistä vasaraa, jolla kopautettiin kitaran tutkittavana olevaa komponenttia. Tällä tavoin vaimennettiin suuri osa perustaajuuden kerrannaisia, jolloin perustaajuus saatiin paremmin esille. Kopautusta kokeiltiin eri kohdista, jotta varmistuttiin oikeasta taajuudesta sekä näytteen laadukkuudesta.

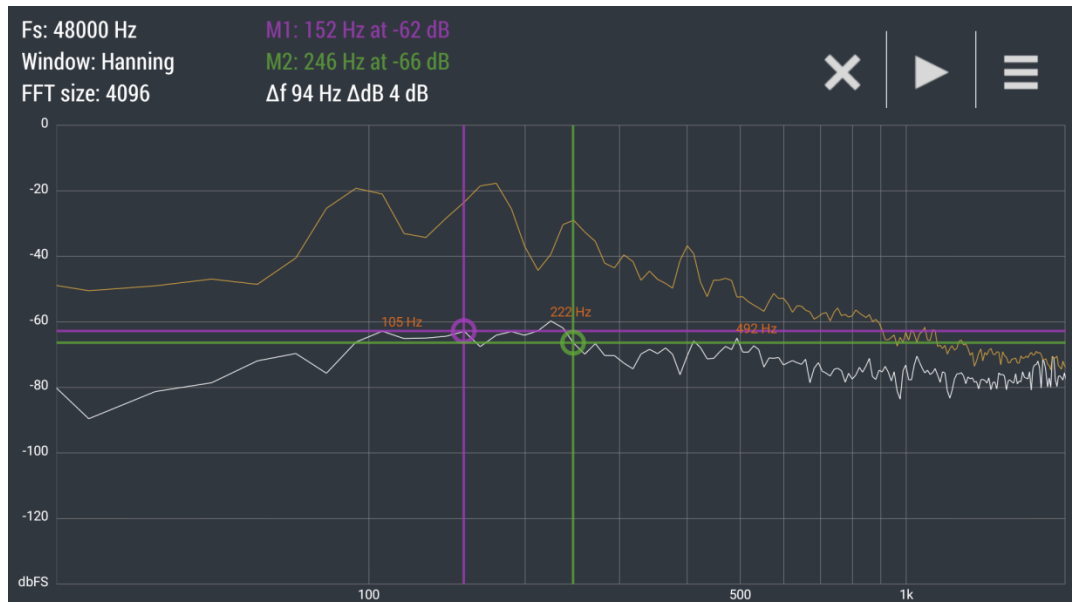
Kopautusääni tallennettiin Samsung Galaxy S5 Android puhelimeen asennetulla Advanced Spectrum Analyzer 2.1 applikaatiolla, joka mahdollistaa hetkellisen näytteenoton ääninäytteestä. Ohjelman kursorin avulla tutkittu resonanssitaajuus merkattiin pöytäkirjaan. Kopautusäänen verhokäyrä tallennettiin muistiin myöhempää analyysiä varten.

Erillisten komponenttien resonanssien mittaamisen haasteena on kopautuksen värähtelyjen välittyminen myös niihin osiin, joita ei haluta tutkia. Tällöin kyseisten muiden komponenttien värähtely pyritään vaimentamaan jollain sopivalla menetelmällä. Esimerkiksi mitattaessa pohjan perusresonanssia kopautus laittaa värähtelemään kannen, ilmatilan sekä kielet, jolloin pelkän pohjaresonanssin poimiminen tarkastelun kohteeksi saattaa olla haastavaa. Jonkin pehmeän tunkeminen soittimen ääniaukkoon poisti kielten, ilmatilan sekä osittain kannen värähtelyt, jolloin pohjan perusresonanssi kuului kyllin selkeästi ja se voitiin kirjata pöytäkirjaan.

On tärkeää myös ymmärtää, mitä kulloinkin ollaan mittaamassa, etteivät resonanssit vahingossa sekaannu toisiinsa. Toisiaan lähellä olevista resonansseista kannattaa ottaa useampi kopautusnäyte, kopautuskohtaa sekä mikrofonin asemaa vaihtamalla, jotta voidaan varmistua, että kyseessä on oikean resonanssin mittaustulos.

Mittausaineistosta voidaan todeta eri puulajeista valmistettujen komponenttien resonanssien sijoittuminen rakentajasta riippuen eri alueille. Kitaroita rakennettaessa ei rajattu resonanssien sijoittamista mihinkään tietylle alueelle, vaan tarkoituksena oli hankkia tietoa puulajien käyttökelpoisuudesta yleisesti ja idea tutkimuksen laajentamisesta resonansseihin tuli vasta jälkikäteen.

Tulostetun kitaran taajuusvasteet mitattiin kahdesti. Ensimmäisessä mittauksessa (Kuvio 2.) kitaran kaikkien komponenttien resonanssit sekä niiden yhteisvaikutus on otettu huomioon. Toisessa mittauksessa (Kuvio 3.) on suljettu ääniaukko, jolla käytännössä on eliminoitu ilmatilaresonanssin esiintyminen ja samalla verifioitu tärkeimmän eli kansiresonanssin esiintyminen käyrämuodossa. Värilliset cursorit M1 ja M2 ovat asetettu erikseen mitattujen kansi- ja pohjaresonanssien taajuuksien kohdalle. Kuviossa 1. voidaan huomioda, kuinka resonanssien yhteisvaikutus muuttaa yksittäisen komponentin sijaintia käyrällä.



KUVIO 2. Tulostetun kitaran taajuusvaste ääniaukko avoimena



KUVIO 3. Tulostetun kitaran taajuusvaste ääniaukko suljettuna

Resonanssien taajuusvasteen lisäksi erikseen mitattiin kopautusääniä perustaajuudet Samsung Galaxy S5 Android puhelimeen asennetulla G-String applikaatiolla. Olennaiset mittaukset on taulukoitu Taulukkoon 1. Taulukon resonanssien mittauksia vertailemalla liitteenä olevan Leonardo Guitar Research Projektin 12 kitaran mittausaineistoon, voidaan todeta tulostetun kitaran kannen värähtelevän huomattavasti matalammalla taajuudella suhteessa kaikkiin puusta valmistettuihin verrokkeihin. Syynä tähän on materiaalin jäykkyysominaisuudet sekä massa. Pohjaresonanssi puolestaan resonoi samalla alueella verrokkien kanssa. Mittaus tukee Leonardo Guitar Research Projektissäkin varmistettua ajatusta pohjan passiivisesta vaikutuksesta kitaran äänen

rakenteeseen, vaikkakin kitarassa johon on tarkoituksella rakennettu erityisen resonoiva pohja, vaikutus mataliin taajuuksiin korostuu. Koko kitaran perusresonanssi on matalammalla ja on seurausta kitaran kokonaismassasta. Ilmatilan koko ja siten myös sen resonanssit ovat luonnollisesti laskennallisesti samat kaikissa tutkituissa soittimissa, joten ainoan poikkeavuuden verrokkisoitinten ilmatilan perusresonanssien mittauksissa aiheuttaa kitaran rakenteen jäykkyysominaisuudet ja siten kaikkien komponenttien keskinäinen yhteisvaikutus. Materiaalin jäykkyysominaisuuksien johdosta myös ilmatilan perusresonanssi on matalampi, kuin verrokkisoitinten.

TAULUKKO 1. Erikseen mitatut tulostetun kitaran tiedot.

Top		Back		Guitar		Air		Weight	Belly bulge
<i>Note</i>	<i>Hz</i>	<i>Note</i>	<i>Hz</i>	<i>Note</i>	<i>Hz</i>	<i>Note</i>	<i>Hz</i>	<i>g</i>	<i>mm</i>
D#3	152	B3	245	G1	50	G2	96	2898	0,95

#### 4.2 Kitaran mekaaniset mittaukset

Mekaaniset mittaukset voidaan karkeasti jakaa mittauksiin, jotka suoritetaan kitaran rakenteen lepotilassa ilman kielten aiheuttamaa jännitystä, sekä kielten aiheuttaman jännityksen tilassa jolloin näiden kahden tilan väliset mittaustulokset kertovat eri komponenttien rakenteellisesta kestävydestä. Tärkeimmät mitattavat kohteet kitarassa on kaulan suoruuden mittaus sekä kannen taipuman mittaus. Muissakin komponenteissa voidaan havaita mitattavia muutoksia, mutta niiden vaikutukset kokonaisuuden kannalta ovat vähäiset.

Kaulan taipuma on verrattain yksinkertainen mitata suoralla teräsviivaimella asettamalla viivain pitkittäin otelautaan asennettujen otenauhojen päälle ja vertaamalla kielten jännityksen aiheuttamaa muutosta suoran viivaimen sekä kielten vedosta taipuneen kaulan välillä. Kaulan sisään asennettujen vahvikkeiden sekä säädettävän kaularaudan avulla on mahdollista lisätä tai vähentää kaulan ominaisuutta vastustaa kielten aiheuttamaa taipumaa.

Tulostetun kitaran kaulan sisään asemoidut hiilikuituvahvikepalkit sekä otelautamateriaalina käytetty Rocklite, puristepuumateriaali varmistivat sen, ettei kaulaan kohdistuva kielten jännitys ollut pelkästään tulostetun materiaalin varassa.



Kielten jännityksessä kaula pysyi suorassa ja kaularautaa kiristämällä kaulan suoruutta voitiin vielä hienosäätää.

Kannen taipumaa on järkevintä mitata tallan takaa, sillä kyseisellä alueella taipuma on suurimmillaan ja sijaitsee kitaran värähtelyjen kannalta olennaisessa paikassa. Etenkin teräskielisissä akustisissa kitaroissa alueen jäykkyys ja toisaalta massa on olennaisessa roolissa kitaran sointiherkkyyden kanssa. Fysikaalisesti alueen toimintaa voidaan yksinkertaistamalla kuvata massa-jousi värähtelijänä.

#### **4.2.1 Kitaran osien rasitus kielten vedossa**

Kitaran kielet aiheuttavat viritettyinä yhteensä noin 70 kg vedon, joka kohdistuu tukipisteiden kautta kitaran eri komponentteihin. Tukipisteiden kautta veto aiheuttaa komponentteihin momentin, joka aiheuttaa staattisen rasitustilan sekä siten joidenkin komponenttien muodonmuutoksen. Perinteisissä puurakenteissa puun elastiset ominaisuudet palauttavat rakenteiden alkuperäisen muodon kun kielten jännitys poistetaan, mutta pitkällä aikavälillä staattinen jännitys aiheuttaa puussa myös plastisia muodonmuutoksia. Kitaran tukirakenteiden, kuten muodon, vahvikkeiden sekä tukirimoituksen tarkoituksena on vastaanottaa kielten aiheuttama rasitus, jotta soitin säilyisi ehjänä sekä soittokuntoisena mahdollisimman pitkään.

Vanhoista soittimista on havaittavissa selviä pysyviä muodonmuutoksia kannen tasomaisuudessa. Kitaran kosteuselämisen sekä kielten vedon aiheuttaman pitkäaikaisen jännityksen seurauksesta kansi on usein jollakin tavoin vääntynyt. Mikäli soitin on edelleen soittokuntoinen, on kyseessä todennäköisesti rakenteellisesti ja sitä kautta soinnillisesti hyvin optimoitu kitara. Usein kuitenkin muodonmuutokset ovat niin suuria, ettei soitin ole soittokunnossa ja näinollen tarvitsee jälkikäteen rakenteellisia tukiratkaisuja tai muita toimenpiteitä, joilla tilanne korjaantuu.

Liiallinen rakenteellinen varmuuskerroin ehkäisee soittimen värähtelyominaisuuksia, mutta vastaavasti liian pieni kerroin tuhoaa soittimen tietyn ajanjakson aikana. Tämä ristiriita on alalla yleisesti tiedossa ja soitinvalmistajien on tasapainoitava tällä karkealla asteikolla tuotteidensa kanssa. Komponenttien rakenteellisella optimoinnilla

pyritään tasapainottamaan kitaran värähtelyherkkyyttä suhteessa sen rakenteelliseen kestävyYTEEN.

#### **4.2.2 Kannen jäykkyyden mitta**

Kitaran kannen jäykkyyssominaisuudet ovat suoraan verrannolliset kannen värähtelyherkkyyteen kielten energian siirtyessä näppäilyn seurauksesta kanteen. Mikäli kansi on liian jäykkä, ei energia riitä kannen värähtelyttämiseen. Tällaisesta kitarasta säteilevä ääni syttyy nopeasti ja sisältää paljon yläsäveliä, mutta on hiljainen. Vastaavasti löysästä kannesta säteilevä ääni syttyy hitaasti ja matalimmat osasävelet korostuvat, mutta rakenteellisesti ratkaisu ei ole kovin pitkäikäinen. Laadukkaassa kitarassa kannen jäykkyyssominaisuudet pyritään sovittamaan rakenteellisen kestävyYDEN sekä värähtelyherkkyyden välisenä kompromissina.

Kannen jäykkyyssominaisuudet muodostuvat kannen materiaalista, paksuudesta sekä kanteen kiinnitettyjen tukirimojen koosta, sijoittelusta sekä muotoilusta. Värähtelyominaisuuksien kannalta vähäisin merkitys on ääniaukon yläpuolisilla rimoilla, joiden vaikutus kuitenkin rakenteellisen kestävyYDEN kannalta on erittäin suuri kielten jännityksessä. Mielenkiintoisin alue sijaitsee kitaran tallan ympärillä, joka on äänenmuodostuksen kannalta ehkä kaikkein merkityksellisin alue kitarassa. Tämän alueen jäykkyyssominaisuuksia voidaan rakenteellisesti modifioida mm. rimojen sijoittelulla ja muotoilulla, kiinnittämällä rimojen päädyt kitaran sivuihin, sekä kiinnittämällä rimojen päädyt toisiinsa kiinni.

Vertailukelpoisin kannen jäykkyyden mitta

menetelmä on mitata kannen kohoaminen tallan takaa. Kun kitaran kielet on viritetty normaalivireeseen (E A D G H E), kielten veto aiheuttaa tallan taipuman eteenpäin, jonka johdosta myös kansilevy pullistuu eniten juuri kanteen kiinnitetyn tallan takana. Mittaus suoritetaan kielten vedossa sekä toistetaan kielten veto poistettuna. Mittaustulosten erotuksesta voidaan siten määrittää kannen suhteellinen kokonaisjäykkyys ja tutkitut kitarat voidaan asettaa tämän perusteella järjestykseen.

Tulostetussa kitarassa kannen jäykkyyssominaisuudet muodostuvat tulostuksen kerroksellisuudesta sekä PLA:n ominaisuuksista. Muovien kohdalla on myös

huomioitava materiaalin viruminen jännitystilassa, joten kannen rakennetta pitää tukea ylimääräisellä tukiratkaisulla vastaanottaakseen kielten veto.

Tulostetun kitaran kannen taipuma kielten vedossa oli 0,95 mm (Taulukko 1.), mikä on vertailtaessa verrokkisoittimiin melko suuri. Syyinä taipumaan on pääasiassa materiaalin jäykkyysominaisuudet. Ajan kuluessa taipuma tulee aiheuttamaan virumisilmion myötä peruuttamattomia ongelmia kitaran kansirakenteelle, joten ylimääräisen tukirakenteen asentaminen on tulostettuun kitaraan välttämätön toimenpide. Kitaran sisäpuolelle asennettu tukirakenne kohdistuu juuri tallan takaosaan, jolloin rakenne tukee sen takana esiintyvää liiallista pullistumaa

### 4.2.3 Kitaran massa

Kitaran materiaalien ominaisuuksista tärkeimpinä pidetään kokonaismassaa, värähtelyherkkyyttä sekä kannen jäykkyyden ja massan keskinäistä suhdetta. Eri puolajien käytölle soittimen eri osissa on värähtelyherkkyyden osalta mitattavissa olevat valintaperusteet. (Gore, T. and Gilet, G, 2016)

Kitaran kokonaismassa kertoo jotakin kitaran värähtelyherkkyydestä, mutta massan jakaantumisen suhde eri komponenttien kesken on vieläkin merkittävämpi. Kitaran kansi on erityisen herkkä massan muutoksille ja sen vaikutus äänenlaatuun on suurin. Mikäli kannen massa on pieni ja vartalon sekä kaulan massa ovat suuret, voidaan havaita että kielen värähtelyt keskittyvät suurimmaksi osaksi kannen alueelle. Tällaisen kokoonpanon äänen voimakkuus sekä dynamiikka ovat suurimmillaan, samoin kuin äänen suuntaavuus kohtisuoraan kannesta eteenpäin on voimakkaimmillaan. Vastaavasti raskas kansi ja kevyet muut komponentit hukkaavat näppäilystä kielestä välittyvää energiaa värähtelyjen kautta lämmöksi, jolloin äänen voimakkuus ja dynamiikka on pieni. Keskeisin yksittäinen merkitys kannen värähtelyominaisuuksiin on kuitenkin tallalla sekä sen tukilevyllä. Niiden sijainti keskellä kaikkein värähtelyherkintä aluetta on niin kriittinen, että pienikin massan ja jäykkyyden muutos on äänentuotto ominaisuuksien kannalta merkityksellinen.

Komponenttien massaa on mahdotonta mitata valmiista kokoonpanosta, joten mittaamista tulee harrastaa prosessin aikana eri vaiheista. Kokonaisuus on luonnollisesti

osiensa summa, eli vaikuttamalla yksittäisten komponenttien massaun, vaikutetaan samalla koko kitaran massaun ja massaun jakaantumiseen eri komponenttien kesken.

Perinteisellä menetelmällä puusta valmistettujen kitaroiden materiaalien ominaisuuksia käsittelevä Handbook of Hardwoods (Building Research Establishment. 1972.) sekä Understanding wood (R.Bruce Hoadley) sisältävät lähes kaiken tietämisen arvoisen puumateriaalien ominaisuuksista. Handbook of Hardwoods -kirjaan on listattu 117 eri kovapuulajin käyttöä, työstöä sekä muita mitattavia ominaisuuksia, joiden tarkoituksena on helpottaa puumateriaalin valinnassa kulloisenkin käyttökohteen mukaan.

Model name: 00\_koppa\_Simul  
 Study name: SimulationXpress Study(-Default-)  
 Plot type: Static nodal stress Stress (-vonMises-)  
 Deformation scale: 71.4479



KUVA 19. Kannen stressianalyysi. (Santeri Halminen, 2016)

Tulostetun kitaran kokonaismassa 2898g (Taulukko 1.) on suuri verrattuna vertailukitaroiden massaun. Tämä aiheuttaa ongelmia äänen dynamiikan sekä äänen voimakkuuden suhteen. Äänen laatu on subjektiivinen, mutta olennainen osa kitaran laatuksiteeristöä, jonka johdosta etenkin kannen massa pudottaa kitaran alemmas laatuasteikolla. Kannen uudelleensuunnittelu esimerkiksi topologisen optimoinnin menetelmillä saattaisi ratkaista joitain ongelmia, mutta samalla tulisi huomioida riittävästi kannen värähtelyominaisuuksia. Kaulan massa edesauttaa jokseenkin kopan värähtelyherkkyyttä, ja on tässä tapauksessa edullinen ominaisuus kitaralle. Usein soittaja kuitenkin toivoo tuntevansa myös kaulan värähtelyt soittaessaan, jolloin tämäkään soittimen ominaisuus ei ole kiveen hakattu.

## 5 YHTEENVETO JA POHDINTA

Teollisuus asettaa suuria odotuksia 3D tulostukselle ja suuria investointeja sekä satsauksia on jo nähty auto-, sekä ilmailualan valmistavassa teollisuudessa. Tulostaminen ei tule näillä näkymin varsinaisesti syrjäyttämään kokonaan olemassa olevia valmistustekniikoita, mutta tulee lisäämään teollisen valmistuksen vaihtoehtoja nopealla sekä muilla valmistustavoilla mahdollisten kappaleiden valmistamista. Suunnittelu, tuotekehitys sekä yksittäiskappalevalmistus ovat saamassa 3D tulostamisesta varsin kilpailukykyisen valmistusmenetelmän joihinkin tuotteisiin, jolloin valmistavassa teollisuudessa tarvitaan jatkossakin uudenlaista osaamista. Samalla on kasvamassa uusi sukupolvi, jolle tulostamalla valmistetut kotitalouksien tavarat ja mekaaniset varaosat on itsestäänselvyys. Esineiden valmistamiseen tulostamalla ei tarvita välttämättä edes mallinnustaitoja, sillä vertaisverkoista on jo ladattavissa ilmaiseksi valmiita malleja pilvin pimein eri käyttökohteiden mukaan, myös soittimiin.

Teknillisille innovaatioille on soitinteollisuuden asiakaskunnassa ollut aina innostunut kannattajajoukko, mutta laajemmassa mittakaavassa markkinoiden suurin kysyntä ja siten myös tarjonta on perin konservatiivista. On selvää, että tulostusmateriaalitekniikan kehittyessä ja menetelmän arkipäiväistyessä myös tulostetuille soittimien komponenteille tulee olemaan enemmän kysyntää, jolloin tekniikan tuntemuksesta tulee olemaan hyötyä alan koulutuksessa sekä alan yrityksille. Laitteiden kehittyminen ja etenkin tulostusmateriaalien monipuolistuminen ja ominaisuuksien parantuminen luovat uusia mahdollisuuksia soittimien suunnittelulle ja valmistukselle.

Tutkimuksen toteutusta varten keräsin ryhmän oman alansa huippuosajia, jolla varmistin, että tulokset ovat laadukkaat, eikä työn teknisestä toteutuksesta aiheudu työn luotettavuudelle merkittävää haittaa. Projektiin osallistuneet tahot toimivat ilman varsinaista resursointia, jolloin ajoittain projektin eteneminen oli jäädä prioriteettilistalla korkeammalla olevien töiden jalkoihin.

Tulostettua kitaraa verrattiin akustisten ominaisuuksien perusteella kahteentoista puusta valmistettuun samalla työpiirustuksella valmistettuun kitaraan, jotta vertailu olisi riittävän laaja. Tutkimustuloksia verrattiin alan kirjallisuuteen ja johtopäätökset on tehty vertailuaineiston sekä kirjallisen aineiston perusteella.

Tässä tutkimuksessa tulostettiin kitara, jollaisia on valmistettu 200 vuoden ajan ja jonka tuotekehitys on rakentunut puumateriaalin sekä puuta työstävien tuotantomenetelmien ympärille. Lähtökohtaisesti tulostusmateriaalin ominaismassa on perinteisiä puumateriaaleja suurempi ja massan lisääminen erityisesti kanteen toi ongelmia sen värähtelyherkkyyteen ja näinollen tuotettavan äänen voimakkuuteen sekä dynamiikkaan. Samoin muovien mekaaninen viruminen sekä lämpötilavaihtelut aiheuttavat pitkällä aikavälillä väistämättä suuria ongelmia kitaran jännityksen alaisille osille, kuten kanteen sekä kaulan liitoksen alueelle, mikäli näitä kohtia ei erityisesti jäykistetä muotoilun tai jonkin mekaanisen menetelmän avulla. On selvää, että tulostusmenetelmän mahdollinen yleistymisen asettaa tulevaisuudessa myös soittimien korjaamistöiden parissa työskenteleville yrityksille täysin uusia haasteita. Tämä tutkimus ja sen aikana tuotettu aineisto olkoon lähtökohtana jatkotutkimushankkeille, joissa keskitytään mm. rakenteellisten yksityiskohtien parantamiseen.

Topologisen optimoinnin avulla soittimien komponentteja voidaan jatkossa tutkia yksityiskohtaisemmin eikä valmistusmenetelmä rajoita rakenteen uudelleensuunnittelua. Optimoinnista saatavan tiedon myötä on mahdollista suunnitella kestäviä ja akustisesti perusteltavia rakenteita, joita perinteisessä soitinteollisuudessa ole vielä nähty. Topologisen optimoinnin mahdollisuuksia kannattaa tutkia erikseen jatkotutkimuksen aiheena.

Kuinka kuumeisesti kitaranvalmistusteollisuus tai kuluttajayhteisö odottaa ja vastaanottaa 3D tulostettujen soittimien vallankumousta, jää täydellisesti arvioitavaksi tämän tutkimuksen ulkopuolella. Kitara ja monet muut soittimet voidaan valmistaa yksittäiskappaleena ja kokonainen tuotanto on mahdollista toteuttaa menetelmällä. Kuitenkin akustisten ominaisuuksien kehittäminen, jotta tuotettavan äänen laatu vastaisi laadullisesti puusta valmistettuja soittimia, vaatii vielä monta kehitysaskelta niin materiaalin ominaisuuksien, kuin rakenteiden muotoilun suhteen. Todennäköisimpänä vaihtoehtona pidän rakenteellisen kestävyuden näkökulmasta, että ensimmäiset akustisesti toimivat kaupalliset versiot ovat yhdistelmiä tulostetuista, sekä perinteisesti puusta valmistetuista komponenteista.

Tulostetun kitaran ääntä arvioin parinkymmenen vuoden kokemuksellani tasapainoiseksi, pehmeän miellyttäväksi mutta dynamiikaltaan puutteelliseksi ja

voimakkuudeltaan hiljaiseksi. Jatkotutkimuksen aiheena pidän myös kuuntelijoille järjestettävä testaus, jossa tulostamalla toteutettuja teknisiä ratkaisuja testataan aidossa koeympäristössä. Vasta tällainen järjestely tuottaa lopullista tietoa yritysten ja markkinoiden käyttöön tulostustekniikan soveltumisesta soitinrakennusteollisuuden käyttöön.



## LÄHTEET

Benedetto, R. Making an Archtop Guitar. Centerstream Publishing (1994).

Building Research Establishment. Princes Risborough Laboratory and Farmer, R.H. Handbook of Hardwoods. H.M. Stationery Office. (1972).

Cho, Adrian. 2017. Million-dollar Strads fall to modern violins in blind ‘sound check’. American Association for the Advancement of Science. (Luettu 25.10.2017).  
<http://www.sciencemag.org/news/2017/05/million-dollar-strads-fall-modern-violins-blind-sound-check>

Cournall R.; Making Master Guitars. Pub, Robert Hale Ltd, London. (1993)

Gold Touch Inc. Patented Spray Chrome Systems and 24k Gold Plating Systems (Luettu 11.12.2017). <https://goldtouchinc.com>

Gore, T. and Gilet, G. Contemporary Acoustic Guitar Design and Build. Trevor Gore. (2011).

Hurd, D.C. Left-brain Lutherie: Using Physics and Engineering Concepts for Building Guitar Family Instruments: an Introductory Guide to Their Practical Application. Ukuleles by Kawika. (2004)

Hoadley, Bruce R. Understanding Wood, A craftsman’s guide to wood technology. The Taunton Press (1980)

Jansson, E.V.; Acoustics for the guitarmaker, Function, Construction and Quality of the guitar. Royal Swedish Academy of Music. (1983)

Metsta: Malliperustaisen tuotemäärittelyn mahdollisuudet PDF, raportti. METSTA ry, Teknologiateollisuus ja SMACC. 2016 Luettu 27.9.2017

Raja V.; Fernandes K. J. Reverse engineering: an industrial perspective. London: Springer cop. (2008).

Rossing, T.D.: An introduction to guitar acoustics. In: The Big Red Book of American Lutherie, Vol. 2, pp. 124–134. Guild of American Luthiers, Tacoma, WA (2001). Alun perin julkaistu: American Lutherie, #11 and #12 (1983/1984).

Rossing, T.D.: The Science of Stringed Instruments. Springer Science & Business Media. (2010)

SFS-EN ISO/ASTM 52900:2017. Materiaalia lisäävä valmistus. Yleiset periaatteet. Terminologia. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS.

SFS-EN ISO 10360-10:en. Geometrical product specifications (GPS). Acceptance and reverification tests for coordinate measuring systems (CMS). Part 10: Laser trackers for measuring point-to-point distances (ISO 10360-10:2016). Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS.

Sloane, I. *Classic Guitar Construction: Diagrams, Photographs, and Step-by-step Instructions*. E. P. Dutton. (1966).

Somogyi, E. *The Responsive guitar*. Luthiers Press. (2010).

Vintage Guitars Info. *Vintage Guitars Info's Vintage Martin Guitars and Ukes*. (Luettu 23.4.2017). <http://www.guitarhq.com/martin.html>

Woodhouse, J., Manuel, E. K. Y., Smith, L. A., Wheble, A. J. C., & Fritz, C. (2012). Perceptual Thresholds for Acoustical Guitar Models. *Acta Acustica United with Acustica*, 98(3), 475–486. <https://doi.org/10.3813/AAA.918531>

Liite 1. Leonardo Guitar Research Projektikitaroiden mittaustaulukko

1(16)



LEONARDO GUITAR RESEARCH PROJECT

Tero Siromaa SÄSKY  
-Koulutuksen kehittäminen laadun ja  
tutkimustulosten avulla-

FREQUENCY AND TAPSTONE CHART

Guitar category	Code and name Builder	Guitar code	Back/sides	Neck	Fingerboard	Bridge	Top: F#3-G3 Note Hz	Back: G#3-A3 Note Hz	Guitar Note Hz	A1: Note Hz	Weight: g	Build: g/m
Steel-string Non-Tropical.	81 Santeri Halminen	S NT 1	Oak	Walnut	Oak	Oak	G#3 210 31	B3 253 31	D2 74	A1 114	1758	0.3
	82 Pekka Barck	S NT 2	Elm	Cherry	Elm	Elm	G#3 205 31	B3 253 31	D#2 78	A1 110	1704	0.65
	83 Ilkka Sorri	S NT 3	Alder	Alder	Birch	Birch	G3 201 31	B3 243 31	D2 74	A1 111	1703	0.45
	84 Kirsi Laesvirta	S NT 4	Cherry	Cherry	Cherry	Cherry	A#3 233 31	G#4 281 31	D#2 77	A#2 118	1750	0.5
	85 Mikko Huttu	S NT 5	Birch	Maple	Elm	Birch	A1 205 31	G4 267 31	D2 74	A1 111	1674	0.4
	86 Arto Koskela	S NT 6	Elm	Elm	Walnut	Walnut	G#3 205 31	B4 291 31	F2 81	A2 124	1750	1.7
Steel-string Tropical.	81 Santeri Halminen	S T 1	Rosewood, Indian	Mahogany	Rosewood, Indian	Rosewood, Indian	G#3 207 31	D#4 307 31	D2 75	A#2 117	1857	0.4
	82 Pekka Barck	S T 2	Padouk	Spanish Cedar	Ebony	Ebony	G#3 204 31	B3 254 31	D#2 78	A#2 113	1740	0.6
	83 Ilkka Sorri	S T 3	Rosewood, Indian	Spanish Cedar	Ebony	Ebony	F#3 186 31	B1 242 31	D2 71	A1 107	1720	0.45
	84 Kirsi Laesvirta	S T 4	Bubinga	Mahogany	Maple	Bubinga	A1 223 31	B1 253 31	D#2 76	A#2 117	1831	0.5
	85 Mikko Huttu	S T 5	Mahogany	Mahogany	Rockite	Rockite	A1 220 31	G4 257 31	D#2 71	A#2 116	1845	0.65
	86 Arto Koskela	S T 6	Mahogany	Mahogany	Maple	Ebony	G3 205 31	F#4 361 31	F2 87	A1 109	1505	0.45

This study was conducted based on the Leonardo Guitar Research Project. The measured guitars were crafted by students at the Institute of Crafts and Design, Finland. Each student built two guitars: tropical and non-tropical based on the same blueprint. The same procedure was repeated in two other (European) schools in Europe: CNR Davao in Belgium and Newark College in UK. All guitars went through several testing rounds by musicians to acquire information on how the materials used affect people's mindset and ability to judge the quality of sound when guitars are constructed out of unconventional or alternative wood species.

The purpose of this study was to demonstrate how it is possible to measure the fundamental components of a guitar without having an access to expensive equipment. Utilizing this method it's possible to generate necessary information for deeper understanding the vibrational elements of guitars and at the same time improve and balance the quality of the guitar makers' processes. From a scientific point of view this study is not a reliable research because of too many variables, but it is repeatable by anyone as well as functions as a tool and an objective perspective for the guitar maker. This helps them study their products and gives valuable information for their continuous improvement.

All equipment used in this study was easily purchased or downloaded from free sources, and the testing method is adaptable for every workshop environment. This is very important since difficult research setups are sometimes hard to arrange in the dusty and confined workshop and therefore are soon neglected. This study was mainly conducted by a laptop, kitchen scale and an Android smartphone.

In this study concentrate on four fundamental vibrational elements of a guitar which relations between each other give the guitar its tonal character. These fundamentals are followed by several sets of partial modes dependent on them. These complex forms of behavior are neither meaningful to measure nor easy to manipulate separately unless it's necessary to get rid of any possible "wolf tones". The goal is not necessarily to put guitars in any particular order but more to see if the basic fundamentals are in their assumed positions.

Note	Hz	f#3	Hz	f#3	Hz	f#3	Hz	f#3	Hz	f#3	Hz	f#3	Hz
C1	32.7	C2	65.4	C3	130.8	C4	261.6	C5	523.3	C6	1046.5	C7	2093.0
G#1	34.6	G#2	69.3	G#3	138.6	G#4	277.2	G#5	554.4	G#6	1108.7	G#7	2217.5
D1	36.7	D2	73.4	D3	146.8	D4	293.7	D5	587.3	D6	1174.7	D7	2349.3
D#1	38.9	D#2	77.8	D#3	155.6	D#4	311.1	D#5	622.3	D#6	1244.5	D#7	2489.0
E1	41.2	E2	82.4	E3	164.8	E4	329.6	E5	659.3	E6	1318.5	E7	2637.0
F1	43.7	F2	87.3	F3	174.6	F4	349.2	F5	698.5	F6	1396.9	F7	2793.8
F#1	46.2	F#2	92.5	F#3	185.0	F#4	370.0	F#5	740.0	F#6	1480.0	F#7	2960.0
G1	49.0	G2	98.0	G3	196.0	G4	392.0	G5	784.0	G6	1568.0	G7	3136.0
G#1	51.9	G#2	103.8	G#3	207.7	G#4	415.3	G#5	830.6	G#6	1661.2	G#7	3322.4
A1	55.0	A2	110.0	A3	220.0	A4	440.0	A5	880.0	A6	1760.0	A7	3520.0
A#1	58.3	A#2	116.5	A#3	233.1	A#4	466.2	A#5	932.3	A#6	1864.7	A#7	3729.3
B1	61.7	B2	123.5	B3	246.9	B4	493.9	B5	987.8	B6	1975.5	B7	3951.1

LEONARDO GUITAR RESEARCH PROJECT

Tony Bennett  
3307 4th Avenue  
Baltimore, MD 21206

LEONARDO GUITAR RESEARCH PROJECT

Top wood list

Guitar category	Code and name number	Guitar color	Back/neck	Neck	Fingerboard	Bridge
Stacking Non-topical	01 Saitan Hainanen	S NT 1 Oak	Walnut	Hainanen	Oak	Oak
	02 Pekka Borch	S NT 2 Elm	Cherry	Elm	Elm	Elm
	03 Mika Sora	S NT 3 Alder	Alder	Birch	Birch	Birch
	04 Sime Laesvira	S NT 4 Cherry	Cherry	Elm	Cherry	Cherry
	05 Pihlo Nuuti	S NT 5 Birch	Maple	Elm	Birch	Birch
	06 Antti Koskela	S NT 6 Elm	Elm	Hainanen	Hainanen	Hainanen
Stacking Tropical	01 Saitan Hainanen	S T 1 Rosewood, Indian	Rosewood, Indian	Hainanen	Rosewood, Indian	Rosewood, Indian
	02 Pekka Borch	S T 2 Redoub	Spanish Cedar	Elm	Elm	Elm
	03 Mika Sora	S T 3 Rosewood, Indian	Spanish Cedar	Elm	Elm	Elm
	04 Sime Laesvira	S T 4 Bubinga	Hainanen	Elm	Elm	Elm
	05 Pihlo Nuuti	S T 5 Mahogany	Hainanen	Elm	Elm	Elm
	06 Antti Koskela	S T 6 Mahogany	Hainanen	Elm	Elm	Elm

Time	Hz	dB	Hz	dB	Hz	dB	Hz	dB			
CE	32.7	62	65.4	63	138.8	64	263.4	65	384.6	67	2693.8
OE	34.4	68	65.3	68	133.6	68	272.2	68	356.6	68	3165.7
DE	34.3	62	71.4	61	144.8	68	293.7	68	337.9	68	3248.3
OE	35.0	62	77.8	68	135.6	68	311.3	68	337.9	68	3183.8
EE	43.2	61	82.4	69	148.8	68	311.3	68	337.9	68	3183.8
FE	43.2	67	87.3	68	154.6	68	311.3	68	337.9	68	3183.8
PE	44.2	62	82.5	68	135.6	68	311.3	68	337.9	68	3183.8
OE	49.9	62	90.0	65	159.0	68	312.0	68	350.0	68	3165.0
OE	51.3	62	100.0	64	167.7	68	345.3	68	345.2	68	3222.4
AE	55.4	62	110.0	63	178.0	68	416.0	68	374.0	67	3826.0
AE	57.0	62	115.0	63	183.0	68	416.0	68	374.0	67	3826.0
BE	61.2	62	121.0	63	191.0	68	416.0	68	374.0	67	3826.0



All data results in this study were collected from guitars tested to normal pitch (A440), except for the study helping determine optimal humidity in the air and the room temperature effects the results of the study. The moisture levels were collected in an average 10 inch square room in a house with the air temperature being 22°C and average relative humidity 30%.

The top and bottom curves were measured with a digital oscilloscope and the frequency response was measured with a digital oscilloscope. The top and bottom curves were measured with a digital oscilloscope and the frequency response was measured with a digital oscilloscope. The top and bottom curves were measured with a digital oscilloscope and the frequency response was measured with a digital oscilloscope.

According to the top guitar research and literature, between 2000 and 3000 Hz is the most important frequency range for the guitar's sound. The top and bottom curves were measured with a digital oscilloscope and the frequency response was measured with a digital oscilloscope.

LEONARDO GUITAR RESEARCH PROJECT

Tero Siromaa  
SASKY -koulutuskuntayhtymä  
ikaalisten käsi- ja taideteollisuusoppilaitos

SANTERI KORVENPÄÄ

Tap tone chart

	Top Note	F#3-G3 Hz	Back Note	G#3-A3 Hz	Guitar Note	Air Note	Weight g	Belly bulge mm
Santteri Korvenpää								
peikka Back	Oak	G#3 210	B3	D3 253	D2 74	A2 114	1758	0,3
Ilkka Soini	Elm							
Kirsi Laasinmä	Alder							
Mikko Huttu	Cherry							
Arto Koskela	Birch							
	Elm							
Santteri Korvenpää	Rosewood, Indian	G#3 207	D#4	D#4 307	D2 75	A#2 117	1857	0,4
peikka Back	Balsauk ilikka							
Soini	Rosewood, Indian							
Kirsi Laasinmä	Bubinga							
Mikko Huttu	Mahogany							
Arto Koskela	Mahogany							

Note	Hz	Note	Hz	Note	Hz	Note	Hz	Note	Hz	Note	Hz	Note	Hz	Note	Hz	Note	Hz
C1	32.7	C2	65.4	C3	130.8	C4	261.6	C5	523.3	C6	1046.5	C7	2093.0				
C#1	34.6	C#2	69.3	C#3	138.6	C#4	277.2	C#5	554.4	C#6	1108.7	C#7	2217.5				
D1	36.7	D2	73.4	D3	146.8	D4	293.7	D5	587.3	D6	1174.7	D7	2349.3				
D#1	38.9	D#2	77.8	D#3	155.6	D#4	311.1	D#5	622.3	D#6	1244.5	D#7	2489.0				
E1	41.2	E2	82.4	E3	164.8	E4	329.6	E5	659.3	E6	1318.5	E7	2637.0				
F1	43.7	F2	87.3	F3	174.6	F4	349.2	F5	698.5	F6	1396.9	F7	2793.8				
F#1	46.2	F#2	92.5	F#3	185.0	F#4	370.0	F#5	740.0	F#6	1480.0	F#7	2960.0				
G1	49.0	G2	98.0	G3	196.0	G4	392.0	G5	784.0	G6	1568.0	G7	3136.0				
G#1	51.9	G#2	103.8	G#3	207.7	G#4	415.3	G#5	830.6	G#6	1661.2	G#7	3322.4				
A1	55.0	A2	110.0	A3	220.0	A4	440.0	A5	880.0	A6	1760.0	A7	3520.0				
A#1	58.3	A#2	116.5	A#3	233.1	A#4	466.2	A#5	932.3	A#6	1864.7	A#7	3729.3				
B1	61.7	B2	123.5	B3	246.9	B4	493.9	B5	987.8	B6	1975.5	B7	3951.1				

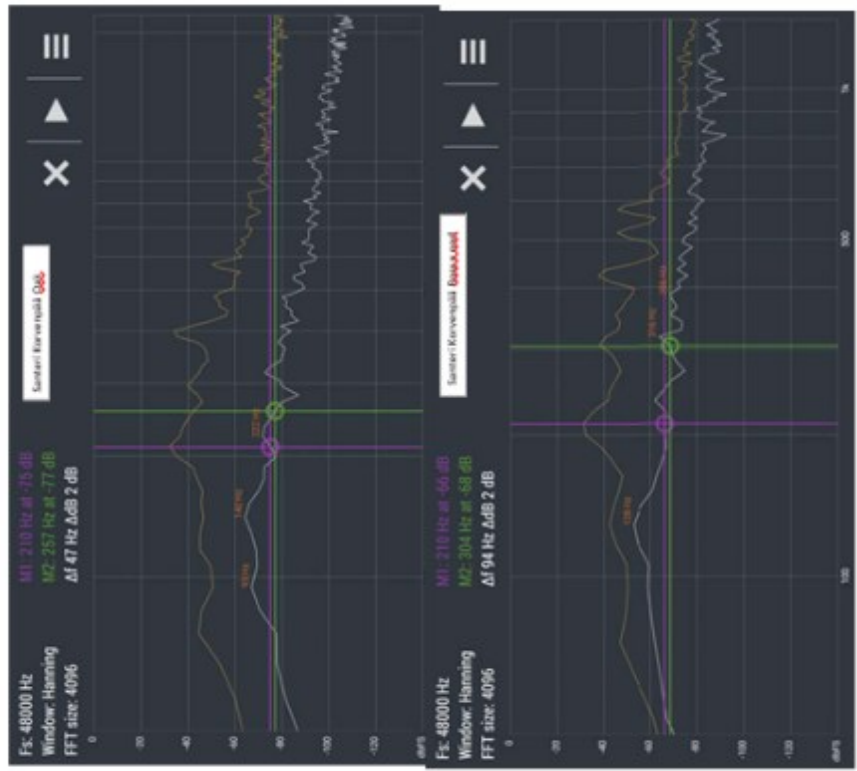
Teos Sironia  
SARIT - Akustikanalyysi  
harjoitustyö ja tutkimusraportti

LEONARDO GUITARRESEARCH

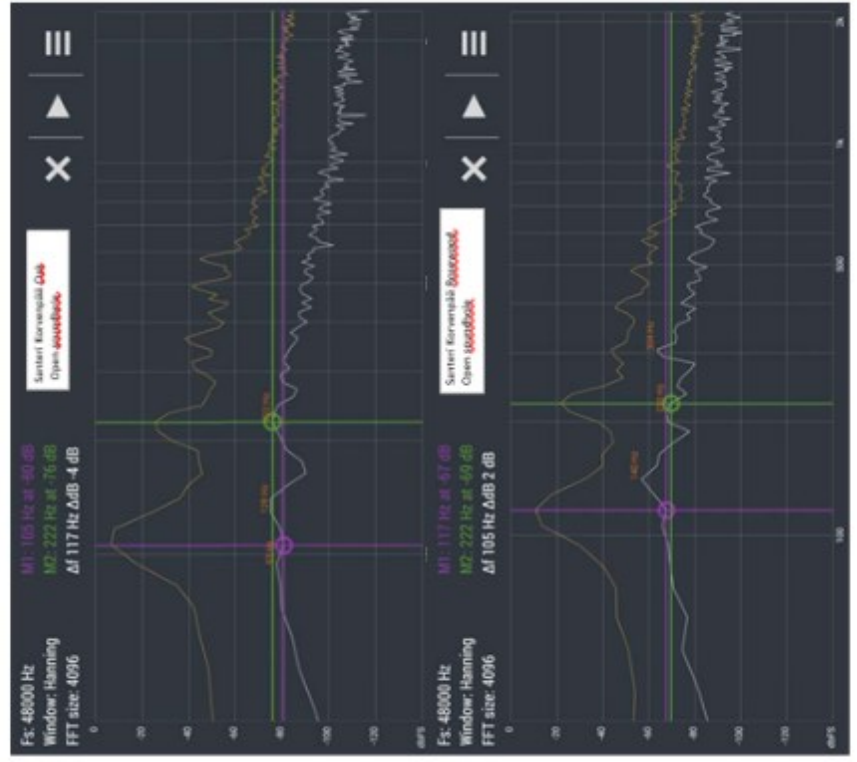


FREQUENCY CURVE SARTER KORVIO PÄÄ

TAP TONE SOUNDHOLE CLOSED



TAP TONE SOUNDHOLE OPEN







LEONARDO GUITAR RESEARCH PROJECT

Tero Siromaa  
SASKY -koulutuskeskityhymä  
ikaisten käsi- ja taideoollisuusoppilaitos

PEKKA BARCK

Tap tone chart

	Top Note	F#3-G3 Hz	Back Note	G#3-A3 Hz	Guitar Note	Air Note	Weight g	Belly bulge mm
<del>SANTEN KONVERPÄÄ</del>								
<del>Peikka Barck</del>								
<del>Jukka Soini</del>								
<del>Mikko Huttu</del>								
<del>Arto Koskela</del>								
Santen Konverpää								
Peikka Barck								
Jukka Soini								
Mikko Huttu								
Arto Koskela								

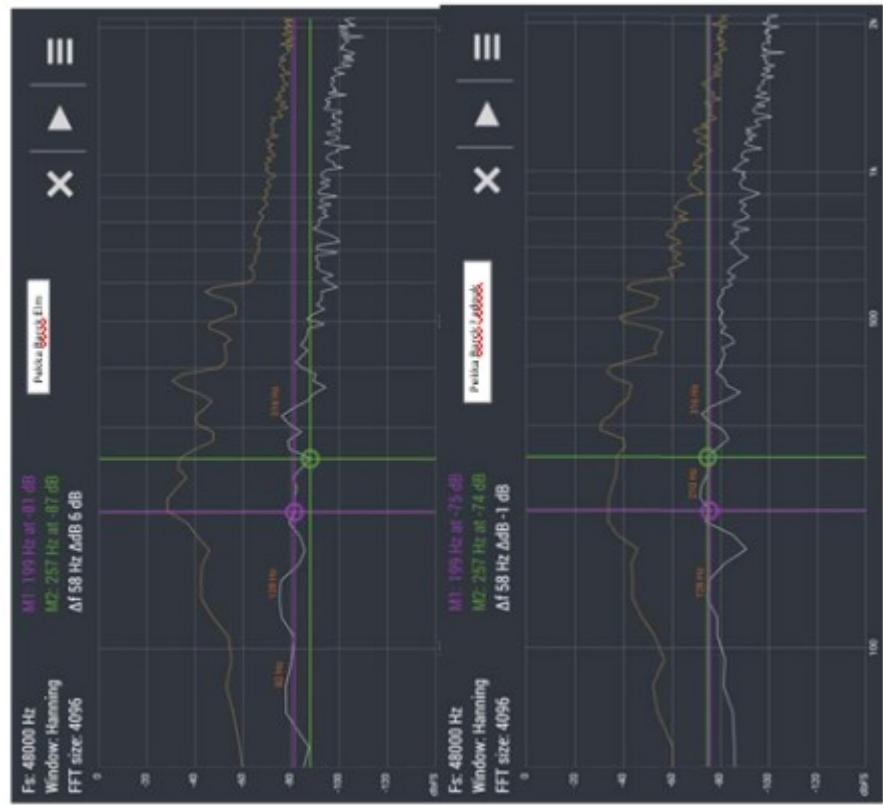
Note	Hz	Note	Hz	Note	Hz	Note	Hz	Note	Hz	Note	Hz		
C1	32.7	C2	65.4	C3	130.6	C4	261.6	C5	523.3	C6	1046.5	C7	2093.0
C#1	34.6	C#2	69.3	C#3	138.6	C#4	277.2	C#5	554.4	C#6	1108.7	C#7	2217.5
D1	36.7	D2	73.4	D3	146.8	D4	293.7	D5	587.3	D6	1174.7	D7	2349.3
D#1	38.9	D#2	77.8	D#3	155.6	D#4	311.1	D#5	622.3	D#6	1244.5	D#7	2489.0
E1	41.2	E2	82.4	E3	164.8	E4	329.6	E5	659.3	E6	1318.5	E7	2637.0
F1	43.7	F2	87.3	F3	174.6	F4	349.2	F5	698.5	F6	1396.9	F7	2793.8
F#1	46.2	F#2	92.5	F#3	185.0	F#4	370.0	F#5	740.0	F#6	1480.0	F#7	2960.0
G1	49.0	G2	98.0	G3	196.0	G4	392.0	G5	784.0	G6	1568.0	G7	3136.0
G#1	51.9	G#2	103.8	G#3	207.7	G#4	415.3	G#5	830.6	G#6	1661.2	G#7	3322.4
A1	55.0	A2	110.0	A3	220.0	A4	440.0	A5	880.0	A6	1760.0	A7	3520.0
A#1	58.3	A#2	116.5	A#3	233.1	A#4	466.2	A#5	932.3	A#6	1864.7	A#7	3729.3
B1	61.7	B2	123.5	B3	246.9	B4	493.9	B5	987.8	B6	1975.5	B7	3951.1

LEONARDO GUITAR RESEARCH PROJECT

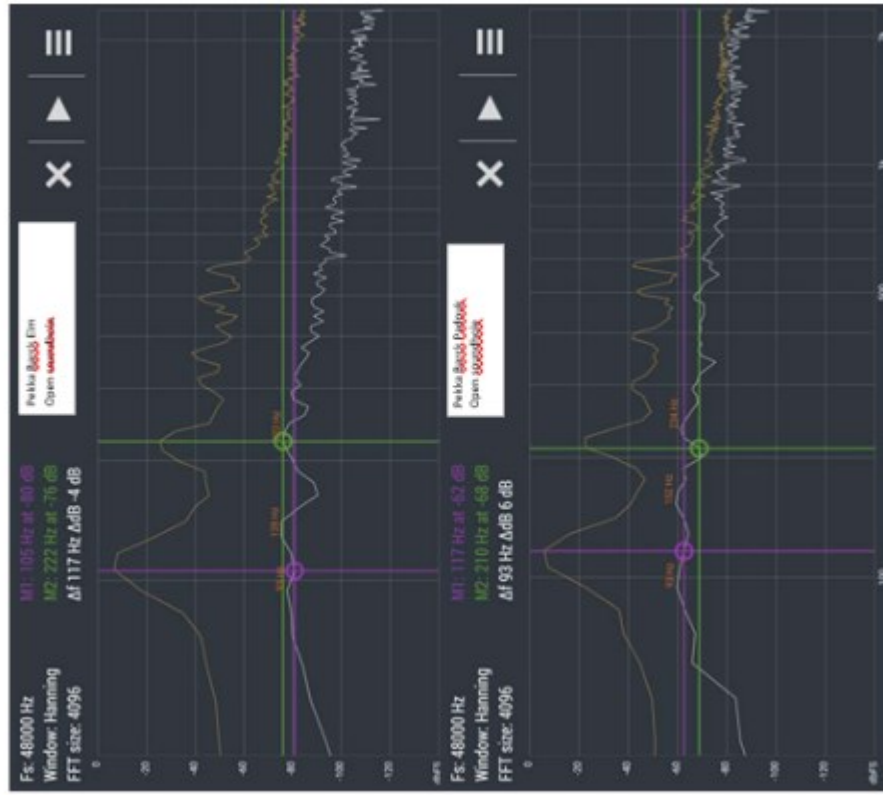
Taru Siemala  
 SAKRY Ääntäkorkeusmittaus  
 Äännealan läänne- ja värähtelösuunnittelusta

FREQUENCY CURVE PEKA BARK

TAP TONE SOUNDHOLE CLOSED



TAP TONE SOUNDHOLE OPEN







LEONARDO GUITAR RESEARCH PROJECT

Tero Siromaa  
SASKY -Koulutuskuntayhtymä  
Ilkaisten käsi- ja taideteollisuusoppilaitos

MIKKO HUTTU

Tap tone chart

	Top Note	F#3-G3 Hz	Back Note	G#3-A3 Hz	Guitar Note	Air Note	Weight g	Belly bulge mm
Samteri Korvenpää								
Peika Berck								
Ilkka Soini								
Mirri Leasvirta								
Mikko Huttu		A3	D4	D4	D2	B2	1874	0,6
Auto Koskela								
Samteri Korvenpää								
Peika Berck								
Soini								
Mirri Leasvirta								
Mikko Huttu		A3	C4	C4	C#2	A#2	1641	0,65
Auto Koskela								

Note	Hz	Note	Hz	Note	Hz	Note	Hz	Note	Hz	Note	Hz	Note	Hz
C1	32.7	C2	65.4	C3	130.6	C4	261.2	C5	522.3	C6	1044.5	C7	2089.0
CH1	34.6	CH2	69.3	CH3	138.6	CH4	277.2	CH5	554.4	CH6	1108.7	CH7	2217.5
D1	36.7	D2	73.4	D3	146.8	D4	293.7	D5	587.3	D6	1174.7	D7	2349.3
D#1	38.9	D#2	77.8	D#3	155.6	D#4	311.1	D#5	622.3	D#6	1244.5	D#7	2489.0
E1	41.2	E2	82.4	E3	164.8	E4	329.6	E5	659.3	E6	1318.5	E7	2637.0
F1	43.7	F2	87.3	F3	174.6	F4	349.2	F5	698.5	F6	1396.9	F7	2793.8
F#1	46.2	F#2	92.5	F#3	185.0	F#4	370.0	F#5	740.0	F#6	1480.0	F#7	2960.0
G1	49.0	G2	98.0	G3	196.0	G4	392.0	G5	784.0	G6	1568.0	G7	3136.0
G#1	51.9	G#2	103.8	G#3	207.7	G#4	415.3	G#5	830.6	G#6	1661.2	G#7	3322.4
A1	55.0	A2	110.0	A3	220.0	A4	440.0	A5	880.0	A6	1760.0	A7	3520.0
A#1	58.3	A#2	116.5	A#3	233.1	A#4	466.2	A#5	932.3	A#6	1864.7	A#7	3729.3
B1	61.7	B2	123.5	B3	246.9	B4	493.9	B5	987.8	B6	1975.5	B7	3951.1

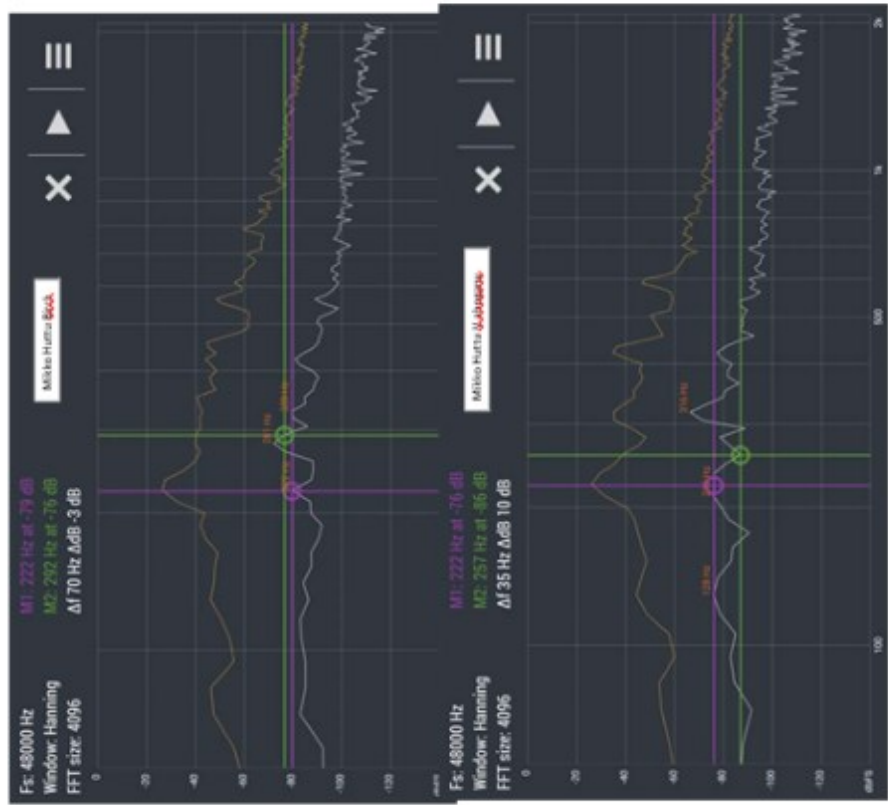
Tero Siromaa  
SÄSKY-Kouluakustanttiryhmä  
Boutiquein lähi- ja valdiesoitteluosastoon

LEONARDO GUITAR RESEARCH PROJECT

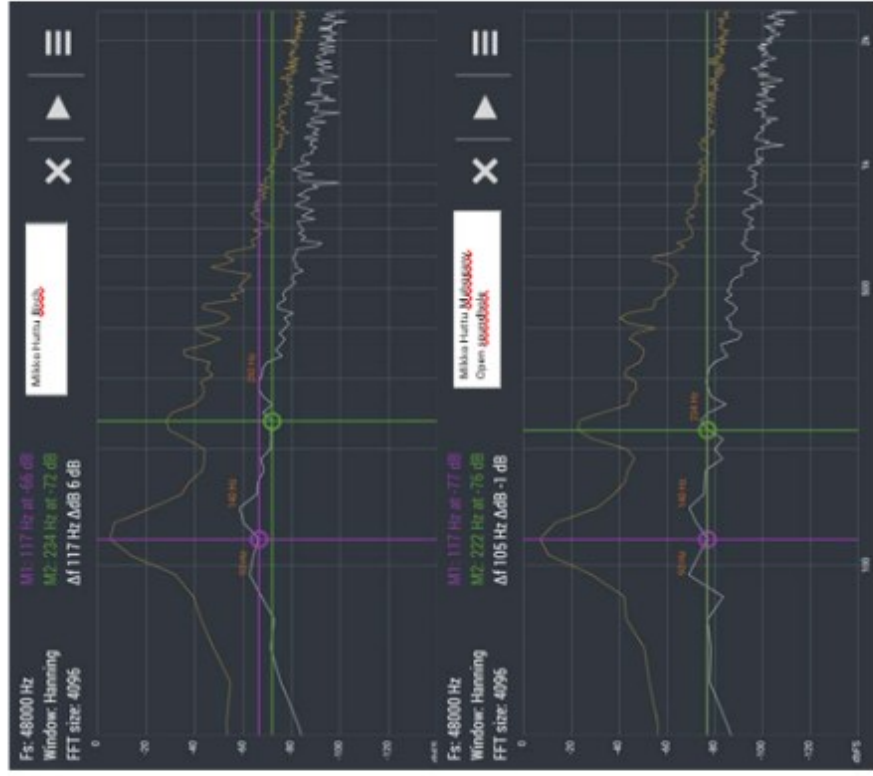


Frequency curve MIKKO HUUTU

TAP TONE SOUNDHOLE CLOSED



TAP TONE SOUNDHOLE OPEN



Tero Siromaa  
SASKY -koulukuntayhtymä  
Ilmaisten käsi- ja taideteollisuusoppilaitos

LEONARDO GUITAR RESEARCH PROJECT



KIRSI LAESVIRTA

Tap tone chart

Top Note	F#3-G3 Hz	Back Note	G#5-A3 Hz	Guitar Note	Air Note	Weight g	Belly bulge mm
----------	-----------	-----------	-----------	-------------	----------	----------	----------------

Santari	265.0	D#3					
Pekka Barck		E10					
Ilkka Soiri		A10B					
Kirsi Laesvirta		Cherry	281	D#2	118	1750	0.5
Mikko Huttu		Birch					
Arto Koskela		E10					
Santari Korvenpää		Bogwood, Indian					
Pekka Barck		Padoak ilika					
Soiri		Bogwood, Indian					
Kirsi Laesvirta		Bubinga	253	D#2	117	1851	0.5
Mikko Huttu		Mahogany					
Arto Koskela		Mahogany					

Note	Hz	Note	Hz	Note	Hz	Note	Hz	Note	Hz	Note	Hz	Note	Hz	Note	Hz
C1	32.7	C2	65.4	C3	130.8	C4	261.6	C5	523.3	C6	1046.5	C7	2093.0		
C#1	34.6	C#2	69.3	C#3	138.6	C#4	277.2	C#5	554.4	C#6	1108.7	C#7	2217.5		
D1	36.7	D2	73.4	D3	146.8	D4	293.7	D5	587.3	D6	1174.7	D7	2349.3		
D#1	38.9	D#2	77.8	D#3	155.6	D#4	311.1	D#5	622.3	D#6	1244.5	D#7	2489.0		
E1	41.2	E2	82.4	E3	164.8	E4	329.6	E5	659.3	E6	1318.5	E7	2637.0		
F1	43.7	F2	87.3	F3	174.6	F4	349.2	F5	698.5	F6	1396.9	F7	2793.8		
F#1	46.2	F#2	92.5	F#3	185.0	F#4	370.0	F#5	740.0	F#6	1480.0	F#7	2960.0		
G1	49.0	G2	98.0	G3	196.0	G4	392.0	G5	784.0	G6	1568.0	G7	3136.0		
G#1	51.9	G#2	103.8	G#3	207.7	G#4	415.3	G#5	830.6	G#6	1661.2	G#7	3322.4		
A1	55.0	A2	110.0	A3	220.0	A4	440.0	A5	880.0	A6	1760.0	A7	3520.0		
A#1	58.3	A#2	116.5	A#3	233.1	A#4	466.2	A#5	932.3	A#6	1864.7	A#7	3729.3		
B1	61.7	B2	123.5	B3	246.9	B4	493.9	B5	987.8	B6	1975.5	B7	3951.1		

Tero Siromaa  
SABY 4000kukuryhmyk  
Realtime 16k - ja 32k:näytteenotusohjelma

LEONARDO GUITAR RESEARCH PROJECT

guitars from  
**n tropical woods**  
www.leonardo-guitar-research.com

Frequency Chart KIRSI LAESVIRTA

TAP TONE SOUNDHOLE CLOSED



TAP TONE SOUNDHOLE OPEN



ILKKA SOINI

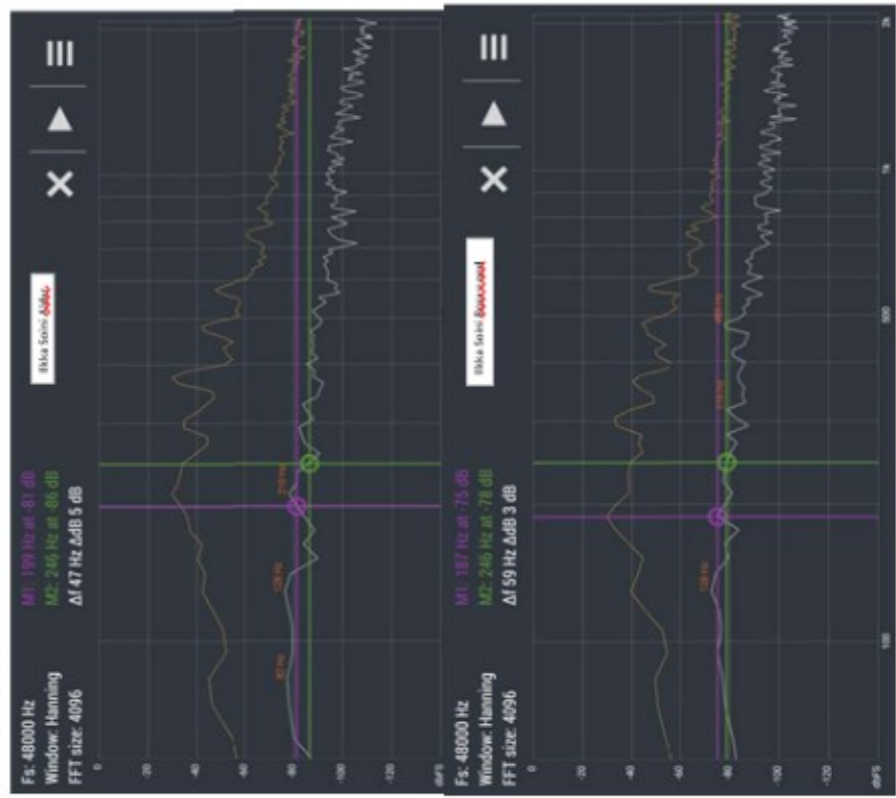
Top tone chart

	Top Note	F#3-G3 Hz	Back Note	G#3-A3 Hz	Guitar Note	Hz	Air Note	Hz	Weight g	Belly bulge mm
<u>Santali</u> <del>Kokkolampi</del>										
<u>Pekka Beck</u>										
<u>Ilkka Soini</u>	<u>G3</u>	201	<u>B3</u>	243	<u>D3</u>	74	<u>A2</u>	111	1703	<u>0,45</u>
<u>Kirsi Laesvirta</u>										
<u>Mikko Huittu</u>										
<u>Arto Koskela</u>										
<u>Santali</u> <del>Kokkolampi</del>										
<u>Pekka Beck</u>										
<u>Ilkka Soini</u>	<u>F#3</u>	186	<u>B3</u>	242	<u>D3</u>	72	<u>A2</u>	107	1720	<u>0,45</u>
<u>Kirsi Laesvirta</u>										
<u>Mikko Huittu</u>										
<u>Arto Koskela</u>										

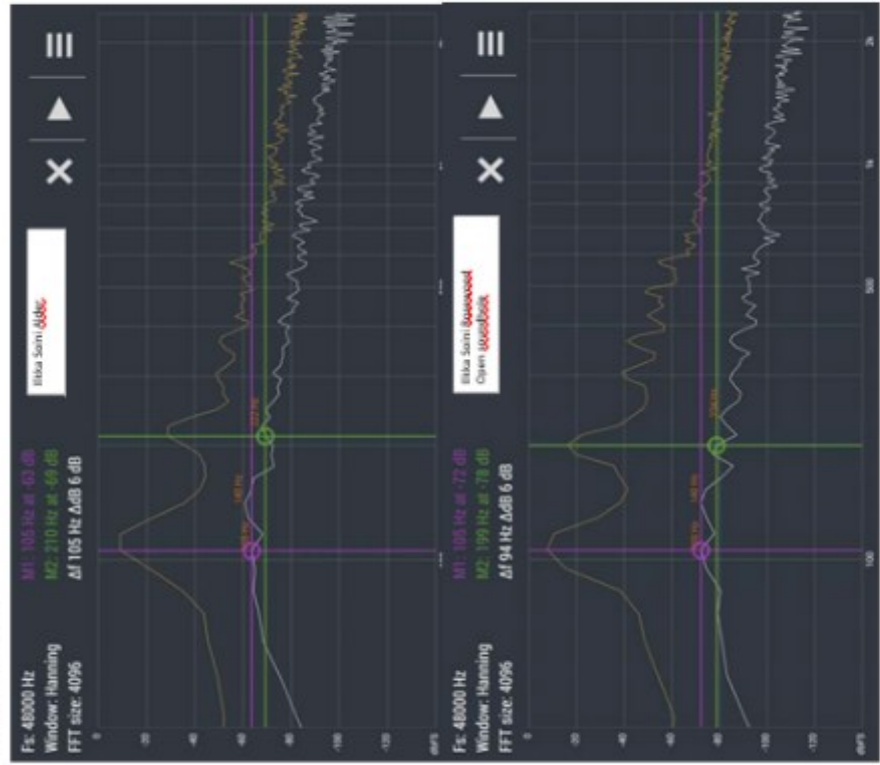
Note	Hz	Note	Hz	Note	Hz	Note	Hz	Note	Hz	Note	Hz	Note	Hz
C1	32.7	C2	65.4	C3	130.8	C4	261.6	C5	523.3	C6	1046.5	C7	2093.0
C#1	34.6	C#2	69.3	C#3	138.6	C#4	277.2	C#5	554.4	C#6	1108.7	C#7	2217.5
D1	36.7	D2	73.4	D3	146.8	D4	293.7	D5	587.3	D6	1174.7	D7	2349.3
D#1	38.9	D#2	77.8	D#3	155.6	D#4	311.1	D#5	622.3	D#6	1244.5	D#7	2489.0
E1	41.2	E2	82.4	E3	164.8	E4	329.6	E5	659.3	E6	1318.5	E7	2637.0
F1	43.7	F2	87.3	F3	174.6	F4	349.2	F5	698.5	F6	1396.9	F7	2793.8
F#1	46.2	F#2	92.5	F#3	185.0	F#4	370.0	F#5	740.0	F#6	1480.0	F#7	2960.0
G1	49.0	G2	98.0	G3	196.0	G4	392.0	G5	784.0	G6	1568.0	G7	3136.0
G#1	51.9	G#2	103.8	G#3	207.7	G#4	415.3	G#5	830.6	G#6	1661.2	G#7	3322.4
A1	55.0	A2	110.0	A3	220.0	A4	440.0	A5	880.0	A6	1760.0	A7	3520.0
A#1	58.3	A#2	116.5	A#3	233.1	A#4	466.2	A#5	932.3	A#6	1864.7	A#7	3729.3
B1	61.7	B2	123.5	B3	246.9	B4	493.9	B5	987.8	B6	1975.5	B7	3951.1

Frequency curve ERKKA SOMI

TAP TONE SOUNDHOLE CLOSED



TAP TONE SOUNDHOLE OPEN





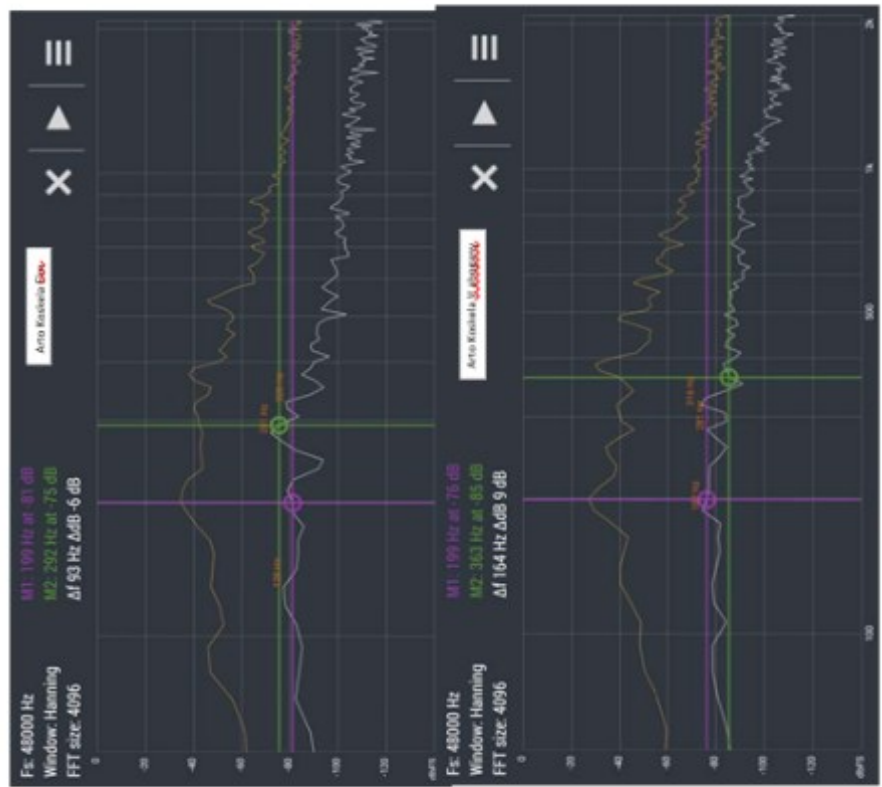


Timo Sivonius  
SABY-Ääniteknologian tutkimuskeskus  
Itämeren lähi- ja taideinstituutin oppilaitos

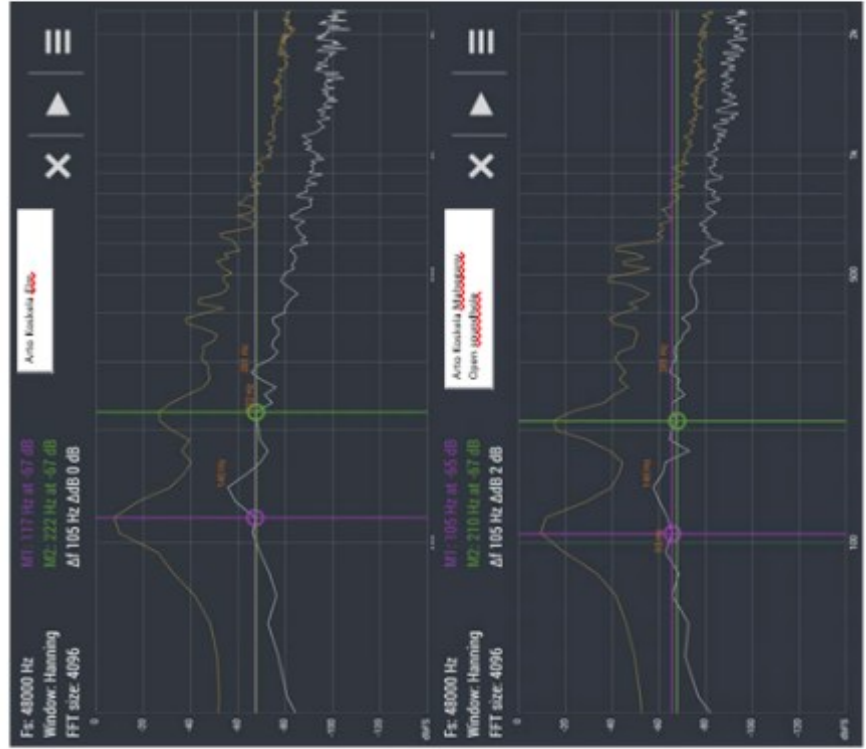
LEONARDO GUITAR RESEARCH PROJECT



FREQUENCY GATE: ARTO KOIKELA  
TAP-TONE SOUNDHOLE CLOSED



TAP-TONE SOUNDHOLE OPEN





Tero Siromaa SASKY  
-koulutusohjelmän laakalisten käsijä  
taideteollisuusoppilaitos

## LEONARDO GUITAR RESEARCH PROJECT



	Top Note	FA3-G3 Hz	Back Note	GB3-A3 Hz	Guitar Note	Hz	Air Note	Hz	Weight g	Belly bulge mm
Kirsi Laesvirta	A#3	233	C#4	351	D#2	77	A#2	118	1730	0.5
Mikko Huttu	A 3	225	D4	287	D2	74	E2	121	1874	0.8
Kirsi Laesvirta	A 3	223	E3	253	D#2	76	A#2	117	1831	0.5
Mikko Huttu	A 3	220	C 4	257	C#2	71	A#2	116	1641	0.65
Santteri Kocconen	GB3	210	E 3	253	D 2	74	A 2	114	1758	0.3
Santteri Kocconen	GB3	207	D#4	307	D 2	75	A#2	117	1857	0.4
Arto Koskela	GB3	205	D 4	291	F 2	88	A#2	114	1750	1.7
Peikka Back	GB3	205	E 3	253	D#2	76	A 2	110	1704	0.65
Peikka Back	GB3	204	E 3	254	D#2	76	A#2	113	1740	0.8
Ukka Soini	G 3	201	E 3	243	D 2	74	A 2	111	1703	0.45
Arto Koskela	G 3	195	F#4	361	F 2	87	A 2	109	1305	0.45
Ukka Soini	FA3	186	E 3	242	D 2	72	A 2	107	1720	0.45

Stiff top

Loose top

Remarks based on the charts and frequency curve only:

Kirsi Laesvirta:

Typically positioned top and back fundamental relations on both guitars. Top fundamentals are slightly high for the recommended range of FA3-G3 that predicts a probability of some tightness in sound. Suggestions: Investigation and careful loosening of the structural top and back braces might increase responsiveness of the guitar.

Mikko Huttu: Typically positioned top and back fundamental relations on a mahogany guitar. Top fundamentals are slightly high for the recommended range of FA3-G3 that predicts a probability of some tightness in sound. Back fundamental on birch guitar seems to be a little high and a little too far from top fundamental to support top resonance. Suggestions: Investigation and careful loosening of the structural top and back braces might increase responsiveness of the guitar, especially on the birch guitar.

Santteri Kocconen: Typically positioned top and back fundamental relations on an oak guitar. Top fundamentals are slightly high for the recommended range of FA3-G3 that predicts a probability of some tightness in sound. Back fundamental on rosewood guitar seems to be a little high and a little too far from top fundamental to support top resonance. Suggestions: Investigation and careful loosening of the structural top and back braces might increase responsiveness of the guitar, especially on the rosewood guitar.

Arto Koskela: Both guitars seem to have stiff backs. The elm guitar's top fundamental is slightly high for the recommended range of FA3-G3 that predicts a probability of some tightness in sound. The Mahogany guitar's top fundamental is on the suggested level, but the top bulge seems considerably large. This indicates a strong X-brace but weak finger braces beneath the bridge. Suggestions: Investigation and careful loosening of the structural top and back braces might increase responsiveness of the elm guitar. Investigating and stiffening the area behind the bridge and probably loosening the X-brace to some extent might improve the structural situation of the mahogany guitar.

Peikka Back:

Typically positioned top and back fundamental relations on both guitars. Top fundamentals are slightly high for the recommended range of FA3-G3 that predicts a probability of some tightness in sound. Suggestions: Investigation and careful loosening of the structural top and back braces might increase responsiveness of the guitar.

Ukka Soini:

Top and back fundamental relations positioned on both guitars typically and accordingly to suggestions predicting a warm and balanced sound. This can be expected to be achieved from these chosen materials. Suggestions: More guitars built and more experience improves the quality of constructing techniques and therefore produces better instruments.



