



Változtatható hangszínű csembaló prototípusának tervezése és építése

Szerző:

Boros Nándor

Konzulens:

Friedrich Dániel



2024. ősz

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Szilárdságtani és Tartószerkezeti Tanszék

Budapest

2024

ABSZTRAKT

Dolgozatunkban a csembaló hangszínének módosítási lehetőségeit vizsgáljuk. Kutatásunk a hangszín fizikai hátterével a hullámegyenletek megismerésével, illetve korábbi példák keresésével kezdődött (Friedrich and Christopher 2023). Húros hangszereknél a hangszín főként a kifeszített húr pengetési helyétől függ. (Nagy 1989) Ezt a csembalók készítésénél már tudták és alkalmazták is. Számos olyan példát ismerünk, ahol lehetőség volt a hangszeren több hangszínt is megszólaltatni. Ezt a húrok mentén különböző, meghatározott helyeken elhelyezkedő regiszterek tették lehetővé, amik között egy mechanikai szerkezet segítségével lehetett váltani (Grant O'brien 1983). Más húros hangszereknél is alkalmazzák a megszólaltatás helyének változtatását a gyakorlatban. Főként a gitárnál, de citeránál is előfordul, hogy a zenemű karakterétől függően más-más helyeken pengetik meg a húrokat, ezzel hozva létre puhább, lágyabb vagy éppen keményebb hangzásokat. Előbbinél a pengetés a húr közepe felé esik, utóbbinál a húr feszítési pontjához közel. (Traube and Smith III 2000) (Ugyanezt a tulajdonságot használják fel a dobolásnál is, csak ott nem a húron, hanem a kifeszített hártán.) Az itt leírt, ma is használt példákban az előadó teljesen szabadon bárhol pengetheti a húrt, míg a korábban taglalt csembaló esetében csak pár előre megkötött helyen teheti ezt meg. (Trévisan 2016)

A kérdés az, mi lenne, ha a csembalónál is lehetne folytonosan változó a pengetés helye, és nem csak az előre kitalált pontokon? Ez több szempontból is érdekes lehet. Egyrészt, ha a húrt pengető szerkezet pozicionáló eleme, a regiszter mozgatható, és nem kell többet készíteni belőle egy húrhoz, az könnyebb és gazdaságosabb, másrészt, ha a csembalónál ez működik és a zenészek is értékelik, akár a zongoránál is lehetne alkalmazni ezt az újítást. A zongora mechanikája abban különbözik a csembaló mechanikájától, hogy a húrok egy kalapács által ütve, és nem pengetve vannak.

Így terveztünk és megépítettünk egy mindössze egy húros csembalót, a húr mentén sínen mozgatható regiszterrel. Ezt követően méréseket végeztünk rajta, és az eredményeket összehasonlítottuk a korábban ismert példákkal.

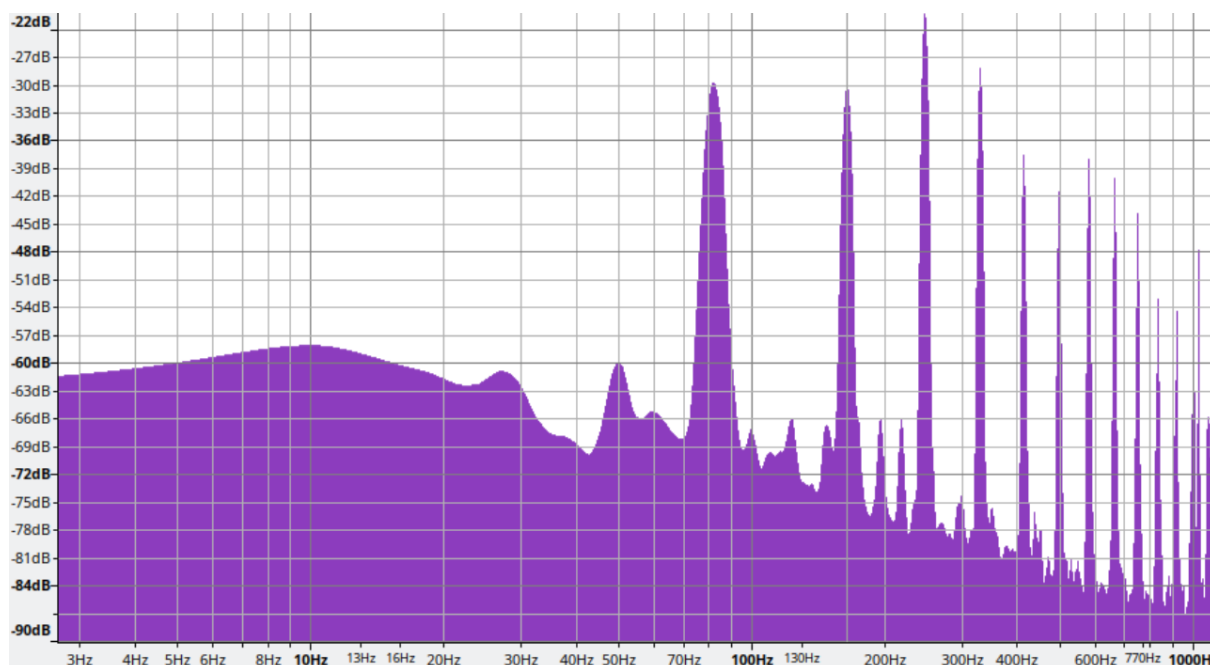
ELMÉLETI HÁTTÉR

A zenei hang fizikai háttere

A fizikai értelemben vett ideális, zenei hang Fourier-transzformáció segítségével felbontható és leírható különböző frekvenciájú és amplitúdójú harmonikus rezgések szuperpozíciójaként. A zenei értelemben vett hang áll egy alaphangból - ez rendelkezik a legnagyobb hangerővel (amplitúdóval) – és az alaphang frekvenciaszámának egész számú többszöröseiből, a felhangokból. A hangmagasság az alaphang frekvenciájától, a hangszín a hangot alkotó felhangok intenzitásának arányától függ. Éppen ezért hangszínt leírni legegyszerűbben úgy lehet, ha a hangot felbontjuk alkotóelemeire (alaphang és felharmonikusok), és azok amplitúdóját vizsgáljuk. Ezzel kapunk egy képet, úgynevezett spektrumot, ami az adott hangra jellemző. Minden különböző zenei hangra felírható egy ilyen spektrum.

Valós (nem ideális esetben) a spektrum folytonos görbe; az alaphang és a harmonikusok helyét kiugró amplitúdóértékek jellemzik.

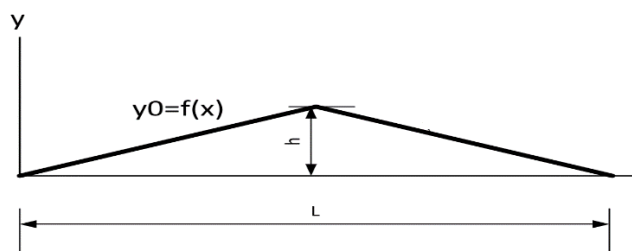
Az 1. ábrán látható vízszintes tengely mentén a frekvencia, függőleges tengely mentén az intenzitás, decibelben. Az első nagy, lokális maximum az alaphang, az utána következők a felharmonikusok.



1. ábra: megpengetett húr spektruma [Trévisan 2016]

Egy ideális húr megpengetése:

Pengetés esetén a kiindulási (kezdeti) alak háromszög alakú (2. ábra):



2. ábra: L hosszúságú, pengetéshez húzott húr geometriai modellje

Az ideális, kifeszített, hajlítási merevség nélküli, mozdulatlan végpontú húr mozgását az alábbi parciális differenciálegyenlettel jellemezhetjük:

$$\mathbf{O}\psi(x, t) = 0,$$

ahol

$$\mathbf{O} = \frac{\partial^2}{\partial x^2} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2},$$

differenciáloperátor, ahol v a hang terjedési sebessége; $\psi(x, t)$ a húr pontjainak diszlokációja az idő függvényében.

Az egyenlet (Fourier-féle) általános megoldását képzetes hatványkitevőjű exponenciális függvény, vagy ekvivalens algebrai átalakítások (Euler-formulák) után trigonometrikus függvények írják le [Nagy 1989]:

$$\psi(x, t) = \sum (A_n \cos(\omega_n t) + B_n \sin(\omega_n t)) \sin \frac{n\pi x}{L},$$

Ahol $A_n + B_n = C_n$ a modális amplitúdókat, n a harmonikus sorszámát, ω_n a körfrekvenciát, $k = \frac{\pi}{L}$ a hullámszámot jelenti. Látható, hogy a függvény egy idő- és egy térfüggő tag szorzata.

Mivel a térfüggő tag trigonometrikus alakú, a háromszög formájú kezdeti alakfüggvényt Fourier-transzformáció után elő kell állítanunk trigonometrikus bázison, hogy kapcsolatot létesítsünk a kezdeti geometria, és a hullámegyenlet megoldása között.

A_n és B_n az alábbi alakra hozható ($\psi = y$ és) [Nagy 1989]:

$$A_n = \frac{2}{\omega_n L} \int_0^L \dot{y}(x, 0) \sin \left(\frac{n\pi x}{L} \right) dx,$$

$$B_n = \frac{2}{L} \int_0^L y(x, 0) \sin \left(\frac{n\pi x}{L} \right) dx.$$

Tehát az n -edik harmonikus modális amplitúdója:

$$C_n = \sqrt{A_n^2 + B_n^2}.$$

Ideális pengetésnél a húr végétől távol, illetve húr minden pontjának kezdősebessége nulla, azaz minden x -re

$$\dot{y}(x, 0) = 0$$

és az L hosszúságú húr kezdetben háromszög alakú; ha pengetési helye a húrvégtől p távolságra van, akkor [Traube 2000]:

$$\begin{aligned} y(x, 0) &= \frac{h}{p}x && \text{for } 0 \leq x \leq p \\ &= \frac{h(l-x)}{l-p} && \text{for } p \leq x \leq l. \end{aligned}$$

Ezért

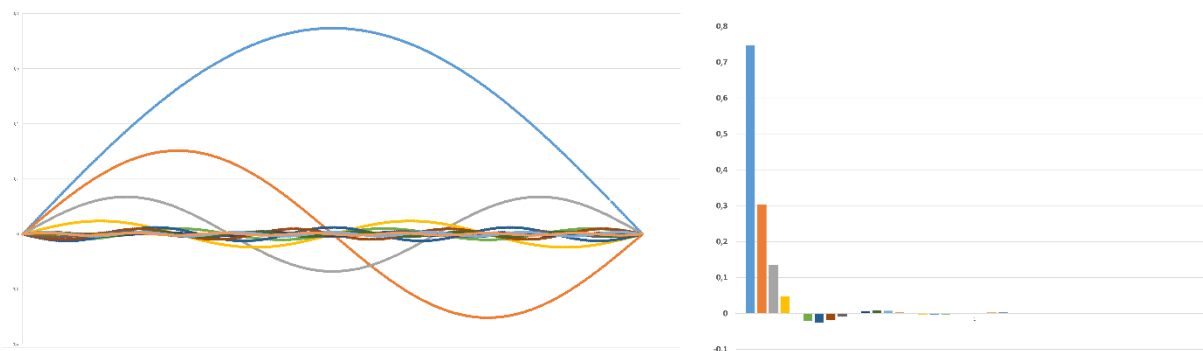
$$C_n = B_n.$$

Az integrál megoldásával megállapítható, hogy ekkor

$$C_n = \frac{2h}{n^2\pi^2 R(1-R)} \sin(n\pi R),$$

ahol $R = p/l$ a pengetés helyének az aránya a húrhosszra vetítve.

Az ideális húr, ha racionális számú húraránynál van pengetve, akkor hiányoznak azok a harmonikusok, amelyeknek van csomópontja a pengetési ponton (ez a fenti egyenletnek evidens következménye). A 3. ábra egy pengetési pozíciót mutat be, ahol a pengetés a teljes húr hosszának $1/5$ -énél történik: a spektrumból hiányoznak azok a harmonikusok, amelyek többszörösei.



3. ábra: 1/5-énél megpengetett ideális húr felharmonikusai, és modális amplitúdói

Az ideális húr és egy pengetős hangszer mért spektruma eltér: ideális húr esetén eltekintünk a húr hajlítási merevségétől; a megtámasztásokat elmozdulásmentesnek tekintjük; nem vesszük figyelembe a hangszertest és rezonáns rezonanciáját, rezgés-elnyelését, valamint a híd szűrő hatásától is eltekintünk. A valós spektrum ezzel szemben folytonos görbe (1. ábra), ahol az elméleti modellhez illeszkedő felharmonikusoknál lokális maximumok találhatók, jelezve, hogy azon frekvenciák nagyobb amplitúdóval jelentkeznek.

A hangszín különböző hangszereken

Egy fuvolán, gitáron és zongorán játszva az egyvonalas C hangot, azt mondjuk, hogy a hangmagasság megegyezik, mivel az alaphang ugyanazon a frekvencián szólal meg. A hangszínük alapján viszont egyértelműen meg tudjuk mondani, hogy melyik hangszer volt. A különbség a hangszínből rejlik.

Egy hangszer hangszíne sok dologtól függ; azt az azon való játék közben is tudjuk befolyásolni. Hangszerészeti szempontból számít a hangszer testének kialakítása, illetve a rezgőtest anyaga. Fúvósoknál ez fa vagy fém; vonósoknál a fa típusa szokott változni, pengetősöknél pedig faanyag és a húr anyaga is. Előadóművészeti szempontból pengetős hangszereknél játék közben a megszólaltatás helye, módja is befolyásolja. Az előző fejezet alapján a hangszínt fizikailag a felharmonikusok amplitúdójának aránya írja le, mely az említett hangszerészeti, és előadóművészi sajátosságok függvénye.

Csembaló régen és most

A csembaló egy főként a reneszánszban és a barokkban használt billentyűs, húros, pengetőmechanika által megszólaltatott hangszer. Hangterjedelme 4-5 oktáv, általában egy vagy két manuálja, azaz billentyűsora van. Legkorábbi fennmaradt változata 1521-ből

származik. A zongora elődjének is szokták nevezni – ennek oka, hogy ugyanúgy billentyűkkel lehet megszólaltatni az egymás mellett sorban elhelyezett húrokat. A különbség viszont az, hogy míg a zongoránál egy kalapács üti meg a húrokat, a csembalónál egy pengető pengeti meg.

A csembaló részletes működését a későbbi fejezetek mutatják be.



4. ábra: Ruckers család által készített csembaló. Bal oldalt: a gazdag ornamentikával ellátott rezonánslemezen a hangszer széléhez közelebb a 8 lábas regiszter hídja, beljebb a 4 lábas regiszter hídja. A billentyűzethez közel, három függőleges sorban helyezkednek el a regiszterekhez tartozó pengetők (kis négyzetek)

Ahogy korábban írtuk, a megpengetett húr hangszíne a pengetés helyétől függ. A csembalónak pedig a megszólaltatás módja miatt alapvetően elég éles hangja van. Ennek változatosabbá tévése érdekében készítettek olyan hangszereket is, amelyek a húrjai mentén több ponton volt elhelyezve pengető (egy billentyűhöz). Ezek váltásával lehetett játszani élesebb és teltebb hangon is ugyanazon a hangszeren.

Gyakran a csembalók két 8 lábas és egy 4 lábas regisztert (húrsor) tartalmaztak. A láb arra vonatkozik, hogy a regiszter egy adott, viszonyítási alapnak megjelölt húrjának mekkora a hossza. A 4 lábas regiszter egy oktávval magasabban szólal meg, mint a 8 lábas. Három regiszter esetében egy billentyűhöz három húr tartozik, kettő az alaphangot adja (nem tévesztendő össze a felharmonikusoknál használt alaphang fogalommal), egy pedig az egy oktávval magasabb hangot. A két alaphang pengetési helye közt eltérés van, jellemzően az egyik közelebb kerül megszólaltatásra a húrvéghez, mint a másik. Így a hangszínükben eltérés tapasztalható. Jellemzően az alaphang (8 lábas regiszter húrjai) a húr $1/7$ -e és $1/9$ -e közötti tartományban szólaltatható meg, míg a négylábas regiszter húrja a húr $1/5$ -énél. (6. ábra) A reneszánszban a

csembalóval párhuzamosan úgynevezett virginalokat is használtak, melynek a „muselar” típusát a pengetőmechanizmus közel a húr közepénél pengeti meg (5. ábra), így kerekesebb a hangzása, kevésbé éles, mint a csembalónak.



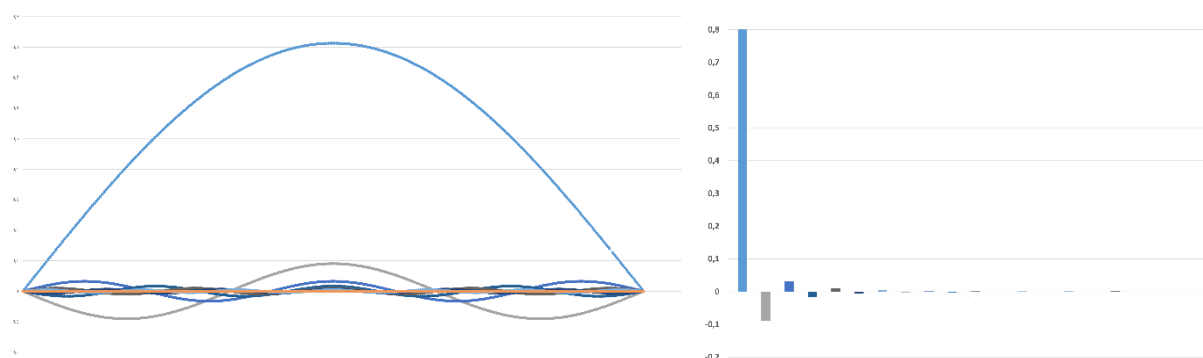
5. ábra. Ruckers család által készített muselar típusú virginal. Zöld egyenes: húr rezgő hossza; piros karika: lécs alatt található a húrhoz tartozó pengető. Látható, hogy a pengetési arány közel 1/2



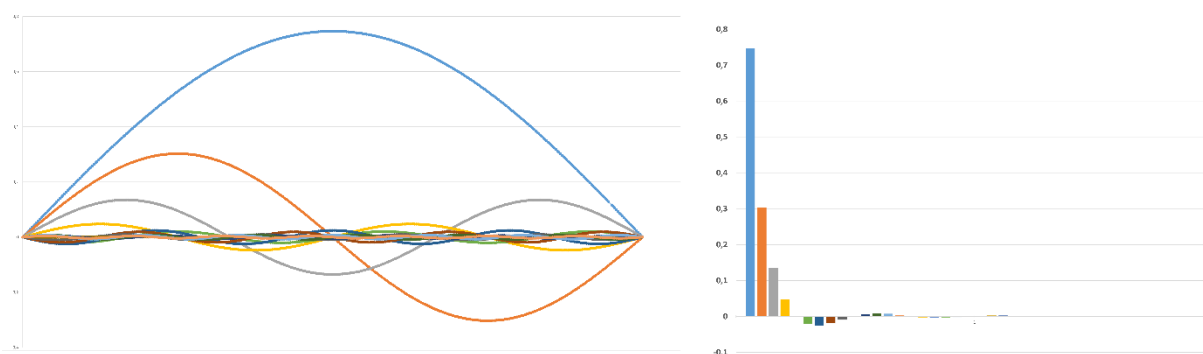
6. ábra. Ruckers család által készített flamand csembaló egy négylábás, illetve nyolclábás húrja (zöld), és a pengetési pozíciók (piros karika a regiszter fedőlemezen). A pengetéshez tartozó húrarány sokkal kisebb, mint a fenti virginal esetében

Az említett pengetési arányokhoz tartozóan ideális húr esetén meghatároztuk a húrarányokhoz tartozó spektrumot excel segítségével [Friedrich 2022]. Ahol az alaphanghoz képest kevésbé jelentősek a felharmonikusok, ott, kerek, lágy hangzást tapasztalunk; minél erősebbek a felharmonikusok, a hang annál élesebb.

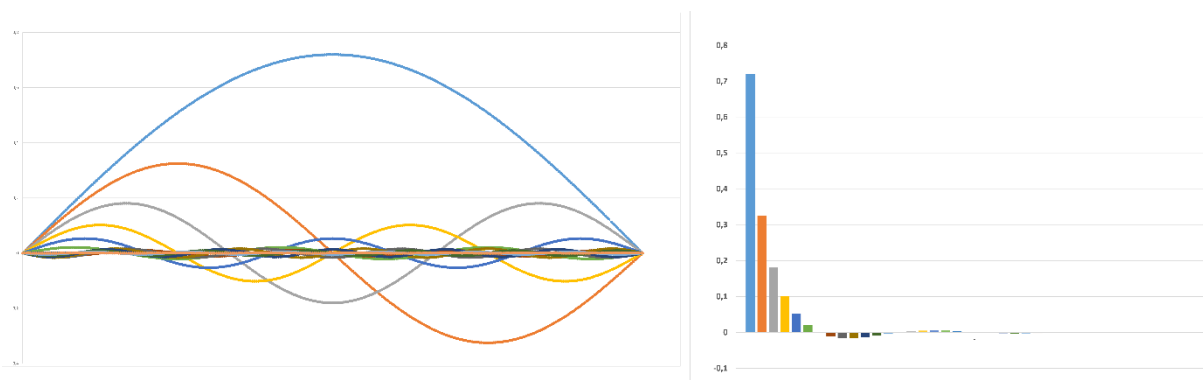
A 7-9. ábrák bal oldalai mutatják a kezdeti alakhoz tartozó harmonikusokat, jobb oldalain pedig harmonikusok amplitúdói láthatók:



7. ábra. Pengetés a húr $\frac{1}{2}$ -énél



8. ábra. Pengetés a húr $\frac{1}{5}$ -énél



9. ábra. Pengetés a húr $\frac{1}{7}$ -énél

A hangszer történetét illetően ma a csembalót leginkább akkor használják, ha korabeli, eredetileg is erre a hangszerre írt műveket játszanak, viszont létezik kortárs csembalózene is. A múlt században kísérleteztek modern csembalók fejlesztésével, az új évezredben pedig egyre gyakoribb a régi hangszerek kópiáinak készítése.

Hangszín változtatás húros hangszereken az előadói gyakorlatban

A gitárnál és a megszólaltatásban hozzá hasonló hangszereknél, mint például a mandolin, ukulele, koboz, vagy akár a kantele és a citera, a hangszínt hasonló módon lehet változtatni. Így ezt a gitárnál fejtem csak ki, de hasonlóképpen érvényes a többire is.

A gitár hangszínének módosítása szempontjából a pengetési pont húr menti elhelyezkedésének van a legnagyobb hatása. A hídhoz közeli pengetés halkabb, de világosabb és élesebb hangszínt eredményez. Ekkor a hang gazdagabb a magas frekvenciájú felhangokban. Ez fizikailag azzal magyarázható, hogy figyelembe vesszük, hogy a húr hídhoz kapcsolódó részének a lejtése meredekebb. A nyakhoz közelebbi pengetés (közelebb a húr felezőpontjához) pedig hangosabb, de lágyabb hangot ad, kevésbé gazdag magas frekvenciájú komponensekben.

A jobb ujjak helyzete miatt az alacsony húrokat általában távolabb pengetik a hídtól, mint a magasabbakat. (Traube 2006) Fernando Sor azt javasolja, hogy a jobb kéz szokásos elhelyezése körülbelül a húr hosszának tizedénél legyen: „A lágyabb és tartósabb hang érdekében érintse meg a húrt hosszának egynolcadánál a hídtól számítva... Ha erősebb hangra van szükség, érintse meg a húrt a hídhoz közelebb, mint általában, és ebben az esetben egy kicsit több erővel.”(Sor 1897)

A hangszínen sokat változtat a pengető anyaga: máshogy szól egy ujjal, vagy kemény pengetővel megszólaltatott hangszer. Az ujj, mint puha és széles pengető számos harmonikust lefojt, így tompább hangzást eredményez.

A fenti összegzés bemutatja, hogy a pengetés helye mellett milyen sok tényező közrejátszik a hangszín milyenségében; mi kizárólag a pengetés helyét tárgyaljuk.

Új ötlet a csembalóhoz

Míg a közvetlenül (kézzel) pengetett hangszereken a megszólaltatás helye tetszőleges pozícióban történhet a húr mentén, a csembalók, virginálok pengetőmechanikája diszkrét pontokon szólaltatja meg a hangszeret. Kutatásunk, fejlesztésünk célja egy olyan csembaló létrehozása, mely tetszőleges ponton tudja megszólaltatni a hangszeret.

A kutatás jelentős erőbefektetéssel jár, így a projektet ütemekre kell bontani; jelen dolgozat egy egyhúros prototípus tervét, és kivitelezését mutatja: megvizsgáltuk, hogy milyen kiegészítő eszközöket kell beépíteni a csembalómechanikába, hogy a megszólaltatás helyét módosítani tudjuk.

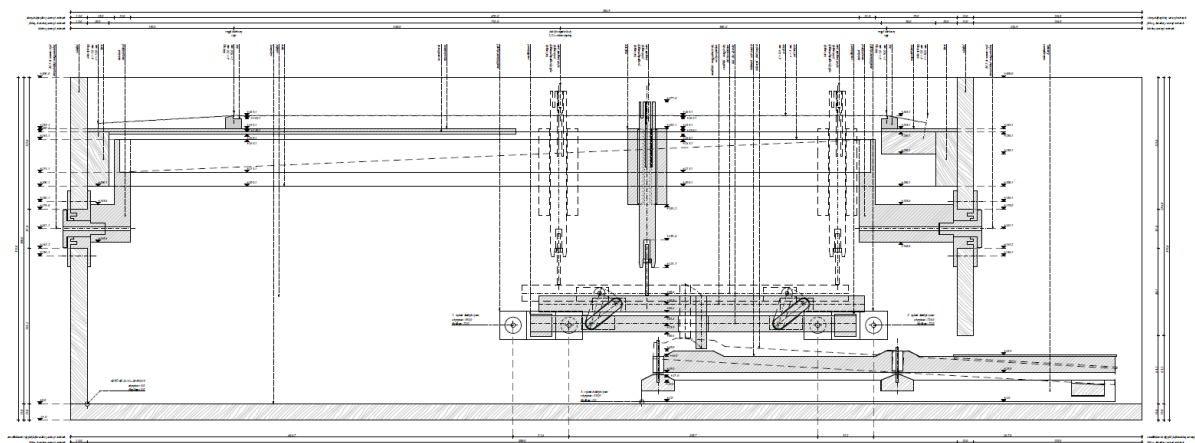
A hagyományos csembalók regisztere, és ezáltal a pengetőugrók adott helyen vannak; mi ezt a húrhossz mentén változtathatóvá tettük.

A pengetőugrónak minden pozícióban azonos magasságot kell emelkednie, viszont a billentyű a tengely közelében nem emelkedik, a végpontján pedig maximálisan emelkedik. Ezért, a függőleges mozgást kiegyenlítő, úgynevezett emelőhidat fejlesztettünk.



10. ábra. A billentyűzet, és a felette lévő emelőhíd a prototípus modelljén

A regisztert sínpáron mozgatjuk, melynek két végén azt a húrra merőleges irányban mozgó sínszabályozót helyeztünk el. Ennek szerepe, hogy pontosan be tudjuk állítani, hogy a pengetőugró a húr mentén milyen távolságra legyen a húrtól.



11. ábra. A prototípus hosszmetsetének kicsinyített rajza

VÁLTOZTATHATÓ HANGSZÍNŰ CSEMBALÓ PROTOTÍPUSÁNAK TERVE

[illegible]

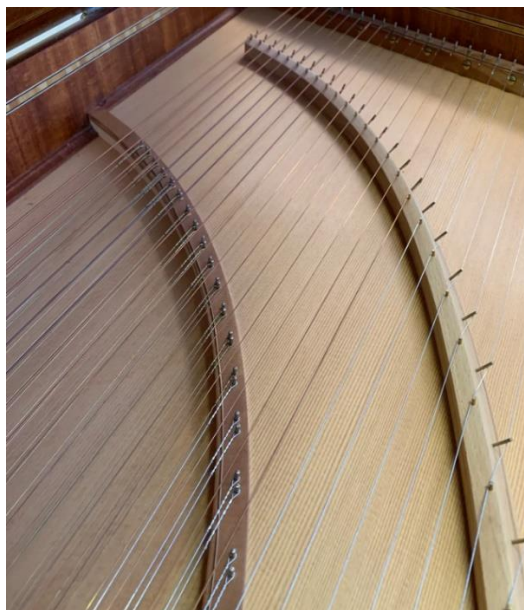
A csembaló fő hangképző eleme a húr, melyet pengetőmechanika szólaltat meg. A kifeszített húr húzóerejét keményfából (tölgy) készült keretváz veszi fel, melynek külső síkjára puhafából határoló oldallapokat készítettek. A húr önmagában a kis felülete végett képtelen jelentős rezgési energiát sugározni a környező levegő felé, így szükség van egy sugárzó felületre, mely szerepét a rezonánslemez tölti be.



13. ábra. Rezonánslemez hátoldala merevítésekkel [Wikipédia – clavecin]

A rezonánslemez jellemzően lucfenyőből készül, sugárirányba vágott, közel 3 mm-es fenyőfalapokból ragasztva. A vágási irány fontos a lehető legnagyobb homogenitás, és két főirányú anizotrópia elérésére. Ilyen vágás esetén az évgyűrűk mintázata hosszú csíkként jelenik meg. Rositrányban a hullámok terjedése gyorsabb; jellemzően a rostirány párhuzamos a húrok irányával.

A húrok a rezonánsra a hídon keresztül adják át a rezgési energiát, mely egy, a rezonánsra ragasztott keményfa rúd.



14. ábra. A csembaló hídjai, pozicionálószegekkel, húrokkal [Wikipédia]

Ahhoz, hogy a húrok a hídra feszüljenek, és energiát tudjanak átadni, iránytörést szükséges elérni, mely a rezonáns síkjában, illetve síkjára merőlegesen erőrendszert generál. A rezonáns a vékonysága végett magában képtelen lenne ellenállni ezeknek az erőknek, így az alsó oldalán bordákkal merevítik (13. ábra). A bordák vékonyak, hogy a rezgést a lehető legkevésbé csillapítsák; a rezonáns rostirányára merőlegesek, hogy a hullámterjedést elősegítsék abban az irányban, amelyik irányban a hangok lassabban terjednek. A végül a keret közelében elvékonyodik, hogy minél inkább csuklós kapcsolat jöjjön létre a rezonáns és keret között, mely szabadabb rezgést eredményez. Ugyan ennek ellentmond a tény, hogy a rezonánst a keretre ragasztják, mely merevséget ad, de a rezonáns vékonysága miatt mégsem számottevő ez a merevségi többlet. Ha nem lenne ragasztás, nemkívánatos zörejek jelennének meg a csatlakozási vonal mentén.

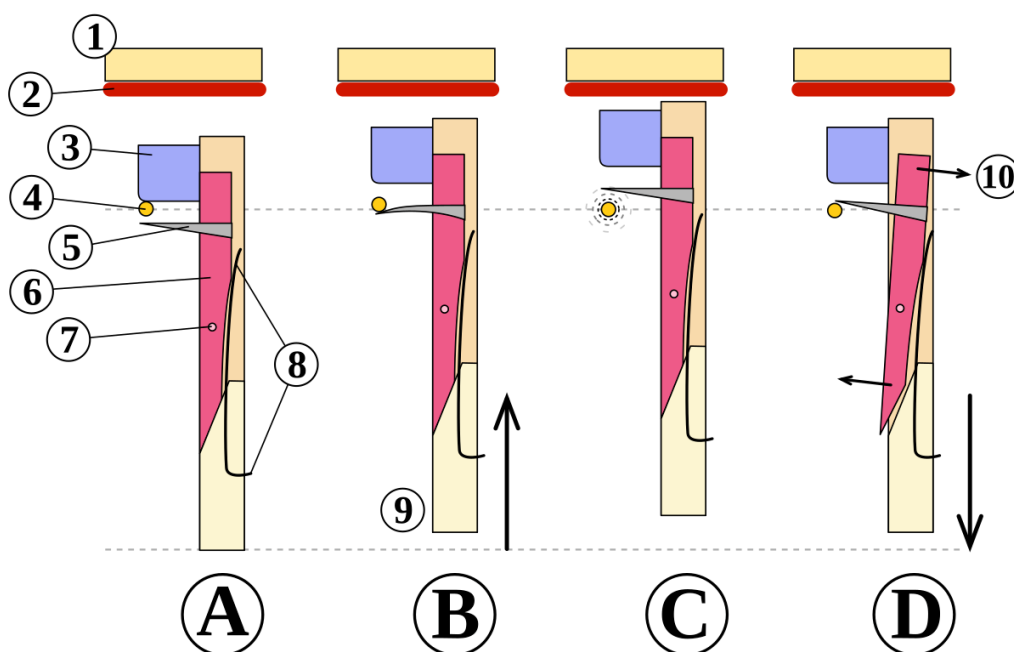
A húrok pozícióját, feszességét négy szeg szabályozza: a billentyűzethez közeli kereten a hangolószeg, mely csavarásával a húr feszíthető; a kereten lévő hídszeg, mely vízszintes síkban pozicionálja a pengetőmechanizmus számára (ez a játékoshoz közelebbi híd a magasság beállítására szolgál), a rezonánson lévő hídon található hídszeg, illetve a játékostól távolabb eső kereten lévő akasztószeg.



15. ábra. Hangolószegek [Wikipédia]

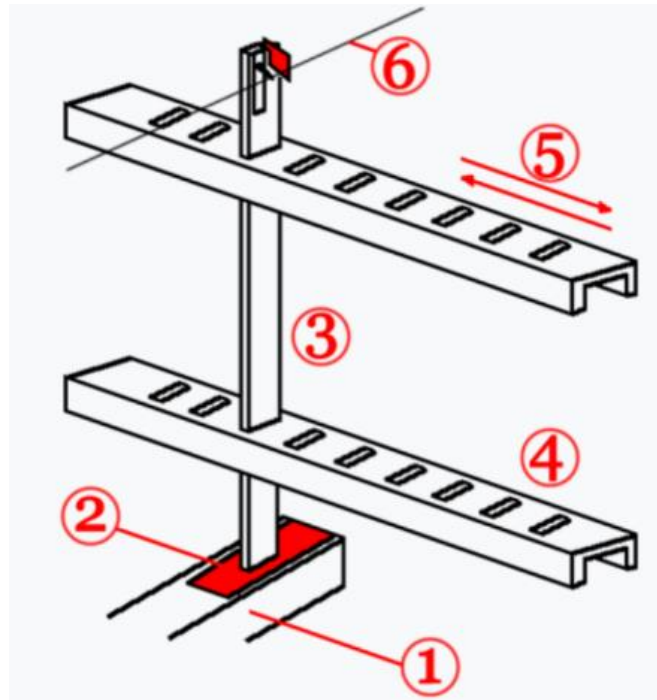
A billentyűzet egy pozicionált kétkarú emelő, mely egy saját, kivehető keretvázon nyugszik. A középtengelye egy álló szeg, mely körül billen. Jellemzően a billentyűn található egy V alakú vályat, mely alul a szűkülete végett nem engedi, hogy a billentyű előre, vagy oldalra mozduljon; fent, a táguló nyílás pedig lehetővé teszi a szeg körüli billenést. A billentyű el tudna e pont körül fordulni vízszintes síkban; ennek megakadályozása a billentyű végén található pozicionálószeg feladata. A járulékos zörejek csillapítását filc párnázat látja el.

A csembaló legnagyobb pontosságot igénylő része a pengetőmechanizmus, mely részletes leírását a következő fejezet tartalmazza; itt főleg a regiszterek hagyományos értelmezésére térünk ki. A billentyű egy ugrót mozgat, melyen pengetőtüske található, amely megpengeti a húrt. Nagyon fontos, hogy megfelelően korlátozott legyen az ugró oldalmozgása (pontos távolságra legyen a húrtól), viszont ne súrlódjon. Hagományosan körtefából készítették - ez az anyag kevésbé volt hajlamos a párávaltozásból fakadó duzzadásra.



16. ábra. A csembaló ugrójának pengetési mechanizmusa négy ütemben [wikipédia]. A: a pengetőszár a húr alatt; B: pengető megemelkedik, nekifeszül a húrnak; C: megpengeti a húrt, a húr fölé kerül; D: visszaesve kikerüli a húrt, nem pengeti meg

Az ugró úgynevezett regiszterben mozog, mely a flamand hangszerek esetén egy alsó, és felső vízszintes lemezből állt. Mindkét lemezen négyzetes vágatok találhatók az ugrók számára.



17. ábra. Alsó és felső regiszter a pengetőugró pozícionálására

Ha kellő pontosságuan illeszkedik a vájat az ugró keresztmetszetére, és a két lemez függőlegesen elég távol van, tizedmilliméterekben mérhető csak az oldalmozgás, mely nem okoz problémát a pengetés során.

Meg kell említenünk a húrsor és regiszter terminológiájának hagyományos értelmezését, hiszen a mi prototípusunk csak egy húrral dolgozik - így egészen más vonatkozik rá. Hagyományosan a csembalók minden billentyűjéhez több húr tartozott; így tudtak hangszínbeli változatosságot elérni. Ahogy a hangszínt ismertető részben írtuk, ezek a hűrok más-más hűrhosszaránynál kerültek megszólaltatásra. Így egy billentyűhöz több pengető is tartozott, melyek a hangszer egészére nézve mátrixot alkotnak. E mátrix egy sora egy regiszter (mely néha összetéveszthető a húrsorok által alkotott regiszterrel, hiszen létezett olyan, hogy azonos hűrhoz tartozott két, különböző helyen lévő pengető). E regiszterek ki- és bekapcsolhatóak, a kívánt hangszín eléréséhez.



18. ábra. Kétregiszteres csembaló. Egy billentyűhöz két húr és két pengető tartozik; egyik pengető távolabb található a húrvégtől, mint a másik

A mi fejlesztésünk azt eredményezte, hogy a húr nem csak bizonyos diszkrét pontokon szólaltatható meg, hanem a húr teljes hossza mentén - így a pengetőugró, és az azt szabályozó regiszter mozgatható. Ehhez különböző, új segédszerkezetek tervezésére volt szükség, mely ismertetését a műszaki leírás tartalmazza.

Műszaki leírás

A műszaki leírás a fejlesztett prototípus elemeinek működését és felépítését mutatja be. A műszaki leírás és az 1. számú mellékletben található tervdokumentáció egyben kezelendő – egyik a másik kiegészítésére szolgál; önállóan nem elégséges egyik sem a hangszer megértésére, illetve reprodukálására.

A műszaki leírás, és a tervdokumentáció megértését axonometrikus ábrák segítik. Célszerű a megértéshez először a hangszer 1:1-es léptékű hosszmetsetét, axonometrikus ábrákat, és leírásokat áttekinteni, majd másodjára az egyes részletrajzokon felfedezni a műszaki leírásban található egyes funkcionális elemeket.

Billentyű

A billentyű a hangszer egyik központi eleme, lenyomás hatására megemeli az emelőhidat, ami a pengetőt mozgatja, így keletkezik a csembaló hangja. A billentyű a vázszerkezeten nyugszik, melynek alapját két 20*40 mm-es keresztmetszetű fenyőfa lécs alkotja, amire faragásztóval és rálapolással rögzítünk három darab keresztirányú fát. Az alsó téglalap keresztmetszetű lécs szerepe a távtartás és a hangszer testéhez való csatlakozás, míg a felső deszkákon helyezkedik el maga a billentyű. Az 1-es keresztlécen helyezkedik el a billentyű oldalirányú mozgását

akadályozó pozicionáló szeg, míg a 2-es számú lécen található a billentyű tengelyét alkotó szeg. Ez, sarkainál ékbe vágott lécszerkezete teszi lehetővé, hogy a billentyű minél kevesebb fennakadással, szabadon mozoghasson függőleges irányban, azaz ne gátoljuk meg a billentyű függőleges síkbeli elfordulását. A 3-as lécszerkezete, valamint elhelyezkedése teszi lehetővé, hogy a billentyű maximális elmozdulása a pengetéshez szükséges 10 mm-es emelkedési-süllyedési magasságot elérhesse, de ne tudja meghaladni azt.

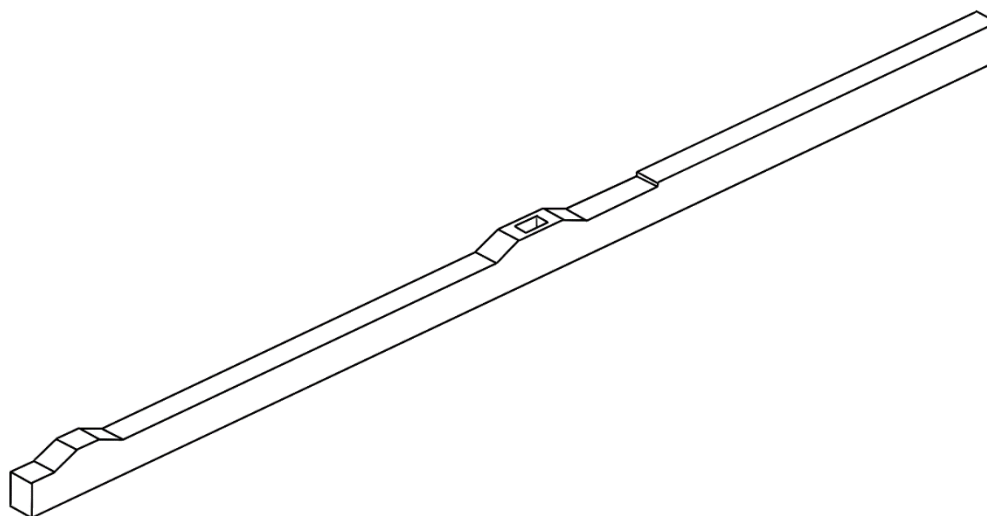
A fa felülete csiszolt, további felületkezelés nem szükséges, mivel a szerkezetet eltakarják a külső fedőlemezek.

A billentyű 3d nyomtatással készül több darabból, ennek oka, hogy a rendelkezésre álló nyomtató tálcája 220*220 mm-es felülettel rendelkezik, ezen méreteket pedig meghaladja a billentyű teljes, 425 mm-es hossza. A tengely és az emelkedési pont között 200-200 mm távolság van a tengelytől két oldalra, az ezen túlnyúló rész a pozicionáló szeg elhelyezkedése, valamint a billentyű hátsó felének villás elágazása miatt van. A darabok felezéssel, és műanyagragasztóval vannak összeillesztve. Keresztszerkezete úgy lett tervezve, hogy a hajlítási merevsége ellenálljon a használat közben létrejövő függőleges síkú terheknek. A billentyű általánosságban 15 mm magas és 10 mm széles (a függőleges síkú hajlításnak ellenálló merevség miatt magasabb, mint szélesebb), az emelési pontnál és a középső, vályús résznél 5 mm-el magasítva, így éri el a 20 mm-es magasságot. A magasításra az emelő esetében azért van szükség, hogy szerelésnél a billentyűzet kihúzásakor a pozicionáló szeg ne akadjon bele az emelőhíd mozgató rúdjaiba, a középső résznél pedig azért, mert a magasabb vályú jobban akadályozza a billentyű függőleges síkból történő kimozdulását. Az emelőhídnál lévő magasítás szélességét az emelőhíd rúdjának mozgás közbeni járulékos oldalmozgásának, szerkezeti szélességének, és kétoldalt 3 mm kiegészítő szélesség összege adja. A középső lécen elhelyezett szeg a billentyű tengelye, ami körül elfordul, függőleges síkban maradva. Az itt tengelyként szolgáló szeg, valamint a pozicionáló szeg vastagsága 2 mm, magasságuk 19 mm.

A tengelyszeg körüli billenést a szög környezetében, a billentyűben kialakított V alakú ék teszi lehetővé, amelynek szélessége biztosítja az elfordulást. A V alak alul szűk, így a billentyű nem tud oldalra elmozdulni, felül viszont tágabb, lehetővé téve a szükséges elfordulást. Ezt az ideális mozgást a billentyű emelési pontjának emelkedése határozza meg. Mivel az emelési pontnak 10 mm-t kell emelkednie, a billentyű 2,8°-ot fordul el a tengely körül. Ebből adódóan a rés szélessége felül 10 mm, alul pedig 2,2mm, amiből 2 mm a szög szárának vastagsága, 0,2 mm pedig a szorulás elkerülése miatti távolságtartás.

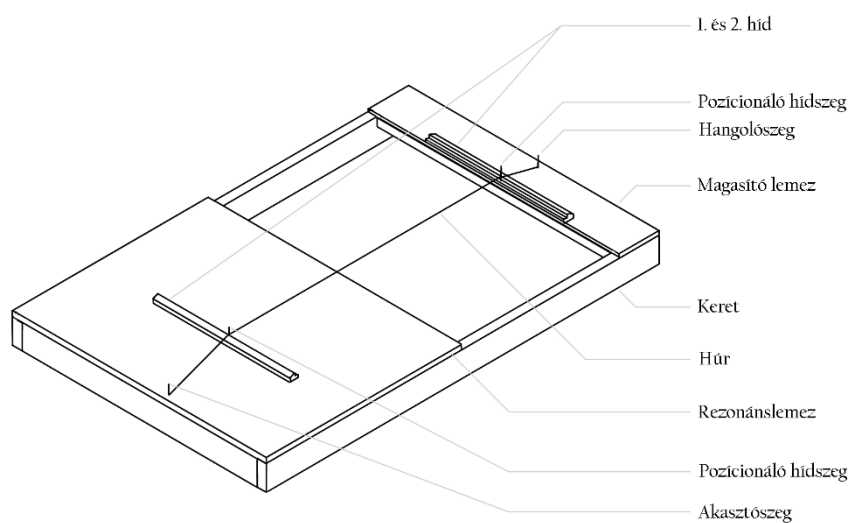
Mivel a billentyű csak egy ponton csatlakozik az alaphoz, az oldalirányban is el tud forogni. Ennek megakadályozásához kell elhelyezni egy pozicionáló szeget a hátsó, kereszt irányú lécen. Ennek befogadásához a billentyű hátsó, szerkezeten belüli vége villásan szétágazik, itt is szükséges a 0,2 mm szorulás elleni távolságtartás a szeg és a mozgó rész között.

A billentyű és az alap találkozásainál használat közben felmerülő kopogó hang tompítására 2 mm vastag filc anyagot használunk, amely ragasztással van a szerkezetre rögzítve.



19. ábra: Billentyű axonometrikus ábrája

Keret



20. ábra: keret, rezonáns, híd, húr axonometrikus ábrája

A hangszer külső borítását a fedőlapok alkotják, amelyeknek a határoláson túl támasztó- és merevítő szerepük is van. Ezek 15 mm vastag rétegelt bükkfa lemezből készülnek, felületük lakkozott, egymáshoz 2.5 mm-es szárvastagságú csavarokkal vannak rögzítve. A teljes borítás egy 300x980 mm-es, egy 415x985 mm-es, és egy 400x300 mm-es lemezből áll.

A külső borításhoz csatlakozik közvetlenül a hangszer egyik központi eleme, a keret, ami a tartószerkezeti vázat alkotja. Feladata az akasztó- és hangolószegeken átadódó, húr feszítését szolgáló erő felvétele. További feladata a rezonáns, a játékoshoz közelebbi híd, valamint bizonyos húrszegek, illetve azokon keresztül közvetetten a húr tartása. A keret 2.5 mm-es szárvastagságú csavarokkal van a borításhoz rögzítve. A keretet 5 darab, 50*20 mm-es keresztmetszetű, lakkozott felületű bükkfa gerenda alkotja, egymáshoz szintén 2.5 mm-es szárvastagságú csavarokkal rögzítve. A kereten helyezkedik el a rezonáns, a húr, a húrszegek, valamint közvetetten a hidak.

A rezonáns nagy felületű, rugalmas, vékony lemez, feladata a húr rezgéseinek felerősítése, illetve a játékostól távolabb lévő híd tartása. Anyaga általában akusztikai szempontok miatt sugárirányban szeletelt lucfenyő vagy ciprus (ezeknek a fáknek homogén, párhuzamos az évgűrűk által kirajzolt mintázata), a modellen 400*400mm területű, 3 mm vastag balsafa, felülete lakkozott.

A hídon lévő pozícionálószegek vízszintes törést képeznek a húr vonalában, így a húr húzóereje miatt vízszintes erőkomponensek is ébrednek, amik a hídon keresztül a rezonánusra adódnak át. Továbbá a híd magasabban helyezkedik el, mint a húr akasztó- és hangolószegeknél található csatlakozási pontja – a húr így feszül rá a hídra, és így képes rezgési energiát átadni – ezért a rezonánsra hajlító igénybevétel is ébred. A rezonáns felveszi a szögtörésből keletkező vízszintes erőket, csavarónyomatékokat, és továbbítja a keretgerendákra. A hajlítási igénybevételekkel szemben is ellenállónak kell lennie, ezért a rezonánst bordázattal szükséges ellátni. A bordáknak a hajlítási merevségen kívül akusztikai szerepük is van, ugyanis ezek segítik a rezgések vezetését keresztirányba.

A rezonáns közvetlenül a kereten helyezkedik el, ragasztással rögzítve. Rostiránya párhuzamos a húr tengelyével, mivel a rezonánsra a hullámok rostirányba terjednek a legnagyobb sebességgel. Alján, a rezonáns rostirányára merőlegesen, ragasztással rögzített merevítő bordák helyezkednek el. A bordák a rezonáns széle felé elvékonyodnak, hogy ne merevítsék a rezonáns-keret kapcsolatot – a keret így tud szabadon rezegni. A rezonánsra található az egyik híd, szintén ragasztással rögzítve.

A hidak közvetlenül a rezonáns síkja felett helyezkednek el. Az egyik maga a rezonáns, a másik vele szemben, a keret másik oldalán (ennek megtartására szolgál a keret vízszintes gerendája), ragasztással rögzítve. Feladatuk a húr függőleges, és vízszintes pozicionálása a rajta lévő hídszegeken keresztül. A rezonánsra fekvő hídnak ezen túl feladata a húr rezgéseinek a rezonánsra történő továbbítása, valamint a húr feszítőerejéből és szögtöréseiből keletkező vízszintes és függőleges erőkomponensek felvétele, továbbítása, és szétosztása a kapcsolódó szerkezeteken.

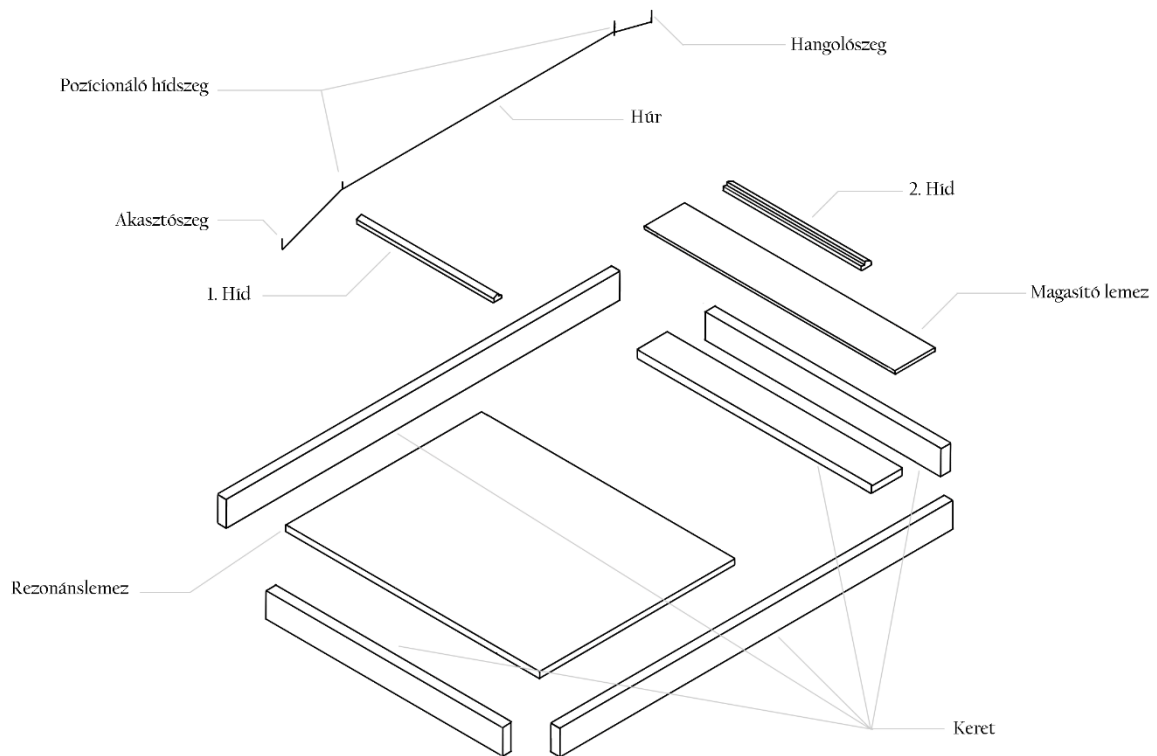
A két híd 200 mm hosszú, és 12 mm magas, 15 mm széles, bükkfából készült, pácolatlan rúd. Azért van szükség keményfára, hogy a híd minél jobban továbbítsa a húr rezgéseit a rezonánsnak. Ugyanezen célból a híd sarkai ék alakban levágásra kerülnek. Ebből kifolyólag a húr kisebb felületen fekszik fel a hídra, így az kevésbé tompítja annak rezgését. Fontos, hogy a két híd magassága egy síkba essen, ezért a rezonánssal szemközti oldalon helyezkedik el a híd alatt a magasító lemez.

A magasító lemez célja, hogy a két híd egy magasságba kerüljön. Vastagsága és felületkezelése is megegyezik a rezonánséval, tehát 3 mm vastag, lakkozott felületű balsafa. Területe 70x400 mm, a rezonánssal szemközti oldalon helyezkedik el. Ragasztással van a szerkezethez rögzítve, valamint a rajta lévő híd is ragasztással van ráragasztva.

A hidakon helyezkedik el egy-egy pozicionáló szeg, ezek feladata a húr vízszintes pozicionálása, valamint a szögtörésből adódó vízszintes erőkomponensek továbbítása a hídra. A szegek 2.5 mm szárvastagságúak, a hídra merőlegesen előfűrt lyukakba vannak elhelyezve.

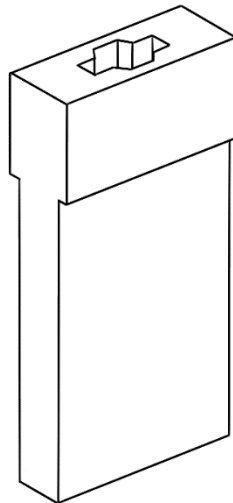
A hídon túl a rezonánsra helyezkedik el az akasztószeg is. Ez a húr feszítését szolgálja, a húr feszítőerejéből származó erőket pedig továbbítja a keretre. A húr stabilan maradó vége ebbe a szegbe van beakasztva. A szeg 2.5 mm szárvastagságú, a keretre merőlegesen előfűrt lyukba van elhelyezve. Tengelye enyhén dőlt – merőleges a ferdén érkező húrra.

Az akasztószeggel átellenben a keret túloldalán, a magasító lemezen helyezkedik el a hangolószeg. Erre a szegre tekerjük fel a húr játékoshoz közelebbi végét, ezt csavarva lehet állítani annak feszességét. A szeg 2.5 mm szárvastagságú, a keretre ferdén előfűrt lyukba van elhelyezve, így a ferdén érkező húr merőlegesen csatlakozik a szegre, és nem sodródik le róla a feszítőerő hatására.



21. ábra: keret, híd, húr, rezonáns robbantott axonometrikus ábrája

Regiszter



22. ábra: regiszter axonometrikus ábrája

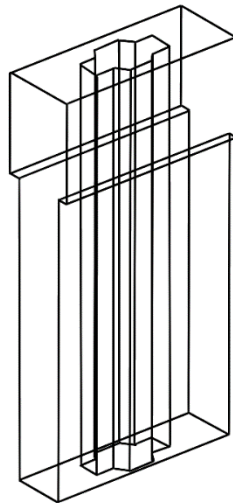
A regiszter a csembaló kiemelkedő fontosságú eleme; feladata, hogy vezesse a benne elhelyezkedő ugrót. A regiszter a benne lévő üregén keresztül lehetővé teszi az ugró függőleges

mozgását, ugyanakkor gátolja annak oldalirányú elmozdulását. Így az ugróban lévő pengető tollszár megfelelő pozícióban találkozik a húrral a billentyű lenyomásakor.

Az üreg alakja az ugró külső palástjának alakját követi, 0,5 mm térközzel a regiszter és a pengető között, kivéve az üreg két végénél, fent és lent, ahol két szorítóperem helyezkedik el. Az elemek közötti távolságra azért van szükség, hogy minimálisra csökkentsük a közöttük felmerülő súrlódást, így elősegítve a könnyebb mozgatót, míg a szorítóperemek akadályozzák meg a pengetőt az oldalirányú elmozdulástól. A peremek 0,6 mm magasak, a pengető és a perem között pedig 0,2 mm távolság van. Az oldalirányú elmozdulás korlátozásán nagy hangsúly van: a hangszer készítése során a perem pontosságára kell a legnagyobb figyelmet fordítani. Ha az ugró teteje pár tized millimétert is kitér, a pengető vagy nem érinti a húrt, és így nincs hangképzés, vagy túlzottan nagy része kerül a húr alá, megakad, így képtelen azt megpengetni. E két szélsőérték közti változás pedig hangerőbeli eltérésekhez vezet.

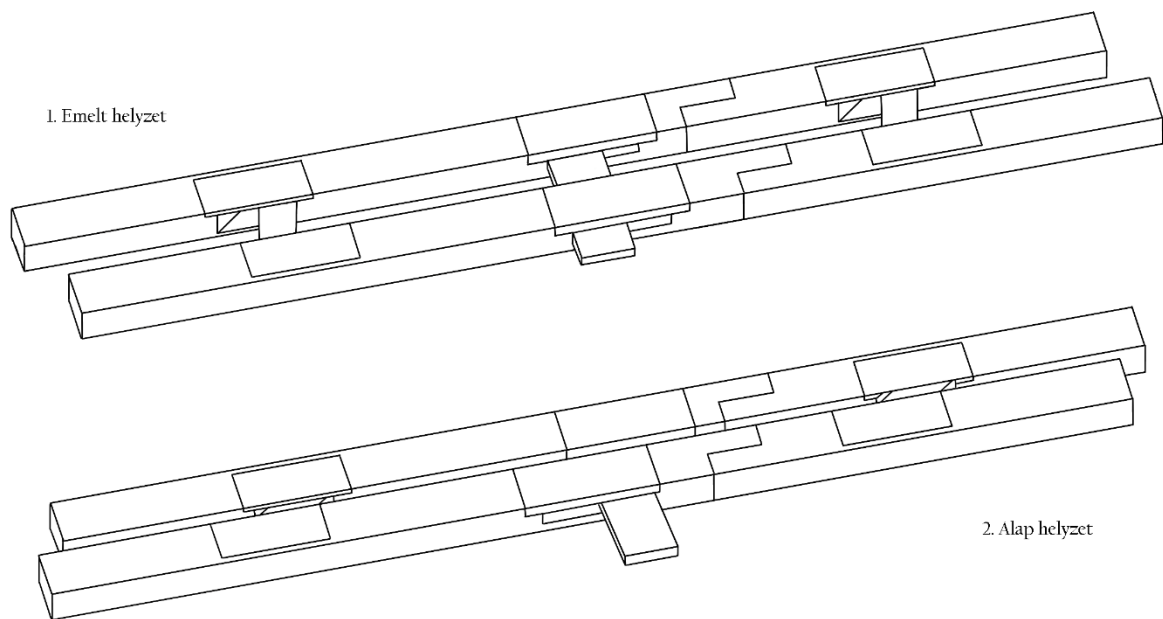
Az elem 3d nyomtatással készült, egy darabban; anyaga PLA. A szerkezet magassága 80,0 mm – a nagy magasság az ugró oldalirányú elmozdulását korlátozza. Az alsó részen 60,0 mm magasságig 10,0*35,0 mm külső keresztmetszetű, a felső részen pedig 20,0 mm magasságban 13,6*35,0 mm külső keresztmetszetű. Az alsó rész mellett helyezkedik el párhuzamosan a 21,0 mm magas, 3,0 mm széles alumínium vezetősín pár, amelyen előre-hátra lehet tolni a regisztert, a húrral párhuzamosan. A felső rész az alsóhoz képest kiszélesedik 1,8 mm-el, oldalperemet alkotva, ezzel a peremmel ül rá a sínre a regiszter meghatározott magasságban.

A test közepén egész magasságában áthaladó 4,4*15,4 mm keresztmetszetű, ugró számára nyitott üreg, amely a függőleges középtengelyére illesztett hatszög alakban kiegészítő bemetszéssel ellátott, hogy a pengetőn elhelyezett csavar feje, valamint az ugró hátra billenő része se ütközzön neki az oldalfalaknak, illetve a peremnek. A tágitott rész mérete a csavar fejének méretéhez igazodik. A hatszög alakú fej párhuzamos lapjainak távolsága 8,0 mm, ehhez hozzáadunk mindkét oldalon 0,4 mm távolságot a szorulás elkerülésének érdekében. Ebből kifolyólag az üreg szélessége a közepén $8,0 + 2 \cdot 0,4 = 8,8$ mm. Így a regiszter legvékonyabb fala a csavar környezetében 0,6 mm vastagságú.



23. ábra: regiszter axonometrikus ábrája a belső élek ábrázolásával

Emelőhíd



24. ábra: emelőhíd axonometrikus ábrája nyugalmi (fent) és emelt (lent) pozícióban

Az emelőhíd szerepe, hogy a billentyű tengelye mentén eltérő mértékű emelkedését kiegyenlítse. A hangszermodell különlegessége, hogy az átlagos csembalóktól eltérően – ahol az ugrót egy előre meghatározott helyen emeli a billentyű – itt az ugró helyzete a húr mentén

változtatható, ezért egy meghatározott szakasz hosszán van szükség azonos mértékű emelkedésre.

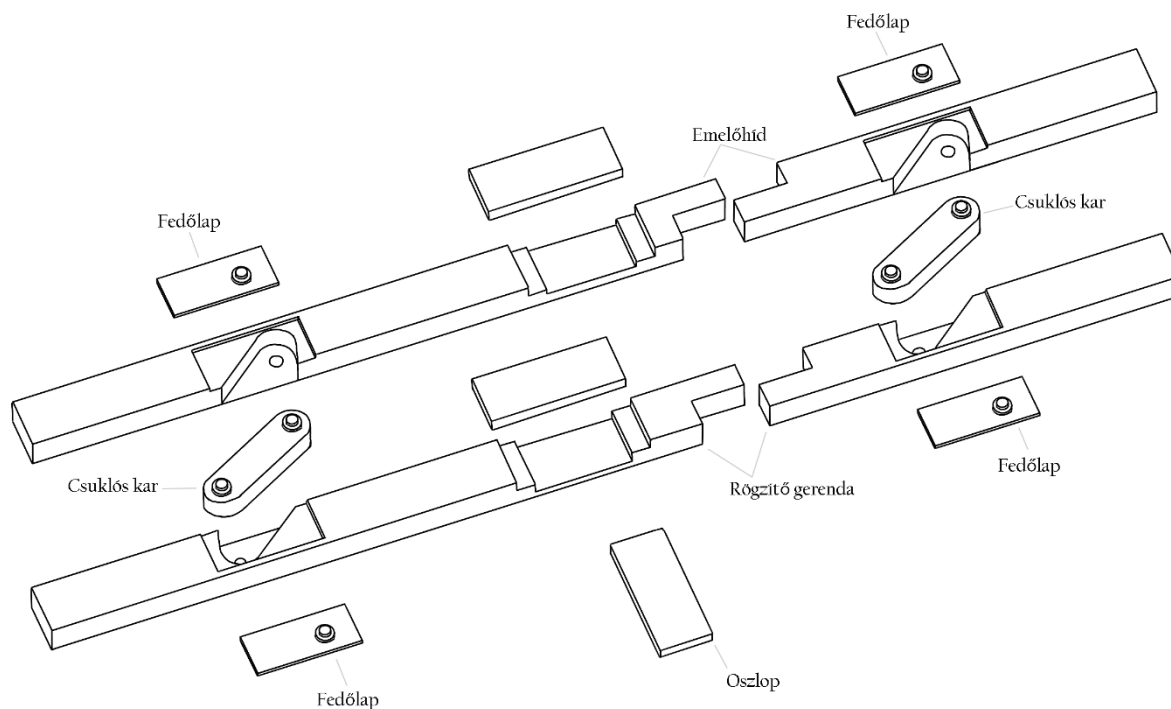
A szerkezet két gerendából áll, amit csuklós karok kötnek össze egymással. Az alsó, rögzítő gerenda feladata az emelőhíd tartása és pozicionálása. Két oldalán, három irányba állítható tartórúdon keresztül van rögzítve a külső falakhoz. A gerenda keresztmetszete 15,0*13,0 mm, közepén egy 3,0*27,2 mm-es nyílással, hogy biztosítani tudja az emelőhidat és a billentyűt összekötő oszlop szabad, súrlódásmentes mozgását. A középső nyíláson kívül még két, fedőlappal zárható vájat található az oldalán; ezek a csuklós karok fogadására szolgálnak. Mindkét vájat 10,0 mm széles, 23,6 mm hosszú, és 13,1 mm magas. Anyaga 3d nyomtatott PLA. A maximális nyomtatási hossz miatt két részből épül fel, feles lapolással toldva, műanyagragasztóval egyesítve.

A felső gerenda az emelőhíd, feladata az ugró 10,0 mm-es emelése a híd tengelye mentén, tetszőleges pontban. A gerendát a közepénél csatlakozó oszlopon keresztül a billentyű mozgatja. A gerenda 15,0 mm magas és 13,0 mm széles, közepén egy 2,8 mm széles és 25,2 mm hosszú nyílással, ennek feladata az emelőhidat és a billentyűt összekötő oszlop fogadása. Az oszlop nyílásba való rögzítése ragasztással történik. Ezen kívül, az alsó gerendához hasonlóan található rajta két, fedőlappal zárható vájat, a csuklós karok fogadására. Mindkét vájat 10,0 mm széles, 23,6 mm hosszú, és 13,1 mm magas. Anyaga 3d nyomtatott PLA. A maximális nyomtatási hossz miatt két részből épül fel, feles lapolással toldva, műanyagragasztóval egyesítve.

A két gerenda két csuklós karral csatlakozik egymáshoz. A karok célja az emelőhíd és az alsó rögzítőgerenda összekapcsolása, az emelőhíd emelkedésének lehetővé tétele, valamint az emelőhíd tengelyének mozgásának párhuzamossá tétele a rögzítőgerenda tengelyével. 10,0 mm magas, 7,6 mm széles, és 39,0 mm hosszú, az egyéb részekkel azonos nyomtatási beállításokkal 3d nyomtatott PLA kar, alul-felül lekerekítve a könnyebb elfordulás érdekében. A rajta található csapok tengelytávolsága 29,0 mm, a kar mindkét oldalán csatlakozik a gerendához. Egyik oldalán egy, az emelőhíd furatába illeszkedő, 3,1 mm átmérőjű és 2,8 mm hosszúságú csappal, ami körül egy 5,0 mm átmérőjű és 1,2 mm magasságú súrlódásgátló perem van. A furat átmérője 3,3 mm; 0,2 mm-el nagyobb, mint a csap átmérője. Másik oldalt is hasonlóan csatlakozik, de itt a karon helyezkedik el a furat és a nyílás fedlapján található a csap a távtartó peremmel. A különbség oka, hogy a nyomtatási technológia miatt a nem alátámasztott részek nyomtatása kerülendő, és a nyomtató így építette fel könnyebben a szerkezetet. A csapok behelyezése után a fedőlappok a rögzítőgerendára és az emelőhídra lettek ragasztva.

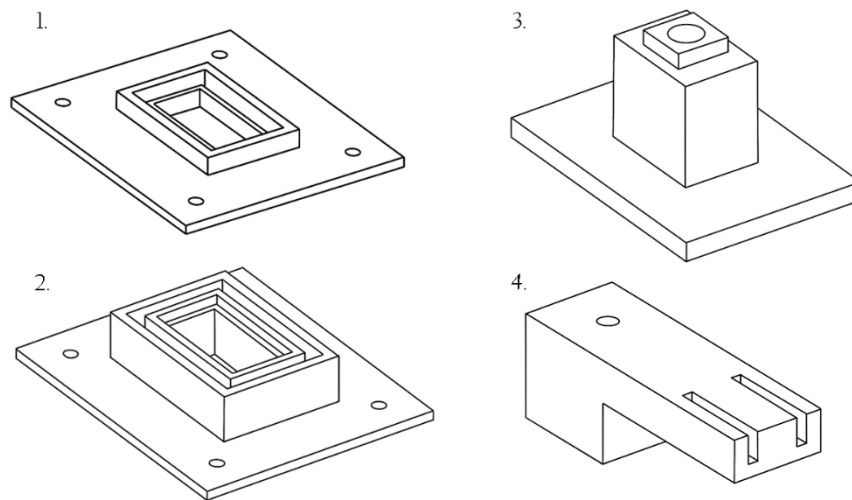
Az emelőhíd a karok miatt járulékosan vízszintes irányba is elmozdul. Ezt a vízszintes mozgást a hídra nehezedő ugró súrlódási erővel fékezi, lassítva a híd visszaesését. Továbbá a visszaesésnél a tangenciális gyorsulás függőleges komponense adja meg a visszaesés effektív gyorsulását, ami előnytelen pozíció esetén arányszámból számolhatóan jelentős járulékos vízszintes komponenssel is kiegészül kényszerszerűen. Az elfordulás tehetetlenségi nyomatéka miatt a vízszintes gyorsítás kerülendő, mert a függőlegesen kisebb gyorsulást eredményez.

Minél kisebb a karok szögelfordulása, a járulékos vízszintes mozgás annál kisebb. Ez a követelmény azonos, 10,0 mm-es elérni kívánt emelkedés esetén vagy nagyobb karhosszúság, vagy kisebb kiindulási szög esetén érhető el, viszont utóbbi konstrukciós nehézségbe ütközik, hiszen a karokat a gerendába, és a hídba kell ágyazni.



25. ábra: emelőhíd robbantott axonometrikus ábrája

Sínszabályozó



26. ábra: sínszabályozó elemeinek axonometrikus ábrája

A pengető-húr távolságnál tized milliméter pontosságra kell törekedni, így elengedhetetlen, hogy lehetőség legyen a távolság finomhangolására. Ez a csembalóknál egyszerű feladat, hiszen a túske méretre vágásával könnyen elérhető a kívánt távolság. Itt viszont a pengető mozgatható a húr mentén, így felmerül a veszélye annak, hogy eltolva közelebb, vagy távolabb kerülne a húrhoz pontatlanságok miatt. Ha túl közel van a túske a húrhoz, nem tudja azt megpengetni, ha túl távol, akkor pedig nem érintkezik. A sínszabályozó feladata, hogy a húr tengelyére merőlegesen mozgassa a vezetősínt 10,0 mm-es tartományban. Mivel a hídhoz közel nehezebb, hídtól távolabb könnyebb pengetni, így a húr mentén azonos pengetőtávolságnál más-más hangerőt kapnánk, ennek beállítására is szolgál a sínszabályozó.

Az elemek 3D nyomtatással készülnek, PLA anyagból, egymáshoz rögzítésük 5,0 mm átmérőjű metrikus csavarral történik. A fa falhoz szintén 5,0 mm átmérőjű metrikus csavar rögzíti az 1-es, 2-es elemet.

A 4-es elem a sín fogadására két 3,4 mm széles, 30,0 mm magas, és 10,0 mm mély vajat helyezkedik el egymástól 10,4 mm távolságra. A befogott sínpár tengelytávolsága 13,8 mm.

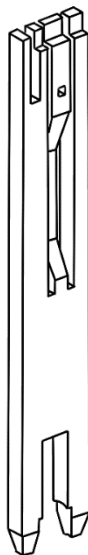
Mivel a sínszabályozó közvetlenül a tartószerkezeti keret alatt helyezkedik el, így ki kell azt kerülnie. Ebből kifolyólag a 4-es számú elem függőleges része a hátsó oldalon 25,0 mm, az elülső, játékoshoz közeli oldalon pedig 75,0 mm távolságot tart a külső borítástól, így kikerülve a keretet. Ez az elem közvetlenül kapcsolódik a 3-as elemhez, M5-ös csavarral, valamint egy

négyzetes adapterrel az elfordulás ellen. Az adapter 3-as elemen lévő része egy 10,0 mm széles, 10,0 mm magas, 3,0 mm hosszú hasáb, amit befogad a 4-es elemen lévő 10,4 mm széles, 10,4 mm magas, 3,0 mm mélységű vajat, ezzel minden oldalon 0,2 mm rést hagyva a két elem között a könnyed csatlakozás érdekében.

Az 1-es és 2-es elem a külső falon lévő, 51,0 mm széles, 36,0 mm magas nyílás béléseként funkcionál, fogadja a 3-as és a 4-es elemet, valamint biztosítja azok súrlódásmentes mozgását. Emellett a rajta középen áthaladó csavar szorítása esetén nekifeszül a 3-as és 4-es elemnek, így gátolva azok mozgását (ez akkor szükséges, ha a megfelelő pozícióba állítottuk a síneket). Az 1-es elem a rajta található 2,0 mm és 3,0 mm vastag peremekkel illeszkedik bele a 2-es elemen található 2,2 mm és 3,2 mm széles vajatokba. A két elem 4 db M4-es csavarral kerül rögzítésre a külső falhoz, a csavarok tengelytávolsága a rövidebb oldalon 50,0 mm, míg a hosszabb oldalon 65,0 mm.

A 3-as elem külső része a hangszer külső oldaláról vezérelhető, így az átmegy a külső falon. Ehhez van szüksége az 1-es és 2-es elemen átmenő 30,0 mm széles, 15,0 mm magas nyílásra. Az elemeken átmenő csavar lazításával mozgathatóak az alkatrészek, a csavar feszítésével a 3-as ráfeszül az 1-es és a 2-es elemen keresztül a keretre, és mozdulatlan marad.

Ugró



27. ábra: ugró axonometrikus ábrája

Az ugró feladata, hogy felemelkedésekor a rajta lévő pengetőszárral megpengeti a fölé kifeszített húrt, majd visszaesésekor a rajta lévő tompítófilccel megszünteti a húr rezgését. Az ugró a szerkezeten belül az emelőhídon ül, a regiszter belsejében mozog.

Az elem 3d nyomtatással készült, egy darabban, anyaga PLA. Alakja egy vékony, 4,0 mm vastag, 15,0 mm széles, és 152,0 mm magas hasáb kivágásokkal. Az elemhez csatlakozik egy 5,0 mm szárvastagságú metrikus csavar, a magasság beállításához, valamint a feszítéshez egy feszítőanyacsavar. A magasság beállításához szükséges csavarhoz illeszkedő fogadóanyacsavar a hasáb aljába tervezett vájatba van rögzítve ragasztással. Felül jobb oldalon egy 2,0 mm széles, 4,0 mm mély, és 20,0 mm magas vájat helyezkedik el a hasáb szélétől 2,0 mm távolságra, ez fogadja a húr rezgését visszaeséskor tompító filcet. A közepén egy vékonyított, rugalmas rész található, ez teszi lehetővé a pengetőszár szükséges kimozdulását.

A billentyű lenyomásával megemelkedik az emelőhíd, ami megemeli az ugrót, és a pengetőszár eléri a felette kifeszített húr, megpengetve azt. A pengetésnél a húr nyomatékot fejt ki a pengetőszárra, ami az ugró rugalmassága miatt előrebillenne, ha ez nem lenne megakadályozva a hasáb tetején elhelyezett 2,0 mm széles, 11,0 mm hosszú, és 4,0 mm magas gerendával. Ennek köszönhetően a pengető nem hajlik előre és végbemegy a pengetés. Visszaeséskor a húr ismét nyomatékot fejt ki a pengetőre, viszont annak hátra hajlását nem akadályozza meg semmi, így pengetés nélkül érkezik vissza a kiinduló pozíciójába.

A rugalmas rész a hasáb közepén van kialakítva. Mellette mindkét oldalon 1,5 mm széles vájat helyezkedik el, hogy esetleges deformáció vagy oldalmozgás esetén se súrlódjon az ugró többi részével. A 4,0 mm vastag hasáb itt 0,6 mm-re van vékonyítva, hogy elérjük a pengetés utáni visszaesési hátrahajláshoz szükséges megfelelő hajlékonyságot. Ha a pengető túl vastag, nem hajlik ki visszaesés közben, és fennakad a húron, ellenben, ha túl vékony, kihajlik pengetés közben és nem történik meg a húr pengetése.

Az ugró alján egy vájat helyezkedik el a magasság állító csavarnak, amivel az ugró magasságát tudjuk állítani. A bemetszés hatszög alakú a fogadóanyacsavar beragasztásához, amely hatszöglapjának a párhuzamos oldalainak távolsága 8,0 mm. Ehhez adódik hozzá körbe még 0,4 mm térköz a könnyebb ragasztás érdekében. A fogadóanyacsavar lefelé túlnyúlik az ugró műanyag részén; ez azért kell, hogy a becsavart szorítóanya ne a műanyagra feszüljön, ezzel károsítva azt. A mellékörejek elkerülése végett a magasságállító csavar aljára filcet ragasztunk. A pengetőszár cserélhető, négyzetes vájatba illeszkedik.

SPEKTRUMOK VIZSGÁLATA

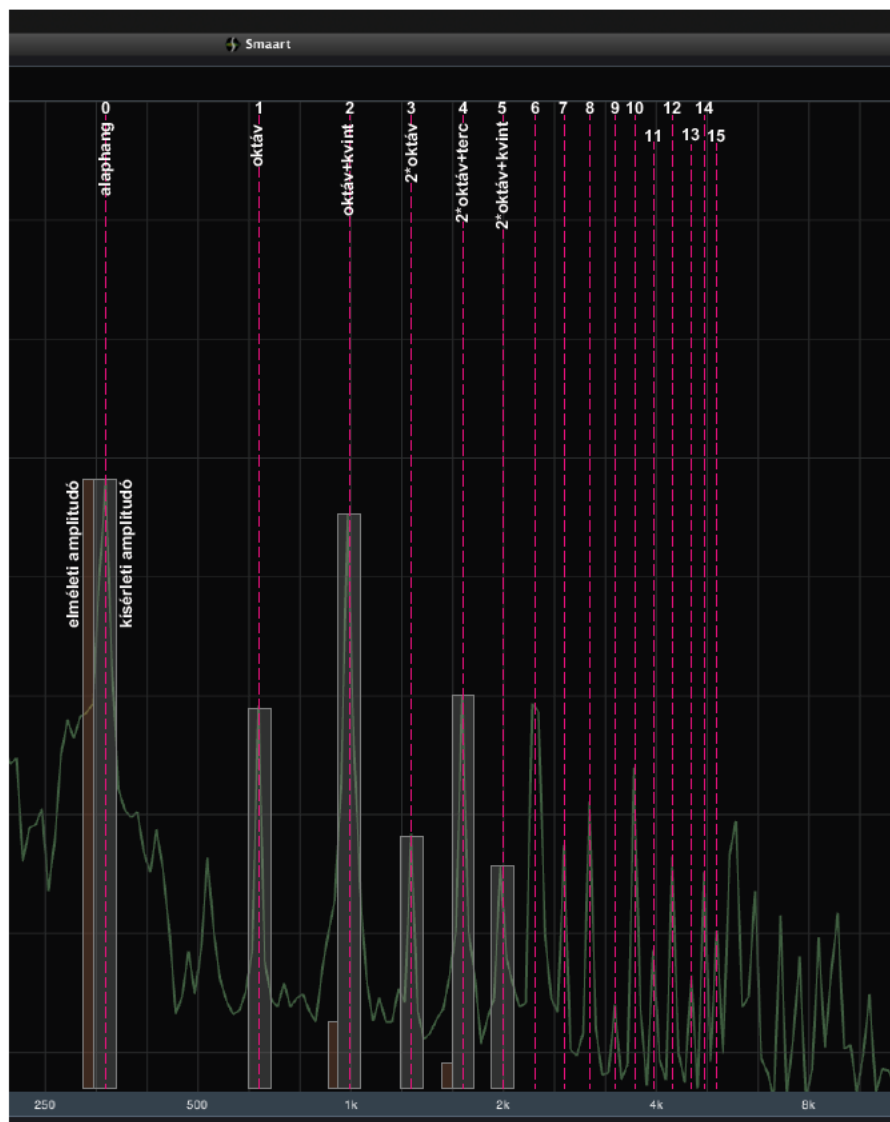
A spektrumok bemutatását „A megpengetett húr hangszínének fizikai vonatkozásai” tanulmány [Friedrich 2022] alapján mutatjuk be. A diagramok mutatják a pengetés utáni első másodpercből vett hangmintához tartozó spektrumot. A vízszintes tengely logaritmikus skálán mutatja a frekvenciát hertz mértékegységben, a függőleges az intenzitást decibelben.

A húr bizonyos nevezetes arányoknál: $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$, $\frac{1}{4}$ került megpengetésre. Érdekes lehet a későbbiekben egy áttekintő, részletesebb spektrumanalízist végezni kisebb racionális számokra is; azonban jelen tanulmány terjedelmét ez meghaladná jelentősen.

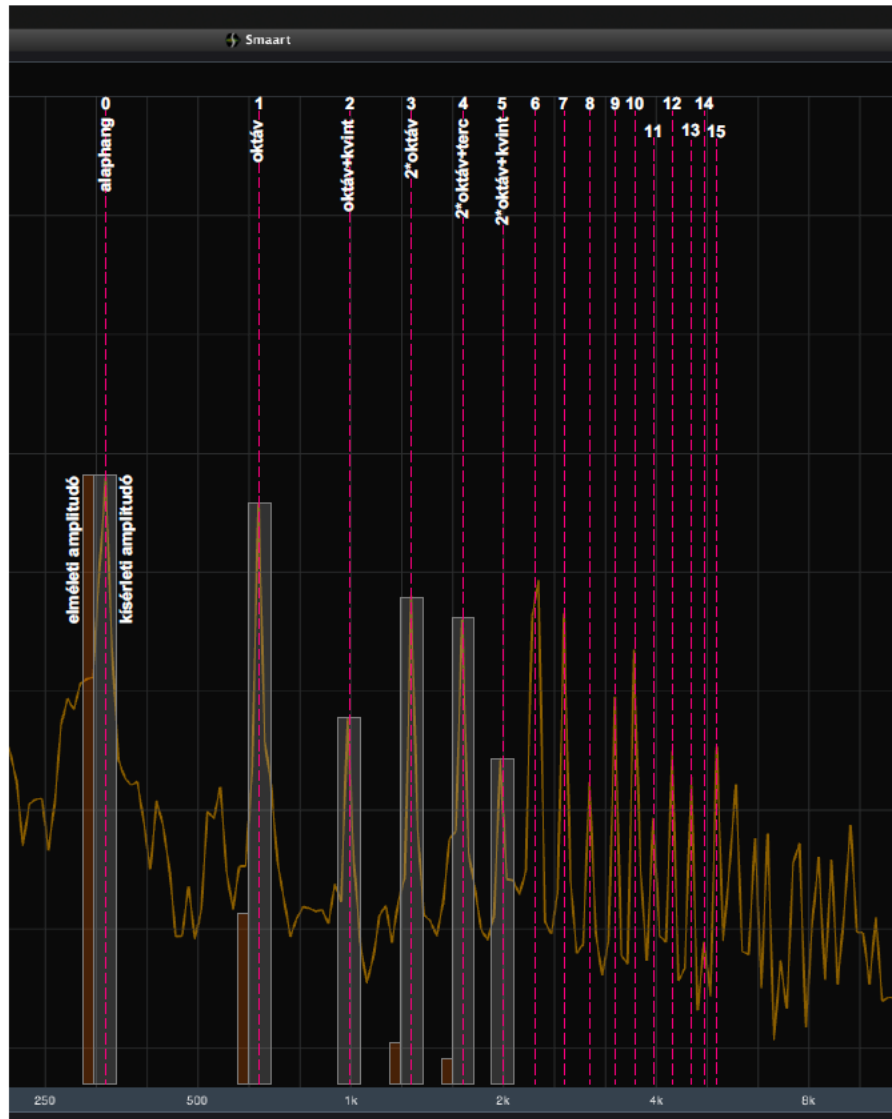
A spektrumok hasonlítanak az ideális húr spektrumára annyiban, hogy az aránynak megfelelő helyeken lévő felharmonikusok gyengék, viszont nem tűnnek el teljesen, hiszen a húrvégeknél tapasztalható támaszmozgás, illetve a hangszertest rezgése egyéb frekvenciákat is generál.

A spektrumok eltérése láthatóan bizonyítja, amit füllel is lehet észlelni, hogy jelentős hangzásbeli eltérés tapasztalható. Így a kísérlet mindenképp sikeresnek mondható. A következő oldalakon láthatók a húr mért spektrumai.

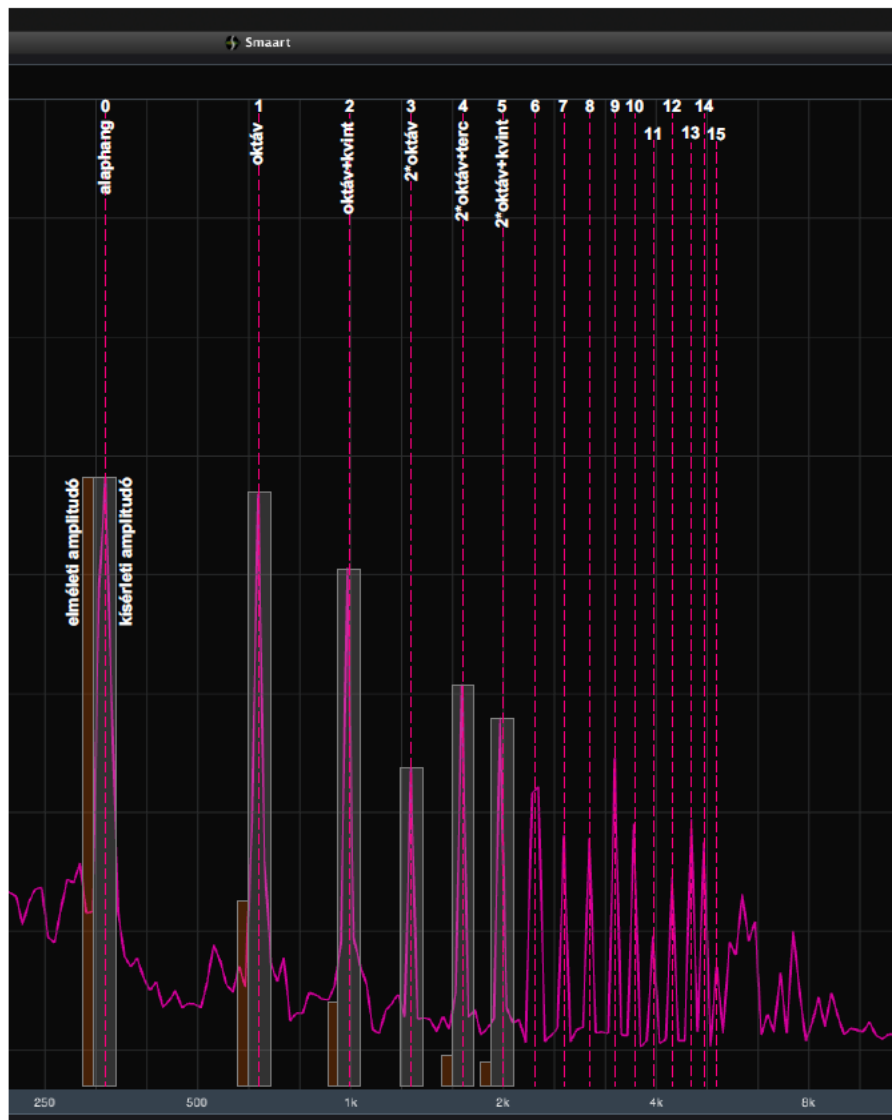
A modell tekintetében mindenképp további pontosítások szükségesek, mielőtt többhúros, több billentyűs irányba fejlesztjük tovább.



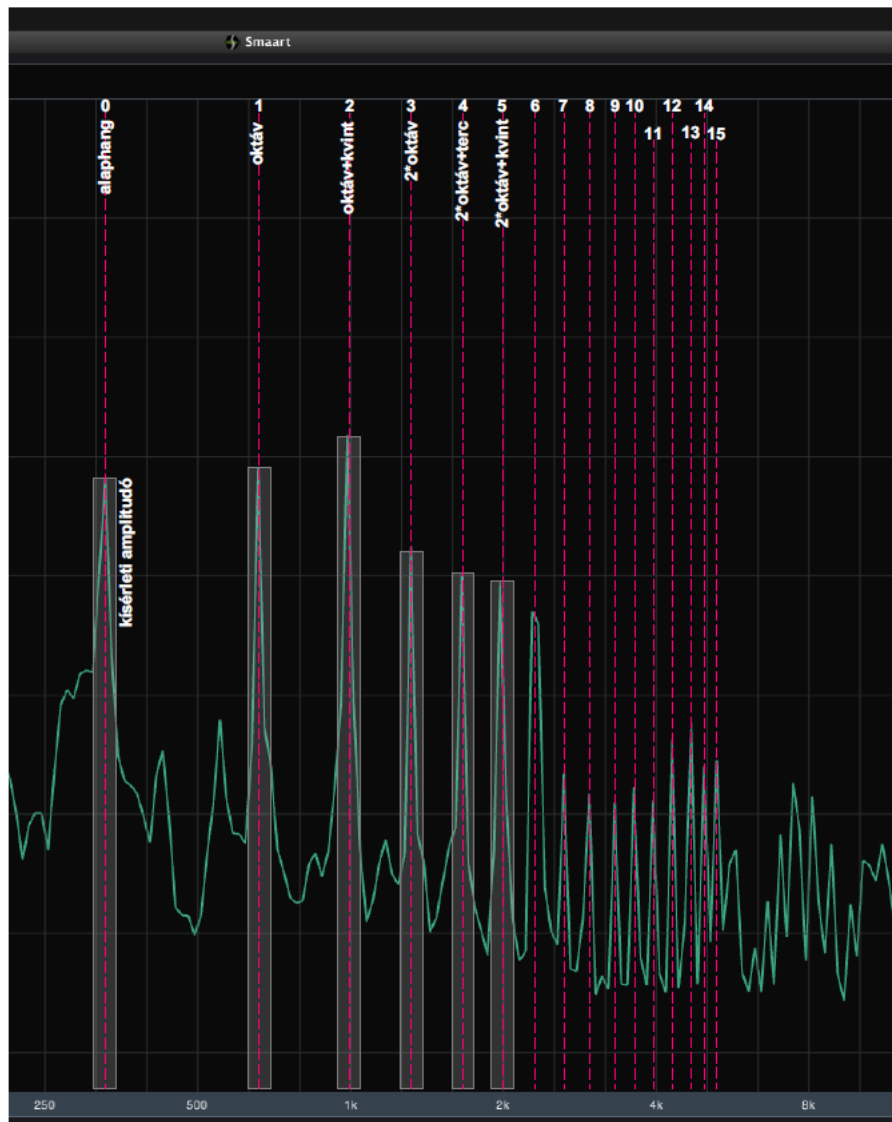
1. diagram. Középen pengetett húr spektruma az alaphang, és harmonikusainak jelölésével (0. alaphang; 1, 2, 3...: felharmonikusok.) Látható, hogy minden párosszámú harmonikus gyengébb.



2. diagram. 1/3 húraránynál pengetett húr spektruma az alaphang, és harmonikusainak jelölésével (0. alaphang; 1, 2, 3...: felharmonikusok.) Látható, hogy minden harmadik harmonikus gyengébb.



3. diagram. $\frac{1}{4}$ -nél pengetett húr spektruma az alaphang, és harmonikusainak jelölésével (0. alaphang; 1, 2, 3...: felharmonikusok.) Látható, hogy minden negyedik harmonikus gyengébb.



4. diagram. A húrvéghez közel pengetett húr spektruma az alaphang, és harmonikusainak jelölésével (0. alaphang; 1, 2, 3...: felharmonikusok). Látható, hogy a harmonikusok erősek.

A TERV JÖVŐJE

Zenészek véleménye

A fejlesztés létjogosultságát nem igazolhatja magában egy fizikai tanulmány; érdekes spektrumok diagramjai. Ahhoz, hogy a fejlesztés relevanciájáról megbizonyosodjunk, ismeretségi köreinkbe tartozó, különböző zenei területen dolgozó előadóművészek véleményét kértük.

Azt a kérdést tettük fel, hogy csembaló, illetve zongora esetén segítség lenne-e számukra az előadóművészi gyakorlatban, és a zenei kifejezés árnyalásában, ha a hangszín nem csak

bizonyos előre beállított jellemzőkkel bírna, hanem szabadon lehetne változtatni a húr hossz menti megszólaltatás függvényében.

Tyukász Botond, jazz gitár előadóművész:

Gitárosként érdekes koncepciónak tartom, hogy egy olyan autentikus hangszerhez nyúltok hozzá, ami a mai zenékben ritkán fordul elő, leginkább a klasszikus műfajban. Könnyűzenészként a billentyűs hangszereken a hangszín változtatása elektronikusan történik. Így az a véleményem, hogy egy klasszikus zenész jobban meg tudná mondani, hogy hasznos-e ez a funkció a számára.

Ferencz Mari, énekes, énektanár:

Igen, segítség lenne. A különféle hangulatok árnyaltabb kifejezését tenné lehetővé, amikor hangszeren kísérem az éneket. A digitális hangszerek és a stúdió programokban a hangszín finomhangolásának lehetősége a rendelkezésünkre áll, izgalmas lenne ezt egy akusztikus hangszeren is megtapasztalni.

Friedrich Hanna, zongoraművész

Én személyesen nem használnám a zongorázás során; jobban szeretem a különböző hangszíneket különböző billentéstechnikákkal elérni.

Székács-Boros Rebeka, zenész

Szerintem minél több hangszínen tud megszólalni egy bizonyos hangszer, annál árnyaltabb hangulatot képes közvetíteni a hallgatónak. Minél árnyaltabb, összetettebb egy darab hangulati világa, annál nagyobb öröm hallgatni és játszani is. Nagyon izgatottan ülnék le egy ilyen csembalóhoz.

Prototípus továbbfejlesztése

A prototípuson számos fejlesztést kell végrehajtani, mielőtt több billentyűs modellt hozunk létre.

A zörejszűrés a filcpárnákon túl a 3D nyomtatott elemek kitöltési sűrűségének növelésével lehet elősegíteni. A szellős kitöltésű, vékonyfalú műanyagelemek, mint rezonáns erősítik fel a nemkívánatos zörejekeket.

A billentyű a stabilabb pozicionálás végett nagyobb tengelyszeggel látandó el.

Az emelőhíd forgó karjai hosszabbra tervezendők, hogy az elfordulási szög kisebb legyen, így a mozgás vízszintes komponense elhanyagolható legyen a függőlegeshez képest. Ebben az esetben a tangenciális gyorsulás közel megegyezik a hasznos (függőleges irányú) gyorsulással, így az emelőhíd hamarabb esik vissza a nyugalmi pozíciójába a billentyű visszaengedése után.

Sínszabályzó csatlakozása, rögzítése pontosítandó, kis, nemkívánatos elmozdulások tovább korlátozandók. Ezt többtengelyes átmenőcsavarral lehet elérni az egytengelyes helyett.

Sín oldalmozgást gátló inerciája növelendő.

Regiszter tömörebbé teendő a zörejek csillapítása végett.

Ugró nyelvének hajlékonysága optimalizálendő, pengetőtüske nyílásánál a megfelelő méret megtalálása szükséges.

A fenti módosítások sikeres végrehajtása után javasolt a kutatás folytatása. Célszerű hangszerészek, gépészmérnökök, fizikusok, egyéb társtudományok tagjainak bevonása, majd több billentyűs prototípus tervezése.

Összegzés

Összességében tehát sikeresnek mondható a kutatásunk. Kezdeti célkitűzésünk, hogy tervezzünk egy változtatható hangszínű csembaló modellt, sikerült, mind elméleti fejlesztés és tervezés, mind gyakorlati megvalósítás szintjén. A hagyományos asztalos és hangszerkészítő technikák ötvözése a modern, 3d-nyomtatott elemekkel nagyobb kihívást jelentettek számunkra, mint először gondoltuk, de végsősoron igazunk lett abban, hogy a milliméteres pontosságot igénylő részletek digitálisan megtervezve sokkal precízebb végeredményt fognak

majd nyújtani. A kutatás további sorsát tekintve még sok izgalmas dolgot tartogat számunkra a jövő, hiszen egy egész hangszer megtervezése és megépítése rengeteg új kihívást és érdekességet hoz magával.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Szeretném megköszönni

Gyimóthy Eszter segítségét, aki részt vett a szöveg hangszínnel kapcsolatos részének megírásában, 3D modellezésben, hangszerépítésben;

Friedrich Dániel segítségét, aki a konzulensi, projektvezetői, technológiai- és gyártmánytervezői szerepet töltötte be, és részt vett a hangszerépítésben

Hornok Brigitta segítségét, aki a gyártásvezetői szerepet töltötte be, a 3D elemek nyomtatását, optimalizálását vezette, és a nyomtatással kapcsolatban szakmai tanácsadóként szervesen részt vett a fejlesztési folyamatban

Sütő Péter segítségét, aki részt vett a 3D modellezésben, gyártmánytervek készítésében

Fazakas Tímea segítségét, aki részt vett a 3D modellezésben

Tóth Lili Hanna segítségét, aki kutatásokat végzett a 3D nyomtatott rudak hajlítási merevségének optimalizálásában

Bank Balázs segítségét, aki akusztikai mérésekkel kapcsolatban konzultációt biztosított

IRODALOMJEGYZÉK

Friedrich Dániel, Clarke Christopher. 2023. "Clavecin de Ruckers_1624."

Grant O'brien, George. 1983. "Ruckers. A Harpsichord and Virginal Building Tradition Volume I-II-III."

Nagy Károly. 1989. *Elméleti Mechanika*. Budapest: Tankönyvkiadó.

Sor, Fernando. 1897. "Método Para Guitarra."

<http://statensmusikverk.se/musikochteaterbiblioteket/ladda-ner-noter/boijes-samling/>.

Traube, Caroline. 2006. *An Interdisciplinary Study of the Timbre of the Classical Guitar*.

Traube, Caroline, and Julius O Smith III. 2000. "Estimating the Plucking Point on a Guitar String."

Trévisan, Benjamin. 2016. "Prédiction Des Mécanismes Vibroacoustiques Des Plaques Orthotropes Raidies de Forme Quelconque Application à La Table d'harmonie de Piano."

<http://edeea.ec-lyon.fr>.

Friedrich Dániel: A megpengetett húr hangszínének fizikai vonatkozásai. TDK dolgozat,
BME Építésmérnöki Kar, Szilárdságtani és Tartószerkezeti Tanszék.