

# **Hegedűhang szintézise fizikai modellezés segítségével**

**Papp Sándor Róbert V. Vill., [ps421@hszk.bme.hu](mailto:ps421@hszk.bme.hu)**

**Konzulens: Dr. Sujbert László, MIT, [sujbert@mit.bme.hu](mailto:sujbert@mit.bme.hu)**



## Előszó

Napjainkban a számítástechnikai eszközök fejlődése a hangszintézis számára óriási lehetőségeket nyitott meg. A hangszerek hangja elektronikusan előállíthatóvá válik, melynek során az ún. fizikai modellezéssel történő szintézis adja a legjobb eredményt.

A hegedű különleges hangszer. A hegedűhangot vizsgálva annak időbeli és frekvenciabeli jellemzői műszerrel könnyen kimutathatók, azonban a hangszínt meghatározó fő okok rejtve maradnak. Ennek oka az, hogy a hegedűhang kialakulásának folyamatában nehéz különválasztani a hangszer felépítése, strukturális tulajdonságai által meghatározott objektív paramétereket és peremfeltételeket azon szubjektív paramétereiktől, amelyeket maga a játékos határoz meg. Éppen ezért általánosan kimondható, hogy a hegedűhang szintézisének problémája összefügg magával a hegedűjátékkal.

Ezen összetett rendszer azonosítása során – muzsikusi tapasztalataimat is felhasználva – egyrészt egy szemléletes fizikai modell kialakítására törekedtem, másfelől figyelembe vettem az ismert tanszéki modellt, amelynek működését a hegedűhang szintézise szempontjából elemeztem.

A rezgő húr fizikai modellezésének egyik eszköze a waveguide-struktúra, amelyet a hegedűhang előállításához folyamatos rezgésfenntartásra kell bírunk. A húr vonóval való gerjesztésének modellezéséhez meg kell vizsgálnunk, hogy az ún. Helmholtz-féle klasszikus modellt hogyan kell interpretálni a waveguide numerikus módszerével.

A Helmholtz-modell ugyanis egy egyszerű megfigyelésen alapuló, hozzávetőleges modellnek bizonyult.

A vizsgálat és a szintézis során a Helmholtz-féle modellt sikerült egy kézben tartható, az eddigieknél jóval stabilabb folyamatként realizálni. Ez a gerjesztési modell a jelenlegi kutatásaim fő eredménye.

A gerjesztési modell ismeretében mód nyílik arra, hogy jobban megismerjük és pontosítsuk, illetve modellezzük azokat a fizikai jellemzőket, amelyek befolyásolják a minőségi hegedűhang kialakulását. A húr és a hangszertest, valamint a vonó által megszabott leglényegesebb jellemzők szerepelnek a gerjesztési modellben, de a játékos technikája és játékmódja által meghatározott jellemzők már külön modelleket igényelnek, melyek lehetővé teszik a szintézis során különböző hangszínek és zenei effektusok előállítását.

Dolgozatom rövid tartalma a következő: egy nem-szokványos hangszerismertető után a hangkeltés nehezen megközelíthető fizikai jelenségének matematikai leírása: a hegedű modellezése és a szintézis eddig elért eredményének bemutatása következik

## Tartalom

1. Hangszerismereti összefoglaló .....	5
1.1 A hegedűhang képzése zenészi megközelítésben: zenei kifejezőeszközök fejlesztése és alkalmazásuk .....	5
1.1.1 A hegedű születése, dinamikus előretörése a zene világában, a művészi alkalmazások .....	5
1.1.2 Alapismeretek a hangszer építéséről .....	7
1.1.3 Művészi visszahatás a zenére, a fejlesztések, az 'optimális hegedülés' problematikája. ....	11
1.2 A hegedű, mint rezgő rendszer ismeretlen tartalékainak felderítése: akusztikai megfigyelések, fizikai modellek .....	13
2. A hegedű elektronikus hangszintézise .....	16
2.1.1 A hangszerek felosztása a lehetséges szintézisük szempontjából .....	16
2.1.2 Az ún. fizikai szintézis alapelvei, általános struktúrák .....	16
2.1.3 A vonó korábbi gerjesztési modellje és a tanszéki előzmények bemutatása .....	19
2.2 A folyamatos rezgésfenntartás a waveguide struktúrában .....	21
2.2.1 A rezonancia matematikai feltétele, ennek szemléletes fizikai tartalma ..	21
2.2.2 A rezonancia szerepe a vonó gerjesztési modelljében, matematikai, fizikai megfontolások .....	22
2.3 Egy megoldási javaslat bemutatása, amely teljesíti az előírt fizikai és matematikai feltételeket .....	24
2.3.1 Az újabb gerjesztési modell, és a modellezés során kapott kimenet bemutatása .....	25
2.3.2 Következmények: a szuperpozíció újabb értelmezése a húrmodellekben	26
3. A modell paraméterek leírása, a mérések bemutatása .....	28
3.1 Az egypólusú szűrőparaméterek mérése .....	28
3.2 A törtrész szűrő paramétereinek beállítása .....	31
3.3 Ötletek a hangszertest átviteli függvényének mérésére .....	33
4.1. A dolgozatban leírtak összefoglalása .....	35
4.2 A hangzó zenei anyag ismertetése .....	36
4.3 Az alkalmazás kiterjesztésének lehetőségei .....	36
4.3.1 További feladatok a hegedűhang szintézisében .....	37
4.3.1 Más hangszerek hangjának szintézise .....	37
Irodalomjegyzék .....	38

## 1. Hangszerismereti összefoglaló

### 1.1 A hegedűhang képzése zenészi megközelítésben: zenei kifejezőeszközök fejlesztése és alkalmazásuk

#### 1.1.1 A hegedű születése, dinamikus előretörése a zene világában, a művészi alkalmazások

A hegedű szülőhazája Itália, Németország, Franciaország, melyek mint gazdasági-kulturális-politikai nagyhatalmak ma is az Európai Unió kontinentális vezető államai. A reneszánszban felhalmozott technikai-művészi tudásnak köszönhetjük a hegedű születését. A számtalan, ekkor kifejlesztett vonós hangszer között, a hegedű bizonyult a legsikeresebbnek, egy érzelmeket is kifejezni tudó, erős hangú hangszert sikerült létrehozni, olyat, amit a kor zenei ízlése már nagyon várt.

A hegedű négyhúros változata 1550 körül jelent meg, korábbi háromhúros változata 1520 körül, Milánó környékén. Kezdetben az ún. violákkal együtt használták zenekarokban, főleg a korabeli szórakoztató zenék kedvelt hangszereként. A legrégebbi fennmaradt hegedűk Bresciában készültek, a leghíresebbek pedig Cremonában. A hegedű klasszikus formája, a hegedűépítés virágkora és a hegedűzene kialakulása egyaránt a 17. századra tehető. A kb. 1760 előtti olasz mesterek lakkozási művésze a később már nem ismert nyersanyagokon és eljárásokon alapult, sem akusztikai sem optikai hatását nem érték utol. [3]

A hegedű a barokk kor új hangszere lett. Az instrumentális barokk zene fejlesztésében az élvonalban járó hangszerkészítő műhelyek és zeneszerző muzikusok egyaránt részt vettek. A régi reneszánsz zene ugyanis elsősorban vokális jellegű volt, a vonós hangszerek az énekszólamokat erősítették (a tiszta intonáció és megfelelő hangerő miatt), imitálták (utánozták) és dúsitották (a harmóniákat).

A hegedűkészítés mellett a hegedűművek komponálásában és előadásában egyaránt élen járó itáliaiak szívesen adták át szellemi találmányukat szerte Európában. E nagy mesterek voltak [2]:

- Arcangelo Corelli olasz zeneszerzőt és hegedűvirtuózt már életében a "*mesterek mesteré*"-nek nevezték. Őt minden jelentősebb hegedűs szellemi ősatyjának tekintett.
- Antonio Vivaldi, „*a barokk géniusza*”
- Tartini, a "*nemzetek tanítómestere*", a kombinációs hangok (a különbségi hangok<sup>1</sup>) felfedezője (1714). Felfedezését csak 1754-ben Trattato di musicában hozta nyilvánosságra.

<sup>1</sup> Az összegzési hangokat Helmholtz figyelte meg, Lehre von den Tonempfindungen...(1863) c. könyvében foglalta össze tapasztalatait. [3]

- Geminiani "*a hegedűművészet feltalálója*", (1751-ben, Londonban kiadott hegedűiskolája: *The Art of Playing on the Violin*),
- "*Egy Isten, egy Veracini*",
- Locatelli, a "*18. század Paganinije*",
- Pugnani, "*a nagy vonók mestere*",
- Viotti, Pugnani növendéke, a művészi szintű francia hegedűiskola megalapítója.

A precíz német zenei világ aktív, naprakész együttműködésének jellemző példái:

- J.S. Bach, aki maga is kiváló hegedűs volt, számos művében átiratokat készített az általa nagyra becsült Antonio Vivaldi concertóiból, ezzel is tanulmányozva az olasz stílus jellemzőit.
- A 'tudós hegedűs' Leopold Mozart (a nagy zeneszerző és szintén kiválóan hegedülni tudó W.A. Mozart édesapja) *Versuch eine Violinschule* című 1756-ban kiadott műve mutatja azt az enciklopédikus tudást, amellyel egy korabeli muzsikusként rendelkezett. [10]

A francia hegedűművészet is hamarosan bekapcsolódott ebbe a kulturális vérkeringésbe, Viotti munkásságának köszönhetően, és új utakat nyitott a fejlődésben.

A hegedű őstörténetét elemezve látható, hogy ez az egyébként drága 'zenei csúcstechnológia' általánosan elterjedt volt, amely elsősorban a tehetősebb, gazdag zenekedvelő emberek örömét szolgálta, de sok muzsikusként tisztelt megélhetését is biztosította. Olyannyira fontos hangszer volt, hogy nem volt zeneszerző, aki nem ismerte jól, a legnagyobbak pedig a hegedűlést művészi szinten művelték. (Például J.S. Bach, W.A. Mozart.)

## 1.1.2 Alapismeretek a hangszer építéséről

"A hangszerek királynője a több mint 70 darabból készült "hegedű", avatatlan kézben bosszantó játékszer, a művész kezében bámulatot keltő eszköz: a rezonancia műszere, amelyből hangokat lehet kicsalni. Hangja betölti a hangversenytermeket, templomokat."

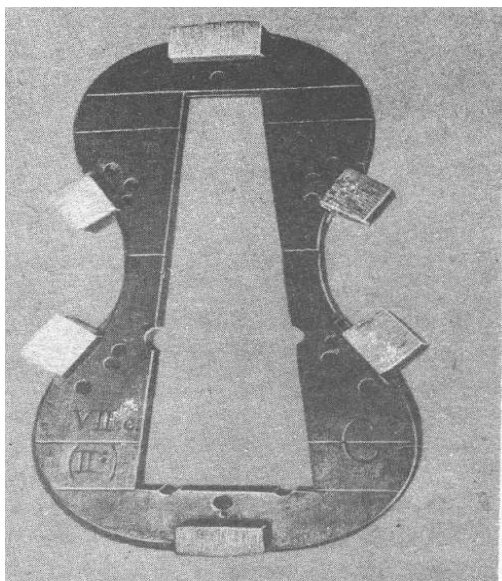
[21]

Yehudi Menuhin, William Primrose: Violin and Viola c. könyvében pedig azt olvashatjuk, hogy a hegedű 80 vagy 84 fadarab együttese. [20]

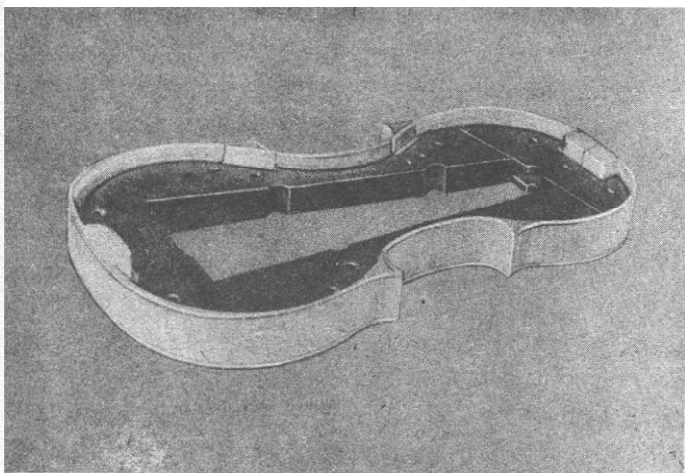
### A hegedű

A tető, a tőke, a lécek, gerendák radiálisan darabolt fenyőből, a hát, a csiga radiális illetve ritkán érintős darabolású jávorfából készülnek [21]. A jávorfa szép fodrai adják (persze, ha fodros) a hegedű "habos" hátát.

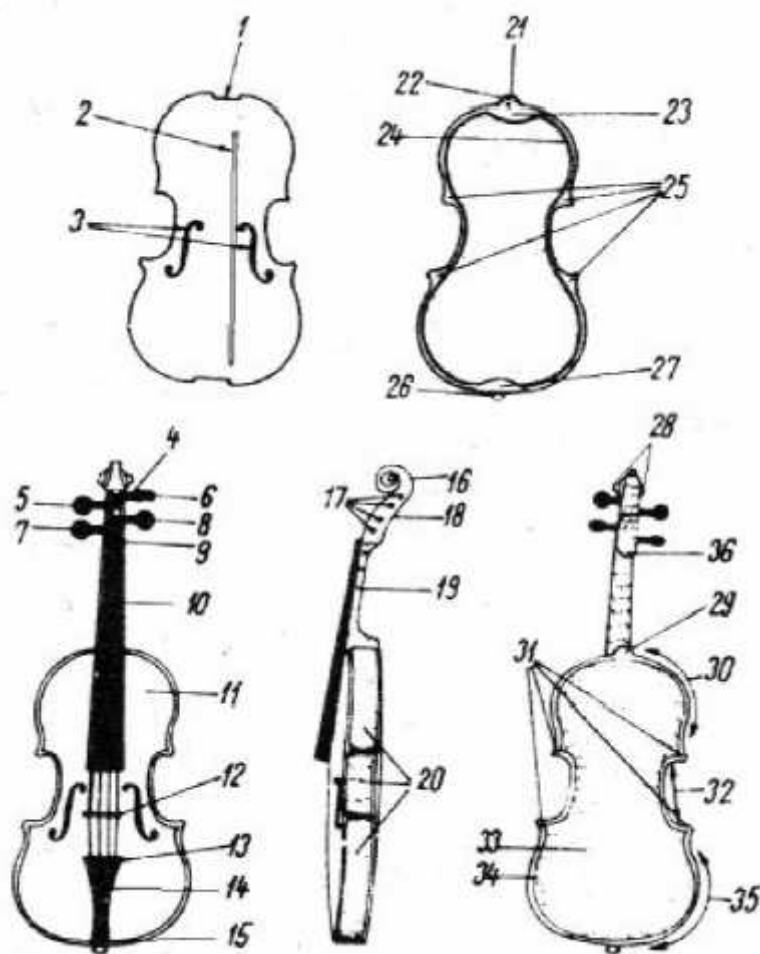
A jó hangú hegedű készítéséhez szükséges geometriai arányok kialakításában a faanyag tulajdonságai meghatározó szerepet töltenek be, statikai és akusztikai szempontból egyaránt. A rezonanciában a fa sejtszerkezeti elrendezésével összefüggően a fa fajsúlya és rugalmassága játssza a fő szerepet. Ennek ismerete igen nagy szakértelmet és gyakorlatot kíván. A hangszer készítése közben a mesterek a hangszer hangját befolyásoló formánsok (Fuhr-hangok) rezgésszámait, erősítésük arányait rendszeresen ellenőrzik. A hegedű fedő- hátlapja, a kávák, a csiga, a nyak, kialakítása sablon segítségével különböző asztalos szerszámok és néhány speciális célszerszám, valamint a sablon alapján elkészített ún. mintafa segítségével történik. A lakkozáshoz szesz vagy olajlakk használatos, fő szempont hogy a lakk rugalmas legyen, ezen kívül tartósnak, átlátszóan szép árnyalatúra színezettnek, valamint színtartónak is kell lennie. [21]



1. ábra: A mintafa a beillesztett tőkékkel



2. ábra: A tőkék a lécezett kávákkal együtt lesíkozva; a hát felenyvezhető



3. ábra: A hegedű részei

- |                          |                               |                  |
|--------------------------|-------------------------------|------------------|
| 1. a tető belső nézete   | 13. acélhúr finomhangolója    | 25. saroktőkék   |
| 2. gerenda               | 14. húrtartó                  | 26. gomb         |
| 3. "F"-nyílások          | 15. alsó nyereg               | 27. alsó tőke    |
| 4. kulcsszekrény         | 16. csiga                     | 28. csigaszemek  |
| 5. D-kulcs               | 17. kulcsnyílások             | 29. makk         |
| 6. A-kulcs               | 18. csiga hátsó hajlata       | 30. felső hajlat |
| 7. G-kulcs               | 19. nyak                      | 31. sarkok       |
| 8. E-kulcs               | 20. kávak                     | 32. középhajlat  |
| 9. felső nyereg          | 21. hát belső nézete kávakkal | 33. hát          |
| 10. markolat             | 22. makk                      | 34. berakás      |
| 11. tető                 | 23. felső tőke                | 35. alsó hajlat  |
| 12. láb (középső nyereg) | 24. lécek                     | 36. szakáll      |

## A vonó

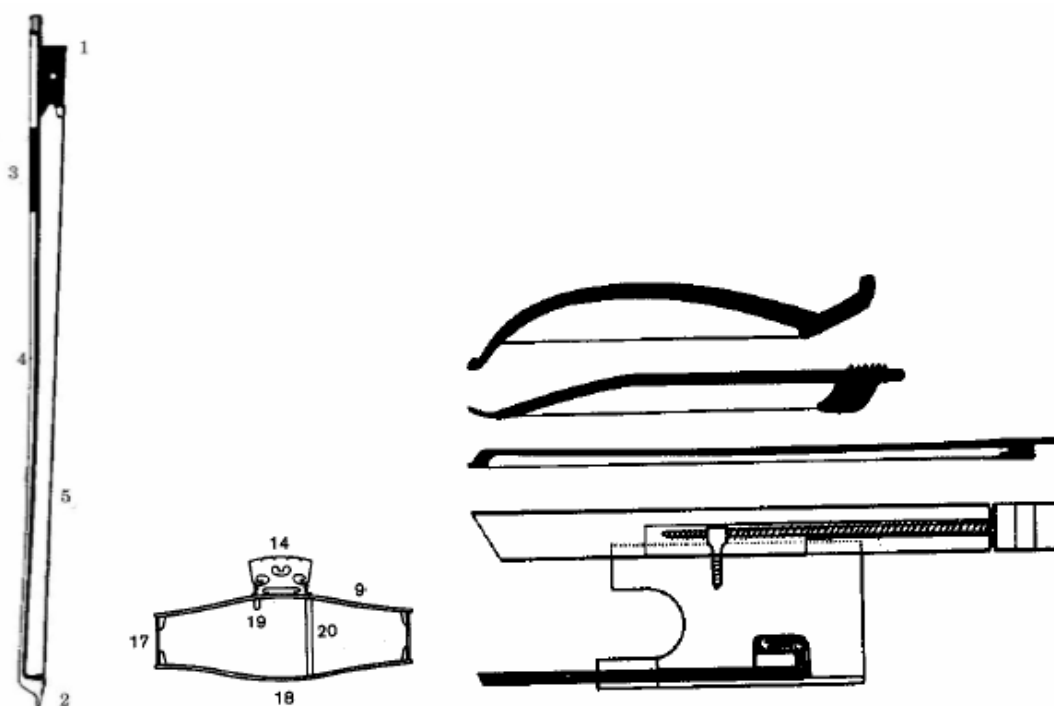
A vonó a hangszer 'erőforrása', a hangok gerjesztője. Mesteri használata a hegedűművész technikájának egyik erőssége.

A vonó a barokk korban „hal-formájú” volt, majd a 19. században nyerte el ma ismert formáját, súlyelosztását. A következő ábra bemutatja a különféle vonó formákat és a vonóval kapcsolatos elnevezéseket.[17] [20]



A vonó anyaga pernambukfa, Brazília őserdeiből származó fa, amelynek igen kicsi kritikus csillapítási tényezője 0,2% és 0,6% között van. Az összeszerelt vonó rezgési módusai ettől csupán 1..7%-kal alacsonyabbak, a csillapítás az előbbi durván kétszerese. Egy további tranzverzális módus is megjelenik 60-75 Hz között, amelyik így a legalacsonyabb frekvenciájú módusa lesz a vonószőrnek. A jó minőségű vonók - a hegedű frekvenciafüggő átvitelét előnyösen befolyásolják, - általában kis csillapításúak az alacsony frekvenciákon, és a csillapítás a frekvencia növekedésével nő. (Aluláteresztő szűrő jellegű.) [11]

- |          |                      |
|----------|----------------------|
| 1. kápa  | 4. vonórúd           |
| 2. csúcs | 5. vonószőr (lőszőr) |
| 3. fonat |                      |



4. ábra: A vonó fő részei (a megnevezéseket lásd fent)

5. ábra: A hegedű hossz tengelyére merőleges keresztmetszete a hegedűlábbal (14) a lélekkel (20) és gerendával (19)

6. ábra: A vonó fejlődése: a korai vonó, a 17. századi és a Tourte-féle vonó (1820 k.), továbbá a kápa mechanikája

### Speciális vonós elemek:

Akusztikailag jelentős szerepe van a gerendának és a léleknek (lásd fent), a formán sok kialakításában elengedhetetlen funkcióval bírnak.

A lélek egy henger alakú fapálcika, amelyet enyvezés nélkül behelyeznek a tető és a hátlap közé. Helyzetének változtatásával állíthatjuk a hegedű rezonátor tulajdonságait, bizonyos határok között.

A gerenda speciális módon egybe van ragasztva a tetővel, pontos működése mindmáig ismeretlen.[21]

### 1.1.3 Művészi visszahatás a zenére, a fejlesztések, az 'optimális hegedülés' problematikája.

A hegedű továbbélését, fejlődését egyrészt maga a hangszer hangja, másrészt azok a sokoldalú muzsikuskok vitték sikerre, akik tehetségük folytán le tudták küzdeni azokat a nehézségeket, amelyet a megszólaltatás komplexitása adott. Pályafutásukat közösen az jellemezte, hogy szakmai küzdelmeik során olyan hegedűtechnikai, zeneelődői eszköztár birtokosaivá váltak, hogy koruk zenéjét rendkívül magas színvonalon tudták előadni.

A hegedű, noha soha nem lett divathangszer, de művelőinek köszönhetően a stílus- és korszakváltások nem jelentettek törést, csak állandó kihívást a profi játékmód elérése érdekében.

Ennek szép példája a zenében a klasszikus stílus lezárása, a romantika születése, amely a francia forradalommal köthető össze.

A francia forradalom fordulópontot jelentett társadalmi-politikai-kulturális téren is. Az 1795-ben megalapított Conservatoire de Musique a hegedű oktatásának intézményesítését is jelentette. Az első hegedűtanárok Viotti tanítványai: Rode, Kreutzer és Baillot voltak. A mai napig használatosak a középfokú hegedű-tanításhoz elengedhetetlenül szükséges Rode- és Kreutzer-etűdök, amelyek különleges módon kódolják a hegedűjáték zenei és technikai tapasztalatait. [12]

A romantikus zenét a különböző kifejezőeszközök hihetetlen gazdagsága, sokszínűsége jellemzi. A hangszereket az új hangzásvilág (új közönsége) igényei szerint átépítették: kb. 1800 után a menzúrát (bizonyos méreteket) és a feszítési nyomást megváltoztatták a nagyobb, erőteljesebb koncerttermi hangzás érdekében. 1820 k. a vonó is elnyerte mai modern alakját a párizsi François Tourte-nak köszönhetően, amely differenciált vonóvezetést tett lehetővé. [17]

A 19. században ismét egy olasz döbbsentette meg a nyugat- és kelet-európai hegedűsöket.

Niccolò Paganini technikai bravúrjaival nem csak csodálóira, hanem vetélytársaira is mély hatást gyakorolt. A különböző "trükkök" ellesése, talán még nem egészen tudományos, de praktikus átgondolása elkezdődött, és ez óriási lendületet adott a hegedülés fejlődésének.

*"Paganini ott kezdődik, ahol az ész megáll", mondta Giacomo Meyerbeer francia zeneszerző. [2]*

Liszt Ferenc, Paganini csodálója, korának több hegedűművészevel is kapcsolatban állt: Wieniawskival és a fiatal Hubay Jenővel is.

Hubay a világhírű magyar hegedűiskola megalapítója. Szakmai pályafutása során nemzetközi, és hazai elismerést is kivívott magának. *1882-86-ig a brüsszeli konzervatórium hegedűtanára, majd hazatérve átvette a bp.-i Zeneakadémia vezetését [6]* [3]

Tágabb értelemben a zeneművészetben és zeneoktatásban ez az utóbbi "romantikus" korszak a mai napig tart.

A közép-kelet-európai zenei-kulturális központokban, elsősorban Bécsben, majd Budapesten komoly szintézise folyt az olasz-német-francia stílus elemeinek. A bécsi

klasszika (W.A. Mozart, Haydn, Beethoven), illetve a német-osztrák hegedűiskola és a Hubay-féle világhírű magyar hegedűiskola bizonyította ennek a szintézisnek a sikerességét. (Sőt, Bartók és Kodály) zenéjére, illetve gondolkodásmódjára ez az analitikus-szintetikus látásmód ugyanúgy jellemző volt.)

Az előbb említett mesterek illetve művész-tanárok munkásságán kívül a hegedűstradíció szempontjából szintén jelentősek a Magyarországon született illetve itt is élt hegedűpedagógusok. Nemzetközileg is ismertek Flesch Károly, Auer Lipót<sup>2</sup> eredményei.[16]

Sok művész véleménye szerint azonban a 20. század második felétől már nem ugyanúgy fejlődik a művészet, mint azt megelőzően, ebben a hegedűművészet sem tér el a többi művészettől. Erre példaként szeretném említeni Dr. Szende Ottó, első szakfelügyelő tanárom kutatási eredményeit a hatvanas években a hangképzés fizikai, fiziológiai alapjaival kapcsolatban, tapasztalatait anatómiai ismeretek felhasználásával is rendszerbe foglalta.<sup>3</sup> [18]

A hegedűhang előállításakor a játékos rossz rezgési peremfeltételek, rossz csatolások kialakításával leronthatja a hangszer által adható jó hangzást. Ezért nem hagyható figyelmen kívül a játékos szerepe.

A hegedűjáték során tehát valamilyen módon ki kell alakítania a hegedűsnek egy olyan optimális játékmódot, amely fiziológiailag helyes (tehát a statikus és dinamikus izommunka szempontjából legkevésbé megterhelő, vagyis az állóképességet és a pontos lejátszhatóságot garantáló mozgási sztereotípiák begyakorolását jelenti az anatómiai-geometriai feltételek figyelembe vételével), illetve akusztikai szempontból egyaránt megfelel az elvártaknak. [6] [7] [8] [10] [13] [18] [20]

---

<sup>2</sup> az ún. orosz és az ún. amerikai hegedűiskola megalapítója

<sup>3</sup> Jórészt ezen eredményeket felhasználva, zeneművészeti egyetemi éveim alatt, feladatomból volt, hogy videó anyagok alapján, amelyek az egyik utolsó Hubay-tanítvány, Fenyves Lóránt által tartott hegedűórákat örökítették meg, rekonstruáljam a „megfoghatatlan” Hubay-módszer fő jellegzetességeit.

## 1.2 A hegedű mint rezgő rendszer ismeretlen tartalékainak felderítése: akusztikai megfigyelések, fizikai modellek

A hegedű, mint rezgő rendszer tanulmányozása a hangszerészek és akusztikusok számára is hosszú és szép feladatot jelentett. A zenei felhasználók, a muzsikuskok akusztikai felfedezései általában titokban maradtak,<sup>4</sup> azonban 19. század óta komoly szakemberek foglalkoztak a tudományos szintű megközelítéssel.

Néhány pontban összefoglalható, hogy milyen rezgéstípusok jelennek meg a hegedűhang képzésénél:

1. A hegedűhangot általában a gyantázott vonó segítségével hozzuk létre úgy, hogy a kellően megfeszített hegedűhúrokon a megfelelően feszített és irányított vonószőrt meghúzzuk és azok súrlódása által a húrok rezgésbe jönnek. (Vagyis gerjesztés jön létre.)

2. A vonó által létrehozott húrrezgés áterjed a lábra, innen a tetőre. (Lemezrezgés alakul ki.)

3. A beékelte lélek a tetőn kialakult rezgést átviszi a hátra, majd a kávékra is.

4. A hangszer test rezgését átveszi a belsejében levő levegő is. A légtérben a hangenergia kisugárzódik.

5. Az előbbi pontokban említett elemek: a vonó, a hegedű különböző részei (húrok, láb, lélek, fedő- hátlap stb.), a levegő, sőt a játékos is, mint "rezgő alrendszer" *együttesen csatolt és visszacsatolt egységes erősítő rendszert alkotnak.* [21]

Ezek egy része a módusok kialakulása szempontjából parciális differenciálegyenletekkel analitikusan is jól modellezhető (pl. húrrezgés), más részük kevésbé: például a parciális differenciálegyenletek peremfeltételei ugyanis már a bonyolult alakú lemezek esetében is bizonytalanok, de kvalitatív közelítést még adnak. (X és O módusok.) [4] [11]

A kvantitatív elemzés viszont annál problematikusabbnak bizonyult. Az összetettebb, numerikus, testhangot is elemző véges-elem módszerek sajnos nem bizonyultak megfelelő módszernek a rezgésanalízisben. [11]

A rezonátor üreget, elemzése helyett (ami tartalmazza a test és az üreg rezgését egyaránt), egy egyszerűsített modellben egy lineáris szűrőként megadott átviteli függvényvel modellezzük.

Az átviteli függvény tulajdonságait, a formánsokat, az átvitel spektrumát egyrészt a hangszerészek, másrészt az akusztikusok is meghatározták.

Az 'újrafelfedezésre' jellemző példa: Dr. Karl Fuhr tanulmánya: *Die akustischen Rätsel der Geige*, Verlag von G. Merseburger in Leipzig, 1926) és Alonso Moral-Jansson (1982b) [11] [21]

A ma használatos általános modellt a 2.1.2. alfejezetben fogom részletesebben kifejteni.

---

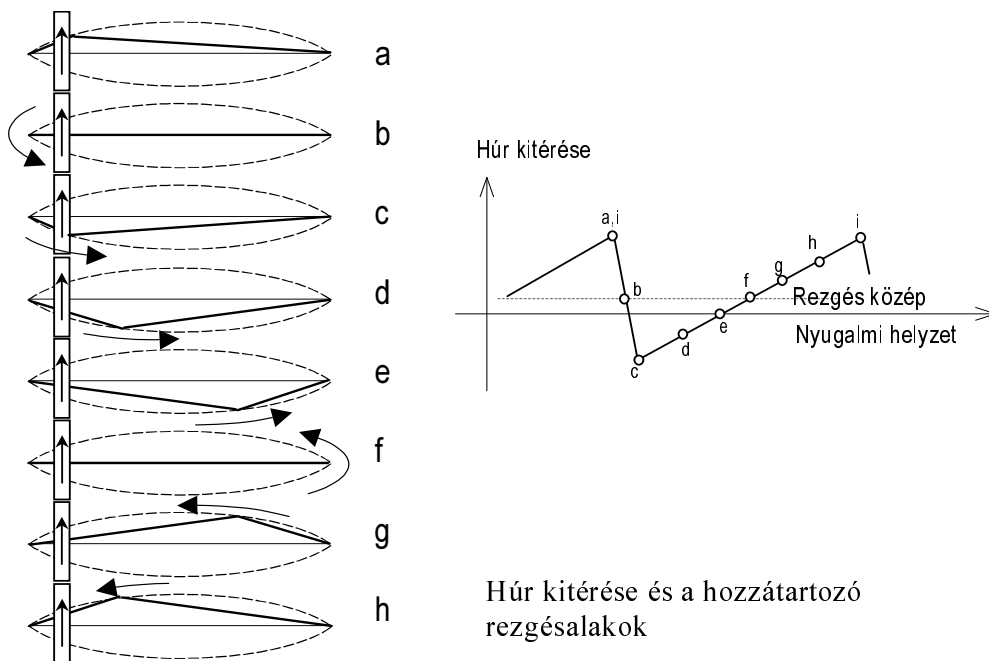
<sup>4</sup> Például Tartini felfedezése, a kombinációs hangok.

A csatolások, visszacsatolások, kényszerített rezgések modellezését pedig általában elhanyagoljuk, kivételt képez a húrok modellezése, ahol figyelembe kell venni a húrmodellben, illetőleg a gerjesztési modellben.

A vonó rúdjának viselkedését, mint aluláteresztő szűrőt lehet a modellezéskor figyelembe venni.

A gerjesztési modell tapasztalati leírása Helmholtz nevéhez fűződik:

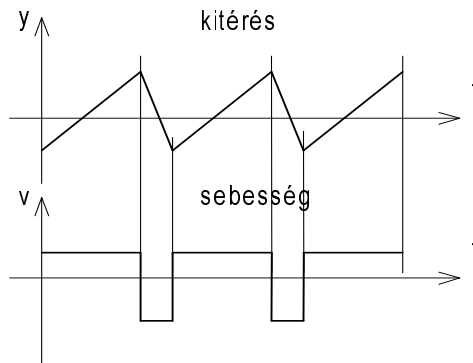
Helmholtz elméletében a húr burkolója hasonlatos a pengetett húrúhoz. Az alábbi ábra szerinti töréspont vándorol. [4]



7. ábra: A húr kitérése

A klasszikus megfigyelés alapján a folyamat a következőképpen történik:

A vonó a súrlódási erő révén magával ragadja a húrt, együtt mozognak. A súrlódás alkalmazkodó kényszererő, ezért a mozgás addig tart, míg a kimozdult húr visszatérítő ereje (konzervatív erő) nagyobb lesz, mint a nyugvó súrlódás. Majd a húr visszafelle lendül, majd elérve a másik oldali holtpontot, ott megáll és elindul ellenkező irányba. Mihelyt sebessége ismét megegyezik a vonóéval, a folyamat kezdődik előlről. Pozitív mozgáskor a húr energiát vesz fel, visszapattanáskor pedig energiát veszít a súrlódóerő ellenében. Mivel a nyugvó súrlódási erő nagyobb, mint mozgás közben, ezért a felvett energia több mint a leadott.



8. ábra: kitérés és sebesség a Helmholtz modellben

A lényegét így foglaltam össze, amit a modellezés során később is felhasználtam:

1. a súrlódásnak köszönhető a húr kitérése, és ez a kitérés (mozgás) állapotként jelenik meg.
2. az alaphang kialakulásával kapcsolatban van a tapadó súrlódás visszatérése, ami a húr periodikus mozgásának következménye. Ez pedig Helmholtz modelljében a konzervatív erőter tulajdonságából következik.
3. hegedűhúr és a vonószőr az előbbi két pontból adódóan mechanikusan csatolt rendszert alkot.

Példaként meg lehetne említeni az inga mozgását is, ahol a konzervatív erő a gravitáció. A gravitációs erőter azonban nem képes rezonanciára bírni az ingát. Ezzel szemben, ha egy csatolási ponton egy oszcillátorral sajátfrekvenciáján gerjesztjük, létrejön a rezonancia. A különböző erőterek tehát csak nagyon speciális elrendezésben hatnak periodikusan környezetükre és a rezonancia kialakulása ekkor sem valószínű. A vonó esetében a súrlódási erő nem konzervatív, de a húr az. Itt nagyon érdekes, hogy noha a vonó adja az energiát, és a húr kapja, mégsem a húr alkalmazkodik mozgásában a vonóhoz, hanem éppen fordítva. Ezt pedig az teszi lehetővé, hogy a súrlódási erő egyrészt nem konzervatív és limitált, tehát pl. a hely függvényében nem biztosít egyértelműen kölcsönös leképezést, mint a konzervatív erőterek, és maximuma van, másrészt viszont függ a nyomóerőtől, amely itt szintén nagyon fontos tulajdonsága lesz a modellben.

## 2. A hegedű elektronikus hangszintézise

### 2.1.1 A hangszerek felosztása a lehetséges szintézisük szempontjából

- Az ütőhangszerek világa, tágabb értelemben. Ide tartozik a zongora is, mint húros-ütős hangszer.
- A vonós és fúvós hangszerek világa. Közös jellemzőjük, hogy a hang nem hal el, mert a kisugárzott energia miatti veszteség pótlódik a játékos folyamatos hangképzésének köszönhetően.

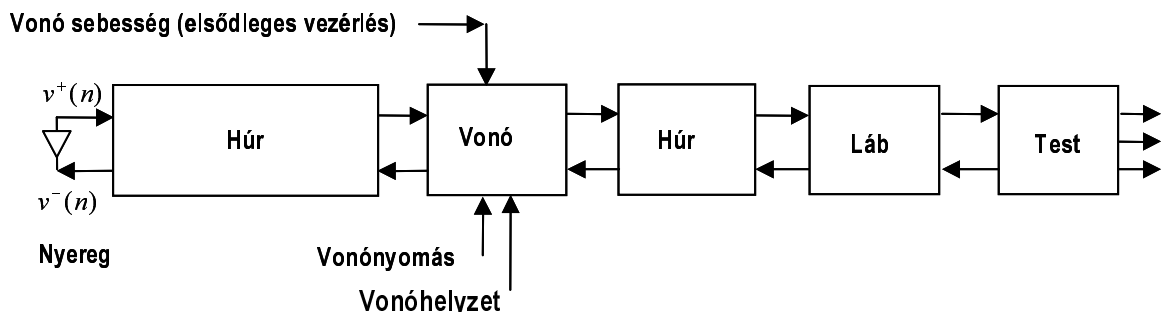
### 2.1.2 Az ún. fizikai szintézis alapelvei, általános struktúrák

A fizikában a változások matematikai modellezése differenciálegyenletek segítségével történik. A 'közelről minden lineáris elve' alapján többnyire jól közelíthető nagyon sok fizikai rendszer lineáris differenciálegyenlet-rendszerek segítségével. Ezek a lineáris algebra segítségével könnyen megoldhatók.

A numerikus számításokban a differenciálegyenletek helyett differenciaegyenleteket oldunk meg. Ha a számítási eljárás numerikusan stabil, kellő pontossággal kapunk numerikus megoldást.

Említésre méltóak az ún. végeselem módszerek (FEM) és a waveguide-struktúra segítségével történő megoldás.

Noha a hangszerek modellezése hangszertípusonként más és más lehet (ez adja a fő nehézséget), a húros hangszerek közös tulajdonságokkal rendelkeznek, amiből érdemes a modellezés során kiindulni, és így a legmegfelelőbb modellezési módszert kiválasztani.



9. ábra: a vonós hangszerek általánosan elfogadott, sematikus modellje [9]

### 2.1.3 A waveguide struktúra, mint egyszerű megoldási mód a húr viselkedésének leírására.

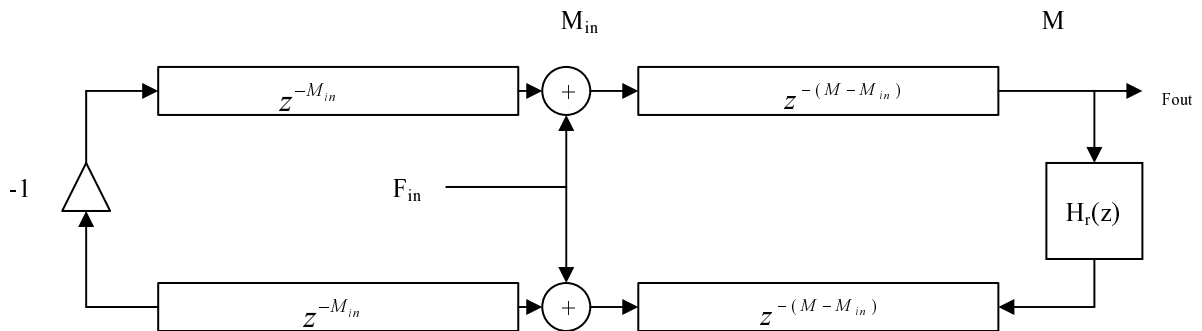
A waveguide egy késleltetőkből összekapcsolt körstruktúra, amely képes egy elosztott paraméterű hálózat modellezésére. Így például tipikus alkalmazásként lehet használni egydimenziós hullámegyenlet diszkrét idejű megoldására. Jelen esetben a hangszintézis ún. fizikai modellezés segítségével történik, waveguide segítségével. Az egydimenziós húr modellezésekor kijelölünk egy állapotváltozót (vagy változókat) (kitérés, sebesség vagy gyorsulás illetve erő), amely valamelyik (vagy több) koncentrált pontból kiindulva továbbhalad(nak).



Jelen esetben a gerjesztés egy ponton lép be a waveguide-ra. A soros feldolgozás miatt célszerű egyszerűen körbeléptetni a waveguide-elemeket, a reflexiók figyelembevételével.

A hagyományos elektromágneses elosztott paraméterű hálózatokkal analóg módon értelmezhető az erő-sebesség dualitás a feszültség-áram viszonyoknak megfelelően, azonban a waveguide esetében a csatolási egyenleteket már hagyományosan úgy írják fel, hogy a waveguide elemek szuperpozíciójakor mindig előjeles összeadást kelljen elvégezni, éppen ezért a reflexiók tényezője mindig -1, ha veszteségmentes a reflexió.

A waveguide módszerrel gyakorlatilag mindenféle hangszer modellezhető, amely transzverzális (és torziós) hullámok figyelembevételével rezeg.



10. ábra: a waveguide alapmodell

A waveguide átviteli függvénye:

a)  $H_r(z) = -r = 0$  esetében:

$$F_{out} = F_{in} (1 - z^{-2M_{in}}) z^{-(M-M_{in})} = z^{-M} (z^{M_{in}} - z^{-M_{in}})$$

b)  $H_r(z) = -r$  visszacsatolást bevezetve:

$$\frac{F_{out}}{F_{in}} = \frac{1}{1 - r \cdot z^{-N}} z^{-M} (z^{M_{in}} - z^{-M_{in}})$$

Tegyük fel, hogy a reflexió folyamatosan csillapít a rezonátor tagok között ahogy a hullám halad a waveguide-ban, így a pólusok csillapításai egyformán:

$r_1 = \dots = r_N = r^{\frac{1}{N}}$ , a pólusok körfrekvenciái pedig  $\vartheta_k = \vartheta \cdot k = (2k\pi) / N$ , a k-adik módus(kör)frekvencia,  $N=2M$ , a késletővonal teljes hossza.

Így parciális törtre bontással és  $z_k = r_k e^{j\vartheta_k}$  helyettesítéssel (r most már helyettesítve van!)

$$\frac{F_{out}}{F_{in}} = \frac{1}{1 - z^{-N}} z^{-M} \left( z^{M_{in}} - z^{-M_{in}} \right) \Big|_{z_k = r_k e^{j\vartheta_k}} =$$

$$= \left\{ \frac{a_1}{1 - z^{-1} r_1 e^{j\vartheta_1}} + \dots + \frac{a_N}{1 - z^{-1} r_N e^{j\vartheta_N}} \right\}$$

$$a_k = j \frac{2}{N} \sin\left( 2k\pi \frac{M_{in}}{N} \right) e^{-j\vartheta_k M}$$

Ahol  $a_k$  a komplex amplitúdók, és  $r_k$  a pólusok sugarai.

Ugyanis a parciális törtre bontásnál a nevező:

$$\frac{d}{dz} (1 - z^{-N}) = N \cdot z^{-1} \cdot z^{-N} \Big|_{z_k = r_k e^{j\vartheta_k}} = N \cdot r_k e^{-j\vartheta_k}, \text{ tehát az abszolút érték: } N \cdot r_k.$$

A negatív előjel a kitevőben csak egy negatív irányú körülfordulást jelent, ami a pólusok viselkedésén nem változtat a pozitív forgáshoz képest; az egyszerűsítésnél a periodikusságot használtam fel.<sup>5</sup>

A számláló pedig:

$$z^{-M} (z^{M_{in}} - z^{-M_{in}}) \Big|_{z_k = r_k e^{j\vartheta_k}} = r_k e^{-j\vartheta_k M} \cdot (2j \cdot \sin(M_{in} \cdot \vartheta \cdot k))$$

Ebből  $a_k = j \frac{2}{N} \sin(2k\pi \frac{M_{in}}{N}) e^{-j\vartheta_k M}$  és az alábbi alakból származtatva:

$$\sum_{k=1}^N \frac{a_k z}{z - p_k} = \sum_{i=1}^N \frac{a_k}{1 - p_k z^{-1}} \text{ megkapjuk a végeredményt.}$$

Az átviteli függvény tehát frekvencia- és fázisfüggő, a módusfrekvenciáktól és a késleltetésektől függ.

A waveguide impulzusválasza:

$$h(n) = \sum_{k=1}^N a_k (r_k e^{j\vartheta_k})^n = \sum_{k=1}^{N/2} a_k (r_k e^{j\vartheta_k})^n + a_{N-k} (r_{N-k} e^{j\vartheta_{N-k}})^n$$

Mint hogy  $\vartheta_{N-k} = 2\pi - \vartheta_k$ , a megfelelő póluspárok konjugált póluspárok lesznek

$r^{N-k} e^{j\vartheta_{N-k}} = r^k e^{-j\vartheta_k}$ , és ugyanígy az amplitúdók  $a_{N-k} = \overline{a_k}$ , ahol a felülvonás komplex konjugáltat jelez. Így az impulzusválasz kifejezhető exponenciálisan lecsengő szinuszos tagok összegeként:

<sup>5</sup> Komplex konjugált póluspár esetén a párt alkotó pólusok helyet cserélnek, valós pólus esetén a pólus konjugáltja ugyanaz, tehát nem változik meg semmi. A periódusnyi késleltetést már azonban nem lehet ilyen egyszerűen megmagyarázni. Igaz, mindenfajta diszkrét spektrum periodikus, de ez még további megfontolást kíván.

$$h(n) = \sum_{k=1}^{N/2} r_k (a_k e^{j\vartheta_k n} + \overline{a_k} e^{-j\vartheta_k n}) = \sum_{k=1}^{N/2} |a_k| r_k^N \sin(\vartheta_k n + \varphi_k)$$

Tehát egy  $H(z) = -r$  veszteségi szűrővel csillapított rendszer impulzusválasza exponenciálisan lecsengő szinuszos tagokból áll, melynek frekvenciái az egységkörön belül egyenlően vannak felosztva, ugyanolyan csillapítással. Azonban egy általános  $H(z)$  reflexiós szűrő módusfrekvenciái és csillapításai nem fejezhetők ki zárt formulával. [14]

Az ütős hangszerek szintézisének alapja tehát ezen impulzusválasz.

A húr energiaveszteségeinek nagy része a hang kisugárzására fordítódik. Éppen ezért a veszteségi szűrő fontos eleme a modellezésnek. A veszteség valóságos rezgő rendszereknél nem minden frekvencián egyforma, magasabb frekvencián általában nagyobb a veszteség, tehát a magas frekvenciás komponensek hamarabb lecsengenek. Ez a jelenség nagymértékben befolyásolja a húros hangszerek jellegzetes hangszínét. [1]

### 2.1.3 A vonó korábbi gerjesztési modellje és a tanszéki előzmények bemutatása

A tanszéken a Helmholtz-féle modell alapján egy működőképes modellt sikerült korábban létrehozni. (Bank Balázs, Nagy Attila) [14]

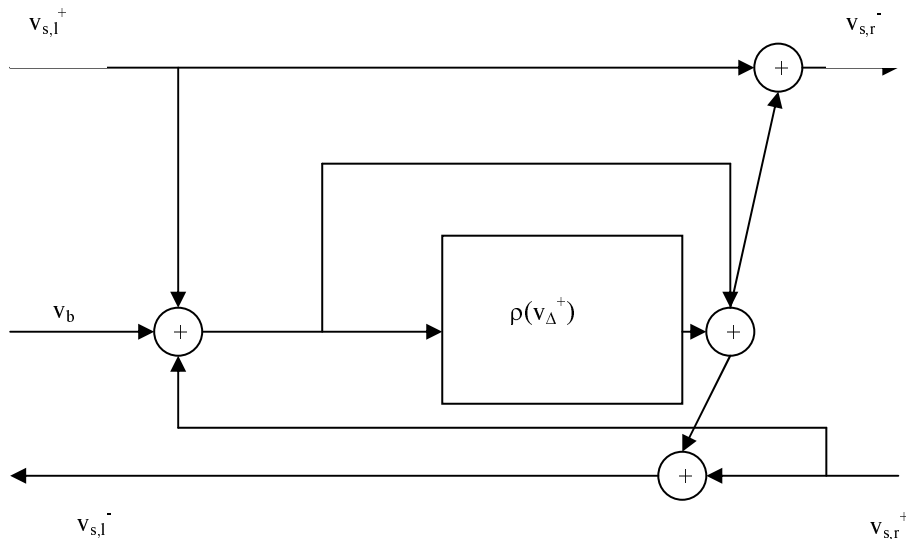
A vonó modell

Vonós hangszerek esetén a gerjesztés a húr és a vonó szőrzet közötti tapadásos súrlódáson alapul. A húr merőleges irányban mozgó vonó beleakad a húrba (tapadási fázis). Ez a tapadási erő erősen nemlineáris. A húr egyre növekvő kitérésének köszönhetően a rugalmas visszatérítő erő is növekszik mindaddig, amíg a szintje eléri a tapadási erőt. Ezen a ponton elengedi a vonó a húr, a húr visszalendül (elengedési fázis) és ezután szabadon rezeg. A rezgés csillapodik egyrészt a húr saját veszteségei, másrészt a húr és a vonószőrzet között fellépő csúszási súrlódás miatt. Ez az állapot addig tart, amíg a vonó ismét rátapad a húrba. Ez csak akkor léphet fel, amikor a vonó és a húr sebessége megegyezik. Ilyenkor a relatív sebességük zérus, a súrlódási erő pedig a legnagyobb. A tapadási és csúszási fázisok ily módon való váltakozása az ún. Helmholtz-mozgás. A gerjesztés periodikus és fűrészfog alakú rezgést hoz létre.

A gerjesztés számos vezérlési változótól függ. Az elsődleges vezérlési változó a vonó sebessége, más fontos tényezők a vonó húron kiváltott ereje és a vonó húrhoz viszonyított pozíciója. Kevésbé fontos változók a húr és a vonó által bezárt szög, a vonó érintkezési felülete és a vonószőrzet tapadása (amely növelhető gyantával). Azért, hogy a modell kezelhető és megvalósítható legyen, általában csak az elsődleges és néhány más fontos tényezőt (pl. a vonóerő és –pozíció) vesznek számításba.

A vonó - húr kölcsönhatást általában szóródásos kereszteződéssel modellezik. Ezt a kereszteződést a sebességkülönbség vezérli, amely a pillanatnyi húrsebesség és a vonó sebességének a különbsége. A vonó helyzete határozza meg a kereszteződés beiktatási pontját a késleltetési vonalakba. Más változók (vonóerő és –szög, stb.) a

( $\rho(v_{\Delta}^+)$ ) visszaverődési függvény paramétereinek módosításával változtathatók. Ez a függvény függ a húr karakterisztikus impedanciájától és a húr és vonó közötti tapadási súrlódási tényezőtől is.



11. ábra: Kereszt-csatolási pont a vonó-húr kölcsönhatásának modellezésére.

A bejövő és kimenő sebesség hullámok a húr bal(kézi) oldaláról  $v_{s,l}^+$  és  $v_{s,l}^-$  jelöléssel. Hasonló jelöléssel a jobb kéz oldaláról:  $v_{s,r}^+$  és  $v_{s,r}^-$ . A reflexió-függvény jelölése:  $\rho(v_{\Delta}^+)$ , és  $v_b$  a vonó sebessége.

A csatolási modellben fontos szerepet kap a differenciális vonósebesség ( $v_{\Delta}^+$ ), amely a vonósebesség és az aktuális húrsebesség különbsége.

A húr-vonó kölcsönhatás modellezése mellett a játékost is modellezni kell.

A vonót tartó jobb kéz pontos modellje nagyfokú szabadságot ad az interaktív vezérlők használatára. Ez ismét egy menedzselhetetlen eszközt eredményezne és/vagy valóságos hegedűjátékost feltételezne. A javasolt billentés-modellhez hasonlóan ez a probléma is megoldható a vonós hangszerek valóságos játékmódjain alapuló automatikus rendszerrel. Mindegyik vonójáték-stílushoz az elsődleges változók időbeli változásai jellegzetes (karakterisztikus) burkolókkal jeleníthetők meg, így csak egy paramétert kell az adott stílushoz igazítani.

## 2.2 A folyamatos rezgésfenntartás a waveguide struktúrában

### 2.2.1 A rezonancia matematikai feltétele, ennek szemléletes fizikai tartalma

A fejezet további részében kísérlem meg, hogy a meglévő struktúrák új nézőpontból, új megvilágítás alá kerülhessenek.

Legelőször nem maga az eddigi tanszéki modell kerül matematikai vizsgálat alá, hanem az a waveguide tulajdonság, amelyre maga a modell épül.

A lecsengő pólusok amplitúdó erősítése matematikailag is szemléltethető az alábbi egyszerű közelítéssel, hasonlóan az előbbi levezetéshez:

Legyen a lineáris, invariáns, kauzális rendszer egyetlen gerjesztése belépő és  $k$  nem-negatív értékeire periodikus jel, amelynek periódusideje  $N \in \mathbf{Z}_+$

A gerjesztés első periódusát

$$u_N[k] = \{\varepsilon[k] - \varepsilon[k - N]\} \cdot u[k]$$

írja le, míg magát a gerjesztést

$$u[k] = \varepsilon_N[k] u_N[k] \equiv u_N[k] + u_N[k - N] + u_N[k - 2N] + \dots$$

Képezzük  $u_N[k]$  Z-transzformáltját!

A gerjesztés Z-transzformáltja:

$$U(z) = \frac{1}{1 - z^{-N}} U_N(z) \equiv \frac{z^N}{z^N - 1} U(z)$$

A rendszer  $H(z)$  átviteli függvényének ismeretében kifejezhetjük a válasz Z-transzformáltját:

$$Y(z) = H(z) \frac{z^N}{z^N - 1} U_N(z)$$

A  $z^N U_N(z)$ -nek nincsenek pólusai, mert  $U_N(z)$  a  $z^{-1}$  változó legfeljebb  $N-1$  fokszámú polinomja. Ez a jel véges hosszából és a Z-transzformáció definíciójából következik:

$$U_N(z) = \sum_{k=0}^{\infty} u_N[k] \cdot z^{-k} = u_N[0] + u_N[1] \cdot z^{-1} + \dots + u_N[N-1] \cdot z^{-(N-1)}, \text{ ugyanis a többi tag } 0.$$

A kifejezést  $z^N$ -nel beszorozva eltűnnek  $z$  negatív és nulladfokú tagjai.

Így  $Y(z)$  pólusai egyrészt a  $H(z)$  átviteli függvény pólusai, másrészt a  $z^N - 1 = 0$  egyenlet  $N$  számú  $z_p$  gyöke, amelyek az egységsugarú körön helyezkednek el. [5]

A pólusok amplitúdói egységnyiek, körfrekvenciái pedig  $\vartheta_k = \vartheta \cdot k = (2k\pi) / N$ , a k-adik módus(kör)frekvencia. (Kétszeres pólusok keletkeznek, lásd a 2.1.3 alfejezetet.)

A válasz a waveguide átviteli függvénye és  $H(z)$  szorzata:

$$Y(z) = \frac{1}{1 - z^{-N}} U_N(z) \cdot \frac{1}{1 - z^{-N}} z^{-M} (z^{M_{in}} - z^{-M_{in}})$$

Az erősítést  $\left(\frac{1}{1 - z^{-N}}\right)^2$  dönti el. A parciális részlettörtekre bontáskor a nevező együtthatója:

$$\frac{d}{dz} (1 - z^{-N})^2 \Big|_{z=e^{j\vartheta_k}} = 2Nz^{-1} (z^{-N} - z^{-2N}) \Big|_{z=e^{j\vartheta_k}} = 2Ne^{-j\vartheta_k} (1 - 1) = 0$$

Tehát a nevező tart a nullához, így az erősítés pedig a végtelenhez.

Így tehát a rezonanciával egy 'ideális erősítőhöz' jutottunk.

A waveguide mindig kifejezhető párhuzamos rezonátorok halmazával.

Következmény:

A waveguide megismert fő tulajdonsága, hogy a rezonanciafrekvenciája a húr alapharmonikus frekvenciájával bármifajta racionális arányt képez, tehát például, ha a gerjesztő jel periódusideje megegyezik az alaphang reciprokával.

A hegedű szintézisekor történt eddigi tanszéki kísérleti eredmények is ezt igazolták. Az eddigiekből következik, hogy a gyakorlatban, a (lineáris) oszcillátoroknál megismert alapelvek itt is segítenek, noha itt a szuperpozíciót máshogy kell értelmezni, hiszen elosztott paraméterű és nem invariáns a rendszer.

A rezonancia egy fizikai rendszerben amplitúdó növekedést szokott okozni, oszcillátorok tervezésekor az a cél, hogy ezt kézben lehessen tartani.

A periódusidő tartása miatt itt is lehet értelmezni valamiféle fázistartalék fogalmát. A periódusidő be nem tartása esetén a rezonancia ugyanis rohamosan romlik, és kellemetlen 'moduláló' zajjal terhelt jelet kapunk.

## 2.2.2 A rezonancia szerepe a vonó gerjesztési modelljében, matematikai, fizikai megfontolások

A korábbi wavguide modell azért működőképes, mert a waveguide képes periodikus mozgás létrehozására, egy valóságos fizikai húrhoz hasonlóan. Egy konstans gerjesztés hatására (ami a csúszó súrlódásnak feleltethető meg) ez a gerjesztés végig halad, majd reflektálódik, így megjelennek a waveguide módusai. Az energiavesztések pótlására szolgál a tapadó súrlódás, amely elvileg akkor jelenik meg, amikor a vonósebesség és a húr sebessége megegyezik, tehát a differenciális vonósebesség nulla. Ez gyakorlatilag a húr sebességének egyik irányba történő előjelváltozásának feleltethető meg.

I. Első lépés a hegedűhang megszólaltatásában: a folyamat statikus leírása: a waveguide általános periodikus gerjesztése

Miután belátható, hogy a rezonancia kialakulásának feltétele a periódusidők szinkronizálódása, a hangszintézis során első közelítésként nem szükséges fizikai modellel megvalósítani, csak be kell tartani. A megfelelő periódusú gerjesztéssel rezonancia, a hullámmozgás folyamatos erősítése figyelhető meg.

Képzeld el, hogy a szőrszálak merevek, és ahogy találkoznak a húr gerjesztési pontjával, kitérésre kényszerítik azt! Így a szőrszálak alakja 'átmásolódik' a húr egy periódusnyi szakaszára, majd végighaladva a húron, mint időfüggvény, ugyanígy a kimeneten is megjelenik.

Egy egyszerűsítést alkalmazva a szőrszálak periódusról periódusra hasonlóan állnak be az új periódusban, ('a szőr rendezett meghajlása'). Éppen ezért első közelítésben nem tartottam szükségesnek egy újabb periódusban ezt megváltoztatni, hiszen ekkor hallható zaj, moduláció léphet fel.

A súrlódást egy időfüggvénnyel jellemezve, megfeleltethetjük egy gerjesztő jelnek. Ezt közelítőleg méréssel határoztam meg a súrlódó vonószőr hangja alapján. A vonót a hegedűlábban húzva kaptam egy zajt, aminek vettem az első 2N a mintáját, ahol N a waveguide alappontok száma.

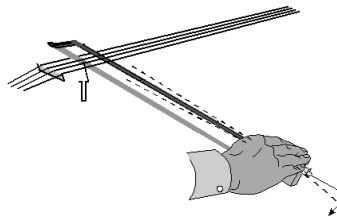
(a 0-szintnél nagyobb jeleket véve 'egyenirányítottam' a regisztrátumot, így megkaptam a 'szőrszálak' hozzávetőleges elrendezését)<sup>6</sup>.

Így tulajdonképpen nem kellett szükséges külön tapadó súrlódás, és nem szoroztam egy periodikus nyomóerő-változással sem a gerjesztő súrlódási függvényt.

Tulajdonképpen a fizikai modellezés számára nem értelmezhető, hogy egy jel periodikus, vagy sem, például szinuszos, vagy bármilyen más alakzatot vesz fel. A testek és az erők kölcsönhatása dönti el a végeredményt.

II. A folyamat dinamikus leírása: a vonó mint erősítő

A súrlódás ereje függ a nyomóerőtől, ez pedig a vonó rúdjának vertikális mozgásától. A vonó két funkcionális eleme, a vonószőr és a vonórúd. A vonószőr húrszerűen van kifeszítve, érdes felületű, kis tömegű. A vonórúd rúdrezgést végez, amelynek módusai nem lineárisan követik egymást, és a vonórúd tömege jelentős, a nyomóerőt általában képes biztosítani (kápánál biztosan). A nagy tömeg csillapító hatását egy mechanikus aluláteresztő szűrőként lehetne modellezni.



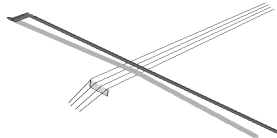
12. ábra: A vonórúd vertikális mozgásai.

<sup>6</sup> Ezt szükség szerint ritkítani is kellett, a felharmonikusok csökkentése miatt, illetve egyen szintet is lehetett hozzá adni kívánság szerint.

Igaz, a függőleges irányú vonórezgés jól kimutatható, ez tulajdonképpen csupán (jó esetben) követi a húr függőleges kilengését, nem csillapítva azt túlságosan. Azonban a függőleges rezgési komponens aktívan nem vesz részt a gerjesztésben, modelünkben nincs funkcionális szerepe, csupán növeli a húr rezgési veszteségeit. Vízszintes irányban a húr mozgási energiája és a függőleges vonónyomás által biztosított súrlódó erő lép kölcsönhatásba, itt történik a gerjesztés.

### 2.3 Egy megoldási javaslat bemutatása, amely teljesíti az előírt fizikai és matematikai feltételeket

1. A saját modellem és korábbi tanszéki modell között az a döntő különbség, hogy modellemben a csatolás helye valójában **vonalszerű geometriájú**. A vonószőr meghajlik, és a húr keresztmetszeti síkjából nézve a vonószőr 'körülöleli' a húr, így biztosítja a biztos tapadást. Az így létrejött forgatónyomatékokat, és az ennek következményeképp létrejött torziós rezgést most nem vesszük figyelembe.



13. ábra: A húrokra feszített vonószőr.

A vonó és a húr relatív sebességét nem kell figyelembe venni, hanem a tapadás folyamatos mindaddig, amíg a húr rugalmas energiája kisebb, mint a gerjesztés energiája.

A vonószőr merőlegesen van felfektetve a húr, hossza jóval nagyobb, mint a húr maximális kitérése, így **bármilyen kitérés esetén a húr folyamatosan érintkezik a vonószőrrel**.

Ezt a tapadást a vonó függőleges nyomása és vízszintes sebessége határozza meg. Tehát a játékos e két paraméterrel egy gerjesztő súrlódási erőt állít be, amely hat a húrban tárolt rugalmas visszatérítő erőre. Ha elértük a kívánt (mozgási) energiaszintet, a vonó elengedi a húr, nem képes a további tapadásra. A csúszó súrlódás hatása elhanyagolható. (Egyébként működik a modell csúszó súrlódással is, de az eredmény teljesen hasonló.)

Noha a súrlódás egyirányú, a csúszási feltétel iránytól független, a relatív sebesség nem számít.

Felvetődhet a kérdés, hogy visszapattanáskor is ugyanolyan irányú erő hat, mert a súrlódás egyirányú és így nem lehet szimmetrikus a rendszer. Tehát nem lehet csupán az energia megmaradást (energia átadást) felírni, a (vektoros) lendület megmaradásnak (lendület átadásnak) is érvényesülnie kell.

Bizonyítható, hogy rendszerünk megfelel az összes megmaradási feltételnek.



### A rendszer nem koncentrált paraméterű, hanem elosztott paraméterű.

A gerjesztési pontban kapott lendület így nem koncentrálódik egy pontban, hanem szétterjed a rendszerben.

Ez a waveguide modellben is belátható:

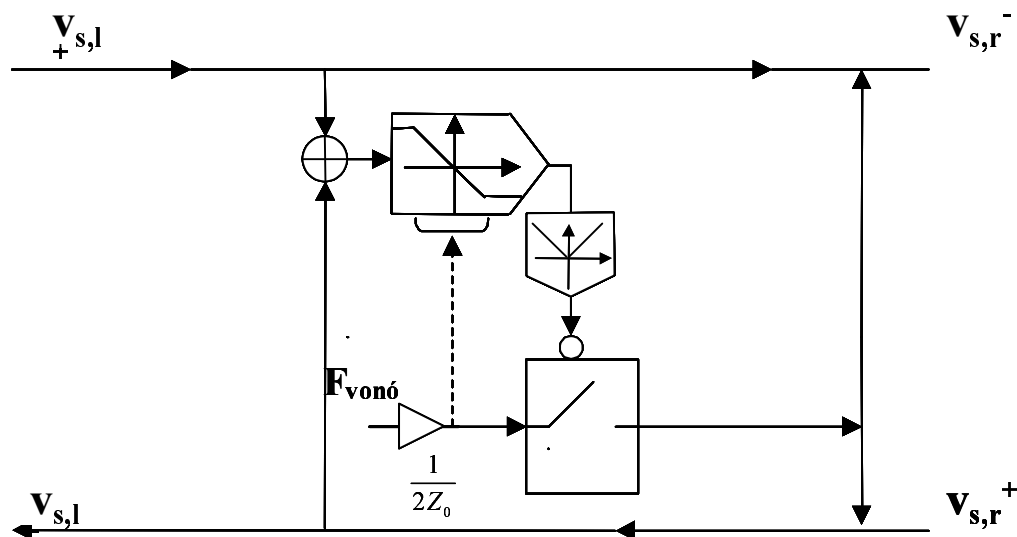
A waveguide elemeket csoportosítsuk páronként úgy, hogy azon a húr egy-egy darabkáját jelenítsék meg (a jobbra és balra menő első, második, N-ik elempár), ezek felfoghatók úgy, mint sorba kapcsolt potenciálgödrök. A rugalmas erőteret a reflexiók biztosítják. A vonósőr minden waveguide taggal folyamatosan érintkezik, így a limitáló feltétel minden potenciálgödörre vonatkozik.

Tehát úgy képzelhetjük el, hogy a húr minden egyes darabkája képes arra, hogy periódusonként lengjen, és ezt a lengést, amely az energiaveszteségek miatt csillapodik, újabb lökással erősíthetjük.

**A folyamatos gerjesztést ezek a húrelemek nem folyamatos gerjesztésként, hanem pillanatszerű, periódusonkénti lökésnek érzik, az elosztott paraméterű rendszernek köszönhetően.**

A reflexiók és a folyamatosan érintkező vonósőr olyan közös potenciáletteret (illetve erőteret) hoznak létre, amelyben a húrelemek közös szabályok alapján, de egymástól függetlenül mozognak.

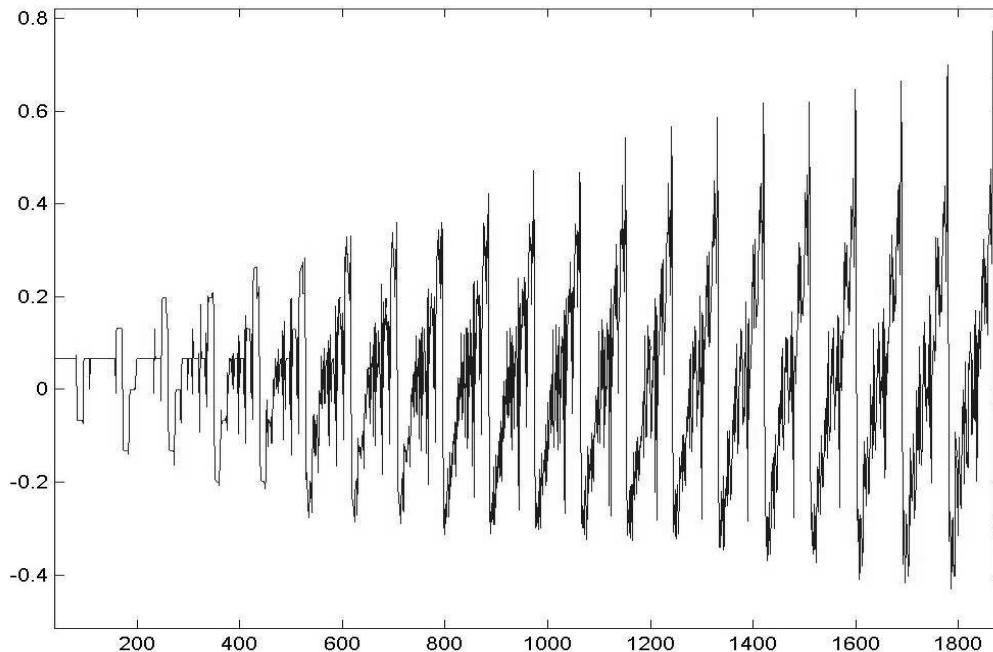
### 2.3.1 Az újabb gerjesztési modell, és a modellezés során kapott kimenet bemutatása



14. ábra: Saját dinamikus vonómodell

Tehát szóban definiálva a gerjesztés 'kvantumos': a vonó súrlódásából származó erő addig hat a húrra, míg az el nem éri ugyanezt az energiaszintet. A rezonancia miatt ez tovább fog erősödni, és fűrészfog jelet fog produkálni, ahogy ezt a kimenet is mutatja (a függelékben kinagyítva látható):

(Hasonló a kimenet, ha a kapcsoló nem tökéletesen zár, az a lényeg, hogy 'megtörjön' a gerjesztés szintje.)



14. ábra: az új gerjesztési modell kimenete

### 2.3.2 Következmények: a szuperpozíció újabb értelmezése a húrmodellekben

A növekvő amplitúdó szabályozása visszavezethető a húr mozgásállapotára. (sebességére, kitérésére, stb.).

A waveguide lineáris tulajdonságú.

$E_t \approx E_{t+T} \approx \sum E_{t,i} \approx \sum E_{t+T,i}$ , ahol  $E_{t,i}$  a t-ik időpillanatban az i-edik waveguide-elem energiáját jelenti.

Ha  $E_{t,i} = 0.5 \cdot |v_{t,i}| \cdot |f_{t,i}|$ , ahol  $v_{t,i}$  a waveguide i-edik elemének sebessége t időpillanatban,

$f_{t,i}$  a waveguide i-edik elemének erőfüggvénye t időpillanatban, akkor bármelyik waveguide-elem amplitúdója, mint az energia négyzetgyöke modellezhető, arányos az elem sebességével, gyorsulásával.

Tehát a modellezéskor a Helmholtz-féle modellt újra megfogalmazva, van egy maximális sebesség, jelen esetben a vonósebesség, amit a húr nem léphet túl a gerjesztési pontban (sem).<sup>7</sup>

Ugyanez az amplitúdóra is következik. (Ami jelen értelmezésben a sebesség periódusonkénti integrálja)

<sup>7</sup> A maximális gyorsulás vagy sebesség illetve kitérés oka a súrlódási erő limitáltsága.

## Fizikai kép:

Tulajdonképpen szemlélet kérdése, hogy 'mi fut a waveguide'-ban.

A középiskolából ismert  $F \cdot \Delta t = m \cdot v$  képletet alkalmazva az erő és a sebesség arányosak, de ugyanez mondható el az  $s = v \cdot \Delta t$  alapján a kitérésről is, amit most  $a$ -val jelölünk.

Elméletem szerint a  $\Delta t$  nem más, mint az alapfrekvencia reciproka.

A gerjesztésnek általában erőt tekintünk, ami a húron sebességet hoz létre, a húr hullámimpedanciájának figyelembevételével.

Az egységnyi idő alatt a sebesség pedig kitérést produkál, tehát a waveguide kimenete amplitúdó jellegűvé válik, noha a hullám sebességként volt értelmezve a gerjesztéskor.

Így értelmezhető a súrlódás limitáló hatása is, mindhárom mennyiség szempontjából:

A súrlódás a részecskék közti vonzóerőként képzelhető el.

Ha egy bizonyos sebességnél nagyobb a részecske **sebessége**, akkor adott időn belül hatótávolságon kívülre kerül, a vonzóerő már nem tudja legyőzni a kitérítő **erőt**.

### 3. A modell paraméterek leírása, a mérések bemutatása

#### 3.1 Az egypólusú szűrő paraméterek mérése

Az egypólusú szűrő karakterisztikáját meghatározó paramétereket a hegedűhúr megpendítésével kimért időállandókból [15] számítottam egy regressziós polinom illesztésével.

A mérés során 46 hang szűrőparamétereit számoltam több száz időállandóval.

A 2.1.3 alfejezetben említett veszteségi szűrő megvalósítására jelen esetben elegendő egypólusú szűrőt alkalmazni. [1] [14]

Az egypólusú szűrő átviteli függvénye:

$$H_{1p}(z) = g \frac{1 + a_1}{1 + a_1 z^{-1}}, \text{ ahol } a_1 \text{ a szűrő pólusa, } g \text{ pedig a DC erősítése.}$$

Az amplitúdó átviteli karakterisztikája:

$$|H_{1p}(e^{j\vartheta})| = g \frac{1 + a_1}{\sqrt{a_1^2 + 1 + 2a_1 \cos \vartheta}}$$

Mérjük le egy  $\vartheta$  diszkrét körfrekvencián egy  $\tau$  időállandót!

Mivel a mért amplitúdó exponenciálisan csökken az időben, ezért az időállandó kifejezhető:

$$|H_{1p}(e^{j\vartheta})| = e^{-\frac{1}{f_0 \tau}}, \text{ vagyis } \tau = -\frac{1}{f_0 \ln |H_{1p}(e^{j\vartheta})|} \approx \frac{1}{f_0 (1 - |H_{1p}(e^{j\vartheta})|)},$$

ahol  $f_0$  az alapharmonikus folytonos idejű frekvenciája.

(Taylor-sorral közelítettünk.)

Ha a csillapítási tényezőt vesszük az időállandó helyett ( $\sigma = 1/\tau$ ), akkor

$$\sigma \approx f_0 (1 - |H_{1p}(e^{j\vartheta})|) = f_0 \left( 1 - g \frac{1 + a_1}{\sqrt{a_1^2 + 1 + 2a_1 \cos \vartheta}} \right) = f_0 \frac{\sqrt{(a_1^2 + 1 + 2a_1 \cos \vartheta) - g(1 + a_1)}}{\sqrt{a_1^2 + 1 + 2a_1 \cos \vartheta}}$$

Másodrendű Taylor sorbafejtést alkalmazva a koszinusz függvényre

( $\cos x \approx 1 - x^2/2$ , ha  $x \approx 0$ ):

$$\sigma \approx f_0 \frac{\sqrt{(a_1 + 1)^2 - a_1 \vartheta^2 - g(1 + a_1)}}{\sqrt{(a_1 + 1)^2 - a_1 \vartheta^2}} = f_0 \frac{\sqrt{1 - \frac{a_1}{(a_1 + 1)^2} \vartheta^2 - g}}{\sqrt{1 - \frac{a_1}{(a_1 + 1)^2} \vartheta^2}}, \text{ ahol a nevező 1-hez közeli,}$$

így alkalmazhatjuk, hogy  $\sqrt{1 + x} \approx 1 + x/2$ , ha  $x \approx 0$ :

$$\sigma \approx f_0 \left( \sqrt{1 - \frac{a_1}{(a_1 + 1)^2} g^2} - g \right) \approx f_0 \left( (1 - g) - \frac{a_1}{2(a_1 + 1)^2} g^2 \right)$$

A  $g$  szerinti nulladfokú és másodfokú tagok együtthatóit  $c_1, c_3$ -nak elnevezve:

$$\tau = \frac{1}{\sigma} \approx \frac{1}{c_1 + c_3 g^2}, \text{ ahol } c_1 = f_0(1 - g) \text{ és } c_3 = -f_0 \frac{a_1}{2(a_1 + 1)^2}$$

Ha  $c_1, c_3, f_0$  ismert, akkor  $g, a_1$  kifejezhető:

$$g = 1 - \frac{c_1}{f_0}, \text{ illetve } a_{1,2} = \frac{-4c_3 - f_0 \pm \sqrt{8f_0 \cdot c_3 + f_0^2}}{4c_3}$$

Eddig  $\tau, \sigma$  egy bizonyos  $g$  diszkrét körfrekvencián volt kifejezve. Legyen  $g_k = g_0 \cdot k$ , a  $k$ -adik harmonikus körfrekvenciája, ahol  $g_0 = \omega_0 T = 2\pi f_0 T$ , az alapharmonikus diszkrét idejű körfrekvenciája,  $T$  a mintavételi periódusidő.

Így  $g_1 = g_0, f_1 = f_0, \tau_1 = \tau_0, \sigma_1 = \sigma_0$  az alapharmonikushoz tartozó frekvencia- és csillapítási adatok.

A  $g$  értékét az alapharmonikus lecsengési idejéből is számíthatjuk:

$$g = e^{-\frac{1}{f_0 \tau_0}}$$

A  $c_1, c_3$  paramétereiből ily módon számítható az egypólusú szűrő. Ezek a paraméterek határozzák meg a szűrő frekvenciafüggő időállandóit. Ezeknek az időállandóknak olyannak kell lenni, hogy legkevesebbé térjenek el a hegedűhúr mért időállandóitól:

$$e_\tau = \sum_{k=1}^K (\hat{\tau}_k - \tau_k)^2 = \sum_{k=1}^K \hat{\tau}_k^2 \tau_k^2 \left( \frac{1}{\hat{\tau}_k} - \frac{1}{\tau_k} \right)^2 = \sum_{k=1}^K \hat{\tau}_k^2 \tau_k^2 (\hat{\sigma}_k - \sigma_k)^2, \text{ ahol } \sigma = 1/\tau, \text{ és } \hat{\sigma} = 1/\hat{\tau}, \text{ a}$$
 közelítéssel meghatározandó csillapítási tényező.

Ebbe a kifejezésbe behelyettesítve  $\tau = \frac{1}{\sigma} \approx \frac{1}{c_1 + c_3 g^2}$  összefüggést:

$$e_\tau = \sum_{k=1}^K w_k (c_1 + c_3 g_k^2 - \sigma_k)^2, \text{ ahol } g_k \text{ a harmonikusok diszkrét idejű körfrekvenciái,}$$

$w_k = \tau_k^2 \hat{\tau}_k^2$  a súlyozott együtthatók. Így  $c_1, c_3$  értékeire a fenti hiba minimális lesz.

Mivel kezdetben  $\hat{\tau}_k$  értékek nem ismertek, kiindulási értéként  $\tau_k$ -kal helyettesítendők ( $w_k = \hat{\tau}_k^4$ )

Az [1] forrás által közölt iterációs formula  $c_1, c_3$  értékekhez konvergál (minimum 2 lépés után):

$$c_3 = \frac{M(w_k)M(w_k \sigma_k \mathcal{G}_k^2) - M(w_k \sigma_k)M(w_k \mathcal{G}_k^2)}{M(w_k)M(w_k \mathcal{G}_k^4) - M^2(w_k \mathcal{G}_k^2)}$$

$$c_1 = \frac{M(w_k \sigma_k) - c_3 M(w_k \mathcal{G}_k^2)}{M(w_k)}$$

$$M(w_k) = \sum_{k=1}^K x_k$$

A kapott értékeket visszahelyettesítve a fenti  $a_{1,2} = \frac{-4c_3 - f_0 \pm \sqrt{8f_0 \cdot c_3 + f_0^2}}{4c_3}$  illet-

ve  $g = e^{-\frac{1}{f_0 \tau_0}}$  képletekbe, megkapjuk az egypólusú szűrő paramétereit.

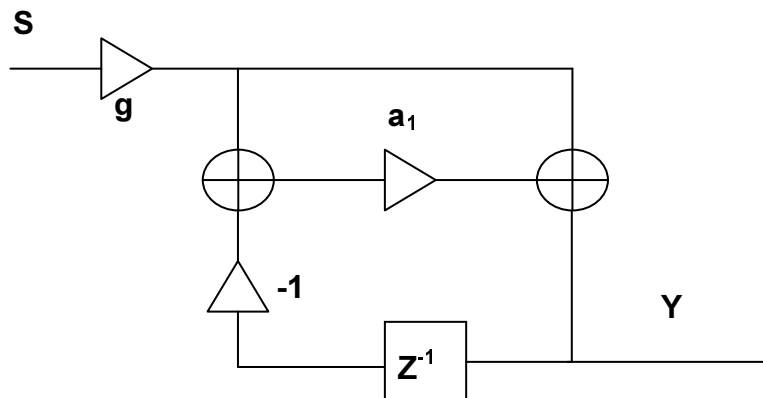
### Az egypólusú szűrő realizálása:

Az átviteli függvény rekurzív alakban:

$$\frac{Y}{S} = g \frac{1 + a_1}{1 + a_1 z^{-1}}, \text{ ebből } Y + a_1 Y \cdot z^{-1} = S \cdot g(1 + a_1)$$

Tovább rendezve:

$$Y = S \cdot g + a_1(S \cdot g - Y \cdot z^{-1})$$



15. ábra: az egypólusú szűrő megvalósítása jelfolyam hálózattal

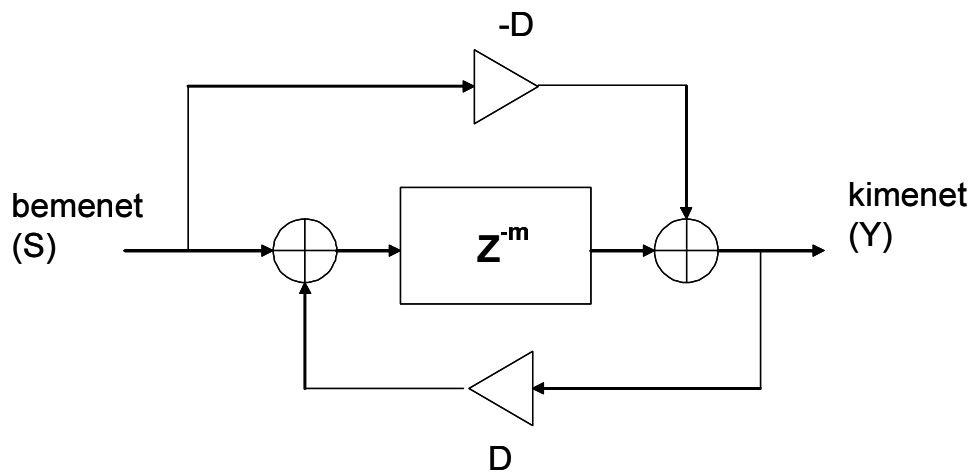
### 3.2 A törtrész szűrő paramétereinek beállítása

A törtrész átvitel (fractional delay filter) a waveguide 'finomhangolására' szolgál. A waveguide elemek ugyanis diszkréték, és emiatt a kialakuló rezonancia frekvencia nem állítható be egészen pontosan.

Legyen adott a mintavételi frekvencia  $f_s$ , és az alaphang frekvenciája:  $f_0$

Elméletileg az alappontok száma:  $N_{elm} = \frac{f_s}{2 \cdot f_0}$ , azonban ennek csak az egész részét vehetjük. Így rövidebb lesz a húr hossz, magasabban szól.

A megvalósításra ún. mindentáteresztő szűrőt használtam, amelyre az interneten a 'Digital Allpass Filter' kifejezést keresve bukkantam rá:



16. ábra: Mindentáteresztő késleltető szűrő blokkvázlata

A törtrész elemek kompenzálására szolgál egyrészt a késleltető vonal, másrészt a törtrész visszacsatolás.

Ha  $m=1$ , akkor egy késleltető elemet iktattunk be a waveguide-ba, így az alappontok száma tulajdonképp  $\frac{1}{2}$ -del növekszik. ( $M=2N \rightarrow$  ha  $M$  nőtt eggyel, így  $N$  0,5-tel növekedett)

A  $D$  érték még ennél is finomabb hangmagasság beállítást tesz lehetővé, a maradék hibát is kompenzálva, kis fázistolással (kis 'fázis rontással', ugyanis fázist nem teljesen lineárisan befolyásolja, ez a hangszint befolyásolja.)

A törtrész szűrő átviteli függvénye egyszerűen fölírható:

Lássuk be, hogy a késleltetővonal kimenete:

$$D \cdot Y \cdot z^{-m} + S \cdot z^{-m}$$

Így a kimenet:

$$Y = D \cdot Y \cdot z^{-m} + S \cdot z^{-m} - D \cdot S$$

$$Y(1 - D \cdot z^{-m}) = S(z^{-m} - D)$$

Ebből az átviteli függvény:

$$\frac{Y}{S} = \frac{z^{-m} - D}{1 - D \cdot z^{-m}} = z^{-m} \frac{1 - D \cdot z^m}{1 - D \cdot z^{-m}} = \frac{1 - D \cdot z^m}{z^m - D}$$

$z = e^{j\vartheta k}$  helyettesítéssel:

$$W(e^{j\vartheta k}) = \frac{1 - D \cdot e^{jm\vartheta k}}{e^{jm\vartheta k} - D}$$

Behelyettesítve az  $e^{jm\vartheta k} = \cos m\vartheta k + j \sin m\vartheta k$  összefüggést, majd beszorozva a nevező konjugáltjával, a számláló:

$$(1 - D \cos m\vartheta k - jD \sin m\vartheta k)(\cos m\vartheta k - D - j \sin m\vartheta k) = \\ -2D + \cos m\vartheta k + D^2 \cos m\vartheta k - j \sin m\vartheta k + jD^2 \sin m\vartheta k$$

$$\text{A fázis : } \frac{-\sin m\vartheta k + D^2 \sin m\vartheta k}{-2D + \cos m\vartheta k + D^2 \cos m\vartheta k}$$

Ha  $D=0$ , akkor a fázis:  $-m\vartheta k$ , így a húr hossza valóban  $\frac{m}{2}$ -vel növekedett.

Lineáris közelítést alkalmazva a fáziskarakterisztika meredekségének fele adja meg a húr hosszának növekedését, mivel  $\operatorname{tg} m\vartheta k \approx m\vartheta k$ .

Tehát a szinuszos és koszinuszos tagokat Taylor-soruk első tagjával közelítve a

$$\text{fázis: } \frac{-m\vartheta k + D^2 m\vartheta k}{-2D + 1 + D^2} = -m\vartheta k \frac{1 - D^2}{(D - 1)^2} = -m\vartheta k(1 + D), D \neq 1$$

Tehát lineárisan közelítve  $D$  valóban a törtrész maradékot kompenzálja ki.



### 3.3 Ötletek a hangszertest átviteli függvényének mérésére

Az átviteli függvény mérésére általánosan többféle módszer létezik. Az általam ismertek a következők:

1. fehér zajjal történő gerjesztés
2. impulzusválasz módszere
3. gauss zajjal vagy multiszinusszal történő gerjesztés

A gauss zajjal vagy multiszinusszal történő gerjesztés, noha számos előnye van, még nem került alkalmazásra. Az alábbi módszereket valószínűleg profi muzikusok tudják hatékonyan alkalmazni. Kizárólag hangszer szükséges hozzá, a mikrofonon és hangrögzítő berendezésen kívül. Viszont előnye ezeknek a módszereknek, hogy a vonórúd és a hegedűtest átvitelét együttesen le tudják mérni.

#### 1. A fehér zajjal történő gerjesztés hegedűs adaptációja:

Alapelv: az elosztott paraméterű hálózat egy szabályozási körként is felfogható. Jó közelítéssel igaz, hogy ha a gerjesztési pontot a körben áttesszük egy másik pontra, a rendszer nem változik meg lényegesen.

Tegyük a mérés során a gerjesztést a lábba, úgy hogy a vonószőr súrolja a lábat! A szőrszálak mennyisége és szerkezete miatt ez a gerjesztő jel ez esetben egy szűrt fehér zajnak tekinthető.

A probléma az, hogy az igen zajos jel mekkora részét, melyik részét használjuk fel, és nem lehet azt sem tudni előre, csak jó néhány próbálkozás után, hogy mennyire nyomjuk a szőrt a lábhoz. Felvétel előtt a hegedűsnek gyakorolni kell, hogy viszonylag jól szóljon. A pontos specifikációja problematikus, ezért végül nem használtam fel.

#### 2. Impulzusválasz módszere

Egyszerű eszközökkel eddig ez lett a legjobb közelítése a hegedű átviteli függvényének, de nagyon profinak kell lenni a hegedűsnek.

Alapelv: a hálózatelméletből jól ismert. Általában ilyen megfontolásból mérőkalapáccsal szokták mérni. A módszerem különbözik ettől.

Az impulzusválasz meghatározásához nagyon rövid, elméletileg 1 mintavételi időegység alatt történő gerjesztést kell előállítani. Minél hosszabb ugyanis az impulzus hossza, annál jobban érvényesül a sinc-es torzító hatás a spektrumban.

A hegedűs gyakorlatból ismert volt a számomra, hogy a meredeken felfutó amplitúdójú hangot a húr rugalmas visszapattanása segítségével lehet elérni. ('Íjhatás'.)

Minél jobban kitérítjük a húrt, annál nagyobb lesz a gyorsulás az elengedés pillanatában.

Mindezt a vonónyomás szabályozásával lehet megtenni, ugyanis kézzel való kitéréskor meghamisítjuk a mérést, mivel a kezünk ez esetben nagyon lomha mozgásúnak tekinthető.

A méréskor az impulzusválasznak azt a rövid szakaszát tekintjük, amikor a húr a kitérésből elengedve az egyensúlyi helyzet felé kezd el mozdulni, igen gyorsan, így a húr meglöki a hegedülábat egy impulzusszerű lökésel.

Erre a kis kitérésre a tapasztalat szerint a hangszer nagyon érzékenyen reagál. Ha nem így lenne, a hangszer sem szólalna meg.

Ez az impulzus igen rövid idejűnek becsülhető, sokkal rövidebb, mint a húr alapharmonikusának periódusideje, tehát az elméleti mintavételi időhöz jóval közelebb áll, mint a többi ismert kézi mechanikus gerjesztési mód.

A vonót annyira kell nyomás alatt tartani, hogy a húr ne tudjon berezegni, így egy nyöszörgő hangot ad. Mély húrokon ezt könnyebb eléni.

Ezt a hangot kell rögzíteni, kicsit hosszabb felvételt érdemes készíteni, nem fél másodperceseket. Így FFT-s átlagolással is pontosíthatjuk a kapott spektrumot.

A vonószőr csillapítása az impulzusválasz rövid ideje alatt jelentéktelen, azután a játékos technikájának köszönhetően nagymértékben megnő.

Az átlagolt spektrumot visszatranszformáljuk időtartományba, így egy impulzusválaszt kapunk. Ezt az impulzusválaszt konvolváljuk a szűrni kívánt adatokkal. Ha túl sok alappontot használunk, túl hosszú lesz az impulzusválasz, ezért túlságosan visszhangos lesz az eredmény.

## 4. Összefoglalás, kitekintés

### 4.1. A dolgozatban leírtak összefoglalása

Az **első fejezetben** a hegedűhang megszólaltatásával kapcsolatban kiderült, hogy a hangszerészek, zenészek és akusztikusok generációkon át tartó kutatására, fejlesztésre volt szükség ahhoz, hogy a ma ismert hegedűhang képzése megismerhető, reprodukálható legyen. A hangszeres zenélés perspektívájából szemlélve, betekintést nyerhettünk ezúttal a zene fejlődésének folyamatába is.

A **második fejezetben** az ún. fizikai modellezés segítségével történő hegedűhang szintézis matematikai, és fizikai alapjaival ismerkedtünk meg. Kiderült, hogy a hegedű hangszintézise az eddigi fizikai-matematikai modellek jóval alaposabb újragondolását igényli. A más hangszerek szintézisének működő struktúrákat ugyanis eddig még nem sikerült hathatósan beleintegrálni egy jól definiált vonós modellbe. A fő problémát az ún. vonóval való gerjesztés fizikai problémája okozta.

A tapasztalataim által kialakított új szemlélet bevezetése céljából kezdetben matematikai levezetéseket használva, szükség volt arra is, hogy újra megfogalmazzak már eddig is alkalmazott módszereket, ezáltal olyan általános összefüggésekbe helyeztem azokat, hogy képesek legyenek új feladatok megoldására is. Végül egy teljesen új fizikai modellt, új módszert és szemléletet sikerült bevezetni az elosztott paraméterű mechanikai rendszerek rezonanciájának vizsgálatára.

A **harmadik fejezetben** elsősorban a modell szintéziséhez szükséges digitális lineáris szűrők tervezéséhez, paramétereinek meghatározásához a tanszéken már ismert, meglévő módszereket reprodukáltam, és dokumentáltam matematikai levezetésekkel. Végül saját ötleten alapuló gyakorlati módszereket mutattam be a hangszerest átviteli függvényének kimérésére.

## **4.2 A hangzó zenei anyag ismertetése**

A mellékelt audió CD-n hallható szintetizált hegedűhang kiválasztásánál három szempont vezérelt.

Tesztelési célból lehetőleg a hegedű összes regiszterét megszólaltassam, minél több hangot. Ennek a feladatnak sikerült maximálisan eleget tenni, hiszen 3 oktávon keresztül az összes félhang felhasználásra került, több lefogási pozícióban.

A jelenlegi szintézer kétféle ún. vonásnemet tud: egy elemi szintű legato-t és egy barokk jellegű detaché-t. A zenei artikuláció így még nem olyan gazdag, hogy egyszerű dallamoknál, daloknál bonyolultabb, lassú tempójú, például barokk darabokat érdemes legyen megszólaltatni. Valamiféle lassú tempójú, egyszerű dallam vagy hangsor mellett egy virtuóz, gyors hegedűdarab vagy tétel az, ami zeneileg indokolt.

Zenész kíváncsiságomat is ki akartam elégíteni. Az a kérdés foglalkoztatott, hogy vajon az előadók mai túl gyors tempói elsősorban a zenére, a zeneműre, annak pszicho-akusztikai tartalmára jelentenek káros befolyást, vagy a túl gyors tempó inkább azért jelent problémát, mert a játékosok görcsös erőlködése akadályozza a műélvezetet, esetleg a tiszta intonáció gyors elérésének problémája a fő ok?

Az előbb feltett zeneesztétikai jellegű kérdés megválaszolása azért sem könnyű, mert még vannak a világon olyan virtuóz hegedűsök, akik sikerrel el tudják fedni fölünk előtt ezt a problémát...

A bemutató CD anyaga:

1. Egy, skálaszerű, lassú tempójú dallam
2. Néhány soros részlet egy gyors tempójú szólóhegedűre írt műből:  
J.S. Bach h-moll Partita - Presto (BWV 1002)

## **4.3 Az alkalmazás kiterjesztésének lehetőségei**

A fizikai hangszintézis tökéletesítésének kettős célja van.

- Egyrészt feltárja azokat az eddig még nem teljesen megértett bonyolult folyamatokat, amelyek a hangszer hangképzése folyamán létrejönnek. („Modellezés.”)
- Másrészt tökéletesítse azokat a paramétereket, amelyek segítségével a szintetizált hang 'megtévesztésig' hasonlíthat az eredeti hangszeres előadás hangjához. Ehhez azonban sokszor nagyon mély zenei és hangszertechnikai ismeretek is szükségesek.  
(„A hang utánzása” és „a kottakép előadásának hűsége.”)

### 4.3.1 További feladatok a hegedűhang szintézisében

Az előbb említett kettős cél számomra muzsikusi tapasztalataim bővülését is jelenti.

A hangképzés modellezésében fontos lehet:

- A gerjesztési modell jobb megismerése, kísérleti igazolása.
- Számos olyan kísérletileg megfigyelhető, de modellben nem szereplő jelenség van, amely befolyásolhatja a hang minőségét. Például kimutatható, hogy a nyereg reflexiója közelítőleg sem tökéletes.

A jelenlegi modell bővítését meghatározzák maguk a hegedűtechnikai elemek, játékmódok, előadási stílusok is. Például:

- A több húron való egyidejű játék fajtái: kettősfogások, akkordok, kettős trillák megvalósítása a modell továbbfejlesztésével.
- A különböző karakterű vonásnemek (detaché, legato, portato, staccato, stb.) kidolgozása, amelyek zenei korszakonként is változtak.  
Egy hangszer jellegzetes hangját nem csak a hangszín, hanem a felfutási, kintartási, lecsengési idők is meghatározzák. Ebben a modellben ezt a rendszerbe bevitt gerjesztés (a limitált súrlódó erő) burkolójával lehet meghatározni.
- egyéb effektusok: üveghangok, pizzicato, col legno, sul ponticello stb., fizikai modellezése.
- a zenei formálás, makro és mikroszinten: dinamika, súlyok, díszítések vezérlése.

### 4.3.1 Más hangszerek hangjának szintézise

A ma használt többi vonós hangszer is a hegedűcsalád tagja, tehát újabb paraméterekkel a modell változatlanul használható. Régebbi hangszertípusok esetén pl. viola d'amore, amelyeknek rezonánshúrjai is vannak, már gond lehet.

Túlzás nélkül állítható, hogy a vonósok az egyik legbonyolultabb módon megszólaló hangszerek. A hangszerek rezonanciájának feltérképezésében, modellezésében megismert fizikai és matematikai módszerek segíthetnek más hangszerek működésének könnyebb megértésében.

## ***Irodalomjegyzék***

- [1] Bank Balázs, "Physics-Based Sound Synthesis of the Piano", Master's thesis, Helsinki University of Technology, 2000
- [2] Boris Schwarz, "*Great Masters of the violin*", Robert Hale, London, 1984
- [3] Brockhaus-Riemann, "*Zenei lexikon*", Zeneműkiadó, Budapest, 1983-85
- [4] Dr. Granát János, „Hangszerek fizikája”, egyetemi jegyzet, BME, Budapest, 2003
- [5] Dr. Fodor György, „*Jelek, rendszerek és hálózatok*”, Műegyetemi Kiadó, 1998.
- [6] Halmy Ferenc – Zipernovszky Mária, „*Hubay Jenő*”, Zeneműkiadó, Budapest, 1976
- [7] Halmi Erzsébet, (szerk.) „Hegedű módszertan”, főiskolai jegyzet, Debreceni Konzervatórium, 1989
- [8] Ivan Galamian, „*A hegedűjáték és tanítás alapjai*”, Zeneműkiadó, Budapest, 1978
- [9] Julius O. Smith III: Physical Modeling using Digital Waveguides  
Computer Music Journal, special issue on Physical Modeling of Musical Instruments, Part I Volume 16, no. 4, pp. 74-91, Winter, 1992
- [10] Leopold Mozart, „*Hegedűiskola*”, Mágus Kiadó, Budapest, 1998
- [11] Neville H Fletcher, Thomas D. Rossing, „*The Physics of Musical Instruments*”, Springer-Verlag New York, 1998
- [12] Nikolaus Harnoncourt: „*A beszédszerű zene*”, Editio Musica, Budapest, 1989
- [13] Papp Sándor Róbert, „Jakob Dont hegedű etűdjei”, egyetemi szakdolgozat Debreceni Konzervatórium, 1999
- [14] B. Bank et al., „Signal-, and physics-based sound synthesis of musical instruments”, Periodica Polytechnica ser. el. eng. vol. 47, no. 3-4, pp. 269-295 (2004)
- [15] Dr. Sujbert László, „Beágyazott rendszerek laboratórium”, mérési útmutató, Budapesti Műszaki Egyetem, 2005
- [16] Rakos Miklós, „*Veszprémtől Szentpétervárig (Auer Lipót élete és művészete)*”, Veszprém, 1981
- [17] Ulrich Michels, „SH-atlasz, *Zene*”, Springer-Verlag Budapest, 1994

- [18] Dr. Szende Ottó, Nemessúri Mihály, „*A hegedűjáték élettani alapjai*”, Zeneműkiadó Vállalat, Budapest, 1965
- [19] Dr. Tarnóczy Tamás, „*Zenei akusztika*”, Zeneműkiadó, Budapest, 1982
- [20] Yehudi Menuhin, William Primrose, „*Violin and Viola*”, Kahn & Averill, London, 1991
- [21] Dr. Vadon Géza, „*Hangszerész (vonós) szakmai ismeret*”, Műszaki Könyvkiadó, 1997