



BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
VILLAMOSMÉRNÖKI ÉS INFORMATIKAI KAR
VILLAMOSMÉRNÖKI TUDOMÁNYOK DOKTORI ISKOLA

Új módszerek orgonasípok hangjának tervezéséhez

Ph.D. téziszfüzet

Rucz Péter
okl. villamosmérnök

Témavezető Augusztinovicz Fülöp, D.Sc.
Társ-témavezető Angster Judit, Dr. rer. nat.



Budapest, 2015.

1. Bevezetés

1.1. Dióhéjban az orgonakutatásról

Az orgonakutatás az orgonaépítéshez szükséges szaktudást igyekszik kiegészíteni új mérési, elméleti illetve szimulációs technikákkal. Annak ellenére, hogy sípos orgonákat már többszáz éve építenek és az orgonaépítés egy meglehetősen hagyománytisztelő mesterség, az orgonaépítők mindmáig keresik hangszereik tökéletesítésének módjait.

Az orgonaépítés eredetileg kézi gyártási folyamat, ami azt jelenti, hogy a sípok összeállítása, behangolása és intonálása mind kézzel végzett munka. Az orgonakutatásnak nem célja az orgonaépítők és -intonatőrök munkájának kiváltása, inkább a tervezési, építési és intonálási folyamatokat igyekszik hatékonyabbá tenni. Ezt a célt új, tudományos eredményekre alapozott – és legtöbbször számítógéppel támogatott – tervezési módszerek és technológiák fejlesztésével éri el.

Az új ipari és művészeti trendek is arra kényszerítik az orgonaépítőket, hogy új technikákat alkalmazzanak a sípok tervezésére. Az egyik legjelentősebb ipari jellegű kihívás az ólom alkalmazásának tiltása az Európai Unióban, hiszen ez a fémsípok egyik legfontosabb alapanyaga. Művészeti szempontból új igényt jelent például az egzotikus (afrikai és ázsiai) hangszerek hangszínének megszólaltatása az orgonasíppokkal. Új anyagok és sípkonstrukciók kutatása mindkét szempontból szükséges.

Fizikai szempontból nézve a sípok hangkeltési mechanizmusa – akár az *ajak*-, akár a *nyelvsípoké* – komplex folyamat, melyben akusztikai, mechanikai és áramlástanai jelenségek vesznek részt erős, nemlineáris csatlásban. A hangkeltés bonyolultsága magyarázatot ad arra a tényre, miszerint a fúvós hangszerek hangkeltése mindmáig aktív kutatási téma a zenei, számítógépes és aeroakusztika területén, sőt még az áramlástanban is. A XIX. századtól nagy számban jelentek meg a témához kapcsolódó tudományos publikációk, melyekben elméleteket illetve mérési és szimulációs eredményeket tettek közzé.

1.2. Motiváció és projektháttér

Az orgonaépítő mesterekkel folytatott párbeszéd rávilágított arra, hogy az orgonaépítésben alkalmazott jópár gyakorlati szabálynak nincsen tudományos megalapozottsága. A hagyományos ökölszabályok a legtöbb esetben elegendőek a tervezéshez, azonban néhány tervezési kérdésben

nincsenek általánosan elfogadott módszerek sem.

Az itt bemutatott kutatás célkitűzése kettős. Egyrészt, az orgonások méretezésének néhány konkrét kérdésére keres választ, új tervezési módszereket javasolva a hang karakterének jobb kézben tartása, illetve a jobb hangminőség elérése érdekében. Másrészt, a disszertáció célja az előbbi kérdések fizikai hátterének feltárása, mellyel lehetővé válik részletesebb akusztikai modellek megalkotása, illetve a hangkeltési mechanizmus jobb megértése. A disszertációban az analitikus és numerikus modellezés eszközeivel, illetve az eredmények mérésekkel való ellenőrzésével közelítjük meg mindkét kitűzött célt.

A disszertáció ipari hátterét az INNOSOUND és REEDDESIGN című, az Európai Unió által finanszírozott projektet jelentették. Az anyagi támogatás mellett ezek a projektek biztosítottak lehetőséget az európai orgonaépítő közösség vezetőivel való kommunikációra.

2. A vonatkozó szakirodalom áttekintése

2.1. Általános megközelítés

Az *aerofon* hangszerek a hangszer testébe zárt légoszlopban, más néven a *rezonátorban* oszcilláló nyomáshullámok útján keltenek hangot. Ahhoz, hogy tartott, állandósult állapotú hang keletkezzék, az oszcillációt a gerjesztési mechanizmusnak kell fenntartania. A gerjesztés a különböző típusú fúvós hangszerekben más-más módokon valósul meg.¹ Az orgonák ajaksípjaiban a hangot aeroakusztikai gerjesztés kelti, míg a nyelvcsippek esetében egy rezgő fémm nyelv – melyet gyakran nádnek is neveznek, – felel a hang megszólaltatásáért. A rezonátor szerepe mindkét síptípus esetében hasonló: ez adja az akusztikai visszacsatolást a gerjesztő mechanizmus számára; így a megszólaltatott hangmagasságot a két rezgő rendszer szinkronizációja határozza meg.² A szinkronizáció következtében a létrejövő hang periodikus a hangkeltés állandósult állapotában, feltéve, hogy a gerjesztés is állandó.

Az aerofon hangszerek modellezésének általános módja a csatolt rendszer két részre szeparálása: a gerjesztési mechanizmust általában egy nem-

¹S. Adachi. "Principles of sound production in wind instruments." In: *Acoustical Science and Technology* 25.6 (2004), pp. 400–405.

²M. Abel, S. Bergweiler, R. Gerhard-Multhaupt. "Synchronization of organ pipes: experimental observations and modeling." In: *Journal of the Acoustical Society of America* 119.4 (2006), pp. 2467–2475.

lineáris hálózat reprezentálja, míg a rezonátor legtöbbször lineáris rendszernek tekinthető. Utóbbi értelemszerű közelítés, mivel a hangszerek rezonátoraiiban a hangnyomásszint a lineáris akusztikai tortomány határain belül alakul. Ezt a modellezési eljárást sikerrel alkalmazta már Fletcher³ is, később pedig Verge és mtsai.⁴ fejlesztették tovább.

2.2. A rezonátor modellezése

Amellett, hogy döntő szerepe van az ajaksípok hangmagasságának meghatározásában, a rezonátornak szintén nagy hatása van a síp hangszínére. Ezt a hatást főként a síptest geometriája (hossza, átmérője, a különböző nyílások mérete és alakja stb.) határozza meg. Az orgonaépítésben *menzurálás*nak nevezzük azt az eljárást, melynek során az orgona összes sípjának méreteit meghatározzuk. Ez a procedúra ugyan művészeti célok megvalósítását szolgálja, az alábbiakban mégis összefoglaljuk a rezonátorok fizikai jellemzésének lehetőségeit.

Az orgonasípok sokféle alakkal rendelkezhetnek és számos módon alakíthatóak ki, a legtöbb síp rezonátora azonban hosszúkás és tengelyesen szimmetrikus. A zenei szempontból is releváns frekvenciatartomány a rezonátor *vágási frekvenciája* alatt van, ahol a légoszlopban kizárólag longitudinális módusok terjednek.⁵ Ezzel a korlátozással a síp akusztikai modellje jelentősen egyszerűsíthető, mivel a rezonátor egydimenziós rendszerként jellemezhető ebben a tartományban. Az akusztikai hullámvezető modell elosztott és koncentrált paraméterű elemekből épül fel, hasonlóan az elektromágneses terek elméletében alkalmazott távvezetékmodellhez.

Az egydimenziós akusztikai modell felhasználásával kiszámítható a rezonátor *bemeneti admittancia-* vagy *bemeneti impedanciafüggvénye*. Ez a függvény a frekvenciatartományban jellemzi a rezonátort, ugyanakkor, az inverz Fourier-transzformáció segítségével használható fúvós hangszerek időtartománybeli szimulációjához is.⁶

³N. H. Fletcher. "Sound production by organ flue pipes." In: *Journal of the Acoustical Society of America* 60 (1976), pp. 1119–1132.

⁴M. P. Verge, A. Hirschberg, R. Caussé. "Sound production in recorderlike instruments. II. A simulation model." In: *Journal of the Acoustical Society of America* 101.5 (1997), pp. 2925–2939.

⁵A. Miklós, J. Angster. "Properties of the sound of flue organ pipes." In: *Acustica-Acta Acustica* 86.4 (2000), pp. 611–622.

⁶S. Adachi, M. Sato. "Time-domain simulation of sound production in the brass instrument." In: *Journal of the Acoustical Society of America* 97.6 (1995), pp. 3850–3861.

A bemeneti admittancia- és impedanciafüggvényeket más szerzők is használták már fúvós hangszerek jellemzésére. Caussé és mtsai.⁷ sikeresen alkalmazták ezt a technikát rézfúvós hangszerek modellezésére. Kokkelmans és mtsai.⁸ a *csövesfuvola* típusú sípok akusztikai tulajdonságainak vizsgálatára használták az admittanciamodelt. Utóbbi szerzők állítása szerint a bemeneti admittanciafüggvény felhasználható a csövesfuvolák optimális méretezéséhez; ugyanakkor nem közöltek olyan algoritmust, mely ezt megvalósítaná. A csövesfuvolák méretezésének és tervezésének problémáját részletesebben tárgyaljuk a 4. szakaszban.

A bemeneti admittanciafüggvény alapján meghatározhatóak a rezonátor sajátfrekvenciái is. Az ajaksípok esetében a rezonátor a gerjesztő oldalon nyílt akusztikai rendszer, így a sajátfrekvenciák az admittanciafüggvény maximumhelyeivel esnek egybe.⁹ A rezonátor sajátfrekvenciái nem csak a hangmagasság meghatározásában játszanak szerepet, hanem jelentős hatásuk van a síp hangszínére is. Az utóbbi megállapítást magyarrázza, hogy abban az esetben, ha a rezonátor egy sajátfrekvenciája egybeesik valamelyik felharmonikussal, akkor az adott felharmonikust a rezonátor jelentős mértékben fel tudja erősíteni.

Az orgonasípok a hangteljesítmény túlnyomó részét a rezonátor nyílásain keresztül sugározzák le. Jóval kisebb szerep tulajdonítható a sípfal rezgései által lesugárzott hangenergiának, melynek csak igen vékony sípfalak esetében van jelentősebb szerepe.¹⁰ A nyílásokról történő hanglesugárzás a rezonátor távvezetékmodelljének nem illesztett impedanciákkal való lezárásaként is felfogható. Alacsony frekvenciák esetén ezeket a lezáró impedanciákat *hosszkorrekcióként* is értelmezhetjük.¹¹ A nyílások alakjának jelentős hatása lehet a síphang spektrumára,¹² ezért a modell pontosságát illetően kulcsfontosságú e nyílások megfelelő jellemzése.

Tetszőleges alakú nyílás *sugárzási impedanciája* nem számítható ki ana-

⁷R. Caussé, J. Kergomard, X. Lurton. "Input impedance of brass instruments – Comparison between experiment and numerical models." In: *Journal of the Acoustical Society of America* 75.1 (1984), pp. 241–254.

⁸S. J. J. M. F. Kokkelmans, M.-P. Verge, A. Hirschberg, A. P. J. Wijnands, R. L. M. Schoffelen. "Acoustic Behavior of Chimney Pipes." In: *Journal of the Acoustical Society of America* 105 (1999), pp. 546–551.

⁹P. M. Morse. *Vibration and sound*. Second edition. McGraw-Hill, 1948.

¹⁰C. J. Nederveen, J.-P. Dalmont. "Pitch and level changes in organ pipes due to wall resonances." In: *Journal of Sound and Vibration* 271 (2004), pp. 227–239.

¹¹N. H. Fletcher, T. D. Rossing. *The physics of musical instruments*. Springer, 1991.

¹²A. Miklós, J. Angster. "Sound radiation of open labial organ pipes; the effect of the size of the openings on the formant structure." In: *Proceedings of the International Symposium on Musical Acoustics*. Washington, 1998, pp. 267–272.

litikus módszerekkel. Ugyanakkor, egy nyílt térbe sugárzó, vékony falú hengeres cső sugárzása leírható analitikusan is Levine és Schwinger¹³ számításai alapján. Ingerslev és Frobenius¹⁴ pedig egy közelítő módszert javasoltak a *szájnnyílás* hosszkorrekciójának meghatározására ajaksípok esetében. Szabálytalan alakú nyílások esetén azonban az analitikus számításal kénytelenek vagyunk felhagyni, a numerikus közelítések alkalmazása elkerülhetetlenné válik.¹⁵

Annak érdekében, hogy a sípokat könnyen újra lehessen hangolni, a sípokat gyakran különböző *hangolóeszközökkel* látják el. Ajaksípok esetén az egyik leggyakrabban alkalmazott ilyen eszköz az úgynevezett *hangolónyílás*. Utóbbi egy szimmetrikusan kialakított ablak a síptesten, hasonlóan a fafúvós hangszerek *hanglyukaihoz*. A különböző hanglyukelrendezések vizsgálatával kapcsolatban már több publikáció is született; a szerző ismeretei szerint a legújabb formalizmust Dalmont és mtsai.¹⁶ közölték.

Újszerűnek számít a hullámvezetők szabálytalanságainak kezelésére az a technika, melyben az irregularitás kis környezetében 3D numerikus módszerrel számítjuk ki a hangteret, majd utófeldolgozással egy *helyettesítőképet* paraméterezünk fel, mellyel a diszkontinuitást helyettesítjük az egydimenziós modellben. Ezt a módszert fafúvós hangszerek hanglyukai vizsgálatára Lefebvre és Scavone javasolta elsőként.^{17,18}

A fafúvós hanglyukak és az orgonasípok hangolónyílásai közti geometriai különbségek miatt a hanglyukmodellek csak igen korlátozottan alkalmazhatóak hangolónyílások modellezésére. Továbbá, a hangolónyílásnak jelentős hatása van a síp hangszínére és -minőségére; ugyanak-

¹³H. Levine, J. Schwinger. "On the radiation of sound from an unflanged circular pipe." In: *Physical Review* 73.4 (1948), pp. 383–406.

¹⁴F. Ingerslev, W. Frobenius. "Some measurements of the end-corrections and acoustic spectra of cylindrical open flue organ pipes." In: *Transactions of the Danish Academy of Technical Sciences* 1.3 (1947), pp. 1–42.

¹⁵J.-P. Dalmont, C. J. Nederveen, N. Joly. "Radiation impedance of tubes with different flanges: numerical and experimental investigations." In: *Journal of Sound and Vibration* 244.3 (2001), pp. 505–534.

¹⁶J.-P. Dalmont, C. J. Nederveen, S. Dubos, V. Méserette, E. Slighte. "Experimental determination of the equivalent circuit of an open side hole: linear and non linear behaviour." In: *Acustica-Acta Acustica* 88.4 (2002), pp. 567–575.

¹⁷A. Lefebvre, G. P. Scavone. "Refinements to the model of a single woodwind instrument tonehole." In: *Proceedings of 20th International Symposium on Music Acoustics (Associated Meeting of the International Congress on Acoustics)*. Sydney and Katoomba, Australia, Aug. 2010.

¹⁸A. Lefebvre, G. P. Scavone. "Characterization of woodwind instrument toneholes with the finite element method." In: *Journal of the Acoustical Society of America* 131.4 (2012), pp. 3153–3163.

kor ezeket a hatásokat ezidáig nem dokumentálta a vonatkozó irodalom. A hangolónyílások modellezését részletesebben tárgyaljuk a 4. szakaszban.

Nyelvsípok esetében a rezonátor szerepe és a gerjesztési mechanizmussal való kölcsönhatása jelentősen különbözik az ajaksípokétól, ahogy azt Miklós és mtsai.¹⁹ megmutatták. A rezonátor és a gerjesztés közti csatolás erőssége széles skálán változik a különböző *regiszterek* esetében. Gyenge csatolásnál a rezonátor egyszerűen szűrőként viselkedik, melyet a bemeneti impedanciafüggvénye jellemez. Nyelvsípoknál a bemeneti impedancia gyakran magába foglalja egy nyitott, kúpos vég sugárzási impedanciáját, mely – a szerző legjobb tudomása szerint – analitikusan nem számítható. Ezzel a problémával szintén a 4. szakaszban foglalkozunk.

2.3. A gerjesztés modellezése

Az orgonaépítésben a gerjesztés jellemzőinek finomhangolását *intonálás*-nak nevezzük. Az intonatőrök minden egyes sípot lépésről lépésre állítanak be. Erre azért van szükség, mert a gerjesztésnek fontos szerepe van a síp megszólalásában, a hangszín illetve a *berezgés* kialakításában. Mivel a gerjesztési mechanizmus kulcsfontosságú a síp szimulációja szempontjából, a következőkben röviden összefoglaljuk a gerjesztés modellezésének módszereit.

Az ajaksípok *élhang* gerjesztését már számos kutató vizsgálta. Holger és mtsai.²⁰ az áramlási paraméterek és az élhang *módusainak* összefüggéseit elemezték. Verge és mtsai.²¹ a légnyelv és az élhang viselkedését vizsgálták és modellezték egy ajaksíp berezgése során. Nemrégiben Yoshikawa és mtsai.²² egy légnyelv-örvényréteg modellt publikáltak, melyet kísérleti eredményekkel támasztottak alá.

A kísérleti munka terén a szerző által ismert legújabb eredményeket

¹⁹A. Miklós, J. Angster, S. Pitsch, T. D. Rossing. "Interaction of reed and resonator by sound generation in a reed organ pipe." In: *Journal of the Acoustical Society of America* 119.5 (2006), pp. 3121–3129.

²⁰D. K. Holger, T. A. Wilson, G. S. Beavers. "Fluid mechanics of the edge tone." In: *Journal of the Acoustical Society of America* 62.5 (1977), pp. 1116–1128.

²¹M. P. Verge, B. Fabre, W. E. A. Mahu, A. Hirschberg, R. R. Hassel, A. P. J. Wijnands, J. J. Vries, C. J. Hogendoorn. "Jet formation and jet velocity fluctuations in a flue organ pipe." In: *Journal of the Acoustical Society of America* 95.2 (1994), pp. 1119–1132.

²²S. Yoshikawa, H. Tashiro, Y. Sakamoto. "Experimental examination of vortex-sound generation in an organ pipe: A proposal of jet vortex-layer formation model." In: *Journal of Sound and Vibration* 331 (2012), pp. 2558–2577.

Außerlechner és mtsai.²³ és érték el. Utóbbi szerzők egy precíziós síplábmodelllel végzett sebességprofil és élhang mérések adatait publikálták.

A rendelkezésre álló számítási kapacitás megnövekedtével lehetségessé vált a hangkeltési mechanizmus numerikus szimulációja. Kühnelt²⁴ egy egyszerűsített sípmodell 3D áramlásszimulációját mutatta be. Újabb eredményként Fischer és Abel²⁵ egy *fedett* ajaksíp kétdimenziós, összeomló *nagy örvény szimulációját* közölték.

A legújabb eredmények közé tartozik Vaik és Paál²⁶ cikke, melyben 2D légnyelv- és élhangszimulációk eredményeit mutatták be a fent említett, Außerlechner és mtsai. nevéhez fűződő síplábmodellben. Publikációjukban a különböző turbulenciamodellekkel számított szimulációs és mérési eredmények jó egyezéséről számoltak be. Ugyanakkor, a 2D modell korlátai miatt a 3D jelenségek nincsenek figyelembe véve ezekben a szimulációkban. A légnyelv- és élhangszimuláció 3D kiterjesztésének jelentőségével bővebben a 4. szakaszban foglalkozunk.

A nyelv sípok gerjesztési mechanizmusával jóval kevesebbet foglalkozik a szakirodalom. Miklós és mtsai.²⁷ pengetett és fúvással gerjesztett nyelvek rezgését vizsgálták, majd egy olyan modellt javasoltak, mely a nyelvrezgés számításában figyelembe veszi az akusztikai és aerodinamikai erőket. Azonban ezt a modellt kvantitatíve nem tudták ellenőrizni, mivel annak számos paraméterét nehézkes kísérleti úton meghatározni.

A szerző legjobb tudomása szerint ezidáig nem jelent meg a nyelv sípok hangkeltését vizsgáló, numerikus szimulációt bemutató tanulmány. Utóbbi természetesen igen bonyolult probléma, melyben akusztikai és áramlástan rendszer kapcsolódik a nyelvrezgéshez. Annak ellenére, hogy egy ilyen modell felállítása érdekes és nagy kihívást jelentő feladat volna, ez már nem képezi jelen értekezés tárgyát.

²³H. Außerlechner, T. Trommer, J. Angster, A. Miklós. "Experimental jet velocity and edge tone investigations on a foot model of an organ pipe." In: *Journal of the Acoustical Society of America* 126.2 (2009), pp. 878–886.

²⁴H. Kühnelt. "Simulating the sound generation in flutes and flue pipes with the Lattice-Boltzmann-Method." In: *Proceedings of the International Symposium on Musical Acoustics*. Nara, Japan, Mar. 2004, pp. 251–254.

²⁵J. Fischer, M. Abel. "Synchronization of nonlinear, acoustical oscillators." In: *DAGA2012 38. Jahrestagung für Akustik*. Ed. by H. Hanselka. Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V. (DEGA). Darmstadt, Germany, 2012, pp. 197–198.

²⁶I. Vaik, G. Paál. "Flow simulations in an organ pipe foot model." In: *Journal of the Acoustical Society of America* 133.2 (2013), pp. 1102–1110.

²⁷A. Miklós, J. Angster, S. Pitsch, T. D. Rossing. "Reed vibration in lingual organ pipes without the resonators." In: *Journal of the Acoustical Society of America* 113.2 (2003), pp. 1081–1091.

3. Módszertan

Ebben a szakaszban röviden összefoglaljuk a disszertációban alkalmazott módszereket. A részletesség igénye nélkül, csak az alkalmazott és kifejlesztett technikák leglényegesebb jellemzőit mutatjuk be.

A 2.1. szakaszban bemutatott általános modellezési elvet követve, az értekezésben tárgyalt módszerek alapját a hangkeltési mechanizmus szeparálása, vagyis a nemlineáris gerjesztés és a lineáris akusztikai rezonátor szétválasztása jelenti.

A disszertációban vizsgált rezonátorformák túlnyomó többsége hengeresen szimmetrikus. Ezekben az esetekben az egydimenziós akusztikai hullámvezetőmodellt alkalmaztuk a rezonátor bemeneti admittanciafüggvényének illetve a síp sajátfrekvenciáinak meghatározására.

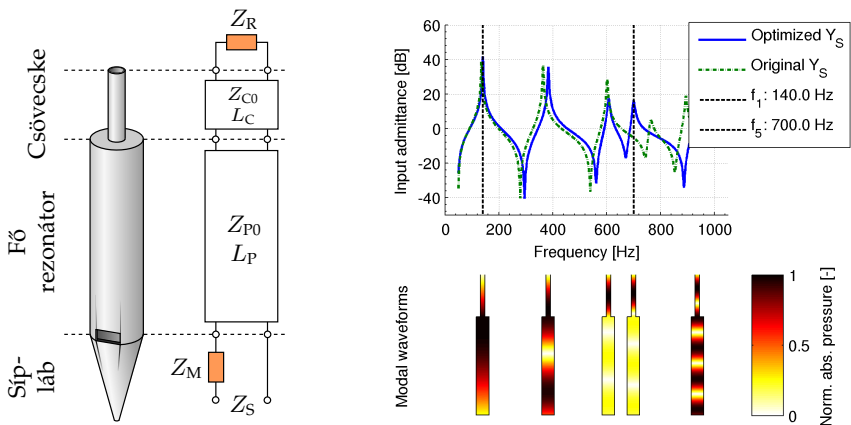
Az egydimenziós akusztikai modellt a rezonátorok menzurálásának optimalizálásához is felhasználtuk, például a csövesfuvolák esetében. Az új, a síphang tervezését lehetővé tevő méretezési eljárások kifejlesztéséhez szükséges volt heurisztikus és olyan általános optimalizációs technikákat is alkalmazni, mint például a Nelder – Mead módszer.²⁸

Szabálytalan elrendezések – mint például a hangolónyílások vagy a nyitott kúpos vég lesugárzása – modellezéséhez numerikus akusztikai eljárásokat, a véges- és peremelemmódszereket alkalmaztuk. A számítógépes modell méretének csökkentése valamint a szimulációk rugalmasságának növelése érdekében a szimulált hangtér utófeldolgozásának segítségével ekvivalens akusztikai paramétereket származtattunk. Így a meghatározott akusztikai helyettesítőképeket különböző egydimenziós modellekbe is lehetséges volt beilleszteni.

A sípláb áramlási képének és az élhangnak a számításához a Navier – Stokes egyenlet numerikus megoldására volt szükség. A több, mint egymillió szabadságfokkal rendelkező háromdimenziós áramlásmo-
dellek megoldása erősen párhuzamosított futtatásokat igényelt, amelyeket egy szuperszámítógép-hálózaton valósítottunk meg.

A modellezés eredményeinek ellenőrzése az értekezés egészét tekintve is a módszertan fontos lépése volt. Az analitikus és numerikus számítások végeredményeit az összes lehetséges esetben mérésekkel támasztottuk alá. Amikor különböző sípok hangminőségének összehasonlítása volt a célunk, tapasztalt intonatőrök segítségét kértük, akik részt vettek a meghallgatásos vizsgálatokban.

²⁸J. A. Nelder, R. Mead. "A simplex method for function minimalization." In: *The Computer Journal* 7 (1965), pp. 308–313.



1. ábra. Csövesfuvola modellje (balra) és az admittancia optimalizációja (jobbra)

4. Eredmények

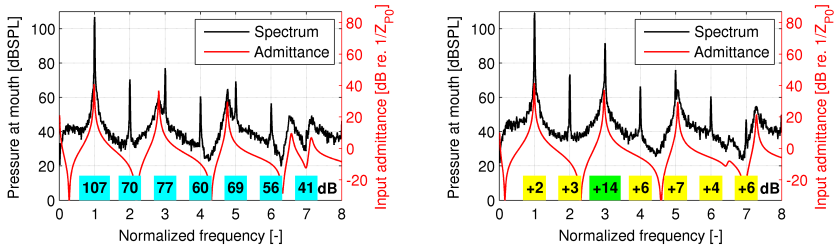
Ez a szakasz röviden összefoglalja a disszertációban elért legfontosabb eredményeket. Az eredmények mögötti tudományos újításokat tézisek formájában az 5. szakaszban közöljük, míg az alkalmazásukat röviden a 6. szakasz tárgyalja.

4.1. Csövesfuvolák hangjának tervezése

Egy csövesfuvola típusú síp vázlatát és egydimenziós akusztikai modelljét mutatja az 1. ábra. A síptest két fő részből áll: (1) a fő rezonátorból és (2) az úgynevezett csövecskéből. A csövecske egy részben nyitott, részben zárt lezárásként viselkedik a fő rezonátor szempontjából.

A csövesfuvola-konstrukció eredeti célja egy adott harmonikus részhang (tipikusan a harmadik vagy az ötödik) kiemelése a síphangban, így biztosítva egyedi, fényes hangszínt. Ugyanakkor, ahogy a következőkben látni fogjuk, a mostani tervezési szabályok nem érik el ezt a célt.

Ahhoz, hogy bizonyos felhangok leghatékonyabb erősítését érjük el, optimalizált menzurálási módszereket javasoltunk, melyek a síp egydimenziós hullámvezető modelljére épülnek (lásd az 1. ábrát). Az optimális menzurálási eljárások a következőket valósítják meg:



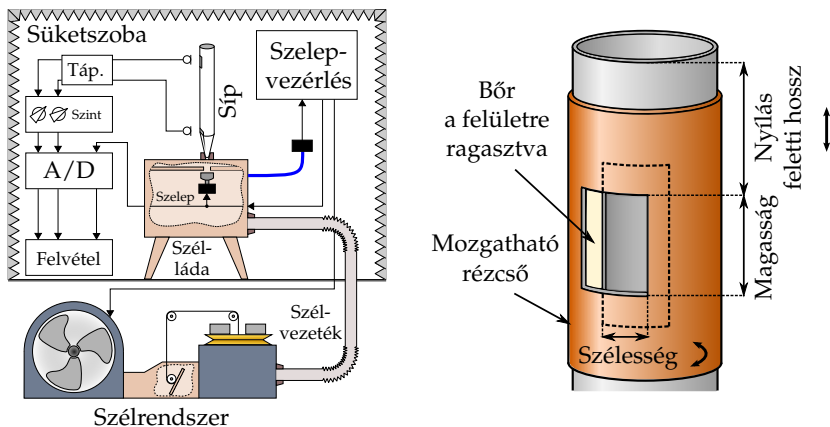
2. ábra. Csövesfuvola optimalizációja: eredeti síp (balra), optimális síp (jobbra)

- A síp hangmagasságát az első sajátfrekvencia hangolásával állítjuk be, míg a kiválasztott felharmonikusok felerősítését más sajátfrekvenciák mozgatásával érjük el, úgy, hogy e harmonikusok és sajátfrekvenciák egybeessenek, az 1. ábra jobb oldalán is látható módon.
- Az optimalizációs módszerek tervezési paraméterek különféle halmaival is képesek dolgozni. Az, hogy mely paraméter legyen rögzített illetve meghatározandó, tetszőlegesen megválasztható.

Az azzal járó nehézségek legyőzésére, hogy a sajátfrekvenciák összetett módon függenek a síp méreteitől, két stratégiát javasoltunk:

1. Egy heurisztikus, iteratív módszert dolgoztunk ki arra a speciális esetre, melynél a meghatározandó paraméterek a fő rezonátor és a csövecske hossza. A csövecske hosszát egy kezdeti becslült értékről indítva a javasolt algoritmus gyors konvergenciát mutat igen alacsony számításigény mellett.
2. Ha a meghatározandó paraméterek száma nagyobb, egy költségfüggvénnyel dolgozó, a simplex-módszerre alapozott technikát alkalmaztunk. A globális optimumot ekkor a bemeneti admittanciafüggvény iterációnkénti ismételt kiértékelésével érjük el, mely a heurisztikus módszernél jóval több számítási erőforrást igényel.

Az optimalizáció eredményét a 2. ábra mutatja. Látható, hogy a harmadik felharmonikus jelentősen felerősíthető a referenciasíphoz képest a javasolt tervezési módszer alkalmazásával. Az új optimalizációs eljárások hatékonyságát és alkalmazhatóságát meghallgatásos kísérletekkel is igazoltuk, az új tervezési módszer szerint megépített sípok felhasználásával és tapasztalt intonatőrök részvételével.



3. ábra. Síphangmérés összeállítása (balra), állítható hangolónyílás (jobbra)

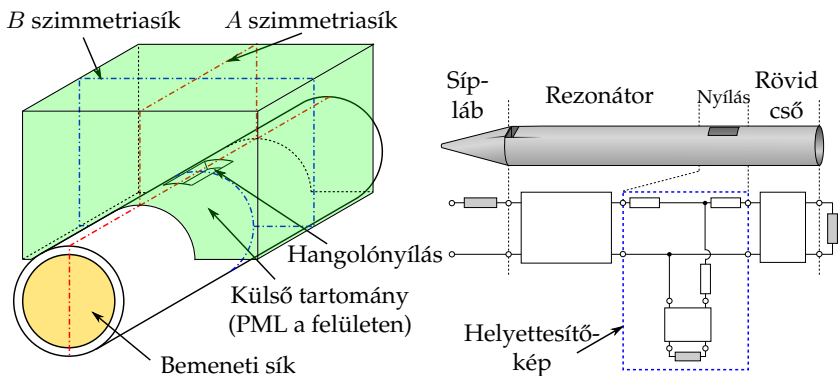
4.2. Hangolónyílás modellezése

A hangolónyílásokat leggyakrabban szűk menzúrájú sípokon, például *Szalicionál* vagy *Gamba* regiszterekben használják. Amellett, hogy megváltoztatja a hangmagasságot, a nyílásnak jelentős hatása van a hangszínre is. Orgonaépítők beszámolóí alapján kiderült, hogy nincs általánosan elfogadott módszer a hangolónyílás méretezésére. Az alkalmazott ökölszabályok pusztán a síp átmérője alapján határozzák meg a nyílás méreteit.

Annak érdekében, hogy meghatározzuk, hogyan hat a nyílás geometriája a síphangra, megismételhető méréseket végeztünk egy állítható hangolónyílással felszerelt kísérleti orgonasípon, amit a 3. ábra mutat.

A mérések bebizonyították, hogy a ma használt ökölszabályok nem biztosítják a hangszín megfelelő kézbentartását. Megmutattuk, hogy a hangolónyílásnak jelentős hatása van a rezonátor sajátfrekvencia-szerkezetére, utóbbi pedig közeli kapcsolatban van a síphang jellemzőivel. Továbbá azt találtuk, hogy a nyílás lehetőségeinek kiaknázása érdekében a nyílás geometriáját az elérni kívánt hangszínnek megfelelően, nem pedig pusztán az átmérőhöz viszonyítva kell megválasztani.

A mérésekben megfigyelt tendenciák előrejelzése és kvantitatív jellemzése érdekében szükséges volt a hangolónyílás pontos akusztikai modelljének felállítására. Ezért különböző nyílások számítógépes modelljeit hoztuk létre a végeselem módszer (FEM) és a *perfectly matched layer* (PML)



4. ábra. Hangolónyílás FE / PML modellje (balra) és helyettesítőképe (jobbra)

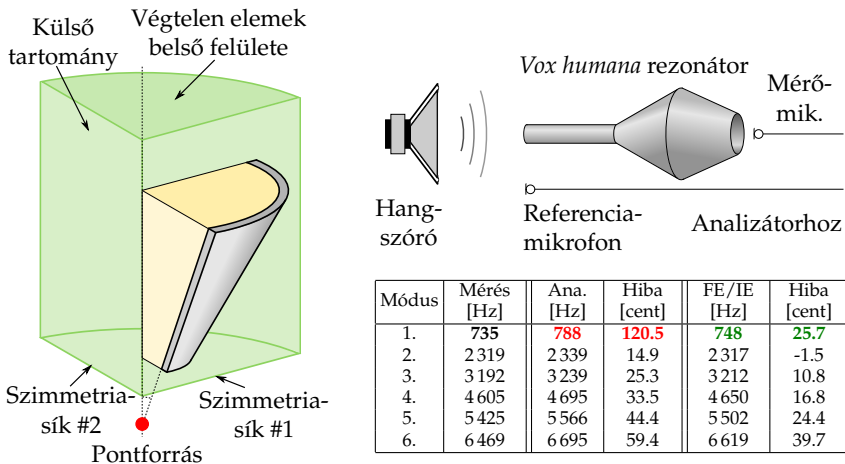
technika alkalmazásával, a 4. ábrán látható módon. Numerikus szimuláció és az eredmények utófeldolgozása útján kaptuk meg a modellezett nyílások akusztikai helyettesítőképeit.

A kiszámított helyettesítőképek egyszerűen alkalmazhatóak az egydimenziós akusztikai modellben, ahogy az a 4. ábra jobb oldalán látható. Az így létrejövő hibrid modell egyszerre biztosít rugalmasságot és alacsony számításigényt. Az eredményeket mérésekkel összehasonlítva megmutattuk, hogy a javasolt modell pontosabb eredményeket ad, mint korábbi hasonló hanglyukmodellek. Az új módszer felhasználható hangolónyílással ellátott sípok optimális méretezési eljárásainak fejlesztéséhez is.

4.3. Nyelvsíp-rezonátorok akusztikai modellje

A különböző regiszterekben a nyelvsípek rezonátorainak alakja igen változatos. Mindazonáltal, a leggyakrabban használt sípformák tengelyesen szimmetrikusak és egyenes illetve kúpos szakaszokból állnak. A nyelvsípkra – kiváltképp a gyenge mechanikai-akusztikai csatolásban működő típusokra – jellemző, hogy a rezonátornak sokkal inkább a hangszín alakításában van szerepe, mint a hangmagasságában.

Annak érdekében, hogy megismerjük a rezonátor hatását a létrejövő hang tulajdonságaira, meg kell határoznunk a rezonátor átviteli függvényét (vagy bemeneti impedanciafüggvényét). Ez sokszor magában foglalja egy kúpos nyitott vég sugárzási impedanciájának kiszámítását is. Mivel



5. ábra. Sugárzási impedancia modellje (balra) és a modell alkalmazása (jobbra)

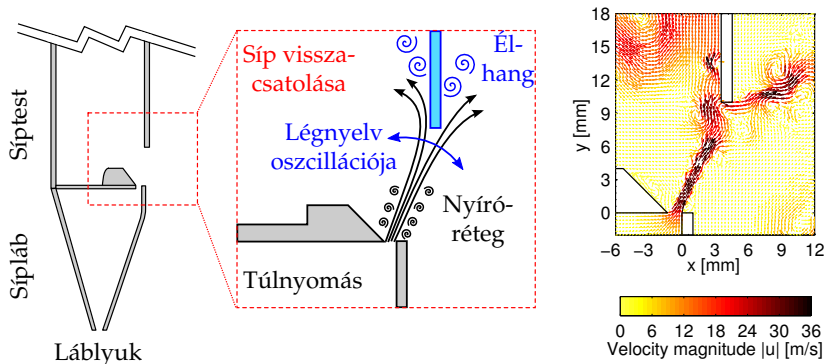
ez utóbbi számítás nem végezhető el analitikusan, a probléma numerikus megoldását javasoltuk.

Az 5. ábrán látható modell egy véges és végtelen elemekből álló elrendezés a kúpos vég sugárzási impedanciájának szimulációjához. A számítógépes futtatásokat különböző modelleken végeztük, változtatva a kúpszöveget. Hogy a számítási eredmények közvetlenül felhasználhatóak legyenek egydimenziós akusztikai modellben is, a kiértékelt sugárzási impedanciafüggvényeket egy skálázható adatbázisban tároltuk.

Az impedancia-modellt átviteli függvények mérésével validáltuk. Azt találtuk, hogy a sugárzási impedanciának nagy hatása van a számított bemeneti impedanciafüggvényre, különösen szűkülő végek esetében. Megmutattuk, hogy a javasolt új impedancia-modell pontosabb eredményeket ad ezekben az esetekben, ahogy azt az 5. ábra is mutatja.

4.4. Háromdimenziós élhangmodell

Az élhang keletkezését már korábban is vizsgálták más szerzők két-dimenziós numerikus áramlásszimulációval. Ugyanakkor, hogy megállapíthassuk e modellek minőségét, érdemes a 2D szimulációkat bonyolultabb, 3D modellekkel is összehasonlítani. Természetesen a szimuláció ki-terjesztése három dimenzióra a szabadságfokok számának jelentős megnövekedtével jár, ami nagyobb számításgényt is jelent.



6. ábra. Síplábmodell (balra) és az élhang szimulációja (jobbra)

A 6. ábra mutatja a síplábmodellt, illetve az élhang keletkezésének mechanizmusát. Ezt a síplábmodellt használtuk fel 2D és 3D hálók létrehozásához. A háromdimenziós szimulációkhoz több, mint egymillió szabadságfokra volt szükség, így ezeket az eseteket egy szuperszámítógépen futtattuk, akár 48 processzormag egyidejű kihasználásával. A számításokat lamináris és nagy örvény turbulenciamodellekkel végeztük el.

Két különböző elrendezést vizsgáltunk. A „Légnyelv” esetben csak a szabad légnyelvet modelleztük, a felső ajkat elhagyva a geometriából. Ebben az esetben a légnyelv sebesség- és turbulenciaprofiljait értékeltük ki. Az „Élháng” esetben a felső ajak már a modell részét képezte, és az erre ható erők spektrumát elemeztük.

Élháng- és áramlásmérésekkel összehasonlítva eredményeinket igazoltuk, hogy a javasolt 3D modell felülmúlja a korábbi 2D modelleket. A „Légnyelv” esetben a modell jobb illeszkedést ad a mért sebességprofilokra, míg az „Élháng” esetben pontosabban becsli az élháng tonális komponenseinek frekvenciáit.

5. Tézisek

I. Téziscsoport (Csövesfuvolák rezonátorának optimalizálása)

Új tervezési módszert javasoltam csövesfuvola típusú sípok hangszínének alakítására. A síp egydimenziós akusztikai modellje alapján optimalizációs eljárást származtattam a rezonátor méretezéséhez. A hagyományos tervezési módszerekkel szemben az általam javasolt technika lehetőséget ad a hangszín megtervezésére a menzúra felvételekor. Az új módszer alkalmazhatóságát objektív mérésekkel és szubjektív vizsgálatokkal igazoltam.

I.1. Tézis

Elméleti és kísérleti vizsgálatokkal megmutattam, hogy a csövesfuvolák méretezéséhez jelenleg alkalmazott tervezési szabályok szuboptimálisak, mivel nem teszik lehetővé a síp hangjának előretervezését a méretek megválasztásakor, illetve nem aknázzák ki a rezonátor által nyújtott lehetőségeket. [J2, C2, C3]

I.2. Tézis

Új módszereket javasoltam csövesfuvolák rezonátorainak optimális tervezésére. Két optimalizációs eljárást vezettem be a célparaméterek különböző halmazaihoz. A kiválasztott harmonikus részhangok felerősítését a rezonátor sajátfrekvenciáinak a sípgeometrián keresztül történő hangolásával értem el. A javasolt technika alkalmazhatóságát megépített sípok laboratóriumi méréseivel és a síphangok szubjektív kiértékelésével igazoltam. [J2, C5, C6, C8]

II. Téziscsoport (Hangolónyílások jellemzése és modellezése)

Elvégeztem egy mérésorozatot, mellyel pontosan meghatároztam a hangolónyílás hatását az orgonák ajaksípjainak akusztikai viselkedésére. Bebizonyítottam, hogy a hangolónyílással ellátott sípok jelenleg alkalmazott tervezési módszerei nem biztosítják a síphang jellemzőinek megfelelő kézben tartását. Új modellt fejlesztettem ki a hangolónyílások jellemzésére végeelem-szimuláció segítségével. Megmutattam, hogy a javasolt modell alkalmazásával optimális méretezési eljárás is kifejleszthető, mellyel legyőzhetőek a jelenlegi tervezési módszerek korlátai.

II.1. Tézis

Megállapítottam, hogy a hangolónyílással rendelkező sípok állandósult állapotú hangspektruma egyedi viselkedést mutat. Megismételhető mé-

rések segítségével meghatároztam és dokumentáltam az egyes tervezési paraméterek hatását a síphang jellemzőire. Bebizonyítottam, hogy a megfigyelhető tendenciákat a hangolónyílásnak a síp sajátfrekvencia-szerkezetére gyakorolt hatása magyarázza. [J3, C4, C7]

II.2. Tézis

Spektrális elemzéssel és felvett síphangok szubjektív kiértékelésével megmutattam, hogy a tervezésben jelenleg használt ökölszabályokkal a hangszín nem tartható a kellő mértékben kézben. Új méretezési megközelítést javasoltam, amely átértékeli a hangolónyílás és a síp paramétereinek kapcsolatát, valamint lehetőséget ad hangolónyílásos sípok hangszínének tervezésére. [J3]

II.3. Tézis

Új formalizmust javasoltam a hangolónyílások ekvivalens akusztikai paramétereinek számításához végeelem szimulációk eredményei alapján. Igazoltam, hogy az általam javasolt új technikával a sajátfrekvenciák pontosabb becslése érhető el, mint a hagyományos hanglyukmodellek orgona ajaksípok hangolónyílásaira történő alkalmazásával. [J4, C5–C7]

III. Téziscsoport (Modellezési módszerek továbbfejlesztése)

Új eredményeket értem el az ajak- illetve nyelvcsővezetékben lejátszódó akusztikai és áramlástan jelenségek szimulációja terén az egydimenziós hullámvezető, a háromdimenziós véges- és végtelenelem, valamint a véges térfogatok módszereinek felhasználásával.

III.1. Tézis (Nyelvcsővezeték rezonátorainak modellezése)

Új módszert mutattam be, amely az egydimenziós akusztikai modellt háromdimenziós véges- és végtelenelem szimulációkból számított sugárzási impedanciamodellel kombinálja. Megmutattam, hogy a szimulációs eredmények utófeldolgozása segítségével a módszer adaptívan alkalmazható hengerszimmetrikus rezonátorok hullámvezető típusú szimulációjára. Bebizonyítottam, hogy az általam javasolt technika azonos számítási igény mellett jobb becslést ad a sajátfrekvenciákra, mint a hagyományos módszerek. [C11, C15]

III.2. Tézis (Az élhang keletkezésének 3D szimulációja)

A korábbi kétdimenziós légnyelv és élhang áramlásszimulációkat kiterjesztettem három dimenzióra. Megmutattam, hogy ez a kiterjesztés, melyet más szerzők lényegtelennek tartanak, jelentős hatással van a szimu-

láció eredményeire. Szintén megmutattam, hogy az általam javasolt háromdimenziós modell jobb illeszkedést biztosít a mért adatokra, mind a szabad légnyelv, mind az élhang szimulációja esetén. [C13]

6. Alkalmazások

6.1. Orgonaépítők számára fejlesztett szoftverek

Az INNOSOUND és REEDDESIGN projektek keretein belül a 4. és 5. szakaszokban bemutatott eredményeket közvetlenül is felhasználtuk különböző programok fejlesztéséhez. Ezek a szoftverek felhasználói felületet biztosítanak ahhoz, hogy az új technikákat az orgonaépítés gyakorlatában is alkalmazni lehessen. Az alábbiakban röviden ismertetjük ezeket a programokat.

SoundAnalysis²⁹ Ezt a szoftvert orgonahang-elemzéshez fejlesztettük. Az implementáció olyan jelfeldolgozási algoritmusokat tartalmaz, melyet az orgonahang sajátosságaihoz illesztettünk. Ilyen például a berezés és lecsengés vizsgálata, vagy a burkolódetekció stb.

INNOScale³⁰ Komplex tervezőprogram, mely hangyománnyos és újszerű eljárásokat tartalmaz teljes regiszterek és művek menzurálásához. A kódba több új technikát is beépítettünk, mint például szűk fasípok tervezését vagy a csövesfuvolák optimalizációját. Utóbbit a 4.1. szakaszban ismertettük.

ReedResonatorSim³¹ Szimulációs eszköz nyelvsíprezonátorok tervezéséhez. Ez a program megkönnyíti a tengelyesen szimmetrikus rezonátorok és *csónakok* tervezését, valamint grafikus felületén közvetlenül összehasonlíthatóak a mérési és szimulációs eredmények. A program a 4.3. szakaszban bemutatott modellt tartalmazza.

6.2. MATLAB toolbox fejlesztése

A modellezési módszerek fejlesztése oda vezetett, hogy a csatolt véges- és peremelem (FE / BE), végtelen elem és *perfectly matched layer* technikákat

²⁹ © A. Miklós, S. Pitsch, P. Rucz, T. Trommer, 2010–2013.

³⁰ © J. Kirschmann, A. Miklós, S. Pitsch, P. Rucz, 2010–2012.

³¹ © P. Rucz, 2013.

– egyéb kiegészítő algoritmusok mellett – beépítettük a saját fejlesztésű, NiHu nevű BEM/FEM toolboxba. A toolbox elsődlegesen kutatási és oktatási célokat szolgál, ugyanakkor ipari méretű problémák megoldására is alkalmas.

Az utóbbi négy évben nyolc olyan – B.Sc. illetve M.Sc. – szakdolgozat vagy diplomavizsga született, melyet az Akusztikai és Stúdiótechnikai Laboratórium hallgatói a toolbox használatával vagy továbbfejlesztésével készítettek el. A toolboxot a [J5, C9, C12, C14] publikációkban közzétettük.

Köszönetnyilvánítás

Szeretném megköszönni témavezetőmnek, Augusztinovicz Fülöpnek az itt bemutatott kutatás irányítását. Szintén köszönöm Fiala Péter útmutatását és javaslatait.

Hálámot fejezem ki Angster Judit és Miklós András felé, akik amellet, hogy szívélyesen fogadtak az Épületfizikai Fraunhofer Intézet Zenei és Fotoakusztikai csoportjában, otthonukban is több alkalommal vendégül láttak.

Hálás vagyok az európai uniós projektekben részt vevő orgonaépítő partnerek jóindulatáért és bátorításáért.

Köszönettel tartozom az Európai Bizottság (#222104 és #286539 számú támogatási megállapodások) és a TÁMOP – 4.2.2.B-10/1–2010-0009 magyar kutatási projekt anyagi támogatásáért.

Szintén köszönettel tartozom a Nemzeti Információs Infrastruktúra Fejlesztési Intézetnek (NIIF), amiért hozzáférést biztosítottak szuperszámítógépeik erőforrásaihoz.

Szeretném megköszönni hallgatóim minőségi munkáját illetve részvételüket a modellezési eszköztár fejlesztésében.

Végül, de egyáltalán nem utolsósorban, hálás vagyok a családom és feleségem, Eszter támogatásáért és törődéséért, melyekben jelen munka készítése során mindvégig részem volt.

Publikációk

Folyóiratcikkek

- [J1] P. Rucz. "Determination of organ pipes' acoustic parameters by means of numerical techniques." In: *Akustikai Szemle, Acoustic Review* 10.3–4 (2010), pp. 39–47.
- [J2] P. Rucz, T. Trommer, J. Angster, A. Miklós, F. Augusztinovicz. "Sound design of chimney pipes by optimization of their resonators." In: *Journal of the Acoustical Society of America* 133.1 (2013). IF: 1.56, C: 1, pp. 529–537.
- [J3] P. Rucz, F. Augusztinovicz, J. Angster, T. Preukschat, A. Miklós. "Acoustic behavior of tuning slots of labial organ pipes." In: *Journal of the Acoustical Society of America* 135.5 (2014). IF: 1.56, pp. 3056–3065.
- [J4] P. Rucz, F. Augusztinovicz, J. Angster, T. Preukschat, A. Miklós. "A finite element model of the tuning slot of labial organ pipes." In: *Journal of the Acoustical Society of America* 137.3 (2015). IF: 1.56*, pp. 1226–1237.
- [J5] P. Fiala, P. Rucz. "NiHu: an open source C++ BEM library." In: *Advances in Engineering Software* 75 (2014). IF: 1.40, C: 1, pp. 101–112.

Konferenciatickek

- [C1] P. Rucz, F. Augusztinovicz, P. Fiala. "Simulation of organ pipes' acoustic behavior by means of various numerical techniques." In: *Proceedings of the 16th International Congress on Sound and Vibration*. Ed. by D. Bismor. Vol. 3. International Institute of Acoustics and Vibration. Kraków, Poland, July 2009, pp. 1742–1749.
- [C2] P. Rucz, J. Angster, F. Augusztinovicz, P. Fiala, A. Miklós, N. Manrique Ortiz. "Simulation of organ pipe transfer function by means of various numerical techniques." In: *Proceedings of ISMA2010: International Conference on Noise and Vibration Engineering including USD2010*. Ed. by P. Sas and B. Bergen. Paper ID. 335. Katholieke Universiteit Leuven. Leuven, Belgium, 2010, pp. 4673–4684.
- [C3] J. Angster, T. Preukschat, T. Trommer, P. Rucz, A. Miklós. "Experimentelle Untersuchung der Wirkung des Rohrs auf den Klang der Rohrflöte." In: *DAGA2012 38. Jahrestagung für Akustik*. Ed. by H. Hanselka. Paper ID. 447. Darmstadt, Germany, 2012, pp. 201–202.
- [C4] T. Preukschat, J. Angster, A. Miklós, P. Rucz. "Der Einfluss von Expressionen auf den Orgelpfeifenklang." In: *DAGA2012 38. Jahrestagung für Akustik*. Ed. by H. Hanselka. Paper ID. 448. Darmstadt, Germany, 2012, pp. 203–204.

- [C5] P. Rucz, F. Augusztinovicz, J. Angster, P. Fiala, T. Trommer, A. Miklós. "Optimization algorithms for the sound design of chimney and tuning slot organ pipes." In: *DAGA2012 38. Jahrestagung für Akustik*. Ed. by H. Hanselka. Paper ID. 457. D. Darmstadt, Germany, 2012, pp. 205–206.
- [C6] P. Rucz, J. Angster, F. Augusztinovicz, P. Fiala, A. Miklós, T. Trommer. "Optimization and simulation algorithms for the sound design of labial organ pipes." In: *ICSV19 19th International Congress on Sound and Vibration*. Ed. by D. Čiplys. Paper ID. 236. International Institute of Acoustics and Vibration. Vilnius, Lithuania, 2012, *–8.
- [C7] P. Rucz, J. Angster, P. Fiala, A. Miklós, B. Olteán, T. Preukschat. "Numerical simulation and optimization algorithms for the sound design of organ pipes with tuning slots." In: *Proceedings of the ISMA2012–USD2012 International Conference on Noise and Vibration Engineering*. Ed. by P. Sas, D. Moens, and S. Jonckheere. Paper ID. 487. Katholieke Universiteit Leuven. Leuven, Belgium, 2012, pp. 4215–4228.
- [C8] J. Angster, A. Miklós, P. Rucz, F. Augusztinovicz. "The physics and sound design of flue organ pipes." In: *Journal of the Acoustical Society of America* 132.3 (2012). Abstract of Paper 4pMU3., p. 2069.
- [C9] P. Fiala, P. Rucz. "FMBEM simulation of scattered wave fields excited by multiple moving sources." In: *Proceedings of the International Conference on Acoustics AIA-DAGA 2013*. Ed. by G. Brambilla and W. Kropp. Paper ID. 618. Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V. (DEGA). Merano, Italy, 2013, pp. 1209–1212.
- [C10] S. Pitsch, P. Rucz, J. Angster, A. Miklós, J. Kirschmann. "Scaling software for labial organ pipes." In: *Proceedings of the International Conference on Acoustics AIA-DAGA 2013*. Ed. by G. Brambilla and W. Kropp. Paper ID. 722. Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V. (DEGA). Merano, Italy, 2013, pp. 299–302.
- [C11] P. Rucz, J. Angster, F. Augusztinovicz, A. Miklós, T. Preukschat. "Modeling resonators of reed organ pipes." In: *Proceedings of the International Conference on Acoustics AIA-DAGA 2013*. Ed. by G. Brambilla and W. Kropp. Paper ID. 416. Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V. (DEGA). Merano, Italy, 2013, pp. 283–286.
- [C12] P. Fiala, P. Rucz. "NiHu: A BEM-FMBEM Matlab toolbox." In: *Proceedings of the Inter-Noise 2013 Congress on Noise Control Engineering*. Ed. by W. Talasch. Paper ID. 684. International Institute of Noise Control Engineering. Innsbruck, Austria, 2013, *–10.

- [C13] P. Rucz, J. Angster, F. Augusztinovicz, M. M. Lohász, A. Miklós. “Air jet and edge tone simulation in an organ pipe foot model.” In: *Proceedings of the Inter-Noise 2013 Congress on Noise Control Engineering*. Ed. by W. Talasch. Paper ID. 748. International Institute of Noise Control Engineering. Innsbruck, Austria, 2013, *-10.
- [C14] P. Fiala, P. Rucz. “Formulating various BEM problems with a generic C++ library.” In: *DAGA2014 40. Deutsche Jahrestagung für Akustik*. Ed. by B. Kollmeier. Paper ID. 368. Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V. (DEGA). Oldenburg, Germany, 2014, pp. 373–374.
- [C15] P. Rucz, T. Preukschat, J. Angster, F. Augusztinovicz, A. Miklós. “Simulation of the sound generation of lingual organ pipes.” In: *DAGA2014 40. Deutsche Jahrestagung für Akustik*. Ed. by B. Kollmeier. Paper ID. 308. Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V. (DEGA). Oldenburg, Germany, 2014, pp. 46–47.
- [C16] J. Angster, K. Dolde, P. Rucz, A. Miklós. “The influence of the shallot shape on the sound of Trompete reed pipes.” In: *Journal of the Acoustical Society of America* 135 (2014). Abstract of ASA meeting paper, p. 2244.

Egyéb publikációk

- [O1] P. Rucz, F. Augusztinovicz, P. Fiala. “Orgonasípok akusztikai paramétereinek meghatározása numerikus technikákkal.” In: *2009. évi Végzős Konferencia*. Ed. by Z. Heszberger. In Hungarian. Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem. Budapest, Magyarország, May 2009, *-4.
- [O2] J. Angster, K. Dolde, P. Rucz, A. Miklós. *Einfluss der Kehlenform auf den Klang der Trompeten-Zungenorgelpfeifen*. Oral presentation at the DAGA-2014 conference, Oldenburg, Germany, March 11th, 2014.