

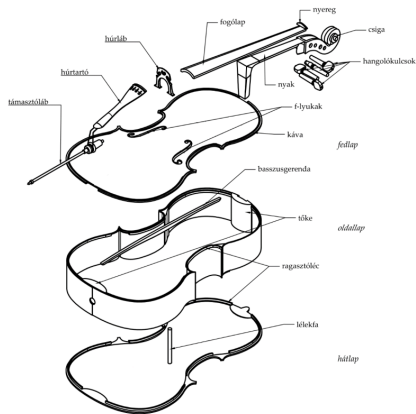
Hangszermodellezés: Alkalmazások, eredmények és kihívások

Fiala Péter, Rucz Péter

fiala@hit.bme.hu

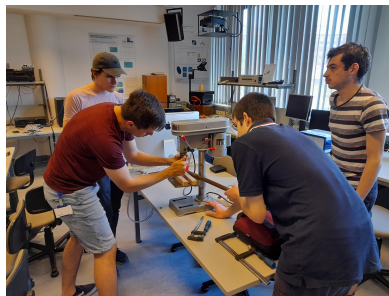
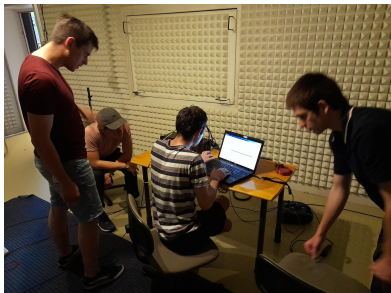


- Miért modellezzünk hangszereket?
- Csak. Mert érdekes.
- Megmagyarázzuk, hogy miért olyan, amilyen
- Fizikai alapú hangszintézis
- Virtuális prototípuskészítés



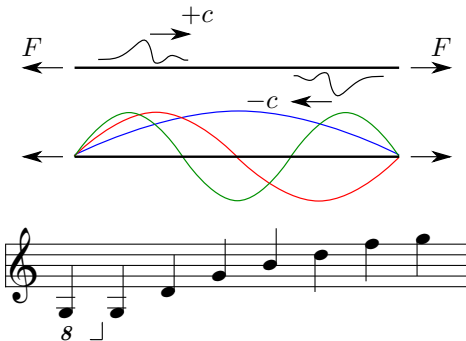
A hangszerek fizikája

- „A hangszerek fizikája” a BME-n
- Szabadon választható
- Modellezés, kísérletezés, mérés, szimuláció



- Húrmodellezés
 - Kalapács-húr- és húr-rezonáns-kölcsönhatás
- Membránmodellezés
 - Harmonikus membránok
- Rúdmodellezés
 - Harmonikus diszperz rudak
- Légoszlopmodellezés
 - Harmonikus kürtök

Húrmodellezés – fizikai alapok



■ Csillapítás forrásai:

- Súrlódás levegővel
- Belső veszteségek (deformáció)
- Húrlezárások

■ Ideális húr

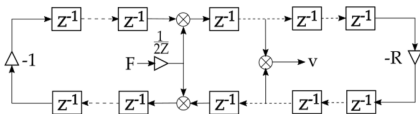
■ Hullámegyenlet: $u'' - \frac{1}{c^2}\ddot{u} = 0$

■ Terjedési sebesség: $c = \sqrt{\frac{F}{m}}$

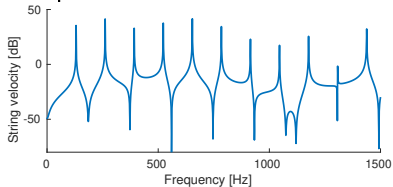
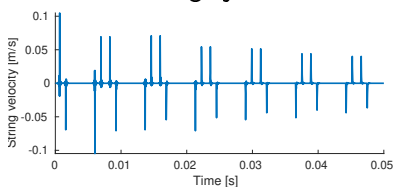
■ Szabadrezgések: $f_n = n \cdot \frac{c}{2L}$

■ Harmonikus felhangsor

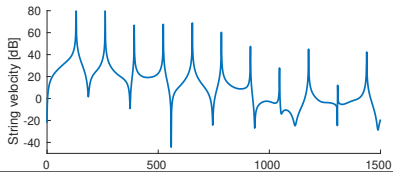
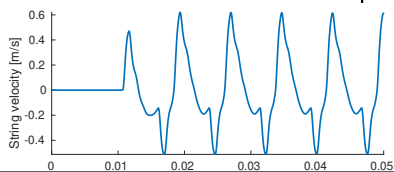
■ Waveguide-modellezés



Dirac-delta erőerjesztés ideális csillapított húron

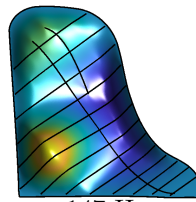
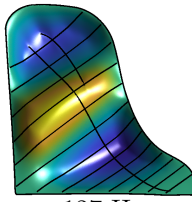
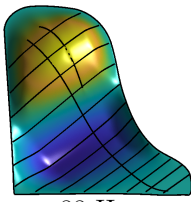
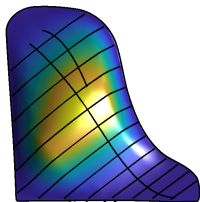


Nemlineáris hiszterézises kalapácsmodell





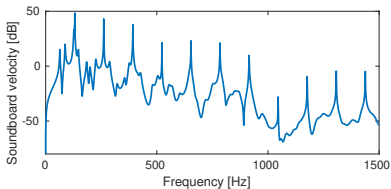
- Bordázott ortotróp falap szerepe
 - Hangesugárzás
 - Húrok közti csatolás
- Modellezés: FEM



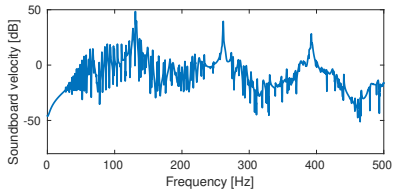
Húrmodellezés – Húr-rezonáns kölcsönhatás

Rezonáns rezgése

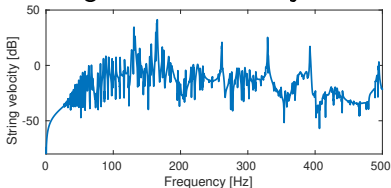
ha egy húr csatlakozik rá 



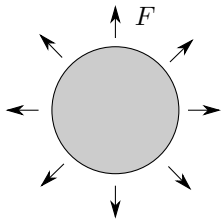
ha 88 húr csatlakozik rá 



E3 rezgése, ha C3-at ütjük 



Membránok – fizikai alapok



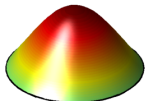
$$\blacksquare u'' - \frac{1}{c^2} \ddot{u} = 0$$

$$\blacksquare c = \sqrt{\frac{F}{m}}$$

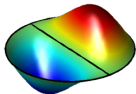
■ „2D húr”

■ Ideális körmembrán módusai és sajátfrekvenciái

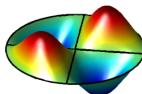
0.6276



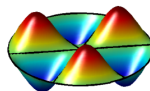
1.0000



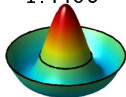
1.3403



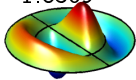
1.6651



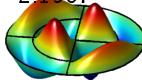
1.4406



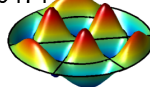
1.8309



2.1967



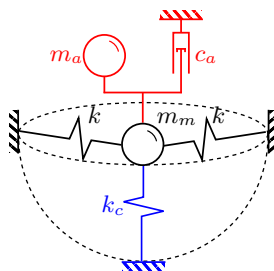
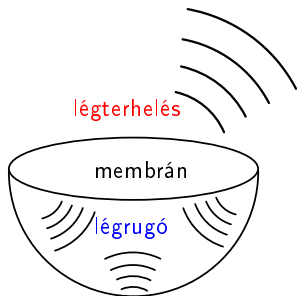
2.5474



Harmonikus membránok – A timpani

■ Timpanimódusok sajátfrekvenciái

ideális	1.00	1.34	1.67	1.98
mért	1.00	1.50	2.00	2.44



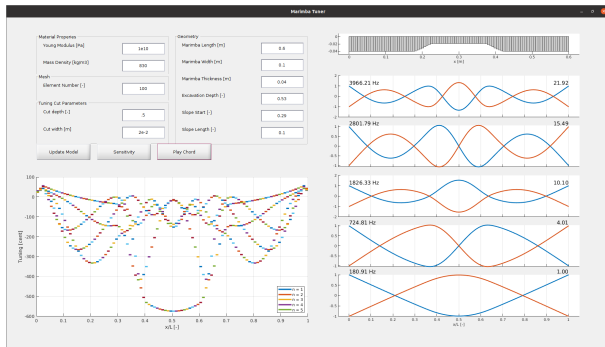
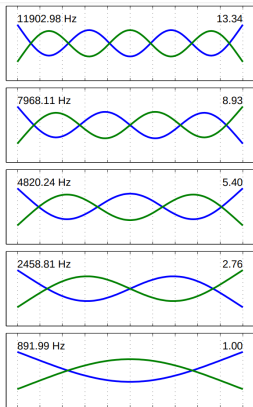
- Légterhelés modellje: $8R/3\pi$
- Bezárt levegő mint légrugó
- Ideális membránsűrűség levegőben: 0.276 kg/m^2

Rudak hajlító rezgése – fizikai alapok

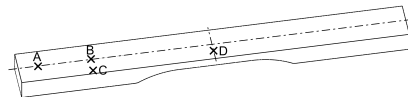
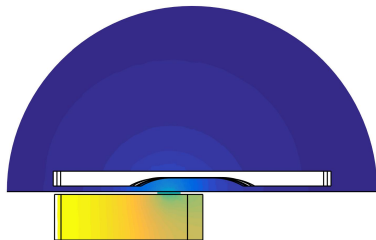
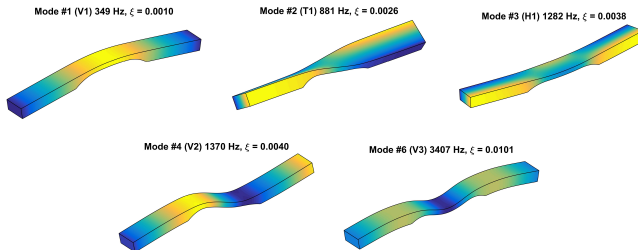
Hajlító rezgés vékony rudakban



- Hullámegyenlet: $u'''' + \frac{1}{c^2}\ddot{u} = 0$
- Diszperzió: $c \propto \sqrt{\omega}$
- Diszperzió: $f_n \propto n^2$



3D numerikus marimbamodellezés



■ rezonátorhangolás



■ pozíciók



■ erősség

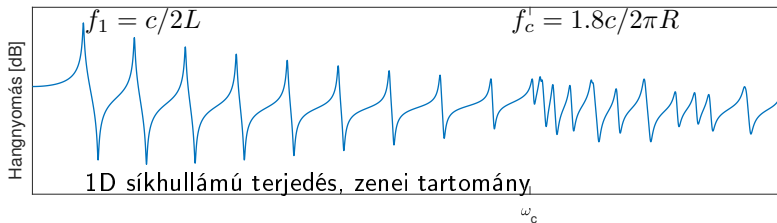


Fúvós gerjesztés - ajaksípok

- Ajaksípok gerjesztési mechanizmusa
- Élhang
- Légnyelv ütközik éles akadállyal
- Aerodinamikai dipól hangforrás



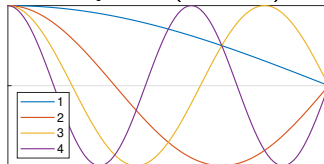
Hangoszlopok – fizikai alapok



nyitott - nyitott (fuvola)

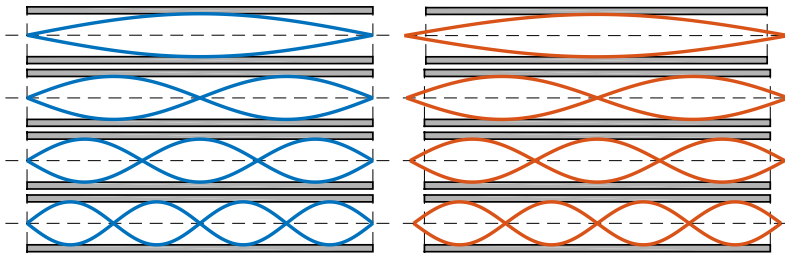
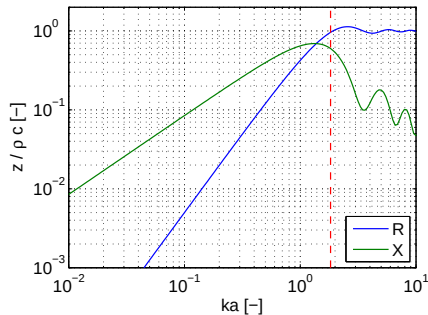


zárt - nyitott (klarinét)



Hosszkorrekció

- A nyitott csövek nem ideálisan nyitottak
- Levegő terhelő impedanciája
- Ekvivalens egy $\approx 8R/3\pi$ hosszú ideálisan nyitott csővéggel

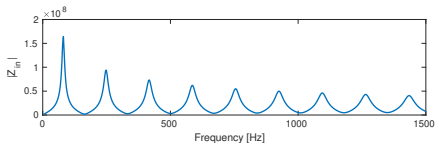
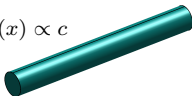




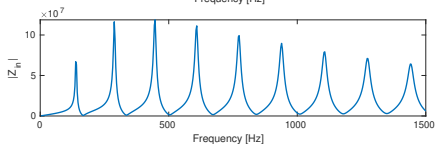
- Nádsíp: zárt-nyitott rezonátor
- Klarinét
 - Hengeres főfurat
 - Felhangsor: 1, 3, 5, 7, ...
 - Átfúvás: T8 + T5
 - 19 lefedendő hangmagasság az alapregiszterben
- Fagott, oboa, angolkürt, ...
 - Kúpos főfurat
 - Felhangsor: 1, 2, 3, 4, ...
 - Átfúvás: T8
 - 12 lefedendő hangmagasság az alapregiszterben
- A főfurat profilja jelentősen módosítja a modális viselkedést!

Kürtök – A keresztmetszetprofil hatása

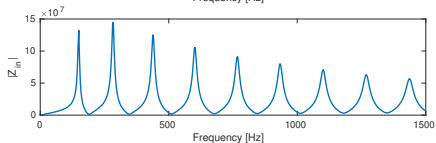
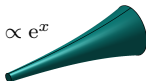
$$r(x) \propto c$$



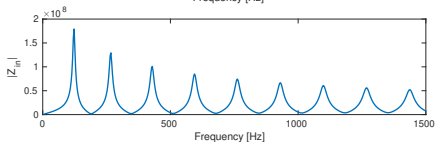
$$r(x) \propto x$$



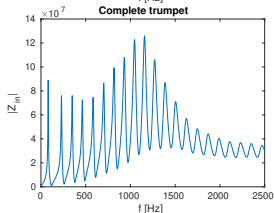
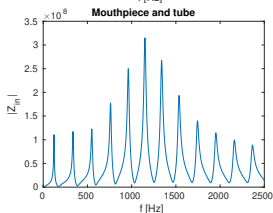
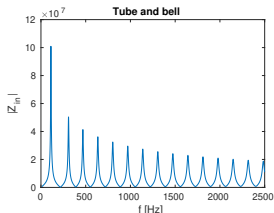
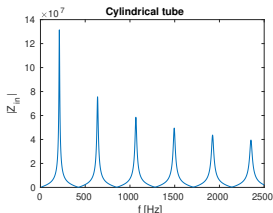
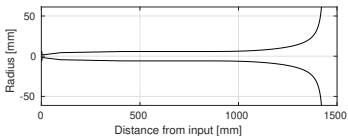
$$r(x) \propto e^x$$



$$r(x) \propto \cosh x$$



Kürtök - Trombita esettanulmány



- lineáris 
- nemlineáris 

- Összefoglalás
 - Szeretünk hangszereket szimulálni
- Köszönetnyilvánítás
 - Halász Dániel
 - Jenei-Kulcsár Dóra
 - Ulveczki Mihály
 - Szécsi Evelin