

CHLADNI-FÉLE PORÁBRÁK

Bevezetés

Az akusztika a fizikának olyan ágazata, mely mindennapjainkban is nagy jelentőséggel bír és különlegességeivel kápráztat el folyamatosan. Az emberiség mindig nagy érdeklődéssel fordul felé. Nekünk is nagyon megtetszett, ezért úgy döntöttünk, hogy dolgozatunk témáját ebből az ágazatból fogjuk kiválasztani.

Mikor az akusztika érdekessegeire gondoltunk, a Chladni-féle porábrák jutottak eszünkbe, hiszen oly sok híres tudós foglalkozott ezen ábrák létrejöttének elvével, a magyarázat mégis csak évtizedekkel később született meg.

Ernst Florens Friedrich Chladni 1787-ben tette közzé első munkáját. Édesapja jogásznak szánta fiát, de miután jogi diplomáját kézbe kapta, inkább a természettudomány felé hajlott. Vonzotta őt az akusztika, vagyis a hangtan. A német fizikus rugalmas lemezek rezgéseit tanulmányozta. Üveglemezre homokot szórt, majd hegedűvonóval hozta rezgésbe a lemezt, amelyen a lemez alakjától, a rögzítési ponttól, és a rezgés frekvenciájától függően különböző tetszetős alakzatok alakultak ki. Eredményeiről számos városban tett bemutatót. Uralkodói udvarokban is megfordult, például Napóleonnak nagyon megtetszettek a porábrák.



E:F:F:CHLADNI HANGÁBRÁKAT mutat be.

(Ceruzarajz 1800-ból)

Figurák, melyek - ha egy üveg Tábla rajta lévő
könnyű Főrennyel bizonyos Fogással bizo-
nyos helyen szarkos nyirettével meg huzaták - előállnak."

A Chladni-féle porábrák egyik alapfeltétele, hogy állóhullám jön létre. Ez az interferencia egyik sajátos esete, mikor a beeső és visszavert hullám egymásratevődik adott frekvenciákon. Egydimenziós állóhullámok kötélen vagy húron jönnek létre. Ilyenkor helyenként a kötel nem rezeg, ezeket a helyeket nevezzük csomópontoknak. Két szomszédos csomópont közötti szakasz felezőpontjában orsópont vagy duzzadóhely jön létre, hiszen itt a kötel maximális amplitudóval rezeg.

Két-, illetve háromdimenziós hullámok is eredményezhetnek állóhullámokat. Ilyenkor a csomópontok helyett csomóvonalak, illetve csomófelületek keletkeznek.

Chladni kísérletében kétdimenziós hullámok jönnek létre, mikor a lemez rezgésbe jön a duzzadóhelyekről ledobódik a por és a csomóvonalakon gyűl össze.

Szerettük volna modern felszereléssel mi is előállítani az alakzatokat, ezért saját módszerekkel biztosítottuk az ábrák létrejöttének feltételeit.

Kísérleti berendezés



1. berendezés

Használt eszközök:

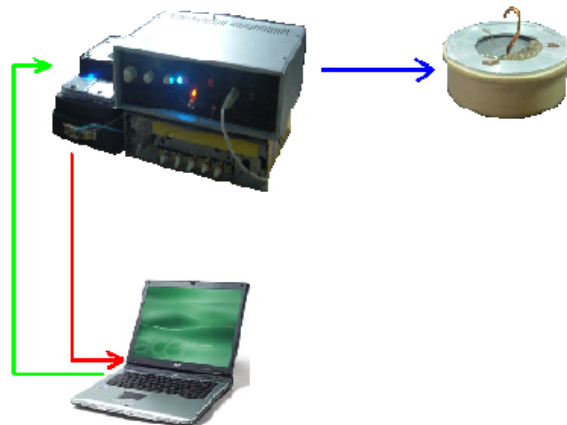
- üveglemezek
- fényképezőgép
- állvány
- vízmérték
- gríz (1. berendezés – kék kör)
- jelerősítő
- tápegység
- számítógép
- hangsugárzó
- munkafelület

Az üveglemezek méretei: 29,6 cm átmérőjű, 3 mm vastagságú kör alakú lemez; 26 cm oldalhosszúságú 2 mm vastagságú négyzet alakú lemez.

A kísérletek elvégzéséhez szükséges volt bizonyos alapfeltételeket biztosítanunk. Az alapfeltételek egyike a megfelelő vízszintezés. Az 1-es számú képen, piros színű körben, látható a vízszintezést segítő vízmérték.

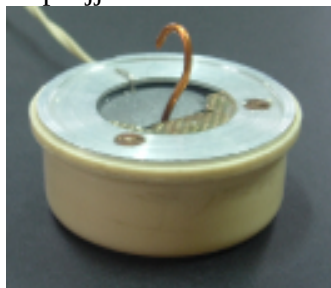
Szintén a képen látható, fából készült munkafelületen van elhelyezve a Chladni-féle ábrák kirajzolására szakosodott üveglemez és a rögzítését biztosító üvegállvány. A felső üveglemez felszínét fekete felülettel vontuk be. Ezzel az eljárással szemléletesebbé váltak az ábrák. A munkafelületre illesztett állvány és digitális fényképezőgép segítségével készültek el a fényképek.

Az ábrák elkészítéséhez egy számítógépes jelforrást, hanggenerátort használtunk. Az egyes szerkezeti elemek összecsatolását a 2-es számú ábra mutatja. A szakosodott program által generált jel a zöld színnel jelzett úton, áthaladván a jelerősítőn, eljut a hangsugárzóhoz. A hangszóró, kámpó segítségével közvetlenül fel van illesztve az üveglapra. Ezen kívül, a visszacsatolás felhasználásával információt is tudtunk visszaküldeni a számítógépbe. A jelerősítő egyben elosztóként, visszacsatolóként is működik, és ezáltal valósul meg az információ visszaküldése a számítógépbe.



2. illesztés

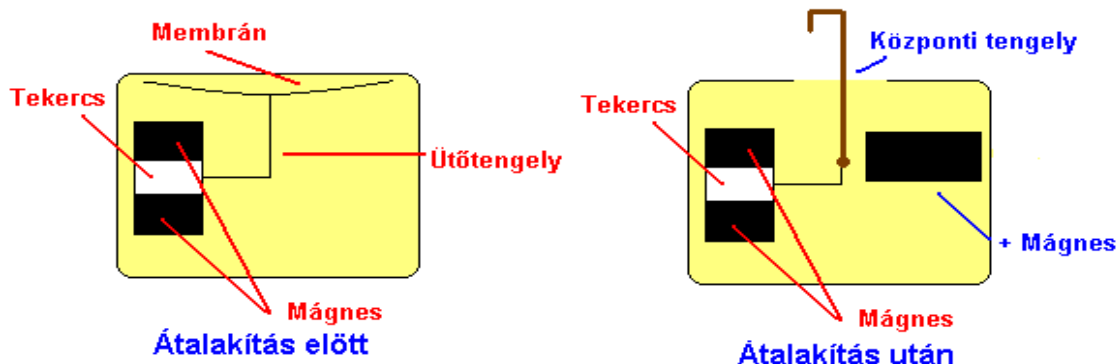
A jelerősítő jelenléte létfontosságú, hiszen a számítógép hangkártyájának a kivezetése pár mW-nyi terhelhetőséget enged meg, így a gerjesztést biztosító hangszóró számára szükséges egy nagyobb terhelhetőséget biztosító forrás. Az erősítőt csakis a Chladni-féle ábrák kirajzolására építettük meg. Az elektronikai felépítéséből kiemelendő az integrált áramkörös megoldás, amely nagy megbízhatóságot, minőséget biztosít. Arra törekedtünk, hogy a zajszennyezést a lehető legkisebb értékre csökkentsük. Itt nagy szerepet tulajdoníthatunk a jelerősítő felépítésének és a számítógépes vezérlésnek. Köztudott, hogy minden számítógép hangkártyája rendelkezik egy bizonyos fokú alapzajjal. Ennek a kiküszöbölésére passzív szűrőtekerccset építettünk be az erősítő



3. gerjesztő

házába. Nemcsak passzívan törekedtünk lecsökkenteni az alapzajt, hanem aktív megoldással is, azaz integrált áramkör segítségével. Egy TDA2004-es végfokot használtunk, amely egy 10W-os kimenőteljesítménnyel rendelkezik. Tápellátásáról egy általunk készült, nagy szűréssel rendelkező laboratóriumi tápegység gondoskodik. A külső befolyásolhatóság megszüntetésére árnyékolt huzalokat használtunk fel.

A gerjesztés előidézésére egy testreszabott hangsugárzót vettünk igénybe. Alkalmasnak tűnt egy régi telefonból kiemelni egyet, és ezt igényeinknek megfelelően átalakítani. A 3-as ábrán látható a gerjesztő, viszont ez



4. gerjesztő

Jel generálása

The screenshot shows the 'Generate Tones' dialog box in Cool Edit Pro 2.0. The 'Base Frequency' is set to 1651 Hz. The 'Frequency Components' section shows five sliders for harmonics 1 through 5, all set to 100%. The 'Flavor' dropdown is set to 'Sine'. The 'Presets' list includes 'A 440 (default)', 'Bell', 'Chord', and 'Out Of Control'. The 'General' section shows 'Flavor' set to 'Sine' and 'Change Rate' set to 0 Hz. The 'Preview' button is visible.

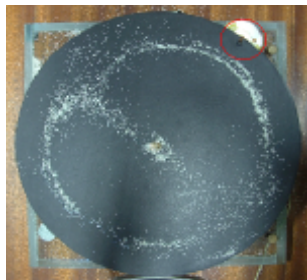
alkalmazott program neve: Cool Edit Pro. 2. Népszerűsége, a számítástechnikai folyóiratokban olvasott pozitív visszajelzések, szakemberek ajánlásainak hatására próbáltuk ki a programot. Grafikus felülete minden szükséges értéket, paramétert megjelenít, továbbá lehetővé teszi ezek módosítását, anélkül hogy meg kellene állítani a jel generálását.

Interaktív menürendszerének köszönhetően ki lehet választani egy frekvenciaértéket (5. Cool Edit – felső piros téglatest), sőt ennek az összetételét (5. Cool Edit – kék téglatest). Amint látni lehet, csak egy komponenst használtunk, ennek értékét maximálisra (100%) állítottuk, a többi komponens viszont inaktív funkcióban maradt (0%). Ezzel is hozzájárultunk a gerjesztő jel tisztaságának a megőrzéséhez.

A frekvenciatartomány kiválasztása mellett még a jel típusát is ki lehet választani: sinuszos, farkasfog, négyszögjel (5. Cool Edit – alsó piros téglatest). A menüben még találunk bizonyos effektusokat: harang, vonó, szabálytalan ritmus.

Kísérlet és ábrák kör alakú lemezzel

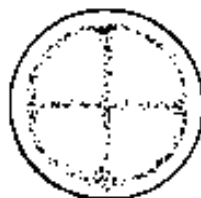
Kísérletünkben különböző alakzatú lemezeket használtunk. Az első kör alakú volt, a második négyzet alakú. Minden képen a gerjesztés helyét egy piros körrel jelezzük, itt duzzadóhelyeket találunk, ahol viszont összegyűlt az általunk használt gríz, ott csomóvonalak jöttek létre. Általában magasabb hangon, egyre több csomóvonal alakult ki.



Chladni 1



5. a. (364 Hz)

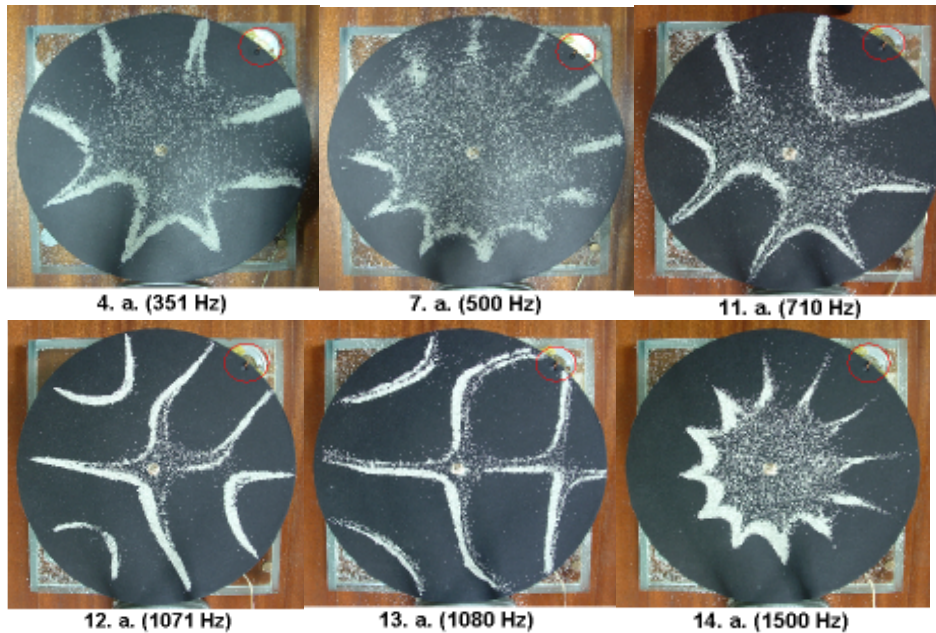


Chladni 2

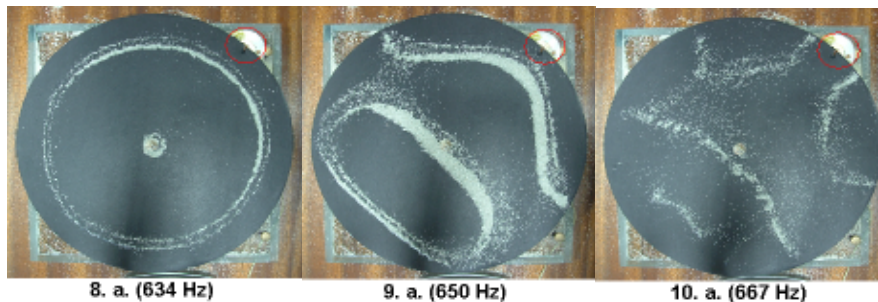
A kör alakú lemezzel kapcsolatosan érdekességeket figyelhettünk meg, már 200 Hz-en rezonanciát észleltünk, viszont a frekvencia növekedésével egyre kifejezőbbek az ábrák. A 3.a. ábrán jól kivehető, hogy egy diametrális és egy radiális vonal keletkezett. Próbáltuk követni a Chladni által felfedezett formákat, ugyanis városunk egyik könyvtárában megtaláltuk Chladni Akustik című könyvét, saját alakzataival, így hasonlóságokat észleltünk az ő és a mi ábráink között.

Az említett alakzatot megfigyeltük a Chladni 1 ábrán. A továbbiakban észleltük, hogy amikor még növeltük a frekvenciát 364 Hz-re, kialakult egy hasonló ábra (5.a.), csupán annyiban tért el az előzőtől, hogy két diametrális és egy radiális vonal képződött. Ezt az ábrát a Chladni 2 ábrában ismerhetjük fel.

Természetesen nem csupán olyan alakzatokat találtunk kísérletünk során, melynek van megfelelője a Chladni által talált ábrák között.



A 12.a. és 13.a. ábrák csupán 9 Hz frekvenciakülönbséggel alakultak ki, nagyon hasonlítanak mégis a második ábrán már látható, hogy változott a frekvencia, mert már közeledik a következő alakzathoz.



A 8.a. , 9.a. és 10.a. ábrák nagyon közeli frekvencián alakultak ki, mégis nagyon eltérnek egymástól. Ezért arra a következtetésre jutottunk, hogy az ábrák nagyon érzékenyek a frekvenciaváltozásra. Sokszor 1 Hz különbség rengeteget számított. A 8.a. ábra jellegzetessége, hogy 3 radiális csomóvonallal rendelkezik, viszont egy diametrális csomóvonala sincs. A 9.a. és a 10.a. ábrák között kis hasonlóságot is észlelünk, viszont az első zárul, míg a második nem. Az utóbbi már a következő alakzat kialakulásához közeledik.

Az ábrák matematikája

Az ábrák kialakulásának matematikája nagyon komplikált. A nehézségét az is bizonyíthatja, hogy mikor Napóleon, akinek nagyon megtetszett a kísérlet, díjat ajánlott a jelenség elméleti magyarázata cserébe, csupán egy hölgy, Sophie Germain jelentkezett pályázattal, viszont neki is csak harmadszorra sikerült. Differenciál egyenletet

alkalmazhatunk, mely jelenlegi tudásunkat meghaladja, ezért próbáltuk egyszerűbb módszerrel egy-két megállapítást tenni. Ilyen egyszerű eset az, amikor szélein rögzített a,b oldalhosszúságú téglalap alakú lemezt veszünk figyelembe. A hullámfüggvényben általában x,y,t nem különíthetők el külön tényezőkké, itt viszont igen.

Hullámfüggvény: **$u(x,y,t)=A\sin(k_x x)\sin(k_y y)\cos(\omega t)$**

Ez két különböző hullámfrontot ír le, az egyik Ox, a másik Oy mentén halad. A peremfeltétel, hogy a szélek rögzítettek. Emiatt

$k_x a = \pi n$ $n=1,2,3$ a: x menti hosszúság
 $k_y b = \pi m$ $m=1,2,3$ b: y menti hosszúság

$$u(x,y,t)=A\sin\left(\pi n \frac{x}{a}\right)\sin\left(\pi m \frac{y}{b}\right)\cos(\omega t)$$

$$|K|^2 = k_x^2 + k_y^2 \qquad \omega^2 = C^2 |K|^2$$

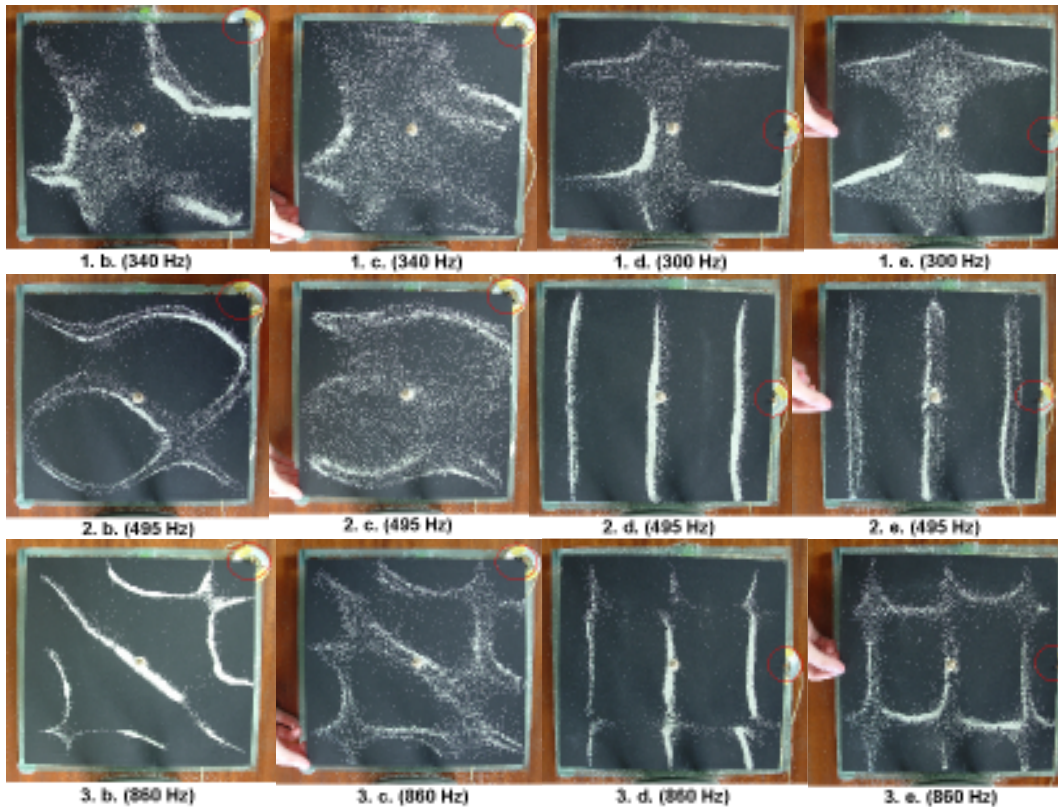
$$\omega^2 = \pi^2 C^2 \left[\left(\frac{n}{a}\right)^2 + \left(\frac{m}{b}\right)^2 \right] \qquad \omega = \pi C \sqrt{\left(\frac{n}{a}\right)^2 + \left(\frac{m}{b}\right)^2}$$

Ez a levezetés mindössze azért került ide, mert bizonyítja, hogy a frekvenciák nem egész számú többszörösei az alaphfrekvenciának, hanem az összefüggés közöttük sokkal bonyolultabb. Mi a negyszögletes lappal nem ilyen peremfeltételek mellett végeztük a kísérletet, viszont a frekvenciák sokfélesége minden alakzat esetén érvényes. Az ábrák alá írt frekvenciákból ez nagyon jól látszik is.

Kísérletek és ábrák négyzet alakú lemezzel

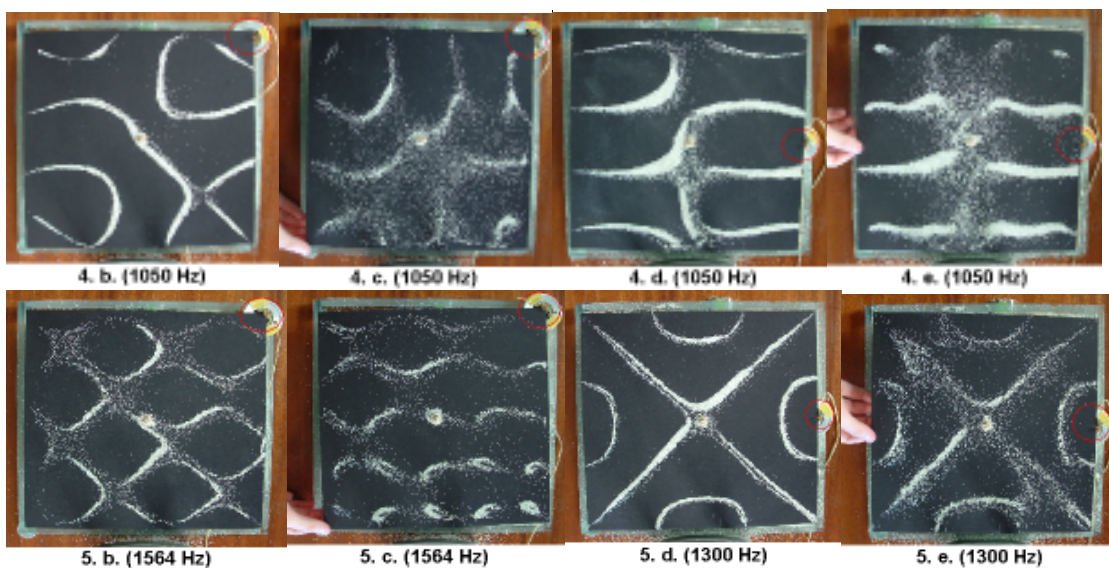
Ez az alak már más feltételeket biztosított, ezért más más alakzatok jöttek létre. A négyzet alakú lemezt eleinte a sarkainál gerjesztettük, majd később az egyik oldal közepénél. Mivel a gerjesztés helye ugyancsak az ábrák kialakulásának befolyásoló tényezője, ezért különböző alakzatokat figyelhettünk meg. Mindkét esetben megközelítőleg megegyező frekvencián rezonált a lemez, viszont azért eltéréseket is észleltünk.

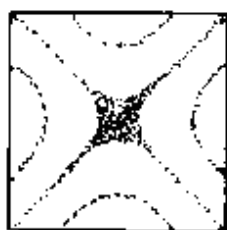
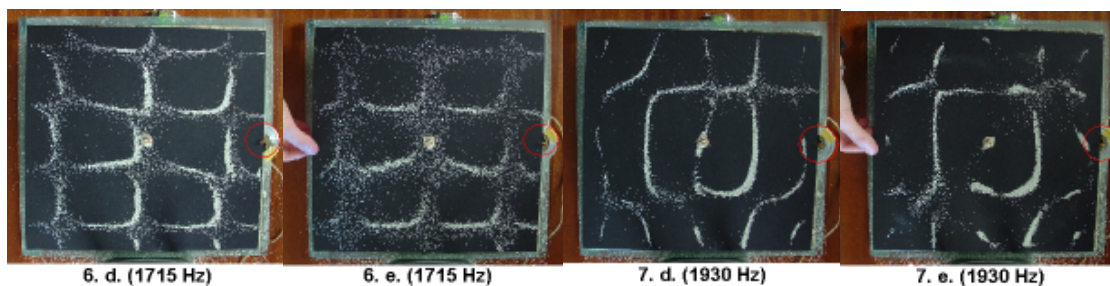
Megemlítendő, hogy mikor a gerjesztés helye a saroknál volt, akkor a rögzítés a szemben levő sarkán történt. Mikor pedig az oldal közepére helyeztük át, akkor természetesen a rögzítés helyét is változtattuk, a szemben levő oldal közepére helyeztük. Tapasztalatainkat fogjuk a következőkben bemutatni.



Amint az előző frekvenciákon a kísérletünk mutatta, azt állapíthatjuk meg, hogy azok az alakzatok, amelyeket lefoglunk (2.c., 2.e., 3.c. és 3.e.) nem annyira kifejezőek és kialakulásuk is több időt igényelt, viszont nagyon hasonlítanak azokhoz a formákhoz (2.b., 2.d., 3.b. és 3.d.), melyek kialakulása közben nem fogtuk a lemezt.

Érdekességnek számított, hogy a 2.e. ábra annyiban tért el 2.d. ábrától, hogy minden csomópont helyett duplavonal jelent meg.





Chladni 5

További érdekes ábrákkal találkoztunk kísérletünk során. A 4.b., 4.c., 4.d. és 4.e. ábrákkal kapcsolatosan megállapíthatjuk, hogy azonos frekvencián azok, amelyek rögzítve voltak, eltérnek azoktól, amelyek nem. Viszont a következő alakzatoknál (5.b.-5.c., 6.d.-6.e., 7.d.-7.e.) hasonlóságot észlelünk. Az 5.d. és 5.e. formák is megegyeznek és a jellegzetességük, hogy Chladninál is megtalálhatóak.

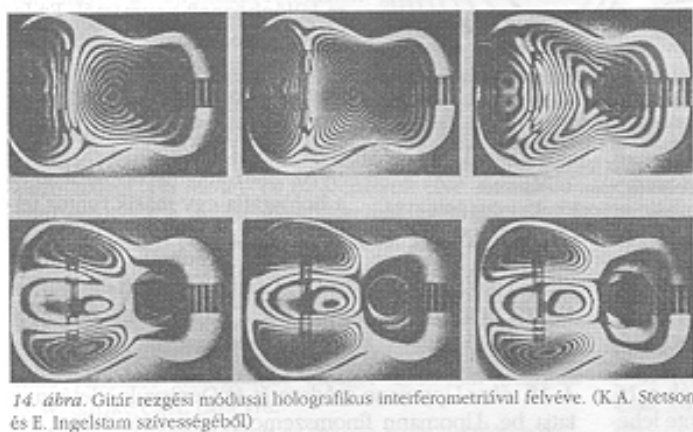
A porábrák és a hangszerkészítés

Kísérletezése előtt azonban Chladni arra az elhatározásra jutott, hogy új hangszert szeretne feltalálni, hiszen egy művész tágabb lehetőségekkel rendelkezik, mint egy helyhez kötött tudós. Végül az a gondolat merült fel benne, hogy nem lehetne-e a nedves ujjakkal dörzsölt üvegpálcák rezgéseit egy új hangszerben értékesíteni, ezért idejének nagy részét az ide vágó kísérletekkel töltötte. A hangszert 1790-ben tényleg elkészítette és euphon-nak nevezte. Természetesen később még számos javításnak vetette alá. Az új hangszerrel különféle városokba utazott s azt nyilvánosan bemutatta. Utazása rá nézve igen fontos volt, hiszen nemcsak alkalmá volt több kitűnő személyiséggel megismerkedni, hanem a nagyobb városokban levő akusztikai munkákat is tanulmányozhatta, ami által irodalmi ismeretei nagy mértékben gyarapodtak. Azonban utazásai közben önálló vizsgálatokat is tett s mindig azon volt, hogy újabb hangszereket találjon fel. Fő törekvése oda irányult, hogy olyan billentyűs hangszert állítson össze, mellyel a hangokat tetszés szerint nyújthassa és a billentyűk erősebb vagy gyengébb nyomása által a hang erősségét fokozhassa vagy csökkenthesse. A zongorák e tulajdonságok egyikével sem bírtak s az orgonáknál a hangokat csak nyújtani lehetett. Az új hangszer mechanizmusa fölött addig gondolkodott, míg azt feltalálta. A hangszer 1800. januárjában készült el s Chladni azt clavicylindernek nevezte, mivel a klaviatúra és egy forgó üveghenger voltak a legfontosabb eszközei. Visszatérve szülővárosába a clavicylinder javításával és Akkustik című művének kidolgozásával foglalkozott.

A Chladni-féle porábrák elmélete a hangszerkészítés terén is nagy sikerrel járt, hiszen a tökéletesen szóló hegedű titka is ebben rejlik. A hegedű elő- meg hátlapját, ha rezgésbe hozzuk, akkor adott frekvenciákon állóhullám jön létre, mely érdekes alakzatokat eredményez. Három módszert alkalmazhatunk az interferencia létrehozására.

Egyik az erőteljes hanghullám használata, melyet ráhangoltunk az adott frekvenciára, más felhasználás a hagyományos hegedűvonó, hiszen maga Chladni is ezt használta, végül pedig mehanikusan vagy elektromechanikusan is rezonciát hozhatunk létre a szükséges frekvencia megadásával. A hegedűlapokat az ábrák segítségével társítjuk, hiszen akkor készíthetünk tökéletes hangszereket, ha azonos frekvenciákon az ábrák azonosak.

Nagy hátránya a Chladni-féle eljárásnak, hogy csak teljesen sík, vízszintes lemezek vizsgálatára alkalmas. Márpedig a hangszerek többsége (pl. harang, cintányér) nem ilyen. A vibrációs holográfia segítségével viszont a hangszerek rezgési módusait minden más eddigi módszernél sokkal pontosabban lehet vizsgálni. Két koherens nyalábot használ, melyek egy nagy felbontású filmen interferálnak. A referenciasugár úthossza fix, a rezgő tárgyról visszaverődő tárgysugár úthossza viszont nyilvánvalóan változik. Az úthossz változását a lemez rezgésének mértéke határozza meg. A vizsgálatokhoz először egy üveglemezre hologramot készítenek a nem rezgő hangszerről, ezt előhívják, majd egy állványba helyezik úgy, hogy a hologramon lévő virtuális tárgy képe a valódi harangra essen. Ha ezután a hangszert megszólaltatják, a kép és a valódi tárgy között interferencia alakul ki. A kapott interferenciaképen jól látszanak a csomóvonalak.



14. ábra. Gitár rezgési módusai holografikus interferometriával felvéve. (K.A. Stetson és E. Ingelstam szíveségéből)

Kísérletezéseink során arra a következtetésre jutottunk, hogy a fizikának egyik ága sem áll valamely művészettel oly törvényszerű rokonságban, mint az akusztika a zenével, ezért is olyan különleges így felhívva magára minden kor emberének figyelmét.

Könyvészet:

1. Budó Ágoston, Pócza Jenő: Kísérleti fizika, Budapest 1970
2. Ernst Florens Friedrich Chladni: Akustik Leipzig, 1802
3. Tellmann Jenő: Fizika Tankönyv a XI. osztály számára
4. Derek Kverno, Jim Nolen: A Study of Vibrating Plates
www.phy.davidson.edu/StuHome/derekk/Chladni/pages/menu.htm
5. Dr. univ. Ráczkevi Béla: Nagy elmozdulások mérése interferometriával
http://dept.phy.bme.hu/phd/dissertations/raczkevi_disszertacio.pdf
6. Németh Ferenc: Teológia, egyháztörténet, természettudomány
<http://iratok.freeweb.hu/tudomany/czogler/CZOGLER.HTM>
7. Chladni patterns for violin plates
<http://www.phys.unsw.edu.au/jw/chladni.html>
8. Fizikai Szemle 2000/6 – Gábor Dénes: Holográfia, 1948-1971
<http://www.kfki.hu/fszemle/archivum/fsz0006/gdenes.html>

