

Violina II: Zvočna barva lesa

Violin II: tone color of wood

Avtor **Niko TORELLI**

izvleček/Abstract

V 20. stoletju smo priča velikemu napredku pri znanstvenem ovrednotenju in razvoju violine – najbolj razvitega in kompliciranega med vsemi godali. Velik izziv za znanstvenike je, kako s fizikalnimi meritvami karakterizirati razlike med posameznimi instrumenti. Situacija je dokaj zmedena: nekateri moderni goslarji trdijo, da izdelujejo violine, ki naj bi bile presenetljivo podobne celo samim stradivarkam. Predstavljen je uvod v fiziko violine in opisane so fizikalne metode za proučevanje tonske kvalitete violin.

The 20th century has witnessed a great increase in the scientific evaluation and development of the violin – the most highly developed and most sophisticated of all stringed instruments. The challenge for scientists is to characterize differences between individual instruments by physical measurements. The situation is rather confusing: some modern luthiers claim that they are producing violins that show an amazing similarity to those of Stradivarius himself. An introduction in the physics of the violin is presented and physical methods to examine tonal quality of violins described.

Ključne besede:

An instrument to tickle human ears by friction of a

horse's tail on the entrails of a cat.

(Ambrose Bierce o violini v *The Devil's Dictionary*, 1911.)

Resnično osupljivo je, kaj zmore odlična violina v rokah virtuozov. Za vzpodbudo k pisanju sem si »navil« odličen posnetek prelepih Sarasatejevih skladb *Romanza andaluza y jota navarra* in *Playera y zapateado* v izvedbi vrhunskega »kolaborativnega« pianista Samuela Sandersa in morda trenutno najboljšega violinista Itzhaka Perlmana s slavno stradivarko Soil, ki jo je odkupil od enako slavnega predhodnika Yehudija Menuhina (prim. Torelli 2005) ali pa isto skladbo v izvedbi izvrstnega Gila Shahama, prav tako s stradivarko Countess Polignac in ob spremljavi »brezdirigentskega« Orpheus Chamber Orchestra. še malo angleščine:

Holding a violin is like holding a young bird. It is vibrating under your touch and you must hold it without squeezing it ...

(Yehudi Menuhin, *Daily Mail*, 15. marec 1977)

Naj vam zaupam, da vselej pišem ob spremljavi dobre glasbe, baročne, klasične in romantične. Zato se še posebej rad spominjam svojega obiska v Pamploni, ne toliko zaradi znamenite pri-

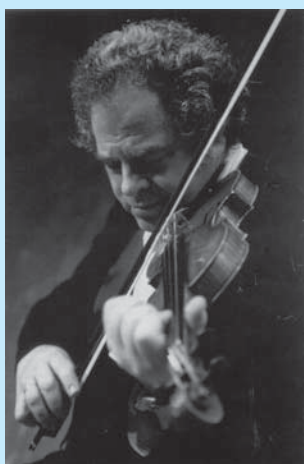
reditve - Fiesta de San Fermin, ko razjarjeni biki na poti v areno podijo pred seboj množico neustrašnih amaterskih matadorjev, kot zaradi druge fieste, ki poteka v čast velikemu Pamplončanu, virtuozu in komponistu Sarasateju (1844-1908). Naj omenim, da se je čudežni deček Pablo izpopolnjeval na pariškem konservatoriju pri Jeanu Alardu (po njem se imenuje morda najboljši »strad« Alard, o čemer sem prav tako pisal v prvem delu).

Bo že nekaj nebeškega v glasbi:

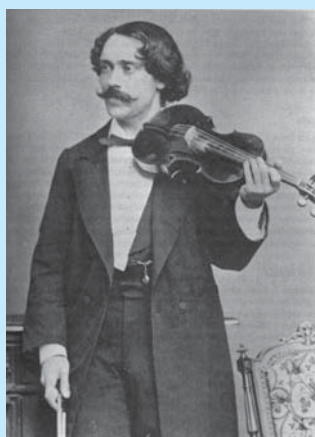
*Music, the greatest good that mortals know,
And all of heaven we have below.*

Joseph Addison v *Song for St Cecilia's Day*, 1694)

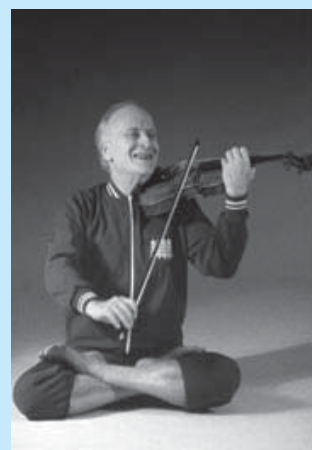
V prvem delu smo razglabljali o skrivnostih kremonk. Naj bi to bil les? Lloyd Burckle z univerze Columbia in Henry Grissino-Mayer (2003) z univerze Tennessee, kot tvorca »mini-ledenodobne« hipoteze, prisegata na vpliv dolgih zim in kratkih hladnih poletij na skromno in enakomerno priraščanje smrek v zdajšnjem Parco Naturale Paneveggio v vzhodnem delu Trientina. Vilim Demšar meni, da takšen les tudi brez »pomoči« ledenodobnega mraza še danes raste na Jelovici, kjer se je po trdnem prepričanju očeta Blaža, tudi znamenitega goslarja, bojda



□ Slika 1. Itzak Perlman s stradivarko Soil



□ Slika 2. Pablo de Sarasate, najverjetneje s stradivarko Boissier



□ Slika 3. Yehudi Menuhin

sam Stradivari oskrboval z »resonančno« smrekovino. Morda ... Bratje Hill (1963) iščejo odločilno skrivnost predvsem v laku (Hill et al. 1963), sam pa bi raje pritrdil Schellengu (1968), ki meni, da je skrivnost v ne dovolj znanim lesu in predvsem v prilagoditvi mer in konstrukcije violine lastnostim lesa. V to smer vztrajno išče tudi profesor Demšar. Slišal sem izboren zvok njegove replike Guarnerijevega Cannone-ja, kjer je očitno ali bolje »slišno« zelo uspešno uporabil svojo računalniško podprto metodo uravnovešanja mas in z njo togosti v violinskem trupu.

Violina

Fizika »proizvajanja« zvoka pri godalih je zelo komplicirana in še ne povsem razumljena.

Violina se v akustičnem smislu sestoji iz dveh delov: (1) votlega resonatorja - violinskega trupa/korpusa in (2) vzbujevalnika nihanja - strun G:196 Hz, D: 294 Hz, A: 440 Hz, E: 660 Hz (g, d¹, a¹, e²) s spremljajočimi deli, ki so potrebni za njihovo pritrditev. Trup violine sestoji iz pokrova iz tonske/resonančne smrekovine ter dna in oboda iz javorovine z izrazito rebrasto teksturo, ki naj bi imela predvsem dekorativen značaj.

Kobilica (it. *ponticello*, angl. *bridge*, nem. *Steg*, fr. *chevalet*) iz »ravne (gladke)« javorovine pretvarja prečna nihanja v navpična nihanja pravokotno na pokrov. Iz praktičnih razlogov violinist poteza lok prečno. Žal se trup najmanj odziva na sile, ki delujejo v tej smeri, in najbolj na sile, ki delujejo pravokotno na pokrov. Praktično edina izdelovalca grobih kobilic sta stara francoska firma Jeandel-Aubert iz Mirecourta in Despiau - prim. Klopčič, 1996. Duša (it. *anima*, angl. *sound post*, nem. *Stimmstock*, fr. *âme*) imobilizira pokrov neposredno poleg desne nožice kobilice tako, da desna nožica miruje, medtem ko preostali del pokrova niha. Predvsem pri nižjih frekvencah duša omogoči oz. povzroči, da je vozle v bližini noge kobilice, ki deluje kot prijemališče vzvoda. To se zelo jasno vidi na slikah, dobljenih s holografsko interferometrijo. Kobilica je pri teh frekvencah toga in deluje kot vzvod, ki niha okrog prijemališča in tako pretvarja prečno gibanje potezane strune v gibanje v smeri navzgor in navzdol na mestu leve nožice. Pri srednjih frekvencah, pokrov in dno »sodelujeta«, pri čemer se duša lahko giblje gor in dol ter tako izničuje vozle na linijo blizu nožice. Tedaj kobilica ne deluje več kot vzvod. Pri frekvenci nad 2 kHz začne kobilica

sama izkazovati močne resonance, kar ojači zvok, ki ga radiira instrument. Lahko le slutimo, kako pomembna je izdelava kobilice. Od načina rezanja in njene oblike, gostote in togosti (E-modul) so odvisne resonančne frekvence plošč. Z »manipulacijo« kobilice in duše je mogoče vplivati na kvaliteto igranja ali na kvaliteto celotnega instrumenta (Rich 41). Podolgovato (dolžina 25 cm, širina 0,5 cm, višina 1,1 cm) rebro (it. *catena*, angl. *bass-bar*, nem. *Bassbalken*, fr. *barre*) iz enakmerno rase smrekovine, ki ga v prednapetem oz. deformiranem stanju prilepijo pod basovsko (levo) nožico kobilice, utrjuje pokrov in pomaga oz. omogoča porazdelitev in ojačitev strunskih nihanj, še zlasti tistih iz spodnjega registra. Zvočnici ali f-odprtini (it. *effe*, angl. *sound hole*, nem. *Schallloch*, fr. *au*), umetelno izrezani v pokrovu na obeh straneh kobilice, povezuje zrak v trupu z okoliško atmosfero in povečujeta gibljivost pokrova med zvočnicama.

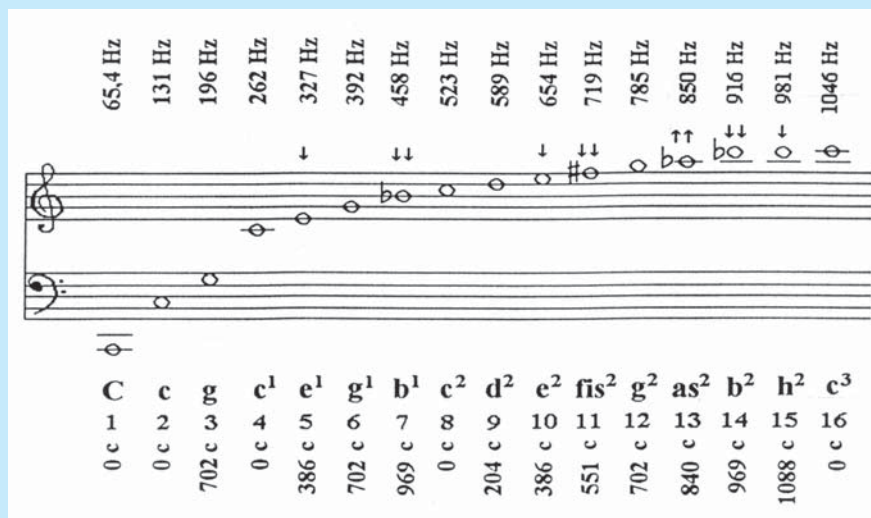
Zvok, ton, zven, barva zvoka

Fizikalno je zvok valovanje s frekvenco in intenziteto, ki jo lahko zazna človekovo uho. Frekvenca zvoka je v območju od 20 do 20 000 Hz.

Za nastanek glasbenega tona so potrebna mehanska nihanja, npr. napetih strun (violina, klavir), lesene ali kovinske plošče (violinski trup, zvočna plošča pri klavirju), napete membrane (boba), lesene ali kovinske palice (npr. marimba, celesta) ali nihanje zračnih stolpov (vokalni trakt, klarinet, orgle). širjenje zvoka vključuje tlačna nihanja in z njimi povezana nihajna gibanja medija, navadno zraka, lahko pa tudi kapljavine/tekočine ali trdnine, ki prenašajo nihajno energijo ali zvok od vira do poslušalca.

Ton (it. *tono*, ang. *tone*, nem. *Ton*, fr. *ton*) je zvok, ki ga odlikuje pravilnost (regularnost) nihanja določene višine (it. *intonazione*, angl. *pitch*, nem. *Tonhöhe*, fr. *hauteur*), tj. zaznavna kvaliteta zvoka, ki je funkcija osnovne (fundamentalne) frekvence. Enostavni ton, imenovan tudi sinusni ton, je enostavno nihanje z eno samo frekvenco; njegova intenziteta je lahko različna.

Skoraj vedno se skupaj z osnovnim tonom vzbudijo tudi višji harmonični toni. Takšni kompleksni toni sestojijo iz dveh ali več enostavnih tonov, imenovanih delni toni. Delni ton najnižje frekvence se imenuje osnovni/fundamentalni ton, »fundamental« drugi pa zgornji delni toni, »parciali« (višji harmonični toni, harmoniki, aqlikvotni toni, alikvoti, višji delni toni, višji toni /star. zgornji toni/, angl. *harmonics*, *upper partial tones*, *overtones*, nem. *harmonische*). Še terminološka pripomba: za nekatere je fundamental prvi harmonik ali prvi parcial. Takšno nihajno skupino potem imenujemo harmonski zven ali glasbeni ton, enostavno tudi zven ali pa samo ton za razliko od »sinusnega tona«. Pri zvenu potemtakem niha hkrati več tonov, ki jih tedaj imenujemo zvenske komponente (Güth 1995). Za številne glasbene tone, še posebej tiste, ki jih kontinuirano proizvaja en sam vir (violina,



□ Slika 4. Prvih 16 harmonik harmonične vrste na osnovi C s frekvenco 65,4 Hz (Ravnkar 1999)

trobenta, glas) obstaja harmonski odnos med parcialnimi frekvencam, ki so celoštevilčni mnogokratniki osnovne frekvence:

$$v = v_1, 2v_1, 3v_1, \dots, nv_1$$

Osnovni ton nastane z nihanjem cele strune, vendar moramo vedeti, da lahko struna hkrati niha še z več višjimi harmoničnimi toni: v polovicah, tretjinah, četrtinah, petinah itd. Na sl. 4 je prikazanih prvih 16 parcialov oz. višjih harmoničnih tonov, ki ustrezajo osnovnemu tonu C s frekvenco 65,4 Hz, npr. za čelo struna C. Zgoraj so ustrezne frekvence, pod notnim črtovjem pa imena tonov, vrstni red harmonske frekvence in v centih (stotinka poltona) izraženi interval, transponiran v osnovno oktavo (prim. npr. Ravnkar 1999).

Ponovimo, zven je prijetno zvoneča kombinacija harmoničnih tonov, ki skupaj določajo zvočno barvo (it. *timbro*, *colore*, angl. *tone color*, nem. *Klangfarbe*, fr. *timbre*).

Po zvočni barvi se razlikujejo glasovi instrumentov in pevcev, ki igrajo oz. pojejo isti ton. Je pretežno (dasi ne izključno) funkcija relativne jakosti višjih harmonskih tonov (včasih tudi nehar-

monskih), ki jih vsebuje zvok. Tako npr. stradivarke slovijo po briljantni barvi tona, guarnerke pa po svojem polnem, temnem karakterju. Razlike zaznajo le specialisti, večina nas pa zlahka loči glas Luciana Pavarottija od Maria Lanze.

Če zaigramo noto, ne da bi s prstom pritisnili struno (prazna ali odprta struna), zazveni najnižja nota na struni, ki ima posebno zvočno barvo. Nasploh imajo prazne strune prav posebno tonsko barvo, ker ni dušenja s prstom in ker ni mogoč vibrato. Poleg igranja nizkega g, ki ga ne moremo zaigrati na noben drug način, je igranje na praznih strunah rezervirano za posebne učinke, npr. za *bariolage*, ko violinist v hitrem zaporedju zaigra isto noto na prazni in pritisnjeni struni. Ob enaki višini tona tako nastane močan kontrast v barvi zvoka. Zelo rad je uporabljal bariolage Haydn, npr. v godalnem kvartetu opus 50, št. 6 in v znameniti Poslovilni simfoniji (*Abschiedssymphonie*) (morda se še spomnite dobre šale na njen račun v eni starejših števil). Vibrato je rahlo spreminjanje višine tona, ki jo doseže violinist najpogosteje s valjanjem konice prsta po struni. Nastane bolj čustven zvok, ki se uporablja zlasti v glasbi

romantične dobe. Pri vibratu torej ni konstantna frekvenca, pač pa amplituda nihanja. Pri tremolu gre za ton konstantne frekvence, vendar s periodičnim spreminjanjem amplitude, dosežemo pa ga s kar najhitrejšimi kratkimi potezami loka. Za razliko od tremola je vibrato v tehničnem jeziku znan kot frekvenčna modulacija.

Zvenske komponente lahko obstajajo tudi neodvisno druga od druge. Takšni so flažoletni toni (it. *suoni flautati*, angl. *flageolet*, nem. *Flageolett-Töne*, fr. *flageolet sons harmoniques*), visoki, stekleno in kot flavta (ime!) zveneči toni, ki jih dobimo, če se z rahlim pritiskom prsta dotaknemo strune tam, kjer se razdeli v celoštevilčnih razmerjih ($1/2$, $1/3$, $1/4$, $1/5$ itn.), z lokom pa prav lahko potegnemo po struni. S tem nastanejo nihajni vozli in struna niha v dveh, treh in več delih, kar daje vsakokrat ustrezni višji harmonični ton. Če se npr. rahlo dotaknemo strune g na $1/3$ njene dolžine, se uduši osnovno nihanje, ne pa tudi 3. harmonska frekvenca, ki ima tukaj svoj vozle: struna bo zazvenela s 3. harmonsko frekvenco, ki je duodecima osnovne frekvence, torej s tonom d^2 . Takšen flažoletni ton je naravni flažolet in ga v partituri označujemo z oglato noto. Naravni flažolet daje harmonski niz frekvenc »praznih« strun. Žal je njihov nabor majhen. V praksi lahko vzbudimo kvečjemu še 6. harmonsko frekvenco, saj je pri višjih težko ugotoviti točno lego ustreznega vozla. Razširitev vzbujanja flažoletnih tonov omogoča umetni flažolet. Pri njem je treba pritisniti na struno z dvema prstoma: s prvim skrajšamo struno, z drugim pa vzbudimo flažolet tako skrajšane strune (Ravnikar 1999).

Zvena strune skorajda ne slišimo. Njena površina je premajhna, da bi razgibala zadostno količino zraka (»kot če bi opletali z zobotrebcom«, Carleen

Hutchins). Pribl. 5-10 % energije, ki jo dovajamo z lokom, se prenese s kompleksnim gibanjem kobilice na violin-ski trup. 1-2 % se je slednjič odda kot zvok. Preostali del se pretvori v toploto. Nihanje potezane strune sestoji vselej iz številnih posameznih harmonskih frekvenc, katerih amplitude se z rastočo frekvenco zmanjšujejo (prim. sl. 6). Nihanje strune prisili violin-ski trup k »sonihanju«. Očitno je amplituda nihanja trupa odvisna od moči oz. amplitude vzbujevalnega nihanja.

Pri prostem dušenem nihanju se energija zgublja, tako da po določenem času nihanje zamre. Lahko pa vzdržujemo nihanje s konstantno amplitudo, če izgubljeno energijo stalno dovajamo oz. nadomeščamo. To je mogoče storiti na dva načina: s samovzbujanjem in z vsiljenim vzbujanjem. Značilno za samovzbujanje je, da nihajni sistem sam določa nihajno frekvenco. Primer je violin-ska struna. Lok sicer tekoče dovaja izgubljeno dušilno energijo, vendar frekvenco, s katero struna niha, določa struna s svojimi lastnostmi.

Višino tona določa masa na enoto dolžine strune, dolžina in natezna napetost (tenzija) strune:

$$f = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{\sigma}{\mu}},$$

kjer je l dolžina nihajoče strune, σ natezna napetost (tenzija) in μ linearna masa.

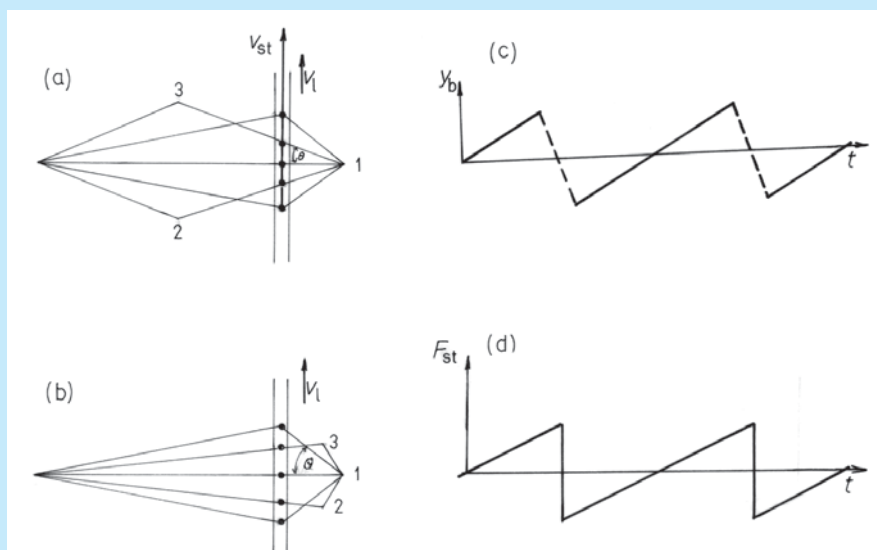
Sledi: (a) krajša je struna, višja je nota, (b) višja je natezna napetost, višja je nota in (c) »težja« je struna, nižja je nota. Ker so strune enako dolge in ker lahko natezno napetost spreminjamo le do določene mere, lahko znižamo višino tona proste strune le s povečevanjem mase. To dosežemo npr. z ovijanjem strune s kovinsko žico. (Pri čelu in basu nižji ton dosežemo z daljšimi strunami.)

Ton nihajoče strune

Nemški fizik Hermann von Helmholtz (»stoji« pred Humboldtovo univerzo v Berlinu!) je ugotovil, da z lokom potezana struna niha povsem drugače od fizikom dobro poznanih sinusoidalnih stoječih valov. Dokazal je, da se lahko vzbudijo še druga transverzalna nihanja strune. Izkazalo se je, da je struna »zlomljena« v dve ravni sekciji (sl. 5). »Koleno« med sekcijama potuje naprej in nazaj vzdolž strune in se odbija na koncih. »Koleno« se giblje z normalno hitrostjo transverzalnih valov, $c = (\sigma\mu)^{1/2}$, kjer je σ natezna napetost in μ masa strune na enoto dolžine. Čas, ko »koleno« opravi cikel, je perioda gibanja in določa višino zvoka. Daljša je perioda, nižji je ton in obratno. Recipročna vrednost periode je frekvenca nihanja (f , v, v Hz).

Pri potezanju z lokom struna potuje zdaj z lokom, nakar hitro zdrsne; proces se ponavlja. (sl. 5). Čeprav je drsno trenje v »zlepnem režimu« razmeroma šibko, se na kobilici energija stalno odvaja s strun na nihajne načine instrumenta. Vsakič, ko se koleno odbije od kobilice in potuje pod lokom, mora lok nadomestiti izgubljeno energijo. Kratek impuls loka na struno povzroči, da se struna giblje spet skupaj z lokom. To je »zdrsko-zlepni« (angl. slip-stick/slipping-sticking, nem. Gleit-Haft) mehanizem oz. režim vzbujanja strune, ki temelji na dejstvu, da je čas zdrsa mnogo krajši od zlepnega trenja. Helmholtzov val generira prečno silo $T \sin \Theta$ kjer je Θ kot strune na kobilici. Ta sila se linearno povečuje s časom, toda njena amplituda se hitro obrne, ko se »koleno« odbije na kobilici. Tako nastane žagasta ali zobasta oblika vala (sl. 5).

Kolofonija na loku v zlepni fazi deluje kot lepilo in v zdrsni fazi kot mazivo.



□ **Slika 5.** Shematski pretiran prikaz prečnega odmika potezane violinske strune in »zdrsko-zlepni« režim, ki generira Helmholtzov val s »kolenom«, ki potuje vzdolž strune. (a) Oblika strune v petih enakih časovnih intervalih, ko je »kolenom« na »daljši« (nasprotni) strani loka in kobilice: »zlepni« režim. Na mestu, kjer je struna potezana, struna in lok potujeta v isti smeri in z enako hitrostjo. (b) Oblika strune v petih enakih časovnih intervalih, ko koleno potuje med lokom in kobilico. Struna zdrsko v obratni smeri gibanja loka: »zdrski« režim. (c) Odmik strune na mestu potezanja z lokom. (d) Sila $\sigma \sin \theta$ ki jo opravijo strune na kobilici kot funkcijo časa, kjer je σ natezna napetost strune (risbe po Güth-u 1995 in Gough-u 2000).

Valovi in nihanja. Spekter periodičnega nihanja strune / zvenski spekter/ harmonski spekter/ spekter nihanja (R13)

Uvodoma povejmo, da so valovi v bistvu nihanja. V zraku razširjajoči se zvočni val sestoji iz nihanj številnih zračnih molekul. Na splošno govorimo o valu vselej, ko ne niha le posamezno togo telo, temveč hkrati številne, medsebojno povezane molekule ali atomi. Le-te sestavljajo obširen elastičen sistem, ki izkazuje od mesta do mesta različen odmik, včasih tudi različno fazo, vendar vselej enako frekvenco. Tako je nihanje violinske strune pravzaprav val, ki niha med kobilico in sedlom od mesta do mesta z različnim odkikom, povsod pa z enako frekvenco. Že sedaj lahko povemo, da gre

pri nihanju strune za prekrivanje več valov različnih frekvenc. Nihanja, ki jih radiira instrument v okoliško atmosfero, se širijo v obliki kroglastih valov. Pri tem ni od mesta do mesta različen le odmik strune, temveč tudi faza zračnih delcev, ne pa tudi frekvenca.

Oblika periodičnega nihanja ne pove ničesar o harmonikih, ki to nihanje sestavljajo. Šele z ustrezno Fourierjevo vrsto lahko določimo deleže posameznih harmonskih amplitud a_n .

Zvenski ali harmonski spekter je nazorni grafični prikaz amplitud posameznih harmonskih nihanj in kolikšne so njihove relativne amplitude (v deležih ali %), pri čemer je amplituda osnovnega nihanja 1 (prim. Ravnikar 1999/7).

Pri žagastem nihanju padajo amplitude obratno sorazmerno z redom nihanja,

vidne pa so vse harmonske frekvence. Oblika vala je drugačna, če so opazne le lihe višje harmonične komponente (prim. npr. Olson 1966).

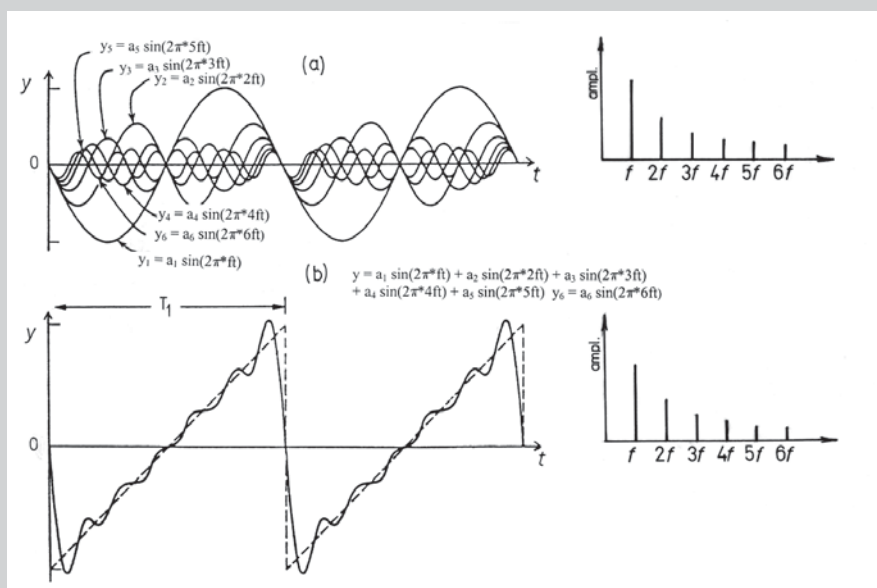
Z naraščanjem frekvence amplitude praviloma hitro padajo. Tako lahko teoretično neskončno vrsto v praksi obravnavamo kot končno vrsto z določenim številom členov.

Seštejmo harmonska sinusna nihanja tako, da se njihova vsota kar se da dobro prilaga žagastemu nihanju:

$$y = a_1 \sin(2\pi f t) + a_2 \sin(2\pi 2f t) + a_3 \sin(2\pi 3f t) + a_4 \sin(2\pi 4f t) + a_5 \sin(2\pi 5f t) + a_6 \sin(2\pi 6f t).$$

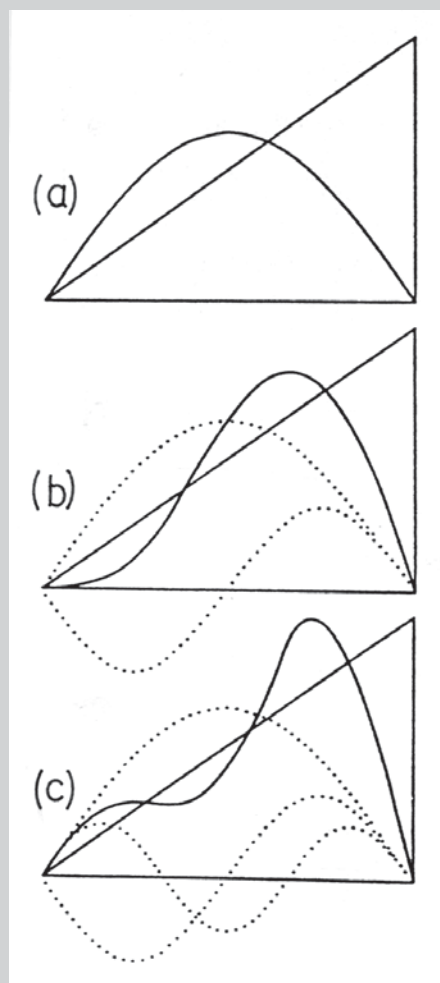
Sl. 6 prikazuje prvih šest harmonikov žagastega nihanja z amplitudami (R8).

Osnovna frekvenca določa osnovni ton, ki ga zabeležimo v notnem črtovju (osnovni ton »notira«). Notirani ton ne pove ničesar o barvi zvena. Vemo, da se barva zvena različnih instrumentov pri igranju istega tona močno razlikuje. Fourierjevo ali harmonsko analizo lahko zato imenujemo tudi zvenska analiza. Zvena ne moremo izraziti v notnem črtovju, ker tam ne moremo podati vrednosti posameznih Fourierjevih koeficientov! (prim. Ravnikar 1999, 7). Prikaz amplitud posameznih harmonskih nihanj je spekter nihanja, harmonski spekter, zvenski ali amplitudni spekter. Spekter pokaže posamezne harmonske frekvence in kolikšne so njihove relativne amplitude (sl. 6). Povejmo še, da je oblika žagastega zoba odvisna tudi od mesta potezanja z lokom. Pri določeni višini tona, ki ga določa dolžina strune od kobilice do prsta, so amplitude harmonikov (kot tudi glasnost in kvaliteta zvoka) odvisne od mesta, kjer se lok dotika strune, hitrosti loka in sile, s katero pritiskamo na struno. Če potezamo struno blizu kobilice, se poveča delež visokih harmonikov. Rezultat je »kositern« kovinski zvok. če pa potezamo struno



□ Slika 6. (a) Prvih šest harmonikov žagastega vala (razširjeno po Güth-u 1995)

□ Slika 7. (a) Prvi približek žaginega zoba z osnovnim nihanjem. (b, c) Drugi in tretji približek z dodajanjem dveh naslednjih harmonikov (Güth 1995, 76).



dlje od kobilice (bliže sredini), se delež visokih harmonikov zmanjša. Rezultat je bolj mehak, nežen zvok. Sicer pa dajejo nizke frekvence zvenu na splošno mehak značaj in visoke, ostrega. Zven, ki ga sestavlja prvih šest harmonskih frekvenc, zveni polno in »muzikalno«, saj je v njem vsebovan durov trozvok. Kadar je osnovna frekvenca najmočnejša, je zven poln, sicer pa je prazen. Sedmi harmonik daje zvenu grob značaj (prim. Ravnikar 1999).

Pokrov in dno - Chladnijske »figure«

Kako že med postopkom izdelave preverjati kvaliteto bodoče violine, oziroma, kako iz lastnosti pokrova in dna napovedati kvaliteto gotove violine? Kakšen ton naj imata prosti po-

krov in dno pred vgraditvijo? Običajna metoda je intonacija z določitvijo višine »trkanih (udarjenih) tonov« (angl. *tap tones*, nem. *Klopföne*) pokrova in poda violine med izdelavo. Goslarji se praviloma zelo natančno držijo uveljavljenih in preizkušenih (zgodovinskih) dimenzij. Z akustičnega vidika želimo z natančnim kopiranjem reproducirati nihajne načine instrumenta. Vendar to ni dovolj, kajti frekvence, oblike in dušenje nihajnih načinov trupa ne določajo le dimenzije in konstrukcija, temveč tudi mehanske lastnosti lesa; le-te pa so zaradi anizotropije, higroskopsnosti, spremenljivih rastnih pogojev, fiziologije ksilogeneze, časa poseka in ravnanja z lesom po poseku, vključno sušenjem, zelo variabilne!! (Richardson 42). Vseka-

kor je prava umetnost določiti pravo razmerje trkanih (udarjenih) tonov prostega pokrova in dna violine. Te frekvence je težko določiti »na uho«, še posebej pri pokrovu.

Že l. 1830 je skušal fizik Felix Savart ugotoviti, kako intonirati pokrov in dno pred vgraditvijo. Kdaj bo plošča prešla v resonanco, je odvisno od trdnosti, mase in njune razporeditve. Savart je ob pomoči francoskega goslarja Vuillaumeja preizkušal tudi plošče vrhunskih kremonk mojstrov Stradivarija in Guarnerija. Pri tem je uporabil tudi metode z nihajnimi »figurami«, ki jo je razvil njegov prijatelj Ernst F.F. Chladni. Ta je potresal plošče s finim prahom in jih s potezanjem z lokom zanihal. Pri določenih frekvencah (resonančne ali lastne frekvence)

so nastale zvenske ali »Chladnijeve figure«: prah se je nabral na mestih, ki niso nihali, tj. vzdolž vozelnih/nodalnih linij. Pri vsaki lastni frekvenci so nastale značilno oblikovane vozalne linije oz. vzorci, ki so pokazali geometrijo različnih tipov nihanja violinskih plošč. Ugotovil je, da so bile resonance pri pokrovih dobrih violin med cis^1 in d^1 in pri dnih med d^1 in dis^1 , pri čemer je bila razlika vselej med polovico in celim tonom. Pri tem so bili udarni toni dna vselej višji. Nekateri goslarji menijo, da mora imeti dno za ton nižji ton od pokrova, drugi spet, da morata imeti enako frekvenco.

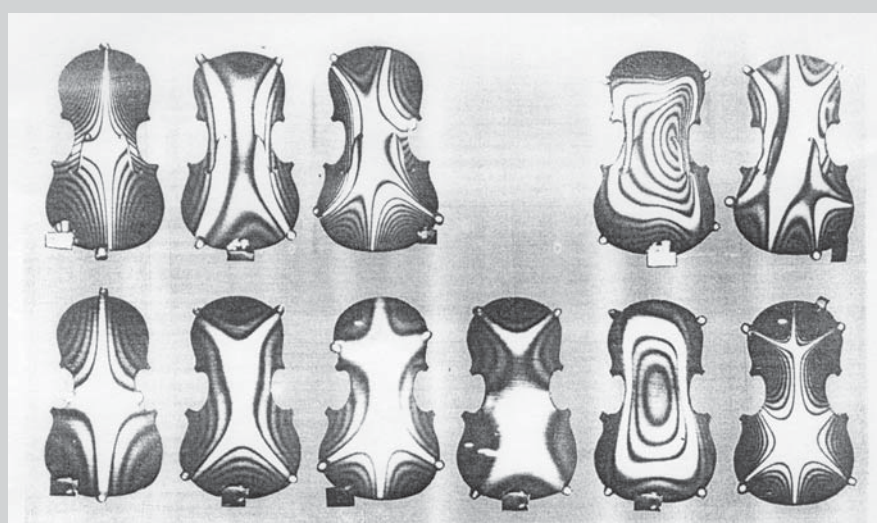
1959 sta začela Hutchinsonova, vrhunska ameriška fizičarka in goslarica, in fizik Saunders raziskovati zvenske lastnosti plošč in njihov vpliv na zven ter igralno-tehnične lastnosti izgotovljenih violin. Pri tem sta preiskala pribl. 800 instrumentov najrazličnejše kvalitete. Poimenovala sta tudi moduse oz. nihajne načine. Prišla sta do podobnih sklepov kot Savart. Dodatno sta ugotovila, da udarna tona nista nujno omejena na intervala $cis^1 - d^1$ oz. $d^1 - dis^1$ in da pri vseh dobrih instrumentih udarni ton dna ni bil višji od tistega pri pokrovu. Še več, pri nekaterih dobrih violinah je bilo prav obratno. Izboljšala sta Chladnijevo metodo zvenskih figur, ki omogoča zanesljivo določanje elastičnih lastnosti pokrova. Güth (1995) meni, da bi se dalo Hutchinsino metodo še izboljšati. Drži, da je mogoče z njo odpraviti negotovost »ročnega« določanja togosti plošč (glej dalje), ne pa tudi posledic velike variabilnosti lesne zgradbe in njenega vpliva na dušenje. Poleg informacij, ki jih dajejo Chladnijeve figure, bi bilo dobro podrobno proučiti še gostoto. Najbolje bi bilo seveda neposredno meriti dušenje. To pa ni lahko in je dolgotrajno. Res pa je, da bi Hutchinsina metoda ne bi bila več tako enostavna.

Violinski plošči imata več nihajnih načinov (modus, mn. modi, označba #), od katerih se vsak pojavlja pri drugačni frekvenci. Izraz »modus« oz. nihajni način se nanaša na možna stanja nihajočega sistema. Podrobneje so jih proučevali 7, vendar so za zven violine pomembni zlasti nihajni načini #1, #2 (način »X«) in #5 (»obročni« ali način »O«) (sl. 8), ki jih lahko »vizualiziramo« oz. napravimo vidne v obliki Chladnijevih figur ali interferenčnih vzorcev s holografskimi posnetki. Pri zelo dobrem pokrovu morajo biti lastne frekvence nihajnih načinov #1, #2 in #5 v harmonskem razmerju, pri čemer naj bi imel nihajni način #5 frekvenco pribl. 340-370 Hz. Ti harmoniki so poglavitne komponente udarnega tona plošč. Mnogi goslarji trdijo, da mora nihajni način #5 doneti natančno eno oktavo višje od načina #2. Tako menijo, da posnemajo prakso zgodnjih goslarjev. To se zdi verjetno, ker metoda ne potrebuje posebne opreme. Zdi se, da je bila ideja v skladu s prakso renesanse matematične perfekcije, ki je vodila zlasti italijanske goslarje.

Z opazovanjem Chladnijevih figur želi goslar kar se da dobro medsebojno uglasiti frekvence nihajnih načinov #1, #2 in #5. Pri modificirani Chladnijevi metodi se položi prosta plošča na zvočnik z notranjo/konkavno stranjo navzgor. Na zvočnik se prenese sinusni signal, ki ploščo sinusno zaniha. Ob počasnem spreminjanju frekvence nato opazujemo, kako se prah porazdeljuje po plošči. Pri lastnih frekvencah nastanejo značilne zvenske - Chladnijeve figure. Še jasneje se vidijo tipične zvenske slike na laserskih holografskih posnetkih.

Slednjič je lahko Hutchinsonova določila pet značilnosti plošč, ki naj bi omogočile izdelavo dobrih instrumentov: (1) Nihajni način #5 mora izkazovati razmeroma veliko amplitudo; ustrezni lastni frekvenci pokrova in dna pa se lahko razlikujeta za manj kot en ton.

Če ima pokrov višjo lastno frekvenco od dna, dobi instrument navadno svetel, sijoč zven. Če je frekvenca dna nihajnega načina #5 višja, zveni instrument temno in polno. (2) Nihajni način



□ Slika 8. Z lasersko interferometrijo vizualizirani nihajni načini .1, .2 in .5. Zgoraj Chladnijeve zvenske figure pokrova z lastnimi frekvencami 80, 147, 222, 304 in 349 Hz, spodaj lastne frekvence dna: 116, 167, 222, 230, 349 in 403 Hz; v okviru nihajni način .2 (»X«) in način .5 (»O«). Številke označujejo frekvence, pri katerih nastopijo resonance (Hutchins 1976, 1988b).

#2 pokrova in dna se lahko razlikujeta za manj kot 1,4 % (pribl. 5 Hz) in sta med 160 in 180 Hz. Tako dobimo mehko zvoneč instrument, na katerega je lahko igrati. (3) Če pri nihajnem načinu #5 pokrov in dno izkazuje enako frekvenco, se frekvenci obeh plošč pri nihajnem načinu #2 ne smeta razlikovati za več kot 1,4 %, sicer nastane instrument s trdim zvenom, ki ga je zelo težko igrati. (4) Odlični instrumenti nastanejo, če se frekvenci nihajnih načinov #2 in #5 obeh plošč razlikujeta pribl. za oktavo in če obe plošči pri teh frekvencah izkazujejo močno resonanco. (5) Kvaliteto violine lahko še izboljšamo, če uglasimo pokrov tako, da je frekvenca #1 nihajnega načina eno oktavo pod načinom #2. Tako so frekvence nihajnih načinov #1, #2 in #5 v harmonskem razmerju. To lahko dosežemo le pri pokrovu, vendar z veliko težavo. Pri dnu, ki ima drugačno strukturo (gostejša javorovina!), tega nika ne moremo doseči.

Carruth (1992) navaja še dodatne kriterije: nihajni načini naj formirajo kar se da jasne in tanke linije, kar dokazuje visoko aktivnost v tem območju in na homogenost materiala.

Izkušen goslar zna nihajne načine ali točneje togost, ki je odgovorna za obliko posameznega nihajnega vzorca, z veženjem z rokami tudi »otipati«. Pri tem obrne notranjo stran pokrova navzgor. Za nihajni način #1 trdno prime pokrov na nasprotnih krajših stranicah in ga vzdolž daljše osi vzvijamo tako, da potiskamo en vogal navzgor, diagonalno nasprotnega pa navzdol (obremenitev na vzvoj/torzija). Če držimo ploščo na eni strani z obema rokama vzporedno z daljšo osjo plošče tako, da sta palca zgoraj, drugi prsti pa pahljačasto razporejeni spodaj in jo koritasto upogibamo v prečni smeri, v bistvu preizkušamo njeno togost nihajnega načina #2 (prečno upogibanje).

Če držimo ploščo s konicami prstov na obeh straneh in s palcema pritiskamo osrednji del plošče navzdol, »otipamo« upogibne lastnosti nihajnega načina t# 5 (vzdolžno upogibanje).

Več violin iz tako intoniranih plošč je v pogledu zvenskih in igralno-tehničnih lastnosti »prekosilo vsa pričakovanja«. Hutchinsovi je uspelo izdelati tudi vrhunske instrumente, po njenem prepričanju primerljive s kremonkami.

Pri intonaciji je treba upoštevati še grundiranje in lastnosti laka. S površinsko obdelavo se poveča masa instrumenta. Pri tem postanejo periferena vlakna lesa bolj toga. Manjši je elastičnostni modul lesa, bolj se z lakiranjem spremeni togost in dušenje. Vsekakor je učinek lakiranja pri smrekovini in javorovini drugačen. Znano je, da je vpliv grundiranja in lakiranja na distoniranje nihajnih načinov na smrekov pokrov večji kot na javorovo dno. Ob povečanju frekvenc grundiranje in lakiranje povečata elastičnostni modul prečno pri smrekovini veliko bolj kot pri javorovini. Vse to pove, kako previden je treba biti pri površinski obdelavi. Zdi se, da se da naštetje vplive »vračunati« pri intoniranju prostih plošč.

Če predpostavimo, da morata pokrov in dno pri nihajnem načinu #2 nihati pri isti frekvenci, potem bi bilo treba ustrezno lastno frekvenco pokrova pred lakiranjem uglasiti za 5-10 Hz nižje.

Omenimo še posledice higroskopsnosti lesa in njegovega prilagajanja oz. uravnovešanja na trenutno klimo. Lak sicer počasni transport vlage skozi zunanje površine violine. Nekatere violine v vlažnem toplem podnebju dobijo top zven in postanejo neodzivne, v centralno kurjenih prostorih pa postane njihov zven grob in trd. Goslarji pravijo, da se violina najbolje počuti v klimi, v kakršni je bila izdelana. Le tako ohrani svoj plemenit zven.

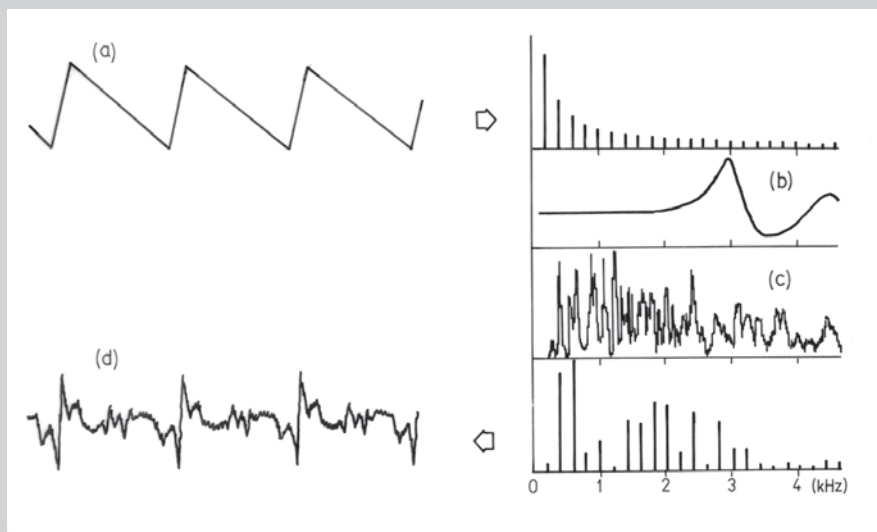
Sicer pa vlaga v lesu absorbira nihajno energijo in jo z evaporacijo spreminja v toplotno energijo. Že majhne spremembe vlažnosti lahko dramatično vplivajo na akustične lastnosti violine: zmanjšanje vlažnosti za 1 % zmanjša dušenje tudi za 3,5 % (Hsieh 2004). Dolgoročni odziv akustičnega odziva temelji predvsem na degradaciji polioz, najbolj higroskopsnih sestavin celicne stene. Z njihovo degradacijo se ravnovesna vlažnost znižuje. K zmanjšanju higroskopsnosti in povečanju togosti lesa utegne vplivati tudi kristalizacija celuloze.

Omenimo, da vsi niso prepričani, da uglasjevanje prostih plošč zadostuje za izdelavo dobre violine in menijo, da nihajni načini prostih plošč nimajo dosti skupnega z nihajnimi načini izdelanega instrumenta (Richardson 1995). Tudi Schleske meni, da ne obstaja enostavna zveza med prostimi nihajnimi načini (#) in nihajnimi načini zaprtega trupa.

Nihanje violinskega trupa

Vsako naravno nihanje je dušeno, saj se v vsaki periodi izgubi nekaj energije, dokler gibanje slednjič ne zastane. Mera za dušenje je *logaritmčni dekrement* λ – naravni logaritem razmerja amplitud dveh zaporednih nihanj. Vzbuja struna izgublja svojo energijo z notranjim trenjem, s prenosom na kobilico in prek nje na trup, največ pa prek prsta, ki pritiska na ubiralko. Zato zveni prazna struna dlje kot pritisnjena/ »zaustavljena«. Največ energije, ki se prek kobilice dovede trupu, se izgubi z notranjem dušenjem. Kar je še ostane, jo trup radiira kot zvočni val. *Akustični uporabnostni učinek* godal je zato zelo majhen.

Žagasta sila, nastala na vrhu kobilice, je vhodni (inputni) signal, ki prisili violinski trup, da niha in radiira zvok.



□ Slika 9. (a) S potezanjem loka prek strun nastane na vrhu kobilice skoraj idealna zobasta sila. Sila lahko sestoji tudi iz 40 Fourierjevih komponent, katerih amplitude gladko padajo. (b) Kobilica, ki transformira energijo iz vibrirajočih strun v nihajne načine trupa, se glede na frekvenco odziva različno. Resonance med 3 in 4,5 kHz krepijo izhodni zvok, medtem ko »dolina« med obema maksimumoma zmanjšuje »nazalne« značilnosti tona. (c) Matematično modelirani akustični izhod violine: izhod se dramatično poveča, kadar vzbujevalna frekvenca sovpa z enim od številnih vibracijskih modusov violine. (d) Fourierjeve komponente multiresonančnega akustičnega izhoda, ki je nastal s potezanjem najnižje note na instrumentu pri frekvenci 200 Hz. Prikazana je izračunana izhodna/outputna oblika vala, ki nastane z idealizirano vhodno/inputno žagasto obliko vala. Drugače od vhodnih amplitud Fourierjevih komponent so lahko izhodne amplitude Fourierjevih komponent dramatično drugačne (risba po Goughu 2000).

Vhodna žagasta oblika vala ima bogato harmonsko vsebino, ki sestoji iz številnih Fourierjevih komponent. Ker je violina linearni sistem, se iste Fourierjeve komponente pojavljajo v »outputu« violine (Gough 2000). Na sl. 9 so te resonance matematično modelirane z namenom simuliranja njihovega vpliva na nastali zvok.

Kako s fizikalnimi meritvami določiti tonske lastnosti ostaja večni izziv znanstvenikov. V zadnjih dveh stoletjih so fiziki Helmholtz, Savart in Raman veliko prispevali k fiziki violine. Pri tem moramo omeniti, da je zven kremenek, kot jih slišimo danes, precej drugačen od zvena v Stradivarijevih časih. Skoraj vse kremenke so v 19. stol. doživele predelave in »izbolj-

šave«. Če prisluhnete avtentičnim »baročnim skupinam, ki uporabljajo fine kremenke, restavrirane v svoje prvotno stanje, boste verjetno zaznali razliko! (prim. Gough 2000).

Nihanje violinskega trupa je primer vsiljenega gibanja. Nihajoča struna ga »prisili«, da niha z njo vred, vendar ne s frekvenco, ki je lastna trupu, temveč s tisto, s katero niha struna. Seveda pa ima trup številne lastne naravne frekvence, s katerimi lahko niha. Če sovpa ena od resonanc trupa s harmonikom (harmonsko frekvenco) strune, se prenese na trup veliko energije, kar močno okrepi ustrezeni ton. Čeprav se trup odzove na vsako od harmonskih frekvenc nihajoče strune, se ne odzove na vsako enako in spremeni se razmerje

harmonikov v radiiranem zvoku. (Richardson 1995). Vsak instrument značilno »obarva« zvok. Spremenljiv odziv je posledica mehanskih resonanc trupa. Drugače od strune se pri trupu nihanja razširijo na ves trup. Zaradi kompleksnosti oblik violine in zgradbe frekvence, pri katerih se pojavijo, niso več v harmonskem odnosu.

Obstoj toliko resonanc pri skorajda naključnih frekvencah pomeni, da ne obstaja nekaj, kar bi lahko imenovali »tipična« oblika vala ali spektrum violinskega zvoka. Kako reagira violina na različne igrane tone, je zelo zamotana stvar. Vsak violinist se sooči s tem problemom. Dobri ga rešujejo avtomatsko in podzavestno.

Resonančne lastnosti violin so raziskovali Saunders, Backhaus, Meinel, Pasquali in Roloff. Načelno potekajo tonske raziskave tako, da instrument vzbujamo, nato nastali zvok z mikrofonom ali akcelerometrom (merilnik pospeška) zabeležimo, nakar ga analiziramo. Instrument lahko vzbuja violinist, potezalni stroj ali pa ga vzbujamo elektromehansko.

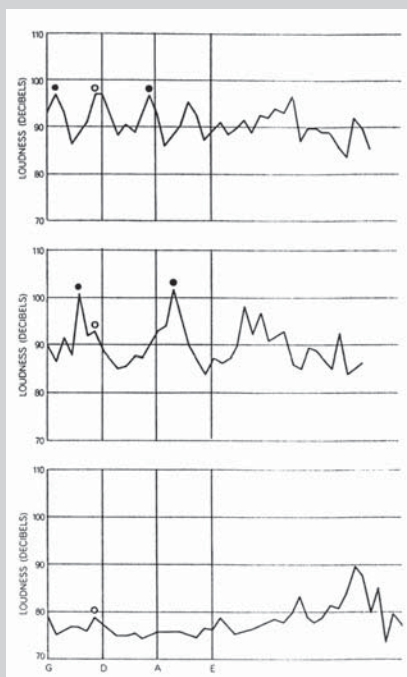
Zelo uporabne so glasnostne krivulje (angl. *loudness curves*, nem. *Lautstärkekurven*) (sl. 10). Dobimo jih tako, da potezamo strune povsem normalno brez vibrata in napredujemo po poltonih, pri čemer igramo vsak ton kar se da močno. Z napravo registriramo glasnost. Marsikateri violinist je presenečen, kako se lahko glasnost posameznih tonov razlikuje.

Pri dobri violini sta glavna lesna in glavna zračna resonanca oddaljeni pribl. 7 poltonov, oz. kvinto; frekvenčno razmerje znaša 2/3. Pri slabem instrumentu je razlika do 12 poltonov, kar ustreza oktavi in frekvenčnemu razmerju 1/2. Hutchinsonova je ugotovila, da se frekvence lesnega in zračnega tona najboljših violin razlikujejo le

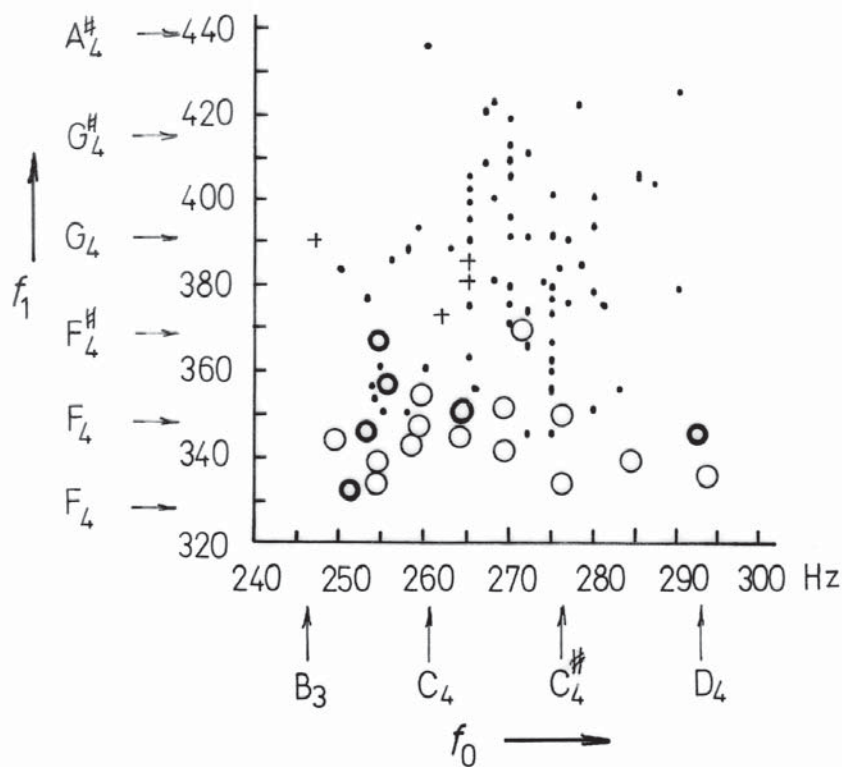
za en ali dva poltona od obeh srednjih strun. Glavna lesna resonanca, tj. najmočnejša resonanca trupa/korpusa, ki nastopi le pri potezanem tonu dobrih violin, je večinoma pri frekvenci 440 Hz, tj. pri tonu, na katerega je ušla druga najvišja violinska struna (a^1). »Volkovi«, s katerimi je obremenjen prenekateri instrument, nastopijo pri tej glavni resonanci. Njihov ton je nestanovit in tresoč, ne glede na kateri struni ga igramo. Mnogokrat se prelomi v višjo oktavo kot glas dečka, ki mutira. »Volkovi« nastanejo, ker strune in trup predstavljajo mehansko povezane resonatorje. Med njimi se ciklično izmenjuje energija. Violinski trup je votli resonator. Zrak v violini prek obeh zvočnic komunicira z okoliškim zrakom. Resonančno frekvenco oz. višino zračnega tona lahko približno ocenimo, če pihamo prek zvočnice. Višina zračnega tona je odvisna od volumna zraka in površine obeh zvočnic. Zrak niha kot zrak v steklenici, ko pihamo prek njene odprtine. Če v bližini violine zapojemo noto blizu dis ali e in primaknemo uho v bližino zvočnic, lahko slišimo resoniranje zraka v trupu (Helmholtzova resonanca). Zračna resonanca je najnižja lastna frekvenca v trupu vsebovanega zraka.

Winkel (1967) navaja naslednje značilnosti zvensko odlične violine: ton ne sme kazati znatnih energijskih deležev nad 3600 Hz, do frekvence 500-600 Hz ne sme biti izrazitih resonanc in izogniti se je treba formantu v območju 600-700 Hz in 1300-2000 Hz, sicer instrument zveni »nazalno«/nosljivo (formant: razločno izstopajoči delni ton v zvenskem spektru).

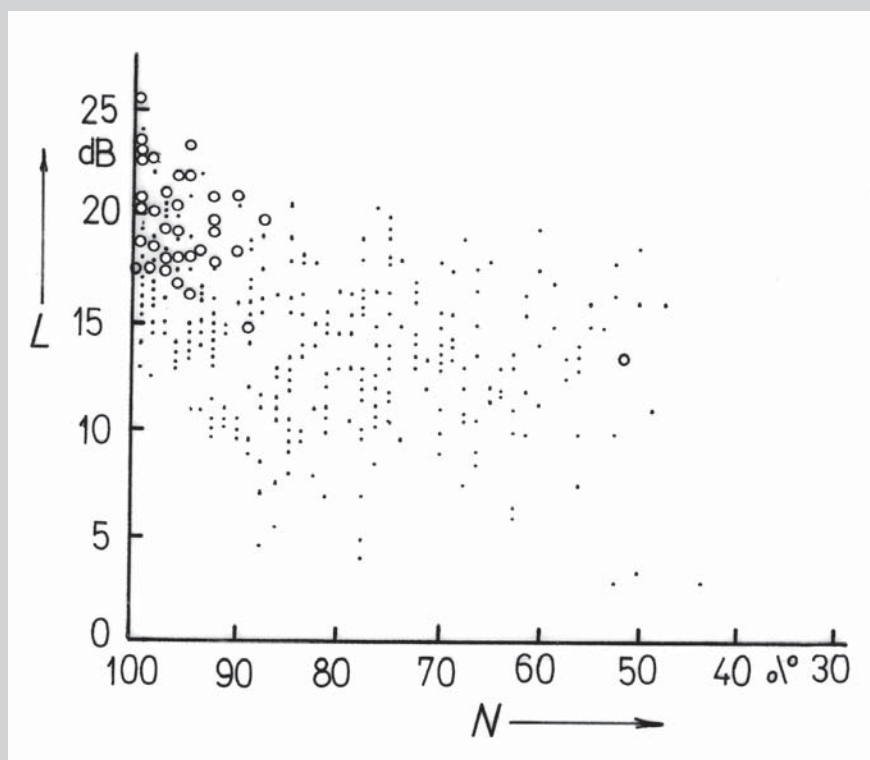
Meyer (1979, 1984) je skušal ugotoviti posebnosti kremonk. Pri tem je ugotovil, da obstaja zveza med prvima resonančnima vrhom B_1 [T_1] (prva lastna frekvenca pokrova) in A_0 (Helmholtzova resonanca). Preizkusil



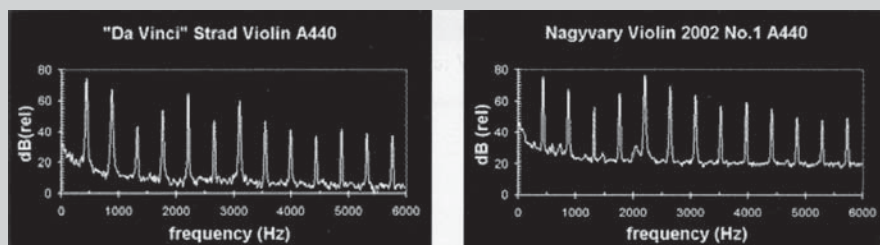
□ Slika 10. »Glasnostna krivulja« dobre stradivarke (1713, zgoraj), 250 let stare slabše violine neznanega izvora (sredina) in slabe violine (spodaj). Le stradivarka izkazuje želeno razdaljo in jakost lesne resonance (črna pika), »wood prime« (kvadrat) in zračne resonance (prazen krožec). črke in navpične linije so frekvence praznih strun (Hutchins 1988a).



□ Slika 11. Porazdelitev najbolj prominentnih trkanih tonov za 100 violin. f_0 je zračna resonanca in f_1 prva korpusna oz. trupska resonanca. Italijanke so označene s tankimi krožci, stradivarke pa s krepkimi krožci (Meyer 1984).



□ Slika 12. Dünwaldov drugi eksperiment. L je relativna jakost (strength) frekvence zračne resonance v dB in N odstotek možnih not, katerih najmočnejši harmonik je med 1300 in 2500 Hz. Kremonke so označene s krogi, druge s pikami (Dünwald 1985).



□ Slika 13. Spekter FFT prazne strune A (440 Hz) stradivarke »Da Vinci« in odlične sodobne Nagyvarijeve violine.

je 100 violin v območju 320-440 Hz (sl. 11). S krogi so označene italijanke. Za slednje so značilne nizke resonance T1 in A0.

Dünwald (1985, sl. 12) je primerjal resonančne krivulje 10 »italijank«, 10 mojstrskih violin-replik in 10 tovarniških violin. Vzbuja jih je z elektromagnetnim gonilnikom (»driverjem«) na kobilici. Prvi vrh na resonančni krivulji je bil A0 (zračna resonanca). Pri frekvencah med 400 in 600 Hz so bile

tovarniške violine, presenetljivo, bolj blizu italijankam kot replikam. Pri frekvencah nad 1000 Hz pa so imele tovarniške violine precej šibak odziv, replike pa preveč močnega, kar je morda prispevalo k rezkemu, predirljivemu zvoku. Širok vrh med 1300 in 2500 Hz pri kremonkah dokazuje, da ima dejansko vsaka nota v tem pasu svoj najmočnejši harmonik.

Čeprav s takšnimi meritvami določimo frekvence važnih akustičnih resonanc,

ne povedo ničesar o tem, kako violina dejansko niha.

Poleg elektromehanskih sistemov vzbuja in beleženj nihanj obstaja tudi možnost optičnih meritev s svetlobnimi vodniki iz steklenih vlaken. S to metodo se da izmeriti dejanski odklon določene točke na površini violine. Pri takšni holografski interferometriji se zabeleži celotna nihajoča površina. Vzbuja se izvši z zvočnikom ali »shakerjem. Z metodo je mogoče poleg informacije o vozelnih linijah dobiti tudi podatke o nihajnih »trebuhih« (prim. sl. 8).

Drugačen način optične meritve je laserska vibrometrija ali laserska Dopplerjeva vibrometrija (Zopf 2000). Drugače od Specklejeve holografije, ki uporablja refleksijo laserske svetlobe celotnega objekta, laserska vibrometrija otipava nihajočo površino točkovno (interferenca slike). Žarek, ki udari ob površino, se odbije, pri čemer se njegova frekvenca zaradi nihanja površne spremeni (Dopplerjev učinek). Odbiti žarek vsebuje tudi informacije o hitrosti premikajoče se točke. Z ustreznim računalniškim programom je treba podatke še obdelati in grafično prikazati.

Optična metoda Moiré deluje na podlagi »učinka Moiré«. Z njim je mogoče zabeležiti obokanje violine. Pri tem se osvetli drobna mreža tako, da z lastno senco interferira na objektu in tvori vzorec. Če sta opazovalec oz. kamera in svetlobni vir v ravnini, se da razdalje med posameznimi linijami prikazati kot izohipse. Tako je mogoče izdelati »tridimenzionalne« fotografije, ki dajejo pomembne informacije o instrumentu.

Institut für Wiener Klangstil na Dunaju je razvil metodo VIAS (Violinen Analyse System). Po tej metodi se določi vhodna admitanca instrumenta in

izmeri hitrost, s katero niha kobilica in celotni instrument. Admitanca je recipročna vrednost impedance, t.j. odpora, s katerim se sistem upira delovanju sil. Admitanca je potemtakem mera za gibljivost (»Schwingungsfreudigkeit«) sistema. Piki na admitančni krivulji predstavljata lastni frekvenci violine (prim. Zopf 2000).

Današnja programska oprema omogoča uporabo matematične tehnike imenovane Fast Fourier Transform (FFT). Zvočni val, ki ga proizvaja instrument, je vsota osnovne frekvence note in vsi višji harmonski toni. FFT »razbije« zvok v delne tone in prikaže njihove relativne jakosti. Tako nastane spektrum FFT (prim. sl. 7). Na sliki 13 sta spektra FFT prazne strune A (440 Hz) dveh violin: levo stradivarke »Da Vinci« in desno Nagyvarijeve violina 2002 No.1.

Učinkovita je tudi modalna analiza. Violino na več mestih nalahno udarimo s kalibriranim kladivcem in z zelo lahkim akcelorometrom izmerimo odziv na več mestih. Odziv nato analiziramo z računalnikom, pri čemer dobimo resonančne frekvence in zgradbene načine nihanja celotnega instrumenta. Metodo uporabljajo uspešno pri pouku v slavni Mittenwaldski goslarski šoli in v ZDA (Ken Marshall).

Podobno informacijo o tonski kvaliteti je mogoče dobiti tudi z analizo končnih elementov. Violina se pri tem modelira kot skupek mas, povezanih z vzmetmi. Tako lahko dokaj neposredno ovrednotimo resonančne nihajne načine in spremljajoča nihanja celotne strukture. Pri tem lahko vključimo v izračun različne fizikalne parametre materialov, iz katerih je violina. Tako zgradimo virtualno violino in napovemo vse njene nihajne in akustične lastnosti (prim. Gough 2000).

Lahko le upamo, da bo ob pomoči

znanosti goslarjem slednjič le uspelo »zadeti« kremonski zven. Za vse čase pa ostaja nedosegljiva njihova zgodovinska slava in umetniška vrednost. Celo primerjava Ferrarija s »fičkom« tukaj povsem odpove. Morda pa je s kremonkami kot z nogometom. Nekdo je rekel: »Nekoč sem mislil, da gre pri nogometu za življenje in smrt, zdaj pa vem, da gre za veliko več ...«

literatura

1. **Burckle, L., Grissino-Meyer, Henri D. 2003.** Stradivari, violins, tree rings, and the Maunder minimum: a hypothesis. *Dendrologia* 21 / 1:41-45.
2. **Carruth, A. 1992.** Free plate tuning II V: American lutherie no-3. Tacoma/WA Guild of american lutherie:42-52.
3. **Dünnwald, H. 1985.** Ein Verfahren zur objektiven Bestimmung der Klangqualität von Violinen. *Acustica* 58:162-169.
4. **Gough, C. 2000.** Science and the Stradivari. *Physics World* 13(4):27-33.
5. **Harvard dictionary of music 2003.** 4. izd. Izd: Don Michael Randel. The Bellknap Press of Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts, London.
6. **Hill, W.H., Hill, A.F., Hill, A.E. 1963.** Antonio Stradivari, his life and work. Dover Publications, New York.
7. **Hsieh, A. 2004.** Cremona revisited: the science of violin making. *Engineering&Science* št. 4:29-35.
8. **Hutchins, C.M. 1976.** Instrumentation and methods for violine testing. V: Benchmark papers in Acoustica, vol. 6 Stroudsburg/PA:Dowden, Hutchinson&Ross, Inc. :3-13.
9. **Hutchins, C.M. 1988a.** Violinen. V: Spektrum der Wissenschaft, Sonderbd: Die Physik der Musikinstrumente. Heidelberg: Spektrum Verlag: 64-77.
10. **Hutchins, C.M. 1988b.** Klang und Akustik der Geige. V: Spektrum der Wissenschaft, Sonderbd: Die Physik der Musikinstrumente. Heidelberg: Spektrum Verlag: 88-98.
11. **Meyer, J. 1979.** Das Klangphänomen der altitalienischen Geigen. V: Musikinstrument, Nr. 8. Frankfurt/m: Verlag Erwin Bochinsky: 1090-1092.
12. **Mayer, J. 1984.** The tonal quality of violins. *The Journal of the Catgut Acoustical Society*.
13. **Ravnikar, B. 1999.** Osnove glasbene akustike in informatike. DZS, Ljubljana.
14. **Richardson, B. 1995.** The physics of the violin. V: The Cambridge Companion to the Violin izd. Robin Stowell str. 30-45. Cambridge University Press.
15. **Schelleng, J.C. 1968.** Acoustical effects of violins varnish. *J. Acoust. Soc. Amer.* Lancaster 44(5):1175-1183.
16. **Schleske, M. 1994.** The influence of changes in the distribution of mass and stiffness of violinplates on eigenfrequencies and mode shapes of the violin. V: SMAC 93 Proc. of the Stockholm music acoustic conference 1993. Royal Swedish Academy of Music no. 19.
17. **Torelli, N. 2005.** Violina I: Najdragocenejši les ali kremonska glorijska. *Les* 57(9):229-238.
18. **Winkel, F. 1967.** Music, sound&sensation. A modern exposition. Dover Publications. New York.
19. **Zopf, S.R. 2000.** Untersuchung neuer und historischer akustisch-optischer Meßmethoden im Geigenbau. Magistrsko delo, Geisteswissenschaftliche Fakultät der Universität Wien.