

# Prečna flavta



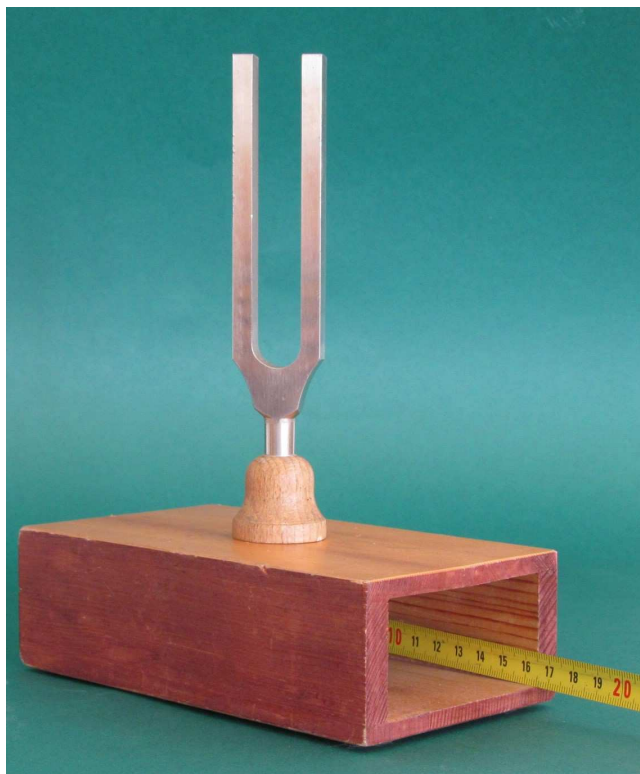
TINE GOLEŽ

→ Prečna flavta me spremlja že iz osnovne šole. Tedaj sem jo uporabljal le kot glasbilo. V gimnaziji pa sem skušal zvok flavte razumeti tudi z vidika fizike, zato sem si zastavil več vprašanj. Na nekatera sem znal odgovoriti, druga pa so morala še malo počakati. A začnimo s kratkim uvodom o piščalih.

## Piščali

Gotovo ste že videli leseno škatlo, na kateri so glasbene vilice za šolsko uporabo. Tej škatli pravimo resonančna škatla (slika 1). Za fizika je tudi trup dragocene violine le »resonančna škatla«, čeprav bi bil violinist nejevoljen ob takem poimenovanju ene izmed svojih največjih investicij, saj so dobra glasbila zelo draga. Vidimo torej, da poimenovanja v fiziki skušajo biti zelo splošna in z besedo ali dvema opišejo veliko različnih predmetov, ki imajo enake lastnosti. Tudi fizikalni izraz piščal zaobjame veliko različnih zvočil.

V fiziki govorimo o treh vrstah piščali: odprta piščal, zaprta piščal in piščal, ki je na eni strani odprta. V piščalih niha stolpec zraka. Fizične lastnosti (dolžina stolpca, temperatura ...) določajo, s katerimi frekvencami bo stolpec zraka nihal. Oglejmo si najprej piščal, ki je na obeh straneh zaprta, saj nas najbolj spominja na nihanje strune, ki ga pred tem obravnavamo pri pouku. Pri struni je šlo za odmike (nihanje) delov strune v prečni smeri, pri piščali pa nihajo plasti zraka v vzdolžni smeri. Na koncu piščali se zrak seveda ne more premakniti, saj je piščal zaprta. Tam se vselej pojavi vozec pomika zraka, kot se pri struni v pritrđišču vselej pojavi vozec (prečnega) pomika strune. Na sredini piščali pa plasti zraka najbolj izdatno nihajo.



SLIKA 1.

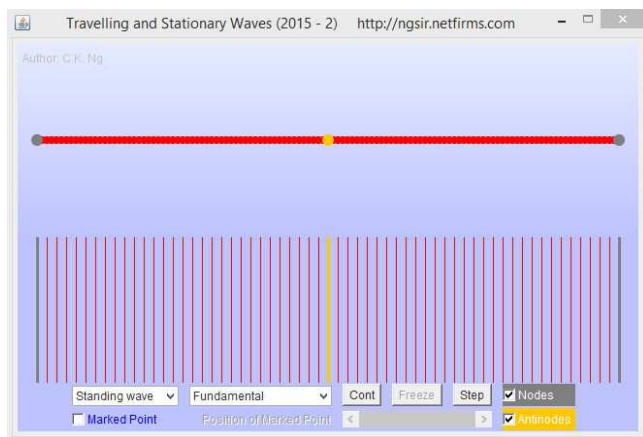
Podobnosti z nihanjem strune še ni konec. Tako kot struna niha z več lastnimi nihanji hkrati, niha tudi stolpec zraka v piščali. Zato je enaka tudi enačba za izračun teh frekvenc. Razlika je le v tem, da pri struni oznaka  $c$  pomeni hitrost potovanja motnje po struni (odvisna je od sile, ki napenja struno, mase strune in njene dolžine), pri piščali pa  $c$  pomeni hitrost zvoka v zraku.

Primerjajmo zaporedne slike nihajoče strune in zraka, ki je zaprt v piščali. Objavo slik, ki so zaslonski posnetki fizikalne simulacije, je dovolil avtor, gospod C. K. Ng.



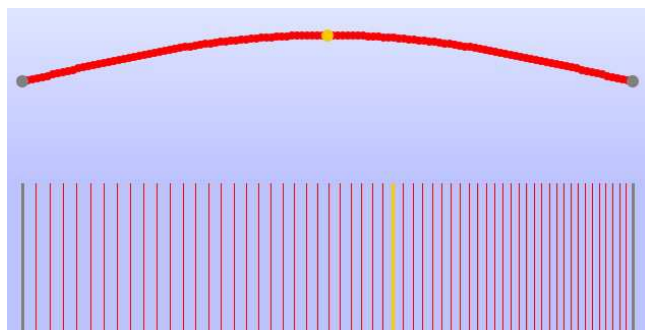


Struno (zgoraj) in zrak (spodaj, gre za plasti zraka) začnemo opazovati, ko potujeta skozi ravnovesno lego. Ob skrajnem robu je s sivo označen del strune, ki je pritrjen, in pri zraku plast zraka ob zaprtju piščali. Z rumeno je označen tisti del snovi (strune oz. zraka), ki najbolj niha in ga imenujemo hrbet (slika 2). Vse čase pri naslednjih slikah štejemo od tega trenutka naprej.



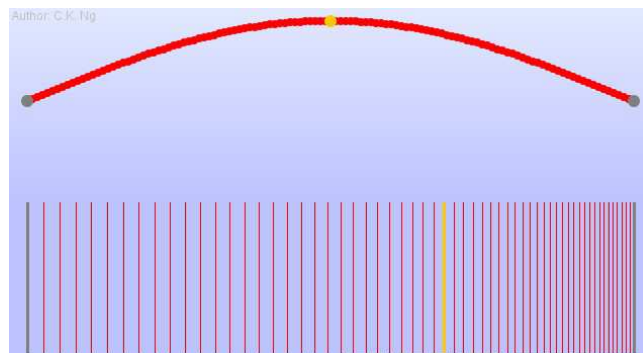
SLIKA 2.

Čez približno desetinko nihajnega časa deli snovi še niso dosegli največjega odmika. Struna niha navzgor, zgoščina v piščali nastaja na desni (slika 3).



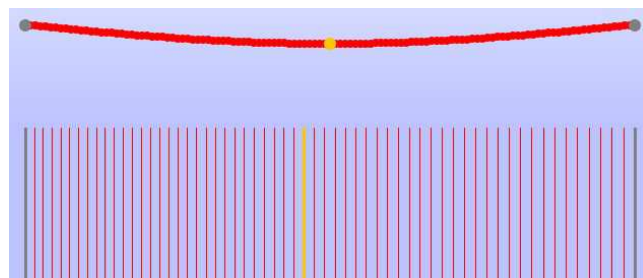
SLIKA 3.

Četrtni nihaja je mimo in deli strune so dosegli največji odmik od ravnovesne lege (navzgor). Hkrati so plasti zraka dosegle največje odmike od ravnovesne lega v desno. Seveda so vse slike močno pretirane, saj so odmiki sicer bistveno manjši (slika 4).



SLIKA 4.

Slika 5 kaže, kje so deli strune in plasti zraka, ko je minilo malo več kot polovica nihajnega časa. Bralcem priporočamo ogled simulacije <http://ngsir.netfirms.com>.



SLIKA 5.

Pri prvem lastnem načinu nihanja (t. j. stoječe valovanje, ki nastane z združitvijo dveh potujočih) je na struni opaziti polovico valovne dolžine, prav tako v piščali. Pri struni imamo (na tretji sliki) hrib, do polne valovne dolžina manjka še dolina vala. Pri piščali pa imamo razdaljo od sredine zgoščine do sredine razredčine. Če bi to razdaljo podaljšali v levo še do naslednje zgoščine, bi imeli celo valovno dolžino. Označimo dolžino strune (piščali) z  $b$ . Zaradi povedanega je valovna dolžina enaka  $2b$ . Za vsa valovanja pa velja:

$$\blacksquare c = \lambda v$$

Zato je:

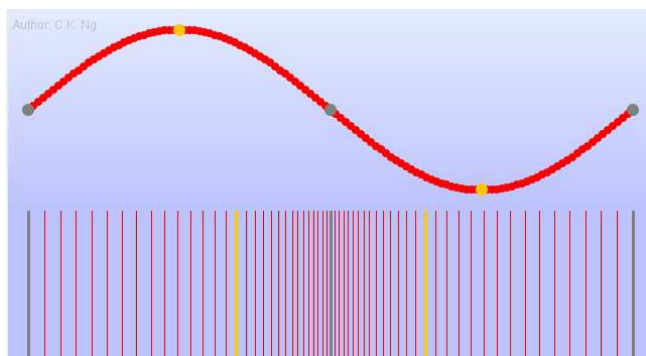
$$\blacksquare c = 2bv$$

In končno:

$$\blacksquare v_1 = \frac{c}{2b}$$

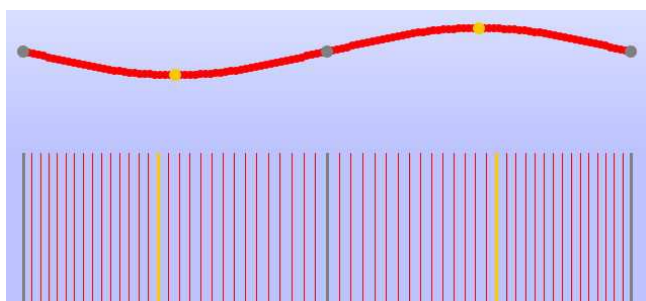
Indeks 1 smo dodali, ker gre za osnovno frekvenco, saj je v igri osnovno lastno nihanje. Poglejmo, kolikšna je lastna frekvenca pri naslednjem lastnem nihanju. Tokrat je na struni (ali v piščali) cela valovna dolžina.

Pri prvem višje harmonskem nihanju se na sredini strune pojavi vozlel odmika, prav tako na sredini piščali. Tisti delček strune je ves čas pri miru, prav tako tista plast zraka v piščali, kar kaže slika 6.



SLIKA 6.

Od prejšnje slike je minilo malo več kot četrtnina nihajnega časa. Z rumeno označena točka niha proti nasprotni skrajni legi, s sivo označena točka (oz. črta pri piščali) pa ves čas miruje (slika 7).



SLIKA 7.

Ker je v piščali tokrat cela valovna dolžina, velja zveza  $\lambda = 2b$ . Zato je frekvenca drugega lastnega nihanja (ali prvega višje harmoničnega nihanja) enaka:

$$\blacksquare v_2 = \frac{c}{b}$$

Poljubna frekvenca lastnega nihanja je enaka:

$$\blacksquare v_n = N \frac{c}{2b}$$

Kadar je na struni pet vozlov (vozlov na pritrdiščih ne štejemo), gre za peto lastno nihanje ali četrto višje harmonsko nihanje strune (ali zraka v piščali). Meritve kažejo, da potrzana struna in piščali nihajo z več lastnimi nihanji hkrati. Pravzaprav to zaznajo tudi ušesa, saj ločijo zven glasbenih vilic (zveni le osnovna frekvenca) od zvoka inštrumenta, ki igra isti ton, kot ga oddajajo glasbene vilice. Tedaj poleg osnovne frekvence zvenijo še celoštevilski večkratniki osnovne frekvence.

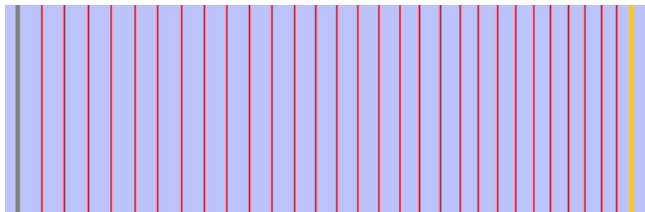
Pri piščali, ki je na obeh straneh odprta, bodo prav pri obeh odprtinah plasti zraka najbolj nihale. Na sredi piščali pa se bo pojavil vozlel; tam plasti zraka ne nihajo. A tudi tokrat je v piščali točno polovica valovne dolžine, zato so lastne frekvence take piščali kar enake lastnim frekvencam piščali, ki je na obeh straneh zaprta in smo jih ravnokar zapisali.

Oglejmo si še lastne načine nihanja zraka v piščali, ki je le na enem koncu odprta. Orglavci ji pravijo tudi pokrita piščal. Na zaprtem koncu je seveda vozlel pomika, medtem ko je na odprtem hrbet. Sedaj je v piščali samo ena četrtnina valovne dolžine. V jeziku glasbe to pomeni, da bomo dobili za oktavo nižji ton tako, da bomo (obojestransko odprto) piščal na enem koncu zaprli. A lastne frekvence tokrat niso več celoštevilski večkratniki osnovne frekvence, pač pa le lihi večkratniki. Zvok take piščali je nekoliko bolj zamolkel, saj v njem ni sodih večkratnikov osnovne frekvence. In kaj bi bila primerjava za tovrstno piščal? Struna seveda ne, kar dobra primerjava pa bi bilo daljše ravnilo, ki ga z eno roko tiščimo ob mizo, z drugo pa zanihamo, da niha čez rob mize. Tudi pri takem ravnilu gre za nihanja s frekvencami, ki so lihi večkratniki osnovne frekvence.

Siva črta predstavlja zaprti del piščali, kjer nastane vozlel pomikov plasti zraka. Rumena črta pa kaže plast zraka tik ob ustju piščali (slika 8). Tam plasti zraka najbolj izdatno nihajo, tlak se tam ne



spreminja. V taki piščali imamo pri osnovnem lastnem nihanju le četrtn vala, saj je skrajno leva razredčina, skrajno desna pa plast, kjer ni prišlo do spremembe gostote; ta razdalja je le četrtnina valovne dolžina.



SLIKA 8.

Tokrat velja  $\lambda = 4b$ . Zato je frekvenca prvega lastnega nihanja enaka:

$$\nu_1 = \frac{c}{4b}$$

Vrnimo se h glasbenim vilicam. Vemo, da je frekvenca 440 Hz. Ali je morda votlina resonančne škatle pod glasbenimi vilicami neke vrste piščal, ki je na eni strani zaprta?

Vsekakor bi morala biti tudi lastna frekvenca te piščali 440 Hz, če naj služi kot resonator. Upoštevamo še, da je hitrost zvoka 340 m/s.

$$\nu_1 = \frac{c}{4b}$$

in od tod dobimo  $b = 19$  cm. Votlina resonančne škatle pod glasbenimi vilicami je globoka le slabih 17 centimetrov. So se izdelovalci zmotili? Ne, a o tem malo pozneje.

Cenena škatla, ki je pod glasbenimi vilicami, omogoča prav lep zvok (slika 1). A violinist mora zaigrati več kot en sam ton. Violinist mora biti sposobna resonance pri zelo različnih frekvencah in zato je tako po obliki, izdelavi ter seveda ceni neprimerljiva s škatlo, ki je pod glasbenimi vilicami.

## Flavta

Sedaj smo razložili osnovne stvari o piščalih in zato bomo razumeli, za kaj gre pri vprašanjih, ki so bila napovedana v uvodnih vrsticah. Začnimo. Ali je prečna flavta – fizikalno gledano – piščal, ki je na obeh straneh odprta? Pri igranju flavte obstaja le

majhna reža med ustnicami in ustnikom. Smemo to režo zanemariti in obravnavati flavto kot piščal, ki je na enem koncu zaprta? Pot do odgovora je nadvse preprosta. Poprosimo flautista, da zaigra le na del flavte, ki mu pravimo glava. Ključna bo sprememba zvoka, ko bomo pokrili konec cevi. Premislimo! Če flavta deluje kot piščal, ki je na enem koncu zaprta, potem bo po zaprtju drugega konca to postala piščal, ki je na obeh straneh zaprta. Osnovna frekvenca se bo zato podvojila; v jeziku glasbe bi ugotovili, da gre za oktavo višji ton.

In še predpostavka, da flavta deluje kot piščal, ki je na obeh straneh odprta. V tem primeru bi po zaprtju enega konca flavte to postala polodprta piščal. Pričakovali bi, da se frekvenca prepolovi; glasbenik bi rekel, da se bo ton za oktavo znižal.

Razsodnik v fiziki je poskus. Flautist naj najprej zaigra le na glavo flavte (del flavte, na katerem je ustnik), potem pa še na zaprto glavo flavte. Hitro prepoznamo, da se je ton znižal skoraj točno za oktavo. Prva ugotovitev je kot na dlani: flavta deluje kot piščal, ki je na obeh straneh odprta. A poskus, ki je odgovoril na eno vprašanje, je odprl drugo: zakaj se frekvenca ni natančno prepolovila, zakaj se je zvok znižal za malo manj kot oktavo.

Odgovora na to vprašanje ne omenjamo prav pogosto. V (šolski) fiziki se največkrat zadovoljimo s »prvim približkom«, ki z bolj preprosto enačbo manj natančno opiše opazovani pojav. A tokrat povejmo, za kaj gre. Učinek piščali ni tak, kot je fizična dolžina same cevi. Morda si predstavljamo, kot da zrak na koncu piščali takoj po izstopu iz cevi ne »občuti«, da je prišel na svobodo. V resnici piščal deluje tako, kot da je cev malenkost daljša, približno za polovico polmera piščali. Na zaprtem delu piščali pa takega popravka ni.

In že lahko odgovorimo na vprašanje o velikosti resonančne škatle pod glasbenimi vilicami. Škatla je nekoliko krajša, saj je učinek tako široke piščali, kot bi lahko imenovali votlino v resonančni škatli, tak, kot da bi bila piščal še nekako dva centimetra daljša.

## Ogrevanje

Že v osnovni šoli sem vedel, da se stvari, ki jih se-grejemo, nekoliko podaljšajo. Pri igranju flavte pa se to ni ujemalo s tem, kar sem opažal. Vedel sem, da krajša cev pomeni višji ton in obratno. Po drugi

strani pa sem opažal, da se dogaja ravno nasprotno. Če je bila flavta še neogreta in sem zaigral izbrani ton, je ta po nekaj minutah igranja postal nekoliko višji; fizikalno bi rekli, da se je povečala frekvenca. Učinek je bil, kot da bi se cev skrčila in ne podaljšala. In to je že tretje vprašanje učenca flavte, ki razmišlja tudi fizikalno.

V glasbeni šoli so nas učili, da moramo flavto vselej najprej ogreti, potem pa se šele lotimo uglaševanja. Navadno je bilo potrebno nekoliko izvleči glavo flavte iz trupa flavte, morda za nekaj milimetrov, pa sta bila flavta in klavir uglašena. Čim bolj smo jo izvlekli, tem nižji je bil ton oz. manjša frekvenca. Ne znatno, za kak odstotek ali še manj.

Ugotovitev, da se s segrevanjem flavta nekoliko podaljša, je povsem točna. A podaljšek je zelo majhen, saj ne presega desetinke milimetra. V igri mora biti še nekaj, kar vpliva na višino intonacije, kot pravimo majhnim spremembam (glasbenega) tona. Odgovor na to vprašanje najdemo že v srednješolskih učbenikih. Hitrost zvoka je zelo odvisna od temperature. Če vemo, kolikšna je hitrost zvoka ( $c_0$ ) pri dani temperaturi ( $T_0$ ), potem hitrost pri poljubni temperaturi izračunamo kot

$$\blacksquare c = c_0 \sqrt{\frac{T}{T_0}}.$$

Ne pozabimo, da je potrebno temperaturo vstaviti v kelvinih!



SLIKA 9.

<http://tupian.baikē.com/11221/1.html>

Ocenimo, da je temperatura zraka v flavti ob začetku igranja kakih 25 °C, po nekaj minutah pa naraste na 30 °C. To pomeni, da se je hitrost povečala skoraj za odstotek. Flavta se je ob tem zanemarljivo malo podaljšala. Zaradi stalne dolžine in s tem valovne dolžine se spremeni frekvenca za enako vrednost kot hitrost. Če je ton  $a$  zvenel na neogreti flavti s frekvenco 440 Hz, bo na ogreti višji, saj bo zvenel s frekvenco 443 Hz (pri omenjenih temperaturah). Uho je dokaj natančno in tolikšna razlika je hudo moteča. Ugotovili smo, da je za spremembo frekvenca odgovorna spremenjena hitrost in ne podaljšanje flavte. Hkrati pa smo še s fizikalnega vidika potrdili staro modrost, da je uglaševanje pihal (in trobil) smiselno šele tedaj, ko je inštrument ogret na delovno temperaturo.

### Delovanje flavte

Težko je verjeti, da najdemo odgovor o delovanju flavte lahko tudi v – oblakih! No, ne za celotno delovanje, pač pa za začetek nastanka tona. Oblaki na sliki so potovali po nebu, a so naleteli na oviro, precej špičast gorski vrh. Niso se enakomerno razporedili okoli ovire, pač pa so nekaj časa večinoma potovali po levi, pa spet po desni in tako naprej (slika 9). Vrtinci, ki so posledica izmeničnega »oblivanja« po levi in desni, nas ne zanimajo. Bistvena stvar je stalna menjava strani, po kateri mimo vrha gore potuje več zraka.

Natančno to se dogaja pri nastanku tona, ko igra mo flavto. Zrak pihamo v ozkem curku na rob ustnika. Tudi ta curek zraka ne potuje po obeh straneh roba tako, da bi bil nekako polovično razpolovljen. Kar naprej se menja delež zraka, ki pristane v flavti oz. ki ga pihnemo mimo. Bistvena razlika med oblaki in pihanjem v flavto je seveda frekvenca. Medtem ko menjava odločilne smeri obhoda pri gori traja najbrž nekaj minut, se pri flavti lahko zamenja tudi tisočkrat na sekundo.

Sedaj smo spregovorili o podobnosti, a kako bi si razložili vzrok za stalno nihanje curka zraka. Začnimo takole. V nekem trenutku malo več zraka zavije na eno stran. Tam se zaradi večje količine zraka hitrost zato zmanjša. Na drugi strani je hitrost ostala enaka. Toda kjer je manjša hitrost (in malenkost več zraka), je malo večji tlak. Zato se del zraka iz tega zastoja preusmeri na drugo stran. In zgodba se obrne.





Frekvenca zvoka, ki nastaja na robu ustnika, v kateremga pihamo zrak pri flavti, je odvisna tako od hitrosti curka zraka kot tudi od oddaljenosti ustnic od roba ustnika. Brez kakšne posebne misli na fiziko, le iz poskusov in učiteljevih nasvetov, to učenci flavte hitro spoznajo. Za višje tone poskrbijo tako, da ustvarijo nekoliko hitrejši curek zraka in se z ustnicami malo približajo robu ustnika. Po nekaj letih šolanja znajo oboje zares natančno uravnati, tako da z razmeroma malo »sape« (za lep ton ni potrebno veliko pihati, a do tega spoznanja se pride z vajo) igrajo flavto z lepim tonom. Seveda je v igri tudi spreminjanje napetosti ustnic in s tem odprtine, skozi katero pihamo zrak.

Celotna flavta deluje kot neke vrste povratni mehanizem. Lastna frekvenca stolpca zraka (in njeni celoštevilski večkratniki) v flavti je tisto, kar slišimo kot zvok flavte. Hkrati pa ravno to nihanje zraka povratno vpliva na frekvenco preusmerjanja zračnega curka ob robu ustnika, ki jo nekako stabilizira. A ko želi flavtist zaigrati drug ton, bo to stabilnost pokvaril ter »naciljal« novo frekvenco in to novo mu bo spet pomagal obdržati nihajoči zrak v flavti. Nekaj podobnega se dogaja pri vožnji kolesa. Vsi znamo kolesariti brez rok. Za stabilnost poskrbita kolesi. Potem se nekoliko nagnemo in zavijemo. In spet nam kolesi poskrbita za stabilnost.

### Še to in ono

Gotovo je v vsakem razredu vsaj en učenec ali dijak, ki igra prečno flavto. Res bi bilo škoda, da pouka ne bi popestrili z nekaj realistične fizike. Seveda je podroben opis fizike flavte tema, ki po zahtevnosti sodi v doktorske disertacije iz fizike; v šoli se pač zadovoljimo s približnimi razlagami.

Energija, ki jo flavta oddaja v obliki zvoka, je komaj odstotek energije, ki jo ima zrak (kinetična energija), ki ga pihamo. Tak izkoristek ni nič tragičnega, saj so naša ušesa zelo občutljiva za zvok. Če hočemo igrati bolj glasno, moramo povečati količino zraka, ki ga pihamo, kar največkrat pomeni tudi večjo hitrost. A večja hitrost bi pomenila tudi večjo frekvenco (in malenkost višji ton), kar pa preprečimo s tem, da z rahlim zasukom flavte zmanjšamo razdaljo med ustnicami in robom ustnika. Zato moramo za igranje flavte imeti dober posluš, da ustrezno popravljamo sicer majhne spremembe intonacije.

Pri kljunasti flavti je bolj nerodno. Kanal zraka je ves čas enako oddaljen od roba, na katerem niha curek zraka. Tudi zato je prečna flavta prevzela mesto sicer v baroku zelo razširjene kljunaste flavte. Novejša stilna obdobja so zahtevala večje razlike v glasnosti posameznih delov skladb, kar je bilo na prečni flavti mogoče doseči, ne da bi se znatno spremenila intonacija.

O eni stvari pa nismo spregovorili, a ta je najbrž vsem jasna. Dolžino stolpca zraka, ki niha v flavti, spreminjamo tako, da z zaklopkami pokrijemo luknje v flavti in tako je odločilna le dolžina flavte do prve odprtine. A teh odprtini je manj, kot lahko zaigramo tonov. Zato na koncu omenimo še prepričanje. Kar veliko prijemov na flavti je takih, ko z nekoliko močnejšim pihanjem ob nespremenjeni postavitvi prstov zazveni za oktavo višji ton.

Sedaj nekoliko razumemo delovanje prečne flavte. Morda pri prvem naslednjem poslušanju ali igranju nekoliko pomislite na to, kar ste ob branju tega članka spoznali. Potem se pa spet prepustite le tistemu posebnemu užitku, ki nam ga zmore nuditi samo glasba.

× × ×

## Križne vsote



→ Naloga reševalca je, da izpolni bele kvadratke s števki od 1 do 9 tako, da bo vsota števk v zaporednih belih kvadratih po vrsticah in po stolpcih enaka številu, ki je zapisano v obarvanem kvadratu na začetku vrstice (stolpca) nad (pod) diagonalo. Pri tem morajo biti vse številke v posamezni vrstici (stolpcu) različne.

	8	13			
16			12		
14				12	
		9			17
			9		
			14		

× × ×