

Dutinové či **vanové rezonátory** se používají v případě, kdy délka trubicového rezonátoru by byla již neúnosná, a nebo u nástrojů v basové poloze většinou s omezeným tónovým rozsahem. Z prostorových důvodů je často připojen jeden dutinový rezonátor k více kamenům (např. u basového xylofonu). Naladění rezonátoru představuje v tomto případě určitý kompromis s rozdílným účinkem na tóny jednotlivých kamenů.

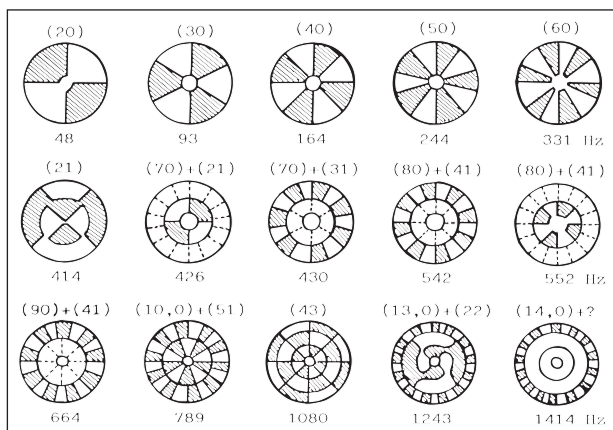
K **vyladěným samozvučným** nástrojům patří také orchestrální zvony tvořené **trubicovými tyčemi** různé délky. Rozložení frekvencí převažujících ohybových rezonančních módů tvoří zcela **neharmonickou řadu** $0.24 : 0.64 : 1.23 : 2 : 2.91 : 3.96 : 5.12 : 6.37$ s neustále se zvětšujícími frekvenčními vzdálenostmi. Proto také žádný vlastní mód neurčuje přímo vnímanou výšku, která je zprostředkována jako reziduální tón z řady módů s nejvíce harmonickými poměry frekvencí. Toto je příčinou problematického ladění orchestrálních zvonů.

U **nevyladěných samozvučných** nástrojů tvoří **oscilátor** tenká deska převážně kruhového miskového tvaru. Řešení značně zjednodušené vlnové rovnice pro ohybové kmity takové desky vede k lineární kombinaci Besselových funkcí při okrajových podmínkách: zcela volné desky, na okraji sevřené desky, nebo desky jednoduše podepřené. Ve všech případech je řada frekvencí rezonančních módů též **zcela neharmonická**. V případě miskového až zvonového tvaru desky je frekvence základního módu závislá též na amplitudě kmitů. Tento nelineární posuv frekvence je příznačný pro nejrůznější typy gongů, tam-tamů a jim podobných nástrojů.

U činelu jsou nejnižší rezonanční módy velmi podobné módům tenké rovné desky resp. membrány. Je-li činel podepřen ve svém středu, mají uzlové čáry prvních pěti event. šesti módů jednoduchou radiální orientaci od středu k okraji (*obr. 6.59*). Na vyšších frekvencích jsou však rezonanční módy tvořeny jako kombinace dvou i více současně se uplatňujících módů. Frekvenci módů kmitů tenké kruhové desky, tedy i činelu lze určit pomocí modifikovaného tvaru tzv. **Chladniho zákona**:

$$f = \text{konst.} (m + 2n)^p \quad [6.38]$$

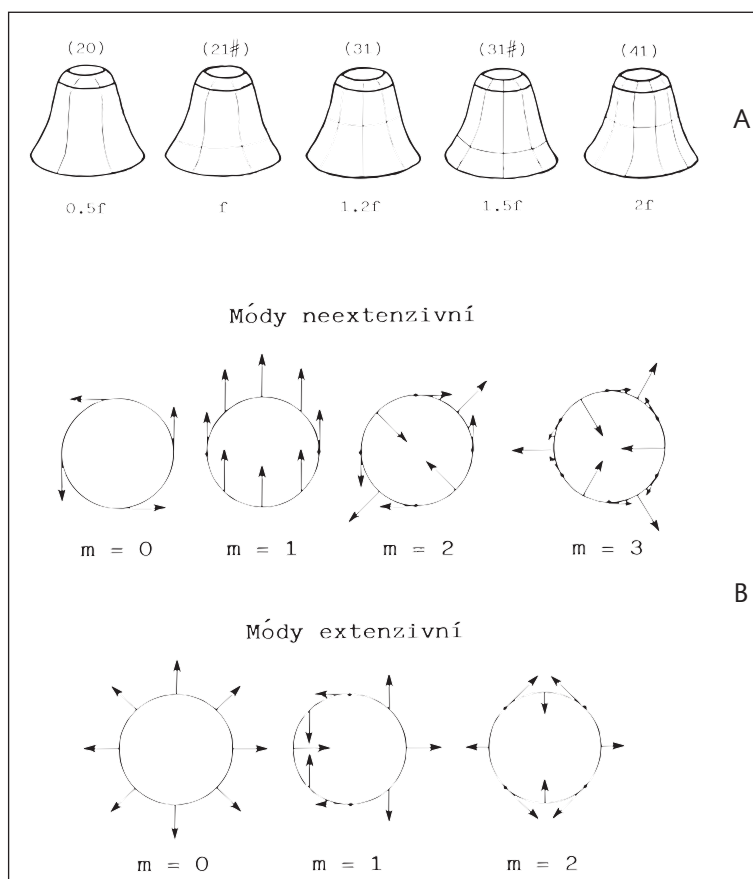
kde m ... počet radiálních uzlových čar, n ... počet kruhových uzlových čar a $p = 2$ pro rovné kruhové desky, $p < 2$ pro miskové desky, např. činely.



Obr. 6.59 Rezonanční módy činelu (*lit. 16*)

Ještě složitější rezonanční módy, tzv. **multimódy** i rozložení jejich frekvencí vykazují např. tam-tamy, gongy, krotaly a deskové zvony, které se jako obecné oscilátory chovají z velké části nelineárně. Vysoký počet neharmonicky uspořádaných módů kmitání je příznačný též pro triangel.

Typickým frekvenčním uspořádáním svých rezonančních módů se vyznačují kostelní zvony (bells) – s vnitřním buzením srdcem, a zvonohry (carillons) – s vnějším buzením kladívkem. **Zvon** ve svém akustickém zjednodušení představuje extrémně tvarovaný dvourozměrný oscilátor, jeho skutečné vlastnosti se však s chováním desky už jenom velmi málo slučují. Vibrace zvonu jsou lineární kombinací celé řady rezonančních módů, jejichž amplituda je určována buzením zvonu. V praxi se sledují povrchové uzlové čáry, které jsou pro prvních 5 módů (mn) laděného zvonu zobrazeny na obr. 6.60A.



Obr. 6.60 Rezananční módy laděného zvonu a jeho pohyby (lit. 16)

Módy (20), (31) a (41) jsou přiřazeny okraji či prstenci zvonu, kdežto módy (21#), (31#) a další souvisejí s kmitáním skořepiny zvonu, a obojí jsou označovány za tzv. **neextenzivní** módy. Pohyby zvonu v horizontálním řezu jsou schematicky znázorněny na obr. 6.60B. U neextenzivních módů pro $m = 0$ je pohyb zvonu ryze „kroutivý“, pro $m = 1$ je pohyb ryze „houpavý“. Příklad $m = 2$ je typický též pro pohyb skleniček, které jsou rozkmitávány

vlhkým prstem. **Extenzivní** módy souvisejí s rozpínáním zvonu resp. jeho materiálu a pro $m = 0$ je pohyb zvonu označován jako „dýchání“. Uvedené nejnižší rezonanční módy nejsou běžně zjistitelné, je jim však přisuzován vliv na subjektivní vjem především v oblasti velmi nízkých frekvencí.

Frekvenční rozložení rezonančních módů laděného zvonu přináší následující tabulka, ze které jsou zřejmé typické intervalové vztahy, zejména pak „terciový“ charakter tónu zvonu.

Mód	Název parciálního tónu	Tón	Ladění čisté	Ladění temp.	Ladění reálné
(20)	Hum („hukot“ zvonu)	d	0.500	0.500	0.500
(21#)	Prime (základní tón)	d ¹	1.000	1.000	1.000
(31)	Tierce (malá tercie)	f ¹	1.200	1.189	1.183
(31#)	Quint (kvinta)	a ¹	1.500	1.498	1.506
(41)	Nominal (oktáva)	d ²	2.000	2.000	2.000
(41#)	Deciem (velká tercie)	fis ²	2.500	2.520	2.514
(22)	Undeciem (kvarta)	g ²	2.667	2.670	2.662
(51)	Duodeciem (kvinta)	a ²	3.000	2.997	3.011
(61)	Double octave (oktáva)	d ³	4.000	4.000	4.166
(71)	Undeciem (kvarta)	g ³	5.333	5.339	5.433
(81)	 (velká sexta)	h ³	6.667	6.727	6.796
(91)	Triple octave (oktáva)	d ⁴	8.000	8.000	8.215

Tab. 6.7

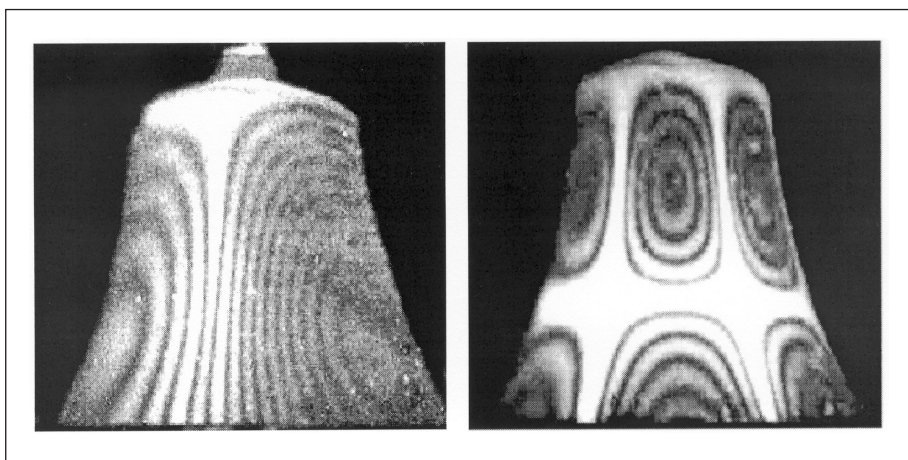
Uvedené frekvenční poměry platí pro laděné zvony, většina kostelních zvonů však parciální tóny přesně vyladěné nemá. Při nárazu srdce či kladívka do zvonu vzniká většinou zcela mimotonální **nárazový** (úderový) **tón**, zvaný též „hlavní“, s velkým množstvím neharmonicky rozložených parciálních tónů. Úroveň těchto parciálních tónů však velmi rychle s časem klesá a nárazový tón se zcela nebo částečně ztotožní se základním tónem zvonu. Nárazový tón je z psychoakustického hlediska reziduálním tónem rezonančních módů (41), (51) a (61) a u kvalitních zvonů se shoduje se základním tónem – **primou**. V případě rozladění nárazového tónu a primy dochází k více či méně zjevnému „houpání“ tónu po každém úderu. U velmi velkých zvonů se ještě vyskytuje tzv. **sekundární** (nárazový) tón jako reziduální tón rezonančních módů (61), (71), (81) a (91), který je v kvartovém vztahu k tónu primárnímu. Nárazové tóny se zřetelně vyskytují u velkých zvonů a určují vjem výšky jejich tónu. Proto je snahou zvonařů dosáhnout naprosté shody nárazového tónu a primy, zejména v případě zvonů určených pro zvonohry. U malých zvonů je intenzita úderových tónů velmi nízká a výška jejich tónu je určena rezonančními módy (20), (21#) a (41).

Pod základním tónem se ve zvuku zvonu vyskytuje tzv. **hum** („hukot“), který je u současných zvonů jeho spodní oktávou. Avšak u gotických a renezančních zvonů se hum často nalézá v intervalu spodní septimy či dokonce sexty, a to v důsledku buď záměrné konstrukce profilu zvonu nebo naopak chyby jeho výpočtu či odliť.

Pro zvony stejného profilového tvaru, ale rozdílné hmotnosti platí mezi frekvencemi jejich úderových tónů vztah:

$$\frac{f_1}{f_2} = \sqrt{\frac{m_2}{m_1}} \quad [6.39]$$

Přítomnost charakteristické **malé tercie** v tónu zvonu je do značné míry dána klasickým tvarem zvonu. Výskyt durové tercie je u starých zvonů vždy spojen s nějakou chybou technologie jejich výroby. Záměrně konstruované zvony s rezonančním módem (31) naladěným nikoliv na malou, ale na velkou tercii, mají atypický tvar (s rozšířením uprostřed) a zvukově působí nezvykle až nepřírozně. Na výsledný zvuk zvonu má kromě jeho vlastní konstrukce a materiálu velký vliv též velikost, tvar a tvrdost srdce či kladívka a současně také místo a velikost úderu.



Obr. 6.61 Interferogramy kmitů zvonu pro módy (20) a (41) (lit.15)