

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

ANALÝZA SPEKTRA A SMĚROVOSTI LESNÍHO ROHU S RŮZNÝMI NÁTRUBKY I RŮZNĚ PRUŽNÝMI REZONÁTORY

THE ANALYSIS OF SPECTRUM AND POLAR PATTERN OF FRENCH HORN WITH DIFFERENT
MOUTHPIECES AND DIFFERENT ELASTIC RESONATORS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Stanislav Holba

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

MgA. Mgr. Ondřej Jirásek, Ph.D.

BRNO 2020

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Audio inženýrství**
specializace Zvuková produkce a nahrávání
Ústav telekomunikací

Student: Stanislav Holba

ID: 195790

Ročník: 3

Akademický rok: 2019/20

NÁZEV TÉMATU:

Analýza spektra a směrovosti lesního rohu s různými nátrubky i různě pružnými rezonátory

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Změřte a vyhodnoťte vybrané tóny hrané stejným hráčem nebo umělými ústy na různé lesní rohy s různými nátrubky. Zaměřte se na mechanické vlastnosti nástroje (hustotu korpusu, tvar a objem nátrubku) a vyhodnoťte i barvu generovanou v různé dynamice. Porovnejte spektra - zastoupení harmonických složek a jejich intenzitu. Rovněž porovnejte směrové vyzařování nástrojů. Výstupem budou komparační tabulky spekter, zvláště porovnání 1. až 8 harmonické složky v prvním pásmu, porovnání intenzit lichých a sudých složek, srovnání center a rozpětí formantových oblastí. Získaná mechanická a akustická data dejte do souvislosti s typy lesních rohů a nátrubky i s psycho akustickými veličinami při vnímání barvy.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] Geist, B.: Akustika - jevy a souvislosti v hudební teorii a praxi. Praha: MUZIKUS s.r.o., 2005. ISBN 978-8086253312.

[2] Syrový, V.: Hudební akustika. Praha: AMU, 2003. ISBN 978-80-7331-127-8.

Termín zadání: 3.2.2020

Termín odevzdání: 8.6.2020

Vedoucí práce: MgA. Mgr. Ondřej Jirásek, Ph.D.

doc. Ing. Jiří Schimmel, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Abstrakt:

Tato bakalářská práce pojednává o lesním rohu a nátrubcích pro tento nástroj. Stručně popisuje lesní roh, jeho strukturu, výrobní materiály, historii a vývoj a možnosti popisu zvukové barvy. Dále je v práci vysvětleno použití algoritmu rychlé Fourierovy transformace v kontextu analýzy. Následuje výpis vlastností jednotlivých nástrojů a nátrubků, použitých pro analýzu. V práci jsou následně porovnány vybrané tónové vzorky přirozených i ventilových lesních rohů různých výrobců, jejich harmonická spektra a směrové charakteristiky. U konkrétních tónů je uveden výpis některých psychoakustických veličin. Získané hodnoty jsou dány do souvislosti s mechanickými vlastnostmi jednotlivých nástrojů a nátrubků.

Klíčová slova:

analýza spektra, barva zvuku, Fourierova transformace, lesní roh, nálevka, nátrubek, směrové charakteristiky, žesťový nástroj

Abstract:

This bachelor thesis deals with the French horn and adjusting mouthpieces for this instrument. The work briefly describes the French horn, its structure, production materials, history and development, and the description of the timbre possibilities. Furthermore, the work explains the use of the fast Fourier transform algorithm in the context of analysis. A list of characteristics features of individual tools and mouthpieces used for analysis follows. The work then compares selected tone samples of natural and valve French horns from various manufacturers, their harmonic spectra, and directional characteristics. For specific tones, a list of chosen psychoacoustic quantities is given. The obtained values are linked with the mechanical characteristics of individual instruments and mouthpieces.

Keywords:

brass instrument, Fourier transform, French horn, funnel, mouthpiece, spectral analysis, timbre, polar patterns

Bibliografická citace:

HOLBA, Stanislav. *Analýza spektra a směrovosti lesního rohu s různými nátrubky i různě pružnými rezonátory*. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/125863>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce Ondřej Jirásek.

Prohlášení

„Prohlašuji, že tuto bakalářskou práci na téma „*Analýza spektra a směrovosti lesního rohu s různými nátrubky i různě pružnými těly (rezonátory)*“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 8. 6. 2020

.....
podpis autora

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval panu Mgr. MgA. Ondřeji Jiráskovi Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy a rady při zpracovávání této práce.

V Brně dne 8. 6. 2020

Stanislav Holba

Obsah

Úvod	10
1 Konstrukce a historie vývoje lesního rohu	11
1.1 Obecný popis nástroje	11
1.2 Popis částí nástroje	12
1.3 Vlastnosti nátrubku lesního rohu	13
1.4 Historie lesního rohu	15
2 Hra na lesní roh	18
2.1 Tvorba tónu	18
2.2 Harmonická řada tónů	18
2.2.1 Ladění lesního rohu	19
2.2.2 Ventilový systém	19
3 Témbr aneb barva zvuku	21
3.1 Základní teorie o barvě zvuku	21
3.2 Směrová charakteristika	23
3.2.1 Směrová charakteristika lesního rohu	24
4 Spektrum zvuku	26
4.1 Spektrum lesního rohu	27
4.2 Aplikace Fourierovy transformace na digitální signály	27
4.3 Lineární prediktivní kódování	29
4.4 Objektivní vyjádření subjektivního zvukového vjemu	29
5 Postup měření	31
5.1 Složení nahrávacího řetězce	31
5.2 Charakteristika měřených nástrojů	32
5.2.1 Použité lesní rohy a lesnice	32
5.2.2 Vlastnosti výrobních materiálů a vliv na zvukovou barvu	35
5.3 Charakteristika nátrubků	36
5.3.1 Použité nátrubky	36
5.3.2 Vlastnosti nátrubků a jejich vliv na zvukovou barvu	38
5.4 Nahrávání vzorků	41
6 Analýza naměřených dat	43
6.1 Realizace analýzy v programu Matlab	43
6.2 Časová spektrální analýza	44
6.3 Analýza tónu F	45
6.4 Analýza tónu a	49
6.5 Analýza tónu h^1	52
6.6 Srovnání psychoakustických veličin – F řada	56
6.7 Analýza tónu B_1	57
6.8 Analýza tónu a	61
6.9 Analýza tónu b^1	63
6.10 Srovnání psychoakustických veličin – B řada	66
Závěr	68
Literatura a zdroje	69
Seznam příloh	71
Přílohy	72

Seznam obrázků

Obr. 1.1: Části jednoduchého lesního rohu	13
Obr. 1.2: Průřez nátrubkem lesního rohu (nálevkového).....	13
Obr. 1.3: Kotlíkový nátrubek určený pro trubku.	14
Obr. 3.1.: Vyzařovací laloky lesního rohu ve vertikální rovině	24
Obr. 3.1.: Vyzařovací laloky lesního rohu v horizontální rovině	25
Obr. 3.3: Modulová kmitočtová charakteristika tónu F: a) s odrazem, b) napřímo.....	25
Obr. 4.1: Modulová kmitočtová charakteristika spektra tónu c.....	26
Obr. 4.2: Zobrazení diskrétního a kombinovaného spektra signálu	27
Obr. 5.1: Rozestavení měřicích mikrofonů a pozice hráče během nahrávání	31
Obr. 5.2: Lesní roh zn. Josef Lidl LHR 867	32
Obr. 5.3: Lesní roh V. F. Červený CHR 681	33
Obr. 5.4: Lesní roh zn. Josef Lidl LHR 321Z.....	33
Obr. 5.5: Lesní roh zn. Josef Lidl LBG 282G	34
Obr. 5.6: Lesní roh zn. Amati Kraslice ABG 283K	34
Obr. 5.7: Lesní roh zn. M. Jiráček & sons 124	35
Obr. 5.8: Nátrubek zn. Vincent Bach, typ 10	36
Obr. 5.9: Nátrubek zn. Denis Wick, typ 5	37
Obr. 5.10: Nátrubek zn. Engelbert Schmid, typ 7,5.....	37
Obr. 5.11: Nátrubek zn. Amati HR 11	37
Obr. 5.12: Retný tón a (220 Hz)	38
Obr. 5.13: Nátrubkový tón a (220 Hz) – nátrubek Vincent Bach 10.....	38
Obr. 5.14: Spektrum nálevkového a kotlíkového nátrubku - porovnání	40
Obr. 6.1: Časový průběh tónu c ₁ v dynamice forte	44
Obr. 6.2: Nepřesné nasazení tónu h ¹	44
Obr. 6.3: Určení formantových oblastí tónu F u měřených lesních rohů	47
Obr. 6.4 – 6.7: Směrová charakteristika tónu F	48 - 49
Obr. 6.8: Určení formantových oblastí tónu a u měřených lesních rohů.....	50
Obr. 6.9 – 6.12: Směrová charakteristika tónu a	51 - 52
Obr. 6.13: Určení formantových oblastí tónu h ¹ u měřených lesních rohů	54
Obr. 6.14 – 6.17: Směrová charakteristika tónu h ¹	55 – 56
Obr. 6.18: Určení formantových oblastí tónu B ₁ u měřených lesnic.....	59
Obr. 6.19 – 6.21: Směrová charakteristika tónu B ₁	60
Obr. 6.22: Určení formantových oblastí tónu a u měřených lesnic	62
Obr. 6.23 – 6.25: Směrová charakteristika tónu a (lesnice).....	63
Obr. 6.26: Určení formantových oblastí tónu b ¹ u měřených lesnic.....	65
Obr. 6.27 – 6.29: Směrová charakteristika tónu b ¹ (lesnice)	66

Seznam tabulek

Tab. 2.1: Harmonická řada tónu A_1 kontra	19
Tab. 5.1: Výchozí řada tónů pro nahrávání zvukových vzorků	41
Tab. 6.1: Porovnávací tabulka tónu F	45
Tab. 6.2: Porovnávací tabulka tónu F – odraz od dřevotřískové zdi	47
Tab. 6.3: Porovnávací tabulka tónu a	49
Tab. 6.4: Porovnávací tabulka tónu a – odraz od dřevotřískové zdi	51
Tab. 6.5: Porovnávací tabulka tónu h^1	53
Tab. 6.6: Porovnávací tabulka tónu h^1 – odraz od dřevotřískové zdi	54
Tab. 6.7: Porovnávací tabulka tónu B_1	58
Tab. 6.8: Porovnávací tabulka tónu B_1 – odraz od dřevotřískové zdi	59
Tab. 6.9: Porovnávací tabulka tónu a (lesnice)	61
Tab. 6.10: Porovnávací tabulka tónu a (lesnice) – odraz od dřevotřískové zdi	62
Tab. 6.11: Porovnávací tabulka tónu b^1	64
Tab. 6.12: Porovnávací tabulka tónu b^1 – odraz od dřevotřískové zdi	65

ÚVOD

Harmonické spektrum je u každého hudebního nástroje či lidského hlasu jedinečné. Přestože některé hudební nástroje mohou znít podobně, je možné vždy nalézt prvky rozdílnosti, které pro posluchače tvoří originální a nezaměnitelný sluchový vjem daného nástroje. Totéž však platí i pro instrumenty stejné, které jsou totožné na pohled, ale rozdílné např. výrobcem, modelovou řadou, či dobou, ve které byl daný nástroj vyroben. Beze zbytku lze i tvrdit, že nástroje vyrobené jednou společností a označené identickým označením nemusí mít totožnou barvu a mohou v posluchači zanechávat různé pocity z přednesených tónů.

Tato bakalářská práce se zabývá strukturou tónu lesního rohu a rozsahem změn jeho zvukového tónu při použití odlišných hracích technik a nátrubků. Po představení nástroje, jeho mechanických vlastností, vývoje v kontextu času a popisu způsobu hry na lesní roh, následují obecné poznatky o barvě zvuku, vyzařování hudebních nástrojů, možnostech analýzy tónového spektra a některých psychoakustických veličin. Získané poznatky jsou dále použity v praktické analýze přirozených lesních rohů, dvojitých lesních rohů a čtyř typů nátrubků od různých výrobců, kde nastane porovnání obsahu harmonických složek u třech tónů různé tónové výšky a subjektivního i objektivního posouzení barvy a kvality tónu.

Nechť tato práce poslouží jako inspirace především pro hráče na lesní roh během praktického nácviku a pomůže jim se zorientovat ve zvukově barevných vlastnostech nejen jejich nástrojů.

1 KONSTRUKCE A HISTORIE VÝVOJE LESNÍHO ROHU

1.1 Obecný popis nástroje

Lesní roh patří do rodiny dechových nástrojů žesťových. Vyrábí se z mosazného plechu, zejména ve dvou variantách:

1. Plech žlutomosazný: Obsahuje kolem 70 % mědi, dále zinek, cín a příměsi dalších kovů v blíže nespecifikovaném poměru (z důvodu know-how výrobce).
2. Plech červenomosazný: Obsahuje kolem 90 % mědi, zinek, olovo a další kovy.

Tloušťka plechu používaná pro výrobu lesních rohů a lesnic je standardně 0,55 mm, vlivem opracování (broušení, leštění...) se ale může zúžit na cca 0,47 mm, taková tloušťka však nebude rovnoměrně po celém nástroji, neboť se jedná o zpravidla ruční opracování, které se rozhodně nepodaří udělat na setinu přesně po celém objemu nástroje. Vliv na tloušťku má též volitelné lakování nástroje, které naopak materiál zesílí, a navíc trochu více zatvrdí, takže lze konstatovat, že každý nástroj je originální a má rozdílné vlastnosti, i když se jedná o totožnou modelovou řadu vyrobenou ze stejného plechu a vytvořenou jedním nástrojářem [1].

Žlutomosazný plech je mezi hráči vyhledáván pro barvu ostřejší, průzračnější, zatímco červená mosaz má tón jemnější a temnější [2].

Nástroj je tvořen z kónicky se rozšiřující trubice zakončené velmi širokým roztrubem (dle typu asi 30 cm). Délka této trubice je pro nástroj laděný v F okolo 4 metrů, záleží na menzura (poměru délky k šířce trubice, někdy označení šířky trubice) a na ladění nástroje. Všeobecně je menzura lesního rohu úzká (ve srovnání s ostatními typy žesťových nástrojů).

Menzura lesního rohu také souvisí se zemí původu, např. francouzští nástrojáři vyráběli menzury užší, trubice se rozšiřovala pozvolněji a roztrub dosahoval šířky 28 cm. V Německu měly nástroje menzuru relativně širokou, trubice se rozšiřovala rychleji a roztrub dosahoval průměru 33 cm. Protože bylo třeba užít více dechu pro německé nástroje, jejich tón byl pocitově větší a obsažnější.

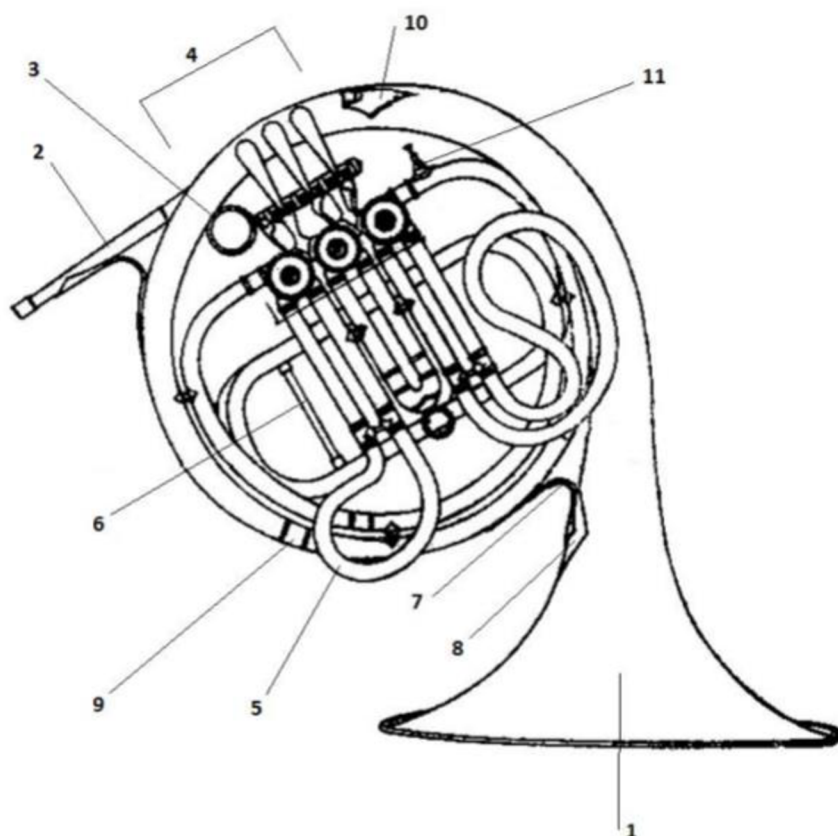
Pravidelně se od přelomu 19. a 20. století používají tzv. ventilové lesní rohy, které mohou být buďto jednoduché, dvojité (spojení dvou nástrojů různých ladění do jednoho) a dokonce i trojitě (spojení tří nástrojů různých ladění). Pro přepínání mezi

jednotlivými nástroji slouží přídavné ventily ovládané palcem. K vidění jsou stále i lesní rohy přirozené, které se používají k vytrubování všelijakých fanfár (slavnostní tuše, myslivecké znělky a signály atp.). Jejich využití je zde možné zejména proto, že většina těchto fanfár či znělek je založena na harmonické řadě tónů, kterou lze na bezventilový nástroj provést.

1.2 Popis částí nástroje

Části lesního rohu jsou velmi dobře vyobrazeny na obrázku 1.1 [3]:

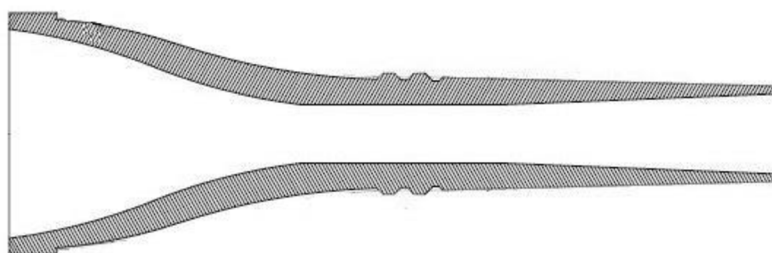
1. roztrub (označován též jako ozvučník)
2. ústnicový nástavec: připojen na tzv. eso (počáteční trubice nástroje, do níž se vkládá nátrubek)
3. kroužek pro palec: nalezneme pouze u jednoduchého typu, u typu dvojitého či trojitého je nahrazen ventily pro přeposlání vzduchu
4. mechanické strojivo (buďto pístové nebo zákružkové, v českých zemích více populární zákružkové): slouží k přesměrování proudu vzduchu do přídavných trubic, které prodlužují celkovou délku nástroje, a tedy i mění výšku harmonické řady tónů
5. cuk neboli zápojka: slouží k jemnému doladění, případně k vylití vody z těžko dostupných míst
6. příčka hlavní ladící zápojky
7. příčka zpevňující vinutí a roztrub
8. zpevňující plechový plátek pod příčkou: určen k ochraně před promáčknutím roztrubu
9. kroužek, spojující dva díly nástroje
10. opěra pro malíček
11. hnízdo notového držáku s aretačním šroubkem.



Obr. 1.1: Části jednoduchého lesního rohu. Převzato z [3].

1.3 Vlastnosti nátrubku lesního rohu

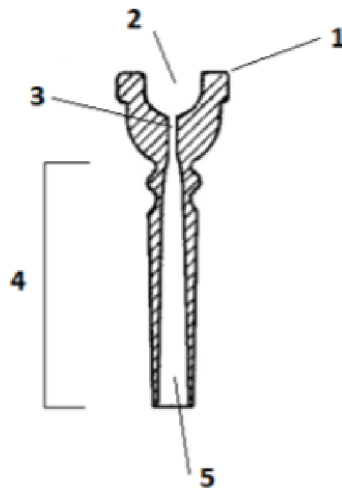
Nátrubek je sice odnímatelnou, ale nedílnou součástí žesťových nástrojů, které lze proto nazývat nátrubkové. Vkládá se do úzkého vývodu nástrojové trubice. Slouží především k pohodlné tvorbě a kvalitnímu průběhu hraného tónu. Je kruhovitěho tvaru, se zesíleným vnějším okrajem, uvnitř dutý. Oproti nátrubkům pro ostatní žesťové nástroje, kde je dutina zaoblena do tvaru misky (nebo též kotlíku), má nátrubek lesního rohu dutinu nálevkovitou (viz. obr. 1.2 [4]). Na jejím spodu se nachází průrazný otvor (hrdlo), který přes vnitřní část stopky vysílá ven proud vzduchu vytvořený hráčem.



Obr. 1.2: Průřez nátrubkem lesního rohu (nálevkového typu). Převzato z [4].

Nátrubek sestává z následujících částí (obr. 1.3) [3]:

1. okraj (těž rantl): část na kterou se přikládají rty hráče
2. kotlík (příp. nálevka, dle typu nátrubku)
3. hrdlo
4. stopka
5. vnitřní kužel



Obr. 1.3: Kotlíkový nátrubek určený pro trubku. Převzato z [3].

Nátrubek zásadně ovlivňuje tónovou kvalitu a harmonické spektrum tónů. Není však jediným faktorem, jakost tónů dále ovlivňuje velikost rtů, objem a postavení ústní dutiny při hře a intenzita dechového proudu. Kvality nátrubku pak lze určit pomocí několika faktorů [1]:

a) Tvar a šířka okraje

Pokud je okraj úzký, hráč má větší kontrolu nad hranými tóny, ale velmi rychle se unaví. Totéž lze tvrdit, pokud je vnitřní hrana rantlu ostřejší.

b) Vnitřní průměr rantlu

Má vliv na tónový rozsah. Při hře ve vyšších polohách se obvykle volí průměr mezi 15 až 17 mm, pro hru ve středních polohách se užívá průměr 18 až 20 mm.

c) Hloubka a profil nálevky

Významně ovlivňuje spektrum tónu. Hluboká nálevka má barvu tónu kulatou až sametovou, ve vyšších polohách však vyžaduje fyzickou zdatnost. Plytká nálevka má tóny průraznější a spektrum bohatší na vyšší harmonické složky. Pohodlněji se na ni tvoří tóny ve vysoké poloze a velmi silné dynamice.

d) Šířka hrdla

Širší hrdlo má za následek měkce a líbivě znějící tón, působí však opět omezení ve středně vysokých a vysokých polohách. Hrdlo úzké naopak nedovolí vyvinout tón v intenzivní dynamice.

e) Parametry světlosti

Jako světlost lze označit kuželovitě se rozšiřující středový tunýlek uvnitř stopky nátrubku, začínající hrdlem a ústící na konci stopky vkládané do nástroje. Ovlivňuje komfort hry v krajních polohách. Pokud se světlost zužuje rychle (průměr hrdla x průměr ústí), tón by měl být spektrálně bohatší, než když se světlost zužuje pozvolna.

Na barvu tónu lesního rohu má pochopitelně vliv i materiál, ze kterého je nátrubek vyroben. U historických nástrojů byl nátrubek pevnou součástí nástroje, a proto byl ze stejného materiálu jako nástroj, tj. ze dřeva, rohoviny či slonoviny. Později se k výrobě začalo užívat kovů, nejužívanějším materiálem pro výrobu nátrubků je dodnes mosaz, standardně s povrchovou úpravou (postříbření, pozlacení). V polovině 20. století se při výrobě experimentovalo s různými materiály, např. korkem či pryží, tyto pokusy se však velké obliby nedočkaly. V současnosti lze pořídit i nátrubky z plastické hmoty, jejich užívání se však mezi profesionálními hráči příliš nepěstuje.

1.4 Historie lesního rohu

Obecně lze konstatovat, že vývojová cesta lesního rohu, jakož i všech dechových nástrojů, byla velmi dlouhá. Dle různých archeologických objevů lze usoudit, že první trubačské nástroje byly vyrobeny ze zvířecích útvarů, které patrně zbyly po lovu, např. duté kosti, zvířecí rohy či kly. Tyto prapůvodní nástroje se zřejmě využívaly právě při dorozumívání na lovech, neboť jejich zvuk byl pronikavější než samotný lidský hlas. Další využití se pro tyto nástroje našlo při různých slavnostech nebo jako vojenský signální nástroj [5].

Asi v 8. století př. n. l. však dochází za významného přispění vyspělých kultur Římanů a Etrusků k rozvoji trubačských hudebních nástrojů, které začaly být vyráběny např. z terakoty (pálené hnědočervené hlíny), ale především ze slitin kovů (mosaz, bronz), které jsou pro výrobu lesních rohů (i všech žesťových nástrojů) užívány dodnes. Zástupcem takových nástrojů je tzv. cornu, což byl roh ve tvaru písmene G s držadlem uprostřed. Svým tvarem i materiálem se tedy jedná o přímého předchůdce moderních

lesních rohů. Z tohoto období existují i první důkazy o existenci nátrubku. Ten prvně býval pevnou součástí nástroje a jednalo se pouze o opracovaný vnitřní okraj, aby rty pohodlně přiléhaly, nálezy této doby však ukazují nátrubky podobné dnešním.

Během začátku středověku pak dochází ke stagnaci vývoje žesťových nástrojů vlivem římské církve, ta uznávala zhruba v prvním tisíciletí n. l. pouze hudbu vokální. Další pokrok přichází až s obdobím renesance (asi 1300 – 1450), kdy vzniká hudba světská, tedy neovlivněná církví. Středověké nástroje se však kvalitativně nerovnal nástrojům starořímským. Vyráběly se nejprve z napodobenin zvířecích rohů, měly velké rozměry a omezený tónový rozsah. Aby tyto nástroje získaly větší tónový rozsah, docházelo postupem času k dalšímu prodlužování trubice, zároveň se však dařilo výrobní materiály ohýbat a stočit do kliček, tudíž se jejich rozměry dařilo zmenšit.

Kolem roku 1500 vzniká v Německu tzv. poštovní roh, který dnes označujeme jako borlici, jež se stále používá především na honech. Dále vznikaly rytířské trumpety či pozouny s různou délkou trubice, a tedy i s různým rozsahem.

V první polovině 17. století se tóny, které lze na nástroj zahrát, vnímají jako řada seřazena dle určitých fyzikálních vlastností, nikoliv jako řada náhodných tónů. Ta se pak celá posouvá na základě prodloužení či zkrácení celkové délky trubice (zejména pomocí vkládaných kotoučů s přesnou délkou posouvající o určitý interval, čímž vzniklo šest různých ladění: F, E, Es, D, C a G). Na nástroje vyvíjené v této době šlo zahrát řadu 12 tónů, což odpovídá délce asi 2 m. Další inovace tohoto rohu se udála kolem roku 1660, kdy se dařilo zahrát řadu 16 tónů. U tohoto nástroje je poprvé užitý pojem lesní roh. Postupným navyšováním smyček (až 6x smotaná trubice) se z lesního rohu stal nástroj, pro něhož začali hudební skladatelé tvořit orchestrální party.

Počátkem 18. století se však podařilo vytvořit 2 zásadní rozdíly, které lesní rohy odlišují od jiných žesťových nástrojů, a sice kónická trubice (jež se rozšiřuje od nátrubku až po roztrub) a nálevkovitý nátrubek (doposud se jednalo o nátrubky kotlíkové, ty se dodnes užívají u trubek, trombonů, tub a příbuzným nástrojům. Za zmínku stojí osobnost Antonína Josefa Hampela (1705-1771), tvůrce dnešního hornového tónu. Původní ostřejší tón podobný trubce zjemnil pomocí ruky vložené do korpusu (tím upravil držení nástroje a snížil korpus k boku hráče). Pomocí různého tlumení rukou v korpusu (označováno jako *capaci* technika) bylo možné měnit výšku tónů harmonické řady o půl až celý tón, což ve vyšších polohách umožnilo zahrát chromatickou (půltónovou) řadu tónů. Svou

barvou a znělostí se však tyto tlumené tóny velmi lišily od netlumených. Dále místo vkládaných kotoučů na změnu ladění vytvořil systém U trubic, přidávaných do vsuvek ve středu nástroje. Tím sjednotil fyzickou polohu nástroje, ať už hrál v jakémkoliv ladění, což velmi prospělo nasazení jednotlivých tónů. Tento nástroj je označován jako invenční lesní roh.

O zdokonalení invenčního lesního rohu se postarali němečtí hudebníci a nástrojáři Fridrich Bluhmel a Heinrich Stolzel, kteří invenční roh (zpravidla v F ladění) opatřili strojivem, zpočátku dvěma, později třemi ventily. Tím vznikla možnost zahrát chromatickou řadu tónu v celém rozsahu nástroje, aniž by byla kvalita jednotlivých tónů výrazně odlišná. Přesto se v orchestrech stále užívaly nástroje bez ventilů, zejména v pasážích vystavěných na harmonické řadě, neboť tóny těchto nástrojů zněly líbivěji. Pozdější zdokonalení strojiva u ventilových nástrojů však přirozené lesní rohy z orchestru zcela vytlačilo.

Koncem 19. století vznikají první dvojité a trojitě lesní rohy, které spojují dva, potažmo tři nástroje v jeden. Na přepínání mezi laděními (u dvojitého lesního rohu F – B, u trojitěho F – B – f) slouží nově přidané ventily pro přesměrování vzduchového proudu. Tato úprava výrazně pomohla zvětšení rozsahu jednoho nástroje, intonaci jednotlivých tónů i jistotě hráče při hraní krajních tónových poloh. Takto uspořádané nástroje (jednoduché, dvojité či trojitě lesní rohy) se vyrábějí a používají prakticky bez úprav dodnes.

2 HRA NA LESNÍ ROH

2.1 Tvorba tónu

Jelikož lesní roh patří do skupiny dechových nástrojů, je zřejmé, že k rozeznění nástroje bude zapotřebí dechu, přesněji tedy proudu vzduchu. Pokud tedy využijeme členění dle modelu Pavla Kurfürsta [6], můžeme určit, že excitátorem (zdrojem, napáječem) je právě proud vzduchu, kterému v cestě stojí přivřené rty. Pokud je tlak proudu vzduchu dostatečně velký, podaří se rozkmitat rty, které zůstávají napnuté pomocí svalstva. Tím se ze rtů stává oscilátor (též budič rozkmitu). Dále rozkmitaný proud vzduchu prochází tělem nástroje, tedy rezonátorem, který za určitých podmínek kmitá zároveň s oscilátorem a tím zesiluje a významně dotváří barvu výsledného zvuku. Korpus (radiátor) je část, která vyzařuje vytvořený zvuk a jeho energii do prostoru. Pro co nejkratší náběh rozkmitání rtů se využívá jazyk, který funguje jako „špunt“, který uvolní vzduchový proud při optimálním tlaku a tón je nasazen konkrétně.

Pravidelným cvičením u hráče na žesťové nástroje vzniká tzv. nátisk. Jde o vycvičení svalstva tváře a správné přikládání rtů na nátrubek, nejlépe tak, aby byl při uvolnění vzduchového sloupce nasazen tón, který si hráč představuje. Tvorba kvalitního nátisku obnáší spoustu času praktického cvičení, zejména dlouhých tónů. Za nejvýhodnější posazení nátrubku na rty se podle vzoru amerického pedagoga Philipa Farkase považuje poměr 2:1 (dvě třetiny nátrubku na rtu horním, jedna třetina na rtu spodním).

2.2 Harmonická řada tónů

Jak bylo zmíněno výše, lesní roh a další žesťové nástroje se zněle rozkmitají za určitých podmínek. Tou nejdůležitější je, že se myšlený hraný tón musí nacházet v tzv. harmonické neboli alikvótní řadě tónů nástroje.

Harmonická řada je tvořena tóny o určitém kmitočtu, pro které platí: „*Kmitočty alikvotních tónů jsou celočíselnými násobky kmitočtu tónu základního (fundamentu).*“ [7] Za objevitele řady alikvótních tónů je označován francouzský kněz Martin Mersenne žijící v letech 1588 – 1648. Obvyklým tónem pro sjednocení ladění zvukových těles i nástrojů samotných je tzv. komorní a (standardně označováno jako a^1), jehož kmitočet je 440 Hz. Pokusme se u nástroje se základním tónem A_1 (A kontra) nalézt tón a^1

v harmonické řadě. V tabulce 1 jsou dopočítány kmitočty (f) 1. až 16. tónu harmonické řady.

Tab. 2.1.: Harmonická řada tónu A_1 kontra

Číslo	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.
Tón	A_1	A	e	a	cis^1	e^1	g^1	a^1
f [Hz]	55	110	165	220	275	330	385	440
<i>//</i>								
Číslo	9.	10.	11.	12.	13.	14.	15.	16.
Tón	h^1	cis^2	dis^2	e^2	fis^2	g^2	gis^2	a^2
f [Hz]	495	550	1005	1060	1115	1170	1225	1280

Tón a^1 je tedy osmým alikvótním tónem (harmonickou složkou) tónu A_1 . Tónové označení je však nutno brát s rezervou, protože se jedná o řadu přirozenou, kdežto v hudbě je několik staletí užíváno ladění temperované (vzdálenost mezi každým půltónem je stejná). Harmonickou řadu lze vypočítat od jakéhokoliv tónu, příp. libovolného kmitočtu.

2.2.1 Ladění lesního rohu

Ladění lesního rohu bývá obvykle F či B. Základním tónem je v prvním případě F_1 (kontra) o přibližném kmitočtu 43,65 Hz, v případě druhém tón B_1 s kmitočtem 58,27 Hz. Nyní lze vypočítat řadu tónů, kterou dokáže přirozený lesní roh zahrát. Běžně lze hrát až po 16. alikvótní tón, což je přibližně dvojnásobek oproti ostatním žesťovým nástrojům.

2.2.2 Ventilový systém

Protože je zřejmé, že tónová řada, kterou lze na lesní roh zahrát je rozsáhlá, ale neúplná, existovaly 2 varianty doplnění chybějících tónů stupnice. Buďto takzvaným „cpaním“, kdy hráč strčil ruku do korpusu, tím změnil výšku tónu, ale i barevné spektrum tónu, nebo pomocí ventilového systému.

Ventilový systém používá ventily otočné nebo pístové a jejich úkolem bylo přeměřovat vzduchový proud procházející nástrojem do trubic prodlužujících celkovou délku nástroje. Podle délky trubice u stisknutého ventilu se celá alikvótní řada posunula

níž. V případě stisku 1. ventilu nastává posun o celý tón, u 2. ventilu je posun roven půl tónu a při stisku ventilu 3. o tón a půl. Samozřejmě je možná i jejich kombinace. Tímto způsobem lze ihned měnit ladění nástroje a tak doplnit chybějící tóny jakékoliv hrané stupnice.

3 TĚMBR ANEB BARVA ZVUKU

Slovem „témbr“ bývá označována charakteristická barva zvuku hudebních nástrojů či hlasu. Přestože byl dříve považován za náhodný prvek u znělých tónů, představoval faktor, který významně ovlivňoval kvalitu a vnímání hraného tónu. Patří mezi elementární subjektivní veličiny při vnímání tónu, společně s výškou, délkou či intenzitou.

3.1 Základní teorie o barvě zvuku

Roku 1843 formuloval německý fyzik Georg Simon Ohm základní psychoakustický zákon, který říká, že lidské ucho vnímá kmitání sinusoidy ve vzduchu jako jednoduchý tón a jakýkoliv jiný periodický průběh rozkládá na řadu analyzovatelných jednoduchých tónů [8]. Protože lze tento zákon aplikovat jen pro periodické zvuky, je celá problematika vnímání tónu velmi zjednodušená, přesto jej lze předvést na schopnosti lidského sluchu, který je možné vycvičit (spolu se znalostí intervalových vztahů mezi složkami) pro identifikaci vyšších harmonických složek (s přesností do 8.-10. harmonické složky).

Z této teorie vycházel Hermann von Helmholtz, využil též matematických poznatků J. Fouriera, z čehož vytvořil první teorii slyšení i základní dělení zvuků do tří kategorií: „der Ton“ (volně přeloženo jako tón, označující sinusový signál), „der Klang“ (volně přeloženo jako zvuk, označující komplexní periodické signály) a „das Geräusch“ (přeloženo jako hluk, zahrnující všechny neperiodické signály) [8]. Dále ve své práci vymezil tři časové fáze u hudebních zvuků: nakmitávací pochody, výdrž tónu a dokmitávací pochody, kde barvu tónu ztotožnil s fází výdrže tónu a stability frekvenčního spektra [8].

Podle Helmholtzovy teorie můžeme tedy definovat 3 oblasti spektra, přičemž 1. – 6. až 8. harmonickou složku lze označit jako oblast intervalovou, 6. až 8. – 16. harmonickou složku jako oblast formantovou a oblast nad 16. harmonickou složkou jako oblast mikrointervalovou nebo též šumovou.

Helmholtz dále vyslovil teorii relativní a absolutní barvy zvuku: *„Barva zvuku resp. tónu je určena počtem a intenzitou jednotlivých harmonických složek. U tónů hudebních*

nástrojů jsou poměry intenzit jednotlivých složek spektra na absolutní výšce těchto složek nezávislé.

U vokálů je barva určena existencí jedné nebo dvou charakteristických harmonických složek, které jsou ve zvuku zdůrazněny. Poloha těchto složek je pevně spojena s jejich absolutní výškou“ [8]. Dnes pro tyto složky užíváme pojmenování formanty.

Na základě těchto poznatků se zvedla vlna zájmu o studium problematiky zvukového vnímání, z čehož vznikla forma psychoakustiky, zabývající se inkluzí fyziky do hudebně-estetických disciplín. V době vzniku se představitelem tohoto oboru stal C. Stumpf, který vytvořil protikladné páry, vztahující se k barvě tónu a klasifikoval vliv harmonických složek na jakost tónu. Byla-li ve zvuku výrazná intenzita 1., 2. či 3. harmonické složky, přisuzoval tomuto zvuku pojem plný a kulatý, při absenci 2. harmonické zvuk definoval jako dutý či prázdný [8].

Roku 1929 vydal E. Schumann tzv. *Zákony barvy zvuku*, kde se snaží „vokálně“ pojímat i zvuky hudebních nástrojů [8]:

1. Zákon formantových oblastí

Barva zvuku resp. tónu hudebního nástroje je dána, nezávisle na výšce základní harmonické složky, pevnou polohou formantových oblastí, které se vyznačují silnějšími vyššími harmonickými tóny. Při stoupající výšce tónu a jeho stejné dynamice setrvává intenzitní maximum dané formantové oblasti na příslušném harmonickém tónu tak dlouho, dokud tento harmonický tón nedosáhne horní hranice oblasti. Potom se maximum přesouvá na nižší harmonický tón, který se v této formantové oblasti nalézá, nebo který do ní právě vstupuje.

2. Zákon formantových intervalů

Pro barvu zvuku resp. tónu hudebního nástroje je vedle frekvenční polohy formantových oblastí rozhodující též interval mezi těmito oblastmi, resp. mezi nejsilnějšími harmonickými tóny těchto oblastí. Velikost tohoto intervalu je charakteristická pro různé hudební nástroje.

3. Zákon akustického posuvu

Při stoupající dynamice tónu se přesouvá intenzitní maximum v dané formantové oblasti na harmonické složky vyšších pořadových čísel. Složky v horní části oblasti jsou obecně silnější než složky ve spodní části.

4. Zákon akustického skoku

U tónu se dvěma formantovými oblastmi přeskakuje při velkém zesílení tónu intenzitní maximum nalézající se při slabé dynamice v nižší formantové oblasti na harmonický tón nalézající se ve vyšší oblasti [8].

První Schumannův zákon spojuje barvu tónu s dominující kmitočtovou oblastí v rozsahu celého nástroje – formantové oblasti, což osvětluje závislost barvy tónu na jeho výšce.

Dle druhého Schumannova zákona lze tvrdit, že s vjemem barvy tónu úzce souvisí interval mezi vzdálenějšími spektrálními složkami.

Třetí zákon popisuje vliv dynamiky na barvu tónu a čtvrtý zákon zdůrazňuje větší barevnou rozdílnost při rozdílné síle tónu, pakliže v tónu existují dvě formantové oblasti [8].

V dnešní době jsou určité pojmy vnímání zvuku ověřeny několikanásobnými poslechovými výzkumy, jejichž výsledky jsou přijímány jako platné. Zatímco liché harmonické složky mají vliv na nosnost, výraz, ostrost či dutost tónu, intenzivní sudé složky ovlivňují plnost či kulatost tónu.

3.2 Směrová charakteristika

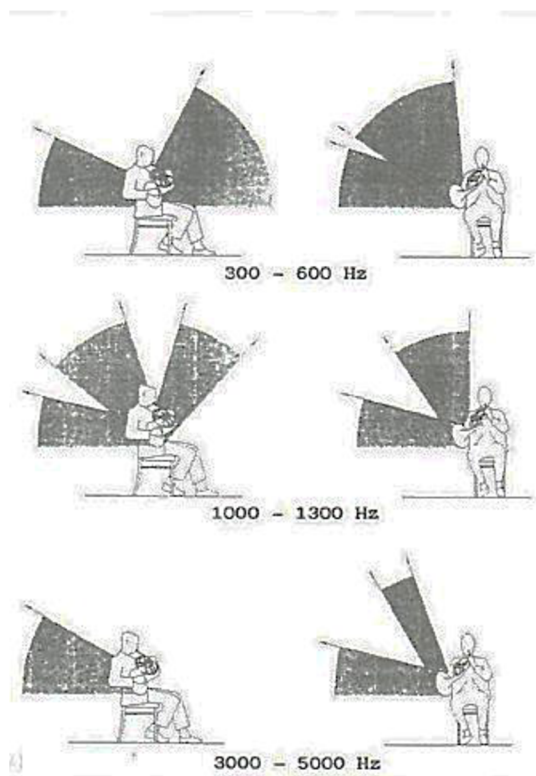
S ténbrem nástrojů a intenzitou harmonických složek úzce souvisí místo, ve kterém hodláme daný nástroj (resp. jeho barvu) analyzovat. K tomuto účelu slouží tzv. směrovost vyzařování. Žádný nástroj totiž nevydává stejnou energii všemi směry, jeho vyzařování je spjato s fyzickými rozměry nástroje, vztažené ke kmitočtu vyzařované vlny. Větší zvukové zdroje a kratší vlnová délka pak mají za následek vícesměrové vyzařovací vlastnosti. Všesměrové vyzařování zvuku je většinou pozorovatelné jen u 1. harmonické složky, a to pouze do kmitočtu 500 Hz [8].

Průběhy charakteristik určujeme v tzv. vzdáleném poli, abychom zachovali nezávislost na vzdálenosti od nástroje. Vzdálenost tohoto pole se obvykle určuje jako největší možný rozměr nástroje a vlnovou délkou nejhlubšího hratelného tónu.

Za nejjednodušší metodu měření směrových charakteristik je považováno měření akustického tlaku v neměnné vzdálenosti od nástroje (zdroje zvuku), nejlépe na poloměru kružnice (kdy zdroj je ve středu měřicího pole).

3.2.1 Směrová charakteristika lesního rohu

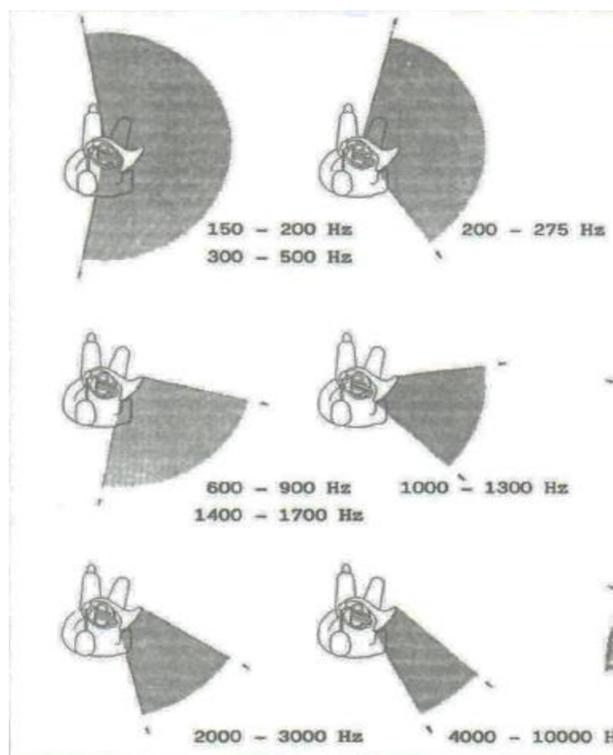
Směrová charakteristika lesního rohu je ve srovnání s ostatními žesťovými nástroji odlišná. Zatímco např. u trubky či trombonu je jen jeden radiátor, a tedy i jeden vyzařovací lalok, u lesního rohu je ve vertikální rovině zřejmé rozdvojení vyzařovacího laloku, což je dáno nejspíše vloženou pravou rukou v ozvučníku během hry. To je ukázkově demonstrováno v obr. 3.1 [8]:



Obr. 3.1.: Vyzařovací laloky lesního rohu ve vertikální rovině v závislosti na kmitočtu.

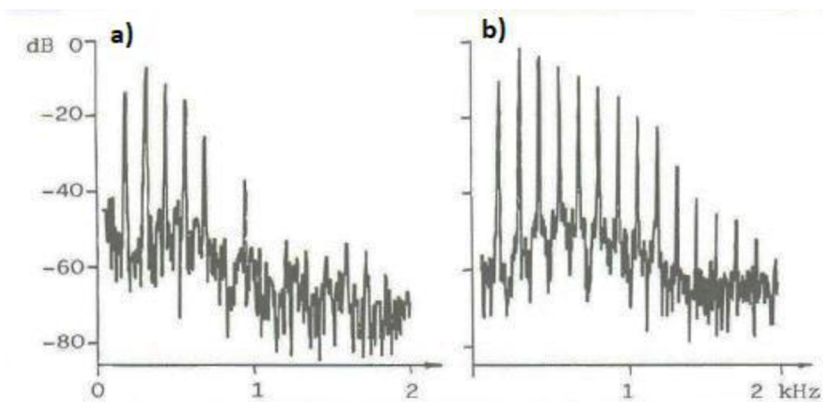
Převzato z [8].

V horizontální rovině se vyzařovací lalok zužuje s rostoucím kmitočtem harmonických složek, viz obr. 3.2 [8]:



Obr. 3.2: Vyzářovací laloky lesního rohu v horizontální rovině v závislosti na kmitočtu. Převzato z [8].

U zvuku lesního rohu platí více než kdekoliv jinde, že umístění vyzářovacího otvoru, tedy i tónu samotného, souvisí s barvou spektra hraného tónu, neboť roztrub zpravidla směřuje na stranu obrácenou uším posluchače. Při hře v silné dynamice tak hráč nástroj jakoby nadzvedne, aby změnil úhly odrazu do hlediště a tím změnil i barevnou strukturu tónu. O rozdílných hodnotách spektrálních složek při vyzářování napřímo či při snímání zředu nástroje čili odrazem nás přesvědčí obr. 3.3 [8]:



Obr. 3.3: Modulová kmitočtová charakteristika tónu F nahrána a) s odrazem, b) napřímo. Převzato z [8].

4 SPEKTRUM ZVUKU

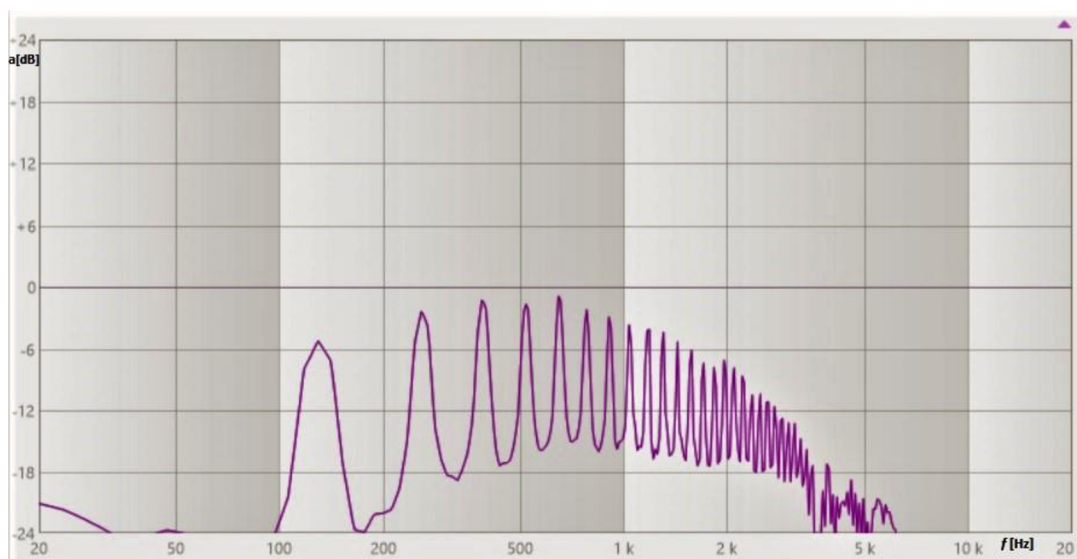
Pro ucelený popis tónové struktury a vlastností se používá grafické vyjádření tónového spektra. Každý signál lze rozložit na určitý počet harmonických signálů (od jedné až po nekonečno). U těchto dílčích signálů můžeme určit jejich efektivní hodnotu či kmitočet [9].

Pro vyjádření řady základních složek je vhodné využít tzv. Fourierův teorém [10]:

$$s(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} a_k \cdot \cos(k\omega_1 t) + b_k \sin(k\omega_1 t), \quad (4.1)$$

kde a_0 označuje složku stejnosměrnou, a_k, b_k koeficienty amplitudy alikvótních tónů, jejichž kmitočet bude $k \cdot \omega_1$

Grafické vyjádření spektra je standardně vyjádřeno v rovině dvou os, kde je vyjádřena závislost intenzity jednotlivých složek udávané v dB na kmitočtu [Hz]. Pro kmitočtovou osu používáme logaritmické měřítko v dekadách, viz obr 4.1:

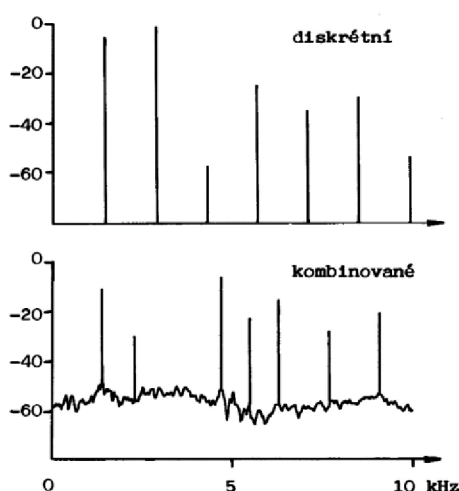


Obr. 4.1: Modulová kmitočtová charakteristika spektra tónu c, hraného na lesní roh

Jak je z tohoto obrázku zřejmé, jedná se o tzv. spektrum spojité, neboť je tvořeno souvislou (nepřerušovanou) čarou. Lokální vrcholy zde označují kmitočtovou polohu a intenzitu jednotlivých alikvótních tónů, s tím že kmitočtově nejnižší vrchol (přibližně 130 Hz) je základním tónem této harmonické řady (viz kap. 2.2), ve které obvykle bývá nejsilnější (avšak ne nutně).

Dalším typem spektra je spektrum diskrétní, které vykresluje výlučně vrcholové body spektra, znázorněny úsečkou představující intenzitu tohoto bodu (harmonické složky).

Zkřížením dvou výše uvedených typů vznikne spektrum kombinované, kde ve spektru spojitým pozorujeme výrazné diskrétní složky. Průběh a vyobrazení spektra diskrétního a kombinovaného popisuje obrázek 4.2 [8]:



Obr. 4.2: Zobrazení diskrétního a kombinovaného spektra signálu. Převzato z [8].

4.1 Spektrum lesního rohu

Spektrum lesního rohu se mění v závislosti na poloze tónu. Zatímco v nízkých, či nižších středních polohách jsou vyšší harmonické rozeznatelné přibližně po 17. harmonickou složku, přičemž fundament není nejsilnější a barvu ovlivňuje formantová oblast mezi 300 až 400 Hz s charakterem samohlásky „U“, ve středních či vysokých polohách je barva určena dominující 1. harmonickou složkou. Další formantové oblasti se dají předpokládat kolem kmitočtů 900, 1200 1600 a 3500 Hz. Spektrum dále velmi ovlivní dynamika, či dušení tónu (např. při cpačí technice či použití dusítka).

4.2 Aplikace Fourierovy transformace na digitální signály

Jak již bylo zmíněno v úvodu této kapitoly, pro rozklad signálu na základní harmonické průběhy se využívá Fourierova teorému. Pro analýzu signálů digitálních,

tedy navzorkovaných signálů, se užívá tzv. Diskrétní Fourierova transformace (DFT), při jejíž aplikaci postupujeme následovně [10]:

1. Posloupnosti $s[n]$ přiřadíme periodickou posloupnost $\tilde{s}[n]$ s periodou N :

$$\tilde{s}[n] = [\text{modul}_N(n)] \quad (4.2)$$

2. Nalezneme obraz diskretní Fourierovy řady:

$$\tilde{S}[k] = \sum_{n=0}^{N-1} \tilde{s}[n] e^{-jk \frac{2\pi}{N} n}, k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (4.3)$$

3. Z periodické posloupnosti $\tilde{S}[k]$ vybereme jednu periodu o délce N :

$$S[k] = R_N[k] \cdot \tilde{S}[k] \quad (4.4)$$

V literatuře se výraz $R_N[k]$ vynechává z důvodu nadbytečnosti, to by ale mohlo znamenat, že obraz DFT je periodický, což není pravda. Přímou diskretní Fourierovu transformaci popisuje definice 4.5 [10].

$$S[k] = \sum_{n=0}^{N-1} s[n] e^{-jk \frac{2\pi}{N} n}, k = 0, 1, \dots, N-1, \quad (4.5)$$

kde n značí daný vzorek v čase a k kmitočty téhož vzorku.

Výsledkem je posloupnost spektrálních koeficientů $S[k]$, která určuje intenzitu spektra v bodech daných posloupností $s[n]$. Uvedená definice se vztahuje ke dvoustrannému spektru zrcadlenému podle Nyquistova kmitočtu, tedy $\frac{f_{vz}}{2}$.

Pro zobrazení kmitočtového spektra hudebních nástrojů za účelem porovnání harmonických složek nám však postačuje polovina zrcadleného spektra, intenzitu je třeba v této polovině vynásobit dvěma z důvodu zachování poměrů energie. Pro praktické výpočty se dnes užívá algoritmus FFT (Fast Fourier Transform), který byl publikován v roce 1964, z důvodu vysoké neefektivitu výpočtu DFT pro dlouhé posloupnosti [10].

Při použití algoritmu FFT se stává, že se vstupní signál periodicky neopakuje, což znamená, že v delším výsledném signálu sestaveném z více krátkých neperiodických signálů vzniká nespojitost. To má za následek vznik čar ve spektru, které se ve skutečnosti v analyzovaném tónu nevyskytují. Těž může nastat snížení odstupů užitečného signálu od šumu [11].

Tento problém lze vyřešit použitím tzv. váhovacích oken, kde jsou vstupní vzorky vynásobeny hodnotami okna, díky tomu se hodnoty krajních výsledných vzorků blíží k nule. Tím již u FFT nedochází k objevování irelevantních složek ve spektru, dojde však ke snížení efektivní hodnoty předmětného analyzovaného úseku. Jako příklad je uvedeno tzv. Hannovo okno, které je definováno vztahem 4.5 [12]:

$$w[n] = 0,5(1 - \cos\left(2\pi \frac{n}{N}\right)) \quad 0 \leq n \leq N \quad (4.5)$$

Protože lze FFT užít výhradně k jednorázovému popisu signálu, není možné pozorovat změny spektra a intenzitu harmonických složek v čase. Aby tedy bylo možné sledování intenzity spektrálních složek, jejich kmitočtu a proměnlivost v čase, využívá se tzv. krátkodobá Fourierova transformace (Short-Time Fourier Transform), která rozdělí časově proměnný signál do úseků, pro které je jednotlivě provedena FFT. Výsledné zobrazení takového signálu nazýváme spektrogram.

4.3 Lineární prediktivní kódování

Lineární prediktivní kódování (LPC) je metoda užívaná k analýze formantových oblastí především u řečových signálů, ale pro stejný účel ji lze užít i u hudebních nástrojů. Tato metoda využívá předpokladu, že lze k -tý vzorek definovat jako lineární kombinaci buzení s předchozími vzorky, což popisuje rovnice 4.6 [13]:

$$\hat{s}(n) = \sum_{k=1}^p \alpha_k s(n-k), \quad (4.6)$$

kde $\hat{s}(n)$ označuje odhad n -tého členu v posloupnosti, určeného jako lineární kombinace p (počtu LPC koeficientů) a α_k značí predikční koeficienty. Nalézáme tedy optimální predikční koeficienty tak, aby se každá hodnota signálu co nejvíce přiblížila lineární kombinaci vzorků předchozích [13].

4.4 Objektívni vyjádření subjektivního zvukového vjemu

Abychom mohli objektivně vyjádřit vlastnosti zvukových barev, musíme nalézt možnost převodu daného vjemu do takové číselné podoby, jež by byla v dostatečném souladu se subjektivním hodnocením zvukových barev. Subjektivní hodnocení však bývá vyjádřeno slovním popisem, což pro jakoukoliv matematickou analýzu vpravdě není příliš uchopitelné.

Dle zdroje [13] však lze objektivně popsat barvu zvuku pomocí tzv. percepčních dimenzí. Mezi ně patří např. ostrost, jasnost, tonalita a drsnost. Přestože na subjektivní

vjem mají vliv i nástupné a sestupné fáze tónu, jejich vliv není tak výrazný jako např. u nástrojů bez konkrétní tónové výšky (zejména bicích) [11].

Ostrost je označována symbolem S , její jednotkou je acum. Hodnota 1 acum odpovídá ostrosti úzkopásmového šumu o šířce tzv. kritického pásma, ve kterém se střední kmitočet rovná 1000 Hz a hladina akustického tlaku dosahuje úrovně 60 dB.

Jasnost, kterou značíme písmeny BR (brightness), definuje Beauchamp jako podíl harmonických složek tónu dle vztahu 4.7 [8]:

$$BR = \frac{\sum_{k=1}^n k c_k}{c_0 + \sum_{k=1}^n c_k} \quad (4.7)$$

kde n symbolizuje počet uvažovaných harmonických složek, c_k velikost k -té harmonické složky v lineárním měřítku a c_0 prahovou velikost užitečné harmonické složky.

Pro objektivně vyjádřenou tonalitu neexistuje obecný popis, využijeme tedy popisu dle [11], kde je tonalita popsána jako poměr geometrického a aritmetického průměru spektrální hustoty výkonu analyzovaného vzorku. Vznikne bezrozměrná hodnota, kterou je vhodné přepočítat na procenta.

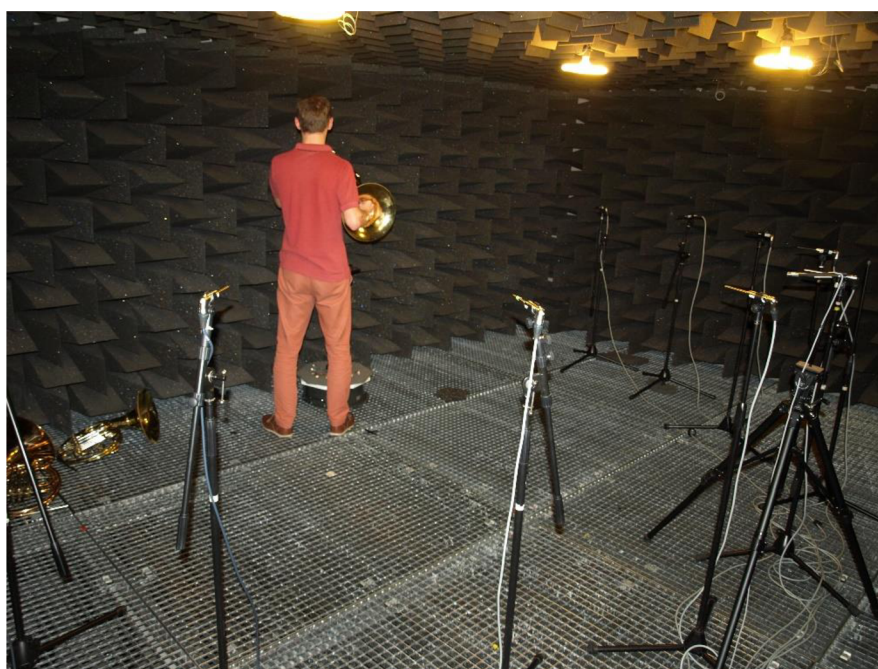
Drsnost je popisována jako percepční korelát fluktuací amplitudy signálu jakožto výsledku amplitudových modulací, kde se modulační kmitočet nachází v rozmezí 20 – 300 Hz.

5 POSTUP MĚŘENÍ

Nahrávání zvukových vzorků pro analýzu spektra a určení směrových charakteristik bylo provedeno v bezodrazové místnosti na Fakultě elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně. Tento prostor byl zvolen kvůli minimální odrazivosti zvukových vln, které by mohly ovlivnit konečné výsledky analýzy. Nahrávání vzorků bylo provedeno jedním hráčem na několik nástrojů a nátrubků, které byly při zachování stejné tónové řady postupně střídány.

5.1 Složení nahrávacího řetězce

Základním měřicím mikrofonom, z jehož záznamu probíhá analýza spektra, je Brüel&Kjær 4189, který byl umístěn ve vyzařovací ose nástroje. Pro určení směrové charakteristiky bylo využito 10 rovnoměrně rozmístěných měřicích všesměrových kondenzátorových mikrofónů Audix TM1, umístěných v půlkruhu v horizontální rovině o poloměru 2 metry (při zachování minimální vzdálenosti 1 m od bočních zdí místnosti a 0,5 m od zadní stěny místnosti) a výšce 1,2 metru. Půlkruh byl rozmístěn okolo vyzařovacího otvoru resp. nulové osy, přičemž hráč stál ve středu pomyslné kružnice (tj. krajní mikrofony půlkružnice byly umístěny do roviny s hráčem pod úhlem 90° resp. 270° od vyzařovací osy nástroje), viz obr. 5.1.



Obr. 5.1: Rozestavení měřicích mikrofónů a pozice hráče během nahrávání

Všechny mikrofony byly přivedeny do zvukové karty M-Audio Profire, která sloužila zároveň jako phantomový napáječ kondenzátorových mikrofonů. Ze zvukové karty byl vyveden výstup skrz rozhraní MADÍ do počítače v kontrolní místnosti. Pomocí programu Cubase, který slouží k nahrávání a zpracování zvukových signálů proběhlo nejdříve nahrání kalibračního signálu (sinusoidy o kmitočtu 1 kHz s konstantním akustickým tlakem) pomocí mobilního kalibrátoru, dále pak postupné nahrávání zvukových vzorků lesních rohů (o vzorkovacím kmitočtu 48 kHz a hloubce 24 bitů).

5.2 Charakteristika měřených nástrojů

Pro nahrávání vzorků, určených pro analýzu, byly použity 2 dvojité lesní rohy, jeden jednoduchý lesní roh, 3 lesnice a 4 nátrubky rozdílných velikostí (tvaru, objemu).

5.2.1 Použité lesní rohy a lesnice

1. Josef Lidl Brno, model LHR 867 (obr. 5.2)

Jedná se o dvojité lesní roh ve standardním, palcem přepínatelném ladění F/B. Tento nástroj lze považovat za profesionální model užívaný na konzervatořích, vysokých školách či v lokálních filharmoních. Cena takového nástroje se pohybuje v závislosti na materiálu (žlutá/červená mosaz) či provedení (odnímatelný korpus) kolem 75 000 Kč. Nahrávaný nástroj byl vyrobený z červenomosazného plechu (90% mědi + další kovy) o tloušťce 0,55 mm před opracováním, opatřený lakem. Roztrub dosahuje šířky 30 cm, menzura nástroje má šířku 11,7 mm. Nástroj byl opatřen 4 ventily vyrobenými z pakfongu (niklové mosazi, při přibližném poměru 60 % mědi, 20 % niklu a 20 % zinku) [1][14].



Obr. 5.2: Lesní roh zn. Josef Lidl LHR 867 v provedení ze žlutomosazného plechu

Převzato z [14].

2. V. F. Červený, model CHR 681 (obr. 5.3)

Tento model dvojitého lesního rohu (ladění F/B) lze zařadit do stejné kategorie jako předchozí model (srovnatelné využití i cena). Nahrávaný nástroj byl zhotoven ze žlutomosazného plechu, ústnice a ventily pak z pakfongu. S předchozím nástrojem je totožné i vrtání (11,7 mm) a srovnatelná šířka roztrubu (30,5 cm). Hmotnost nástroje je 2,6 kg [18].



Obr. 5.3: Lesní roh V. F. Červený CHR 681 v provedení ze žlutomosazného plechu
Převzato z [19].

3. Josef Lídl Brno, model LHR 321Z (obr. 5.4)

Model tohoto lesního rohu se řadí mezi začátečnické modely, jeho využití je především na ZUŠ, často jde o první nástroj hornistů. Tomu odpovídá i cena, která je oproti dvěma předchozím modelům méně než poloviční. Přestože se jedná o jednoduchý lesní roh, je u něj uvedeno ladění F/Es, které lze změnit pomocí přídatného Es snižce (změna ladění v průběhu hry je tedy značně komplikovaná). Nástroj je tedy 3 ventilový, s průměrem vrtání 11,7 mm a průměrem ozvučníku 30 cm. Provedení nástroje je zlatomosazné [20].



Obr. 5.4: Lesní roh zn. Josef Lídl LHR 321Z v provedení ze zlatomosazného plechu
Převzato z [20].

4. Josef Lídln Brno, model LBG 282G

Zlatomosazný přirozený lesní roh v B ladění v koženém obtočení (čistě z praktických důvodů). Jemná úprava ladění se provádí pomocí posuvné pakfongové ústnice, vrtání je standardní, tj. 11,7 mm. Šířka ozvučnicku jest opět 30 cm [21]. Hmotnost této lesnice je 1,1 kg.



Obr. 5.5: Lesní roh zn. Josef Lídln Brno LBG 282G v provedení ze zlatomosazného plechu
Převzato z [21].

5. Amati Kraslice, model ABG 283K (obr. 5.6)

Přirozený B lesní roh proslulého českého výrobce je svými mechanickými vlastnostmi velmi podobný přirozenému lesnímu rohu z brněnské továrny, který je popsán o bod výše. Nástroj byl vytvořen z mosazného plechu, průměr jeho vrtání je rovněž 11,7 mm, šířka roztruby činí 30,5 cm. Nástroj je lakován epoxydovým lakem [22].



Obr. 5.6: Lesní roh zn. Amati Kraslice ABG 283K v provedení z mosazného plechu
Převzato z [22].

6. M. Jiráček & sons, model 124

Další B lesnice pochází z produkce českého výrobce M. Jiráček & sons, sídlící v Hostěrádkách-Rešově nedaleko Brna. Tento model lze považovat za alternativu předchozích dvou lesovek od historičtějších českých výrobců, zároveň je dbáno na to, aby bylo možné tyto lesnice vzájemně doladit (zejména při hře unisono). Tomu odpovídají i rozměry vrtání (11,7 mm) a velikost ozvučnicku (30 cm). Tloušťka plechu je 0,55 mm. Nástroj je lakován lakem na přírodní bázi [23].



Obr. 5.7: Lesní roh zn. M. Jiráček & sons 124 v provedení ze žlutomosazného plechu
Převzato z [23].

5.2.2 Vlastnosti výrobních materiálů a vliv na zvukovou barvu

V popisu jednotlivých nástrojů je uveden materiál, který byl použit pro jeho výrobu. Vždy se jedná o mosazný plech (slitinu mědi a zinku (příp. dalších kovů v mnohonásobně menším procentuálním podílu) v určitém poměru), a to ve třech typech: žlutomosazný (70 % mědi ve slitině), zlatomosazný (85 % mědi ve slitině) a červenomosazný (90 % mědi ve slitině) [1] [28]. Hustota mědi je rovna 8 960 kg/m², hustota zinku je 7 140 kg/m². Pro nástroj s větší koncentrací mědi, tedy látky s vyšší hustotou, bude potřeba více energie k jeho rozrezonování. Zároveň je zřejmé, že vyšší obsah mědi v plechu znamená větší hmotnost nástroje.

U spektra lesního rohu vyrobeného z červenomosazného plechu bychom měli vidět rychlejší úbytek intenzity vyšších harmonických složek než je tomu u nástrojů ze žlutomosazného plechu. Zlatomosazný plech by měl být pomyslnou „střední cestou“, vlastnostmi více podobný červenomosaznému plechu.

To potvrzuje i vnímání hudebníků, kteří si žlutomosazné nástroje vybírají pro tón barevně bohatší, kdežto červenomosazné a zlatomosazné nástroje jsou vybírány pro barvu teplou, širokou a ne tolik průraznou.

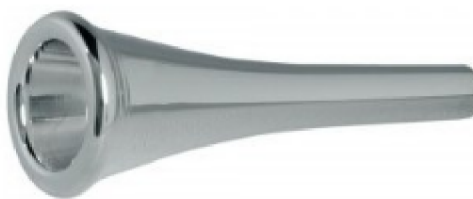
5.3 Charakteristika nátrubků

Pro získání většího množství zvukových vzorků k analýze tónového spektra byly použity 4 nátrubky od různých výrobců. Nutno podotknout, že nahrávání vzorků na jednotlivé nátrubky bude do jisté míry ovlivněno hráčským návykem na určitý typ nátrubku, který používá k běžnému hraní. Problémem je i určení objemu nátrubku, a to hned ze dvou důvodů: jednak výrobci v katalogích neudávají hloubku dutiny a jednak nemusí být dutina nátrubku striktně trychtýřovitá, ale i částečně zaoblená (jakási fúze nálevkového a kotlíkového nátrubku).

5.3.1 Použité nátrubky

1. Vincent Bach, typ 10

Je právě standardně používaným nátrubkem hráče, který nahrával vzorky pro analýzu. Vyroben je patrně z mosazi, opatřen stříbrnou povrchovou úpravou. Dle katalogu výrobce [15] je nálevka označena jako „hluboká“, vnitřní průměr ráfku má hodnotu 16,8 mm, průměr hrdla 4,5 mm a tloušťka ráfku získala označení „středně široký“ z čehož nelze určit šířku v mm. Ve slovním popisu se výrobce vyjadřuje o tomto nátrubku jako o tvůrci německého romantického tónu, tedy objemově bohatého a uchu lahodícího. Hráč by s tvorbou tónu neměl mít obtíže v jakékoliv poloze tónového rozsahu.



Obr. 5.8: Nátrubek zn. Vincent Bach, typ 10. Převzato z [16].

2. Denis Wick, typ 5

Jedná se též o postříbřený mosazný nátrubek, u něhož jsou výrobcem [17] udány následující parametry: Vnitřní průměr ráfku má 17,5 mm, průměr hrdla je 4,6 mm a šířka ráfku se rovná 4,93 mm s dodatkem extra široký. Slovní popis vlastností poukazuje na pohodlnost a pružnost těchto nátrubků, což se má projevit v širokém a bohatém tónu.



Obr. 5.9: Nátrubek zn. Denis Wick, typ 5. Převzato z [17].

3. Engelbert Schmid, typ 7,5

Rozměry nátrubku jsou podle katalogu výrobce [24] následující: Vnitřní průměr okraje je 17,5 mm, průměr vrtání 3,9 mm, šířka nátrubkového okraje 4 mm. Hloubka dutiny nátrubku je označena jako středně plytký, tvar dutiny je označen jako „mírně baňatý“.



Obr. 5.10: Nátrubek zn. Engelbert Schmid, typ 7,5. Převzato z [25].

4. Amati Kraslice, typ HR 11

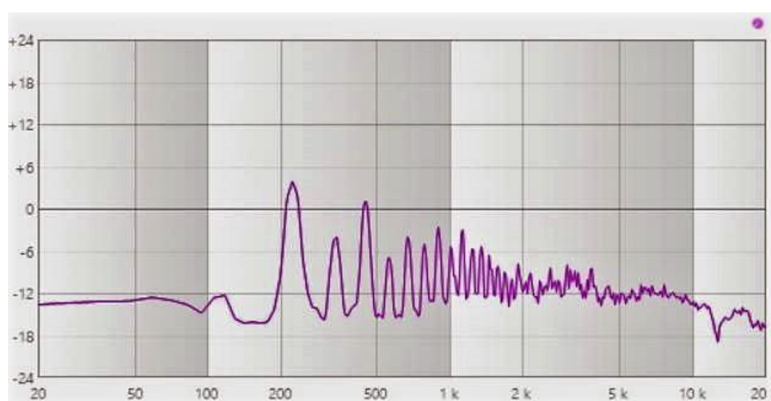
Posledním nátrubkem, použitým pro tvorbu zvukových vzorků je nátrubek české výroby. Zatímco předchozí 3 nátrubky můžeme označit jako prémiové nátrubky využívající know-how každého výrobce, tento nátrubek se dodává společně se zakoupeným nástrojem jako základní model. Vnitřní průměr nálevky je 16,5 mm, šířka ráfku 4,4 mm, hloubka nálevky je „střední“ a šíře hrdla není známa [26].



Obr. 5.11: Nátrubek zn. Amati HR 11. Převzato z [27].

5.3.2 Vlastnosti nátrubků a jejich vliv na zvukovou barvu

Jak již bylo uvedeno v podkapitole 2.1, aktivním oscilátorem jsou v případě žesťových nástrojů rty, které při kmitání vydávají tzv. retný tón. Frekvence retného tónu roste s napětím rtů a zvyšováním tlaku v dutině ústní a klesá, čím víc roste průměr nátrubku ohraničující rty. Nátrubek lze považovat za pasivní oscilátor [8]. Spektrum retného tónu je vykresleno na obr. 5.12, kdy se hráč pokusil hrát dále analyzovaný tón **a** (220 Hz). Ve spektru je jasně patrné, že není složen jen z alikvótní řady tónu **a**. Podle 2., 4. a 6. harmonické složky si dovoluji odhadnout, že se jedná o vzájemné propojení tónů **a** a v menší intenzitě **e¹** (329,6 Hz), tudíž zní společně čistá kvinta.



Obr. 5.12: Retný tón **a** (220 Hz)

Na následujícím obrázku (obr. 5.13) se hráč pokusil zahrát tentýž tón na nátrubek Vincent Bach 10 a posléze na zbylé nátrubky, jenž byly použity. pro analýzu. U tohoto tzv. nátrubkového tónu je ve spektru patrná rezonance nátrubku i stopky, zároveň je zřejmé, že došlo k vyfiltrování harmonických složek spoluznějícího tónu, ozývá se tedy skutečně tón **a** s velmi bohatým spektrem.



Obr. 5.13: Nátrubkový tón **a** (220 Hz) – nátrubek Vincent Bach 10

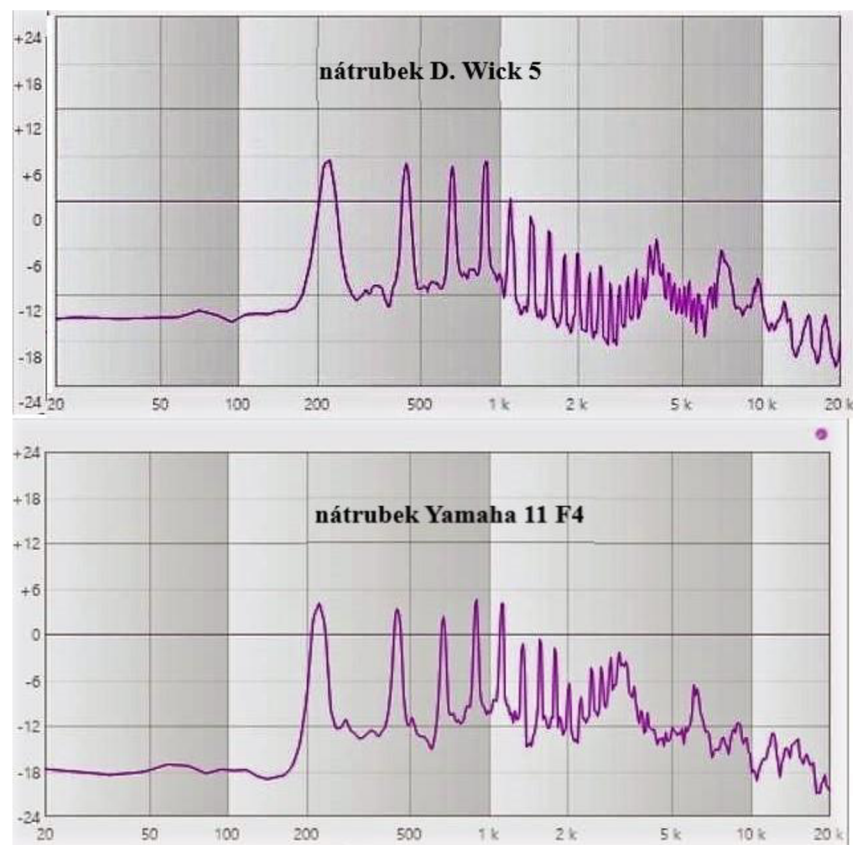
Abychom ověřili, že rezonance nálevky skutečně odpovídá grafickému vykreslení spektra, použijeme výpočet rezonanční frekvence ze zdroje [8] str. 240

$$f_R = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{Vl}} \quad (5.1)$$

kde c je rychlost zvuku ve vzduchu, S efektivní plocha hrdla, V objem nátrubku a l délka stopky.

Protože výrobce standardně neuvádí hloubku nátrubku ani jeho objem, byl u každého nátrubku experimentálně změřen objem pomocí pipety a tekutiny. U každého z nátrubků byla též změřena délka stopky. Hodnoty pro nátrubek Bach 10 jsou následující: $c = 341$ m/s, $S = 2,75^2 \cdot \pi$ mm², $V = 27$ ml a $l = 35$ mm. Po zadání těchto hodnot do vztahu 5.1 nám vyjde hodnota rezonančního kmitočtu 876,9 Hz, což docela přesně odpovídá kmitočtu 4. harmonické složky. U ostatních nátrubků se rezonanční kmitočty liší v řádech jednotek Hertzů, rozdíl je ale v intenzitě této složky. U všech nátrubků lze také velmi dobře vypočítat rezonance stopky nátrubků. Hodnoty rezonance stopek nátrubků se nacházejí kolem kmitočtu cca 4 kHz a cca 7 kHz. Zatímco u rezonančních kmitočtů nálevek můžeme posoudit přímý vliv na oblast kolem 4. harmonické složky, rezonance stopky se nachází kolem 15. harmonické složky, což je hodnota na přelomu 2. a 3. složkového pásma.

Podívejme se nyní na srovnání spektra nátrubkového tónu Denis Wick 5 (mírně miskovitá nálevka) a Yamaha 11 F4 (kotlíkový nátrubek pro trumpetu). Kotlíkový nátrubek by měl mít především v 1. pásmu (1. až 8. harmonická složka) spektrum plnější (intenzita 5. harmonické je srovnatelná s předešlými, 6., 7. a 8. harmonická má téměř totožnou intenzitu). Přestože se rezonance kotlíku nachází opět kolem kmitočtu 850 Hz, rezonance stopky se u tohoto nátrubku nachází kolem 3,2 kHz, což je o cca 800 Hz níže než je tomu v případě nálevkového nátrubku. Tónová barva kotlíkového a nálevkového nátrubku je tedy v mnoha aspektech odlišná.



Obr. 5.14: Spektrum nálevkového a kotlíkového nátrubku - porovnání

Podle popisu vlastností nátrubku, definovaného v kap. 1.3 můžeme tedy určit předpokládané rozdíly v tónu jednotlivých tónů.

1. Šířka a vnitřní průměr okraje: Nátrubek Vincent Bach 10 by měl tvořit pomyslnou „střední cestu“ mezi nátrubky E. Schmid a D. Wick vs. Amati HR 11. Jeho ostrost i jasnost by se měla pohybovat (vlivem okraje) mezi hodnotami ostatních nátrubků, přičemž nátrubek Amati by měl produkovat tóny více pronikavé a E. Schmid, příp. D. Wick tóny jasnější, kulatější.

2. Hloubka a profil nálevky: Nátrubky E. Schmid a D. Wick mají mírně vytvarovanou, nikoliv přesně kuželovitou nálevku. To by mělo ovlivnit intenzitu harmonických složek (intenzita vyšších harmonických by měla být vyšší u nátrubků s nálevkou mírně baňatého profilu).

3. Šířka hrdla, světlost: Vrtání hrdla je nejužší u nátrubku E. Schmid, to společně s nejužším okrajem vede k pohodlnému nasazení tónu v jakékoliv výšce, což mu dodává určitou všestrannost. Na opačné straně je nátrubek D. Wick 5, který má největší okraj i nejširší vrtání (to by se mělo projevit především v hlubokém rejstříku nástroje).

5.4 Nahrávání vzorků

Před začátkem nahrávání bylo nutné nástroje přinést do bezodrazové místnosti, kde byly vytaženy z obalů a cca. půl hodiny ponechány na podlaze, aby došlo ke sjednocení teploty okolí s teplotou lesních rohů a nátrubků. V tomto mezičase proběhla domluva scénáře měření, aby bylo zajištěno nahrání co možná nejkvalitnějších a nejméně zkreslujících vzorků. Bylo domluveno, že se hráč pokusí hrát jednotlivé tóny sobě co nejpodobněji, téměř tak, jako by byly provedeny robotem s umělými ústy. Dále byly zvoleny 2 řady tónů (v závislosti na ladění nástroje), které hráč hrál postupně. Jedná se o tóny nacházející se v obvykle užívaném rozsahu nástroje, viz tab. 5.1. Záměrně nebyly vybrány tóny z krajních poloh (zejména vysokých), aby nedošlo k přepnutí hráče, což by patrně mělo za následek předčasné ukončení nahrávání. Důležitou poznámkou je uvedení názvů tónů v řadě tak, jak skutečně znějí (dle kmitočtu $f_{a1} = 440$ Hz), zatímco hráči na lesní roh F nazývají hraný tón názvem tónu, který ve skutečnosti zní o kvintu výše, než je psán.

Tab. 5.1: Výchozí řada tónů pro nahrávání zvukových vzorků

Číslo	1.	2.	3.	4.	5.
Tón (f řada)	F	c	a	fis ¹	h ¹
f [Hz]	87,31	130,81	220	369,99	493,88
//					
Číslo	1.	2.	3.	4.	5.
Tón (b řada)	B ₁	f	a	c ¹	b ¹
f [Hz]	58,27	174,61	220	269,99	466,16

Každý tón zazněl 4x, poprvé pro vytvoření tónové představy a přípravy rtů a poté ve třech různých dynamikách: piano (slabě), mezzoforte (středně silně) a forte (silně). Tón byl nasazen tenuto, držený po dobu cca 3 vteřin, aby bylo možné získat alespoň vteřinový, v čase výrazně neproměněný tónový vzorek. Řada těchto tónů je záměrně nakombinována tak, aby některé tóny zněly na přirozenou F lesnici, některé na přirozenou B lesnici a na zbylé byla použita prodloužená délka nástroje či (v případě B lesovek) cpačí technika.

Nahrávání F řady probíhalo tak, že byly nahrány vzorky 3 ventilových lesních rohů s použitím totožného nátrubku, poté byly u F/B lesních rohů odzkoušeny nátrubky jiných výrobců. Dále proběhlo nahrání vzorků odražených od dřevotřískové zdi u F/B nástrojů s nátrubkem Bach 10, tyto vzorky jsou pro F řadu porovnány ve zvláštní tabulce.

U B řady se nejdříve nahrály referenční vzorky pomocí dvojitého lesního rohu, a to včetně zapojení ventilového systému. Poté byly nahrávány vzorky jednotlivých lesnic se stejným nátrubkem a u jedné lesnice bylo odzkoušeno více nátrubků či provedeno nahrávání zvukových vzorků odražených od dřevotřískové zdi.

6 ANALÝZA NAMĚŘENÝCH DAT

6.1 Realizace analýzy v programu Matlab

Pro realizaci analýzy naměřených vzorků za účelem porovnání tónových spekter, spektrogramů, číselných hodnot jednotlivých harmonických složek, určení formantových oblastí, objektivního popisu psychoakustických veličin a směrových charakteristik lesního rohu na jednotlivých tónech byly využity funkce vytvořené v programu Matlab. Ty byly použity ze zdroje [11] a formálně upraveny pro účely měření lesního rohu v této práci.

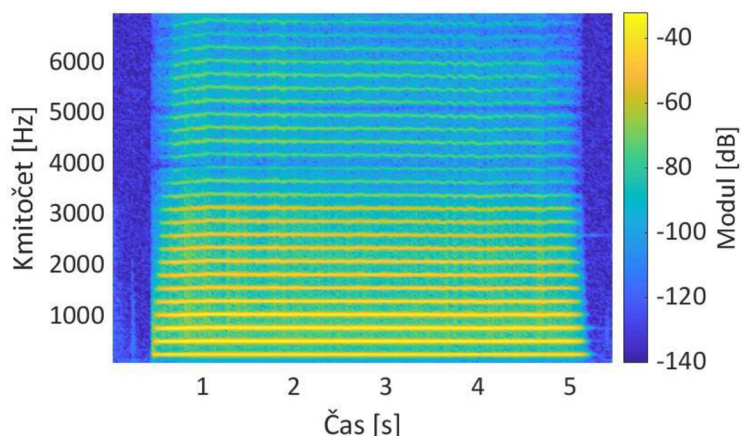
Ve fázi 1 probíhá výpočet intenzity harmonických složek, z něhož ve výstupní tabulce provádíme porovnání spektrálních složek, jakož i psychoakustických veličin analyzovaného tónu. Základním úkolem této fáze je eliminace nespojitostí pomocí Hannova okna, provedení FFT, přeměna na jednostranné spektrum, určení fundamentu a hledání dalších harmonických složek, jejichž hodnoty jsou kýženým výstupem [11]. S hodnotami intenzit harmonických složek dále pracují (po načtení vzorku měřícího mikrofonu) výpočty psychoakustických veličin, tedy ostrosti, jasnosti a tonality. Samostatnou funkcí je vykreslení spektrogramu, tedy změn spektra v čase, kdy je po nastavení parametrů zobrazení a načtení analyzovaného zvukového vzorku spuštěna smyčka krátkodobé Fourierovy transformace.

Fáze 2 slouží k analýze formantových oblastí. Zde se využívá integrované funkce *lpc*, které provádí LPC na autokorelačním principu. Po vytvoření modulové kmitočtové charakteristiky se do téhož grafu vykreslí i charakteristika spektra, kde pak lze pohodlně určit formanty.

3. fáze pak slouží k určení směrové charakteristiky v horizontální rovině. Po načtení kalibračních vzorků měřících mikrofonů proběhne výpočet kalibračních konstant, které jsou spočteny jako převrácené efektivní hodnoty signálu. Ve stejném pořadí mikrofonů pak načteme zvukové vzorky nástroje, které se vynásobí kalibračními konstantami. Dále proběhne výpočet znormalizovaných harmonických složek (vynásobených kalibrační konstantou) a nastane vykreslení dvou polárních diagramů, kde se polovina zvoleného počtu harmonických složek vykreslí vlevo a druhá polovina vpravo, kvůli větší přehlednosti.

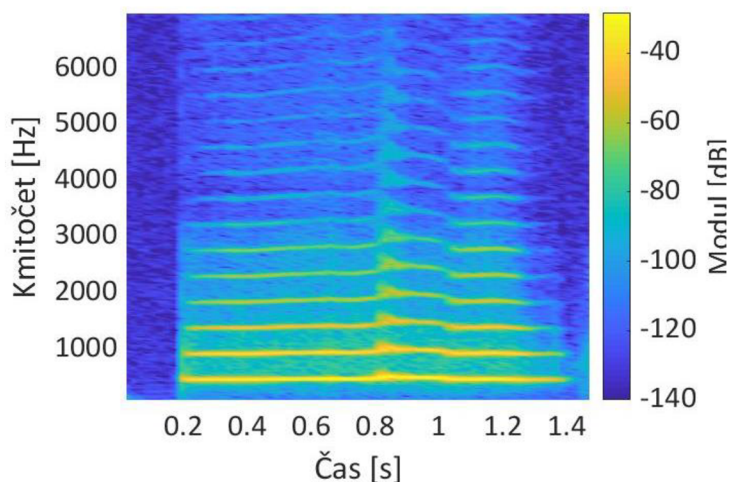
6.2 Časová spektrální analýza

Jak bylo uvedeno výše, k analýze spektra v čase se používá krátkodobá Fourierova transformace. Na základě výsledného spektrogramu můžeme pozorovat změny intenzity modulů v průběhu tónu i v nastupující a doznívající fázi tónu.



Obr. 6.1: Časový průběh tónu c^1 v dynamice forte

Přestože byla zřetelná hráčova snaha o co nejméně proměnnou barvu tónů v rámci času, ne vždy se to dařilo vzhledem k velkému množství nahrávaných vzorků a následné fyzické únavě nátiskového ústrojí hráče. To se projevovalo jak dynamickými, tak i intonačními rozdíly. Ve výše uvedeném obrázku lze např. v čase 3,5 - 4 s pozorovat kolísání kmitočtů vyšších harmonických, což je způsobeno vibratem v této části tónu. Občas v začátku či průběhu hraného tónu nastal přeskok na jiný alikvótní tón, načež každý hráč automaticky upraví nátisk pro rychlý návrat na tón hraný (tato situace se hovorově označuje jako „kiks“ či „kanár“ (viz obr. 6.2)).



Obr. 6.2: Nepřesné nasazení tónu h^1 .

Aby tedy byla zachována co nejmenší proměnlivost v barvě, intonaci či dynamice, byly k následné analýze vyřezány úseky o konstantní délce 1 s, které se dle subjektivního pocitu i vizuálního ověření v reálném čase za pomoci okamžitého zobrazení spektra měnily jen minimálně. V žádném z těchto vzorků se nenachází náběh ani doznívající fáze tónu.

6.3 Analýza tónu F

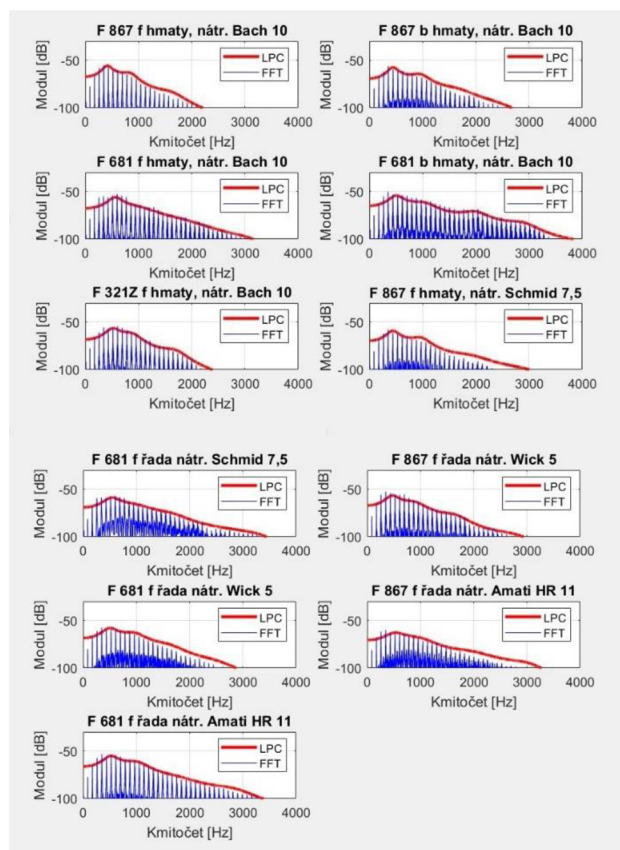
Tón F je nejhlubším z analyzované F řady. Je charakteristický svou teplou barvou, neprůrazností a výraznou intenzitou vyšších harmonických složek nad úrovní fundamentu. Tyto informace pro prvních 8 harmonických složek spolu s výše uvedenými vybranými psychoakustickými veličinami nám ukazuje tab. 6.1.

Tab. 6.1: Porovnávací tabulka tónu F

Hraný tón	F (87,31 Hz)					
Nástroj	Lidl LHR 876	Lidl LHR 876	Červený CHR 681	Červený CHR 681	Lidl 321Z	
Ladění	F	B	F	B	F	
Nátrubek	Vincent Bach 10					
Úroveň vyšších harmonických složek po odečtu f_1 [dB]						
f_1	0					
f_2	12,20	12,36	11,99	11,51	10,58	
f_3	19,57	17,64	22,39	20,14	16,64	
f_4	21,97	23,64	23,54	24,91	21,80	
f_5	19,65	20,09	22,42	21,73	20,97	
f_6	17,80	18,53	24,75	21,30	21,74	
f_7	16,79	18,38	25,76	21,37	23,28	
f_8	14,68	16,59	24,15	20,59	21,51	
Hladina akustického tlaku, jasnost, ostrost tónu a tonalita						
L_p [dB SPL]	63,8	62,8	68,4	71,2	66,3	
Jasnost [-]	7,06	7,59	9,07	10,26	8,07	
Ostrost [Acum]	0,66	0,66	0,7	0,79	0,68	
Tonalita [%]	81,5	76,2	81,4	78,2	80,8	
//						
Nást.	Lidl LHR 876	Červený CHR 681	Lidl LHR 876	Červený CHR 681	Lidl LHR 876	Červený CHR 681
Ladění	F/B					
Nátr.	E. Schmid 7,5	E. Schmid 7,5	D. Wick 5	D. Wick 5	Amati 11	Amati 11
Úroveň vyšších harmonických složek po odečtu f_1 [dB]						
f_1	0					
f_2	12,94	12,94	12,74	13,02	11,71	12,42
f_3	18,57	21,82	22,46	18,98	19,43	20,14
f_4	22,97	21,69	25,66	22,60	21,09	24,08
f_5	19,65	22,07	24,22	20,06	18,55	22,26
f_6	17,86	21,67	22,32	21,21	17,16	22,91
f_7	15,82	16,15	22,34	21,81	16,65	22,98
f_8	16,45	12,59	22,67	19,64	17,52	21,29
Hladina akustického tlaku, jasnost, ostrost tónu a tonalita						
L_p	61,5	65,2	67,9	64,1	61,9	68,5
BR	8,12	6,53	8,14	8,65	9,67	9,38
Ostr.	0,64	0,71	0,66	0,73	0,72	0,73
Ton.	73,7	76,2	77,8	76	71,5	79,5

Spektrum tohoto tónu ve střední dynamice prokazuje u všech nástrojů, že intenzita 1. (nosné) harmonické složky má od 4. harmonické (u většiny nástrojů nejsilnější harmonické složky spektra) odstup minimálně cca. 21 dB. 4. harmonická složka je alikvótou, která zní o 2 oktávy výše než je fundament, tudíž ho barevně posiluje, a my můžeme bez problému identifikovat výšku tónu, a to i přesto, že je 1. harmonická tak výrazně potlačena. Toto potlačení úrovně prvních 3 harmonických složek by mohlo být způsobeno úzkou menzurou (např. ve srovnání s tubou) vzhledem k vlnové délce tohoto tónu. Intenzita 6. a 7. harmonické složky je takřka totožná. Přestože je celková hladina akustického tlaku L_p u B lesnice nižší než u F lesnice, pozorujeme intenzivnější zastoupení nejsilnější (tedy 4.) a 6. a 7. harmonické složky. Zajímavostí je pak vysoká intenzita 7. harmonické složky u lesních rohů V. F. Červený 681 a Josef Lídler 321Z (kolem 620 Hz, tón es^2), která je od fundamentu vzdálena přes 2 oktávy a malou septimu, jež není právě nejlibozvučnějším intervalem. Právě 7. a 8. harmonická složka je však dosti utlumena při použití nátrubku E. Schmid 7,5, což bude způsobeno malým průměrem otvoru v hrdle. Jednotlivé harmonické složky pak mají podobnou intenzitu při použití nátrubku D. Wick 5, tón tvořený na tento nátrubek je u obou nástrojů subjektivně příjemně barevný a přitom krásně kulatý. Vliv na spektrum v této poloze má i materiál použitý pro výrobu nástroje. Zatímco u žlutomosazného vidíme vyrovnané spektrum v celém prvním pásmu, u červenomosazného dominuje právě nejsilnější harmonická složka a poté nastává pokles intenzity jednotlivých složek (dobře viditelné při porovnání nástrojů Lídler 867 a Červený 681 a nátrubku V. Bach 10). V grafech spektra je jasně patrná silnější 10. harmonická, která se pohybuje kolem 800 Hz. Zvýšení její intenzity je důsledkem rezonance nálevky nátrubků.

Barvu lesního rohu má v této poloze určovat výrazná formantová oblast, s centrem okolo kmitočtu 350 Hz (přibližně mezi 4. a 5. harmonickou) s charakterem hlásky U [8], což se beze zbytku potvrdilo u všech měřených nástrojů (viz obr. 6.3). Další formantovou oblast nalézáme na kmitočtu 900 Hz (vyjma nástroje V. F. Červený 681 s nátrubky Bach 10 a Schmid 7,5) a rozpětím cca 150 Hz. Při použití f lesnice a nátrubků Bach a Wick je u nástrojů firmy Lídler pozorovatelná formantová oblast kolem kmitočtu 1500 Hz, což ve spektru téhož tónu hraného na b lesnici nepozorujeme. U nástroje Červený 681 se tato formantová oblast v žádném případě neprojevila.



Obr. 6.3: Určení formantových oblastí tónu F u měřených lesních rohů

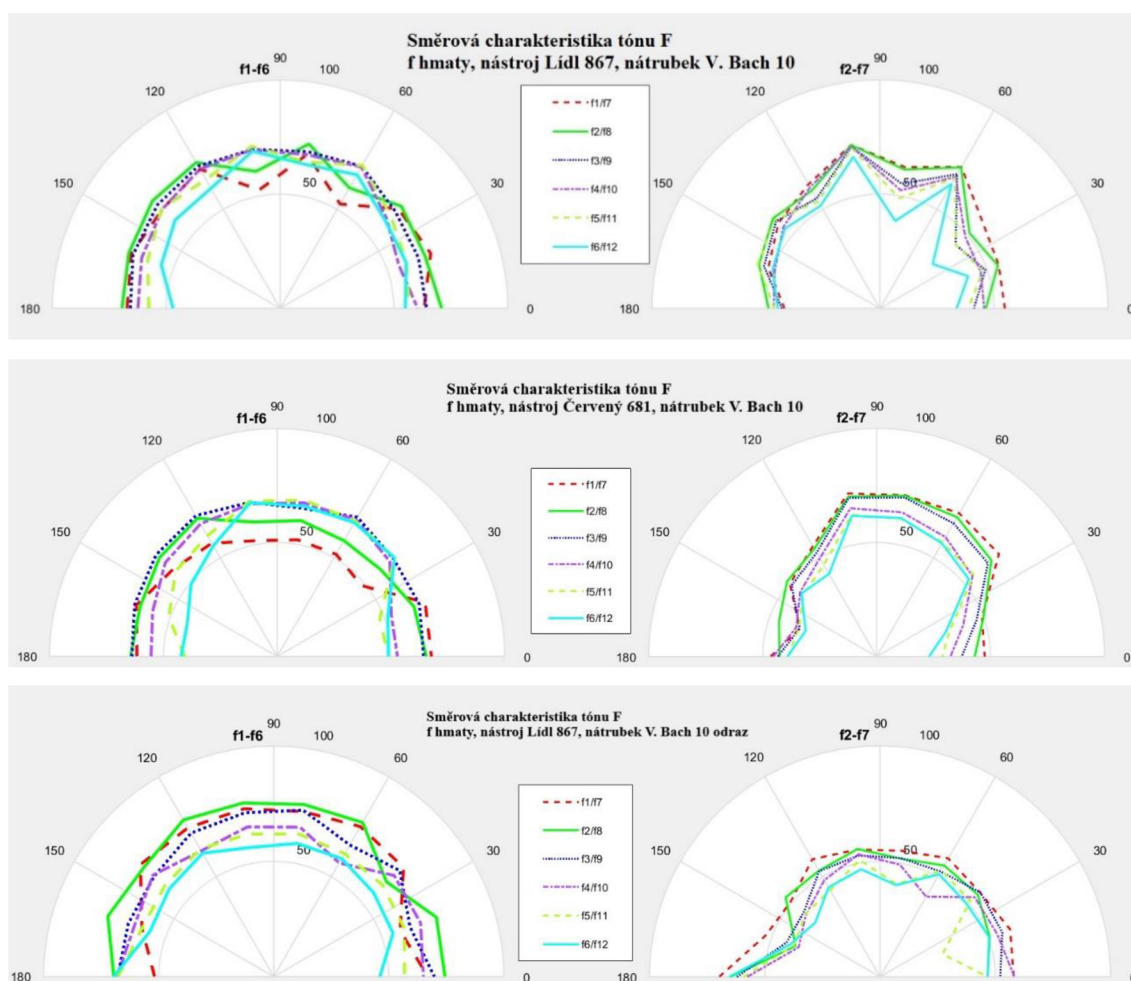
Dále porovnejme rozdíly v intenzitě harmonických složek v prvním pásmu, které jsou způsobeny odlišným postavením hráče ke snímacím mikrofonom. To by mělo simulovat postavení hráče při praktické hře (sólových koncertech či posedu hráčů v orchestru).

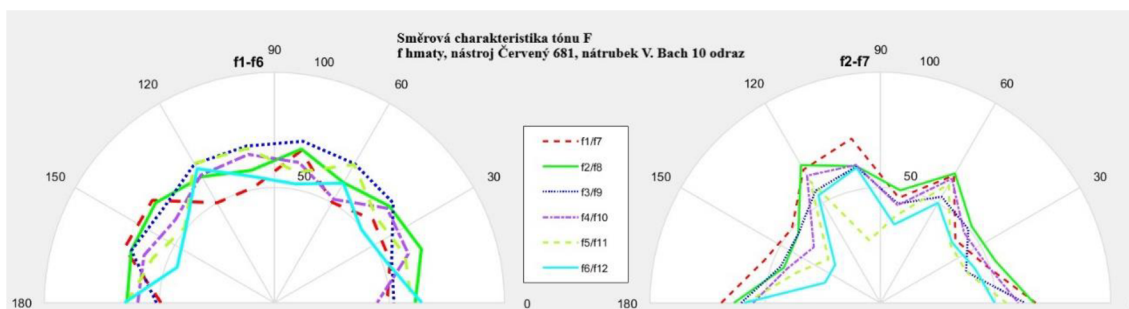
Tab. 6.2: Porovnávací tabulka tónu F – odraz od dřevotřískové zdi

Hraný tón	F (87,31 Hz)			
Nástroj	Čer. CHR 681 "přimo"	Čer. CHR 681 "odraz"	Lidl LHR 867 "přimo"	Lidl LHR 867 "odraz"
Ladění	F/B			
Nátrubek	Vincent Bach 10			
Úroveň vyšších harmonických složek po odečtu f_1 [dB]				
f_1	0			
f_2	11,99	19,62	12,20	22,81
f_3	22,39	24,17	19,57	22,70
f_4	23,54	26,33	21,97	29,72
f_5	22,42	26,91	19,65	32,04
f_6	24,75	20,48	17,80	22,92
f_7	25,76	28,29	16,79	27,47
f_8	24,15	20,34	14,68	22,72
Hladina akustického tlaku, jasnost, ostrost tónu a tonalita				
L_p [dB _{SPL}]	68,4	64,1	63,8	68,8
Jasnost [-]	9,07	8,24	7,06	9,07
Ostrost [Acum]	0,7	0,64	0,66	0,61
Tonalita [%]	81,4	77,6	81,5	81,3

U vzorků nahraných odrazem pozorujeme pokles intenzity 4. harmonické složky a nárůst intenzity 5. harmonické složky spektra. U 6. a 8. harmonické složky vidíme schodovitý pokles, který u lichých složek nepozorujeme (naopak dochází k jejich zintenzivnění). To se nepravidelně proměňuje v tzv. „druhém pásmu“.

Směrová charakteristika tónu F nám ukazuje rozmanitost vyzařování jednotlivých harmonických složek spektra. Na obr. 6.4 jsou pozorovatelné vyzařovací laloky tvarované zřejmě podle polohy ruky v korpusu nástroje, u vzorku na obr. 6.5 jsou tyto laloky tvarovány poněkud jinak. Tvarově (a tedy i intenzitně nejstálejší) jsou 3. a 4. harmonická složka vykreslující téměř dokonalý půlkruh. Ideální úhel, ve kterém vyzařují všechny vykreslené harmonické složky, se nachází kolem 100°. Směrová charakteristika u vzorků, nahraných odrazem (obr. 6.6, 6.7), lze pozorovat větší intenzitu 1. – 12. harmonické složky na krajních směrových mikrofonech (tj. 0° a 180°), dále lze pozorovat stínění hráče i nástroje (dobře viditelná „vykrojení“ v obrázku 6.7).





Obr. 6.4 – 6.7: Směrová charakteristika tónu F

6.4 Analýza tónu a

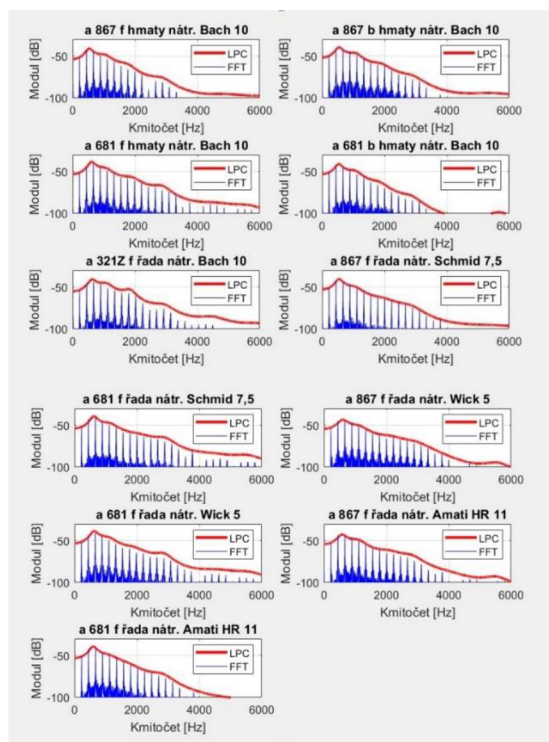
Tón a zastupuje v naší analyzované řadě střední polohu tónového rozsahu lesního rohu. Tato poloha je pravděpodobně pro hráče tou nejpohodlnější, tónově hutná, barevně poměrně snadno zaměnitelná s pozounem. Porovnání harmonických složek přináší tabulka 6.3.

Tab. 6.3: Porovnávací tabulka tónu a

Hraný tón	a (220 Hz)					
Nástroj	Lidl LHR 876	Lidl LHR 876	Červený CHR 681	Červený CHR 681	Lidl LHR 876	Lidl 321Z
Ladění	F	B	F	B	F	F
Nátrubek	Vincent Bach 10					
Úroveň vyšších harmonických složek po odečtu f_1 [dB]						
f_1	0					
f_2	7,20	6,99	6,35	6,90	7,29	7,29
f_3	6,79	6,59	10,60	7,14	9,40	9,40
f_4	2,37	4,26	6,82	2,33	6,76	6,76
f_5	-2,30	1,13	1,91	-2,20	2,04	2,04
f_6	-4,81	-2,68	-0,52	-6,00	-0,44	-0,44
f_7	-10,11	-8,60	-5,50	-11,55	-3,32	-3,32
f_8	-14,61	-10,39	-6,84	-14,94	-4,11	-4,11
Hladina akustického tlaku, jasnost, ostrost tónu a tonalita						
L_p [dBspl]	73,4	76,4	75,5	74,1	75,5	75,5
Jasnost [-]	3,78	4,86	3,87	3,84	4,37	4,37
Ostrost [Acum]	0,77	0,89	0,82	0,73	0,91	0,91
Tonalita [%]	87,5	85,6	82,3	83,8	85,8	85,8
//						
Nást.	Lidl LHR 876	Červený CHR 681	Lidl LHR 876	Červený CHR 681	Lidl LHR 876	Červený CHR 681
Ladění	F/B					
Nátr.	E. Schmid 7,5	E. Schmid 7,5	D. Wick 5	D. Wick 5	Amati 11	Amati 11
Úroveň vyšších harmonických složek po odečtu f_1 [dB]						
f_1	0					
f_2	8,87	9,57	7,67	8,01	9,02	9,24
f_3	7,46	11,45	7,38	10,72	7,88	11,26
f_4	4,27	6,75	6,15	6,92	6,56	4,81
f_5	-1,13	2,18	0,54	1,93	2,08	1,32
f_6	-3,29	-0,77	-3,05	-2,48	-1,58	-0,41
f_7	-8,22	-6,37	-6,44	-7,09	-6,81	-6,37
f_8	-10,69	-7,44	-8,07	-7,81	-8,57	-9,31
Hladina akustického tlaku, jasnost, ostrost tónu a tonalita						
L_p	74,6	77,2	74,2	77,3	74,5	76,5
BR	4,12	4,79	4,48	4,61	4,56	3,75
Ostr.	0,79	0,94	0,9	0,92	0,89	0,82
Ton.	86,6	84,3	81,1	83,2	84,1	89,2

Z údajů, které lze vypočítat z této tabulky, vyplývá, že 1. harmonická složka stále není nejintenzivnější. Oproti tónům z velké oktávy je patrné, že se snížil odstup 1. harmonické složky od zbylých složek v „prvním pásmu“ (odstup se pohybuje mezi 7 – 11,5 dB), přičemž 2. harmonická složka (v intervalu oktávy od fundamentu) a 3. harmonická složka (oktáva a kvinta od fundamentu, pouze u nástroje Červený 681) jsou ve spektru analyzovaného tónu nejsilnější. Zajímavostí je razantní pokles intenzity vyšších harmonických od 4. harmonické složky u f hmatů nástroje Lidl 867 a b hmatů nástroje V. F. Červený 681. Jako zvukově nejbarevnější se subjektivně jeví nátrubek Denis Wick 5, mj. i proto, že tón u obou lesních rohů byl u tohoto nátrubku nejvyrovnanější a pocitově nejpodobnější. Lze též vypočítat, že spektrum nátrubků s mírně miskovitou nálevkou je celkově plnější, než u nátrubků s kónickou nálevkou. Rezonance nátrubku je projevuje u 4. harmonické složky, avšak velmi nepatrně.

Nejvýraznější z formantových oblastí má své centrum mezi 2. a 3. harmonickou složkou, tedy kolem kmitočtu 500 Hz, s rozpětím cca 250 Hz. Přítomnost dalšího formantu lze pozorovat kolem 1,2 kHz. Zřejmou formantovou oblastí je oblast kolem 2800 Hz až 3000 Hz. Ta se vyskytuje u všech nástrojů, nejméně intenzivní je u lesního rohu Lidl 867. Další, méně intenzivní formantovou oblast pozorujeme kolem kmitočtu 1800 Hz.



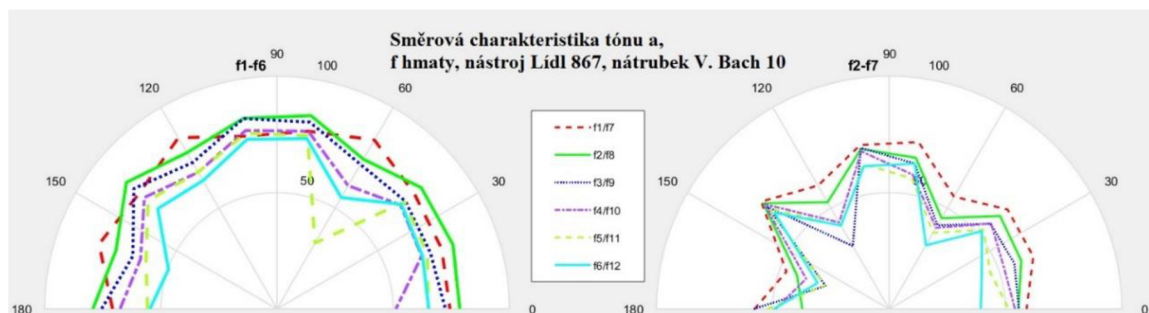
Obr. 6.8: Určení formantových oblastí tónu a u měřených lesních rohů

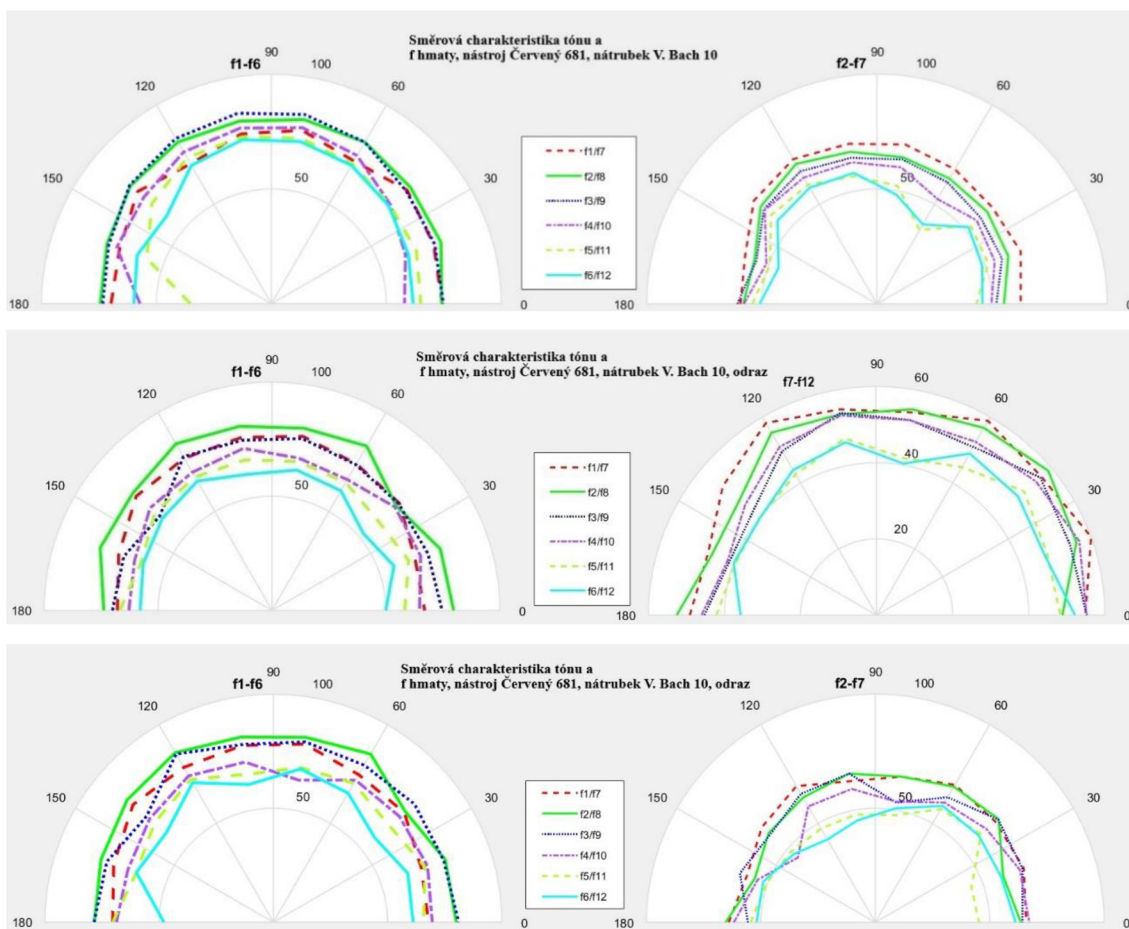
Tab. 6.4: Porovnávací tabulka tónu a – odraz od dřevotřískové zdi

Hraný tón	a (220 Hz)			
Nástroj	Čer. CHR 681 "přímo"	Čer. CHR 681 "odraz"	Lídl LHR 867 "přímo"	Lídl LHR 867 "odraz"
Ladění	F/B			
Nátrubek	Vincent Bach 10			
Úroveň vyšších harmonických složek po odečtu f_1 [dB]				
f_1	0			
f_2	6,35	5,75	7,20	6,32
f_3	10,60	2,40	6,79	0,44
f_4	6,82	-6,57	2,37	-3,34
f_5	1,91	-24,90	-2,30	-12,93
f_6	-0,52	-19,49	-4,81	-19,44
f_7	-5,50	-14,69	-10,11	-21,87
f_8	-6,84	-14,84	-14,61	-18,83
Hladina akustického tlaku, jasnost, ostrost tónu a tonalita				
L_p [dB _{SPL}]	75,5	73,2	73,4	74,1
Jasnost [-]	3,87	3,65	3,78	3,38
Ostrost [Acum]	0,82	0,71	0,77	0,73
Tonalita [%]	82,3	88,5	87,5	91,5

Oproti spodní tónové poloze, kde se intenzity harmonických složek proměňovaly od 6. složky schodovitými skoky, můžeme v tab. 6.4 pozorovat rozdíl ve střední tónové poloze. Tam vidíme zřejmý rozdíl již od 3. harmonické složky. Rozdíl u 5. harmonické činí víc než 26 dB. Intenzita dalších harmonických složek se poté proměňuje ve „vlnách“. Skok mezi 4. a 5. harmonickou složkou u odraženého vzorku poukazuje na zvýšení intenzity 4. harmonické v důsledku rezonance nálevky nátrubku.

Směrová charakteristika nástroje Lídl 867 je poměrně kostrbatá, zejména u 7.- 12. harm. složky připomíná javorový list. Srovnáme-li graf z odrazu u tohoto nástroje, zjistíme, že hvězdicové tvary se zaoblí téměř do půlkruhu. Výjimkou jsou pak vyšší harmonické složky (11. – 12.), které kolem 80° zlomí jinak zaoblenou linku. To je patrně způsobeno stíněním hráče. Nástroj V. F. Červený 681 má napřímo půlkruhovou směrovou charakteristiku, tento trend je zachován i v grafu s odrazem, a to u prvních 4. spektrálních složek. Ostatní složky mají vyzařování poněkud méně rovnoměrné (stín nástroje, hráče).





Obr. 6.9 – 6.12: Směrová charakteristika tónu a

6.5 Analýza tónu h^1

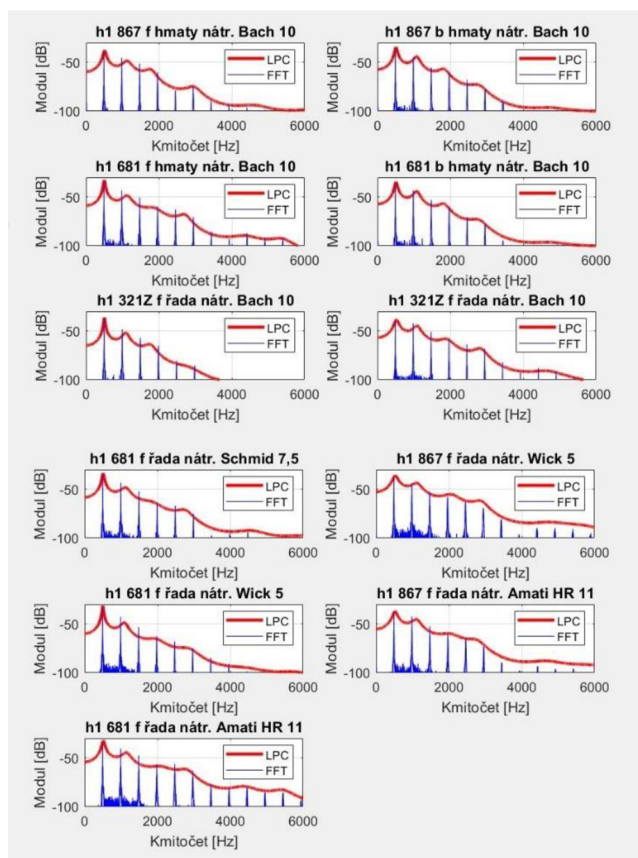
Pro analýzu vyšší polohy v rozsahu lesního rohu byl zvolen tón h^1 . Přestože se nejedná o jeden z nejvyšších tónů, lze na něm dobře demonstrovat změny oproti střednímu pásmu rozsahu lesního rohu. Tón má typický zvuk pilovitého signálu, barevně velmi bohatý, v případě poslechu bez nástupné a dokmitávací fáze tónu znějící nepřirozeně až synteticky. Číselné vyjádření spektra poskytuje tabulka 6.5.

U tónu h^1 vidíme, že se fundament konečně stává nejsilnější harmonickou složkou tónového spektra. Spektrum klesá postupně, místy je některá harmonická složka silnější než předchozí (v řádu jednotek decibelů). Odstup první harmonické od druhé harmonické složky se pohybuje kolem 6 – 7 dB. Můžeme pozorovat vliv lesnice na vyšší harmonické, kde u b lesnice je zřejmý rychlejší pokles u 7. a 8. harmonické složky. Protože jsou vzorky silnější u nástroje ze žlutomosazného plechu, předpokládejme, že je takový nástroj pohodlnější k rozrezonování. Vliv materiálu ani nátrubku jinak ve spektru nepozorujeme.

Tab. 6.5: Porovnávací tabulka tónu h^1

Hraný tón	h1 (493,88 Hz)					
Nástroj	Lídl LHR 876	Lídl LHR 876	Červený CHR 681	Červený CHR 681	Lídl 321Z	Lídl 321Z
Ladění	F	B	F	B	F	F
Nátrubek	Vincent Bach 10					
Úroveň vyšších harmonických složek po odečtu f_1 [dB]						
f_1	0					
f_2	-5,84	-7,18	-8,76	-7,19	-10,47	-10,47
f_3	-11,55	-16,73	-16,11	-16,73	-18,79	-18,79
f_4	-20,59	-20,49	-24,98	-23,94	-27,10	-27,10
f_5	-38,91	-34,27	-28,19	-34,27	-42,57	-42,57
f_6	-34,93	-37,73	-35,80	-41,17	-47,32	-47,32
f_7	-49,65	-54,72	-50,71	-58,17	-69,10	-69,10
f_8	-53,51	-62,97	-58,19	-66,42	-65,24	-65,24
Hladina akustického tlaku, jasnost, ostrost tónu a tonalita						
L_p [dB SPL]	75,9	76,7	79,1	78,6	78,6	76,2
Jasnost [-]	1,69	1,77	1,75	1,79	1,62	1,62
Ostrost [Acum]	0,93	0,94	0,93	0,92	0,85	0,85
Tonalita [%]	96,4	94	96,7	93,6	95,9	95,9
//						
Nást.	Lídl LHR 876	Červený CHR 681	Lídl LHR 876	Červený CHR 681	Lídl LHR 876	Červený CHR 681
Ladění	F/B					
Nátr.	E. Schmid 7,5	E. Schmid 7,5	D. Wick 5	D. Wick 5	Amati 11	Amati 11
Úroveň vyšších harmonických složek po odečtu f_1 [dB]						
f_1	0					
f_2	-2,01	-8,23	-6,39	-10,01	-3,60	-6,12
f_3	-10,85	-16,94	-15,29	-20,42	-13,70	-13,29
f_4	-17,11	-28,21	-20,29	-29,45	-21,38	-22,37
f_5	-23,52	-31,80	-25,13	-35,12	-25,90	-22,08
f_6	-28,10	-40,06	-31,19	-42,00	-34,13	-28,70
f_7	-41,88	-62,14	-42,72	-51,83	-50,55	-43,39
f_8	-51,90	-60,11	-58,55	-57,88	-59,03	-46,56
Hladina akustického tlaku, jasnost, ostrost tónu a tonalita						
L_p	77,6	78,9	77,4	78,8	78,5	80,1
BR	2,58	2,81	2,42	2,38	2,96	2,58
Ostr.	0,86	0,94	0,85	0,92	0,99	1,04
Ton.	93,8	93,5	91,6	93,1	89,2	88,7

Formantové oblasti jsou zde jednoznačně nejlépe určitelné, dle obr. 6.7. se nacházejí kolem kmitočtů 500 Hz, 1,1 kHz, 1,8 kHz a 2,8 – 3,1 kHz (tato formantová oblast u jednotlivých nástrojů maličko „cestuje“, někde se nachází mezi 5. a 6. harmonickou složkou, někde však nad 6. harmonickou složkou, vyjma nástroje Lídl 321Z, kde se tato oblast nenachází vůbec (to se projevuje ve zvuku, který zní u tohoto nástroje poněkud planě)). Tyto formantové oblasti se téměř shodují jak na lesnici B, tak i na lesnici F, vliv nátrubků na intenzitu formantových oblastí pak souvisí s jednotlivými psychoakustickými veličinami.



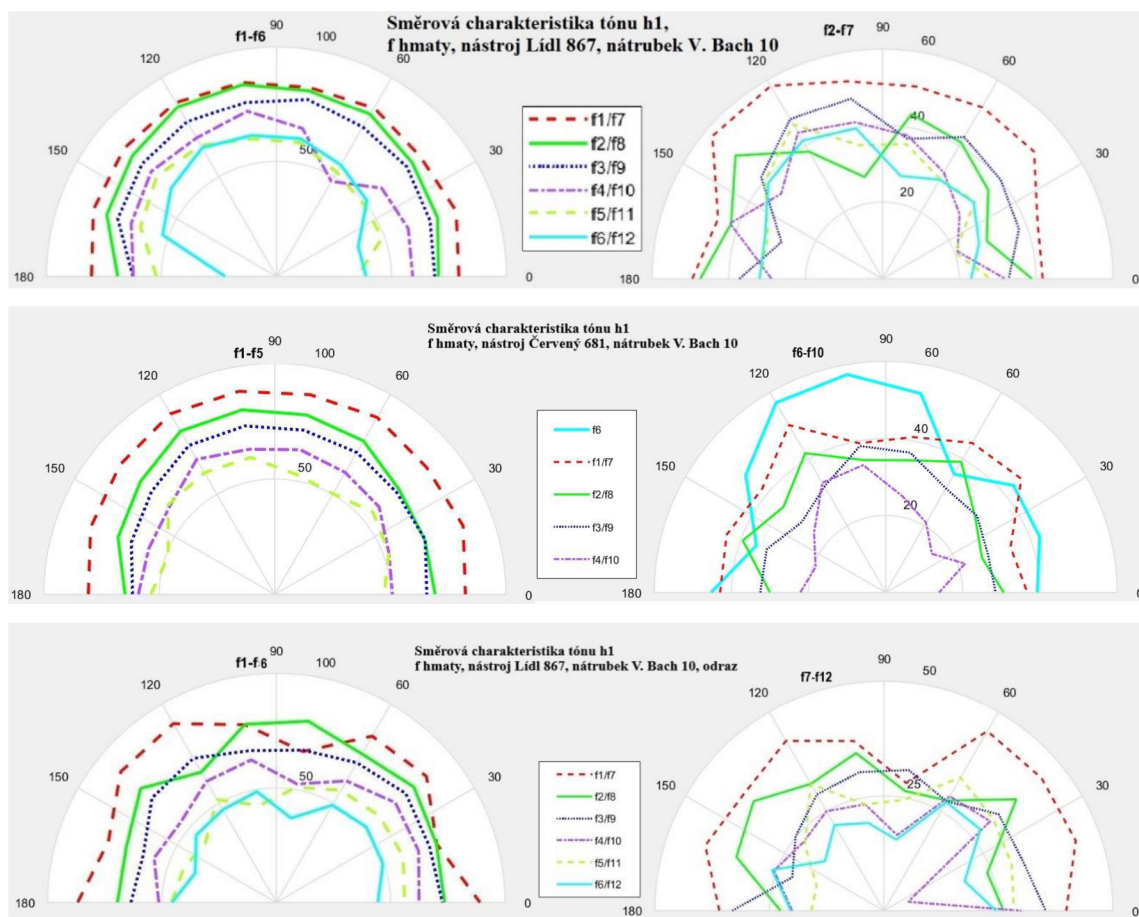
Obr. 6.13: Určení formantových oblastí tónu h¹ u měřených lesních rohů

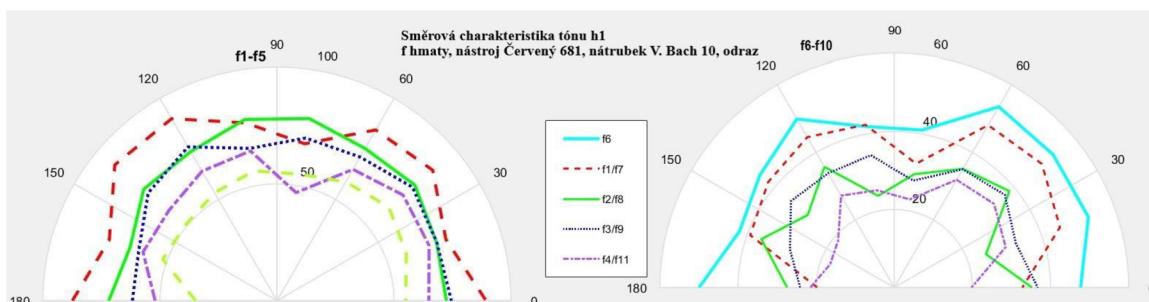
Tab. 6.6: Porovnávací tabulka tónu h¹ – odraz od dřevotřískové zdi

Hraný tón	h ¹ (493,88 Hz)			
Nástroj	Čer. CHR 681 "přimo"	Čer. CHR 681 "odraz"	Lidl LHR 867 "přimo"	Lidl LHR 867 "odraz"
Ladění	F/B			
Nátrubek	Vincent Bach 10			
Úroveň vyšších harmonických složek po odečtu f ₁ [dB]				
f ₁	0			
f ₂	-8,76	-4,55	-5,84	-2,46
f ₃	-16,11	-13,00	-11,55	-18,74
f ₄	-24,98	-22,77	-20,59	-20,58
f ₅	-28,19	-23,83	-38,91	-35,69
f ₆	-35,80	-39,06	-34,93	-31,27
f ₇	-50,71	-56,93	-49,65	-48,19
f ₈	-58,19	-53,85	-53,51	-51,98
Hladina akustického tlaku, jasnost, ostrost tónu a tonalita				
L _p [dB _{SPL}]	79,1	72,2	75,9	71,8
Jasnost [-]	1,75	2,01	1,69	1,76
Ostrost [Acum]	0,93	0,864	0,93	0,877
Tonalita [%]	96,7	91,4	96,4	91,2

Porovnání spektra u nástrojů vyzářujících přímo na mikrofon a nástrojů hrajících „na zed“ poukazuje na velice podobné hodnoty harmonických složek v prvním pásmu, v případě nástroje Lidl 867 pozorujeme rozdíl v intenzitě 3. harmonické složky, poměr dalších harmonických složek je však u dalších podobný.

Ze směrových charakteristik nástrojů „napřímo“ lze vypočítat, že při hře napřímo je 1. – 6. složka vykreslena jako půlkruh (vyjma 4. harmonické složky u nástroje Lidl 867). To platí i při hře na další nátrubky. V druhém pásmu harmonických složek (tj. 8. až 12. harmonická složka) je směrová charakteristika obtížně popsatelná pro svou chaotičnost. U směrových charakteristik nahraných „odrazem“ vidíme na levých grafech na 80° stínící výřez. Zajímavostí je, že tento stín neovlivnil vyzařování 2., 3. a 5. harmonické složky, jejichž vyzařovací charakteristika je půlkruhovitá. Harmonické složky vyobrazené v pravé polovině grafu jsou oproti přímému vyzařování méně chaoticky rozptýleny s obecným útlumem kolem 80°.





Obr. 6.14 - 6.17: Směrová charakteristika tónu h^1

6.6 Srovnání psychoakustických veličin – F řada

Ve spodní polovině tabulek uvedených v kapitole 6 je spočtena hodnota akustického tlaku, jasnosti, ostrosti či tonality. Následující srovnání se pokusí objektivně posoudit vlastnosti tónových vzorků ze spodního, středního a vyššího pásma rozsahu lesního rohu nahraných buďto tzv. napřímo (vyzařovací otvor byl otočen na mikrofon v totožné ose) anebo tzv. odrazem (kdy vyzařovací otvor byl otočen proti kapsli mikrofonu v totožné ose). Jsou srovnávány vzorky, které byly zahrány ve stupni dynamiky mezzoforte, čili středně silně.

Srovnáme-li hladinu akustického vzorku tónu **F** (tab. 6.1) a spočteme aritmetický průměr, dostaneme hodnotu 65,81 dB. Přestože je pro jeho tvorbu spotřebováno nejvíce dechu, je tato hladina akustického tlaku ze tří zde srovnávaných tónů nejnižší. To bude zřejmě způsobeno poměrně nekomfortním tvořením tónu v této poloze. Hlasitost jednotlivých vzorků je však velmi rozdílná, oproti průměru ± 5 dB. Přestože je ve stejném mezzoforte i tón **a**, průměrná hladina akustického tlaku analyzovaných vzorků má intenzitu 75,03 dB, což je oproti spodnímu pásmu rozsahu nárůst o bezmála 10 dB. Hladina intenzity je u jednotlivých vzorků o poznání vyrovnanější. Dle subjektivního pocitu je právě tato hodnota (kolem 75 dB) vhodným ekvivalentem středně silné dynamiky. Ještě vyšší hladiny akustického tlaku dosáhl vzorek h^1 , který byl oproti střední poloze silnější o 2,1 dB, konečná hodnota byla tedy 77,1 dB. Stále se však lze domnívat, že jde o vzorek zahráný ve středně silné dynamice. Můžeme zde pozorovat rozdíl v dynamické intenzitě mezi tóny odraženými (které jsou slabší) a nahranými napřímo, což se u vzorků ve střední a nízké poloze nepodařilo zaznamenat.

Jasnost, definovaná v kapitole 4.4, nabývala v každém pásmu různých hodnot. Pro tón **F** se průměrná jasnost pohybovala kolem hodnoty 8,4. U vzorku středního pásma

pak jasnost poklesla na 4,27 a vzorek vyššího pásma nabyl průměrné hodnoty 2,21. Z těchto výsledků je zřejmé, že s rostoucí výškou jasnost (téměř lineárně) klesá. Jasnost je v jednotlivých rejstřících ovlivněna především nátrubkem, přičemž každý nátrubek mění jasnost různě u jednotlivých nástrojů. Ve spodní poloze se jako nejjasnější vzorky ukázaly ty, které byly nahrány na nátrubek s kuželovitou nálevkou, ve střední poloze je jasnost mírně baňatých a kuželovitých nátrubků, kde mají mírně baňaté nálevky maličko navrch a ve vyšší poloze pocházejí jasnější vzorky opět z nátrubků s kuželovitou dutinou. U vzorků odražených, nahráných na nátrubek V. Bach 10, jsou srovnatelné. Odraz zvuku od zdi tedy nemá výraznější vliv na jasnost tónu.

Ostrost byla u jednotlivých vzorků tónu velmi podobná, ve spodní poloze je ostrost obecně nižší než ve střední a vysoké poloze. U jednotlivých nástrojů se projevuje víceméně stabilně, nátrubek svým tvarem dokáže ostrost ovlivnit v závislosti na tónové poloze. Plytčí nálevka přidává ostrosti především ve vyšším rejstříku, ve střední poloze se ostřejší tón vytvořil pomocí hlubších nátrubků a v hluboké poloze se podařilo nejostřejší tón vytvořit na nátrubek a nástroj, na který je hráč zvyklý ze standardního hraní, nejvyrovnanější ostrost je zde paradoxně opět z nejplytšího nátrubku. Je zřejmé, že odražené vzorky nebudou za žádných okolností ostřejší, než vzorky natočeny přímo bez odrazů.

Jako poslední z psychoakustických jevů porovnáme tonalitu jednotlivých vzorků. Ta roste s výškou tónu v řádu jednotek. Zatímco ve spodním pásmu rozsahu se tonalita pohybuje okolo 78 %, ve středním pásmu rozsahu je to kolem 85 procent a v případě vyššího rozsahu se nacházíme na cca. 93,3 %. Nátrubek Amati HR 11 si drží podobnou hladinu tonality ve všech pásmech, tonalita s výškou nejvíce roste u vzorků z nátrubku V. Bach 10. U nátrubků E. Schmid 7,5 a D. Wick 5 se tonalita s výškou zvyšuje též, avšak pomaleji než u nátrubku V. Bach 10.

6.7 Analýza tónu B₁

Tón B₁ (B kontra) je nejhlubším tónem nahráné B řady a zároveň základním tónem B lesnice. Barevně je teplý, neurčitý a (oproti tubě) velmi úzký, což je dáno menzurou lesního rohu. Nasazení rovného tónu je velmi nelehké, proto mezi jednotlivými vzorky (Tab. 6.7) vidíme poměrně rozsáhlé odlišnosti.

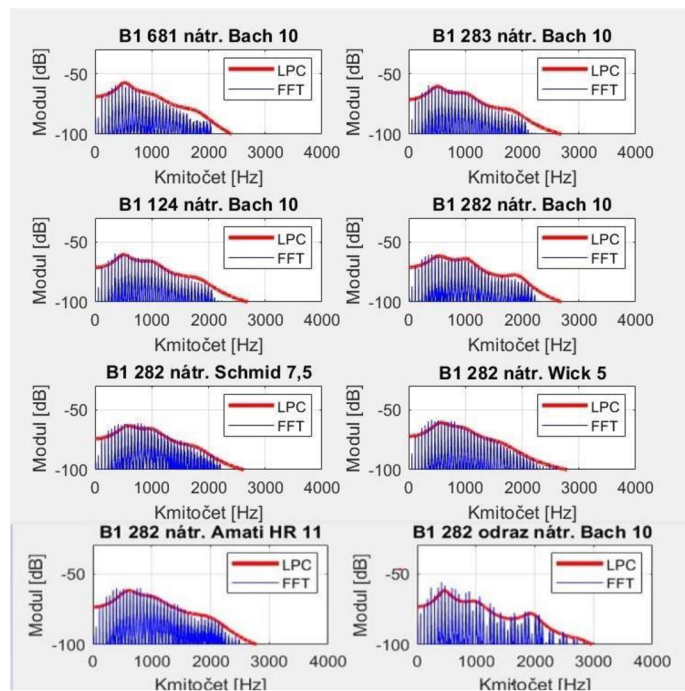
Tab. 6.7: Porovnávací tabulka tónu B₁

Hraný tón	B1 (58,27 Hz)			
Nástroj	Červený CHR 681	Amati ABG 283	Jiráček 124	
Ladění	F/B	B	B	
Nátrubek	Vincent Bach 10			
Úroveň vyšších harmonických složek po odečtu f_1 [dB]				
f_1	0			
f_2	17,56	15,93	11,10	
f_3	15,86	14,31	11,38	
f_4	21,69	21,70	16,59	
f_5	24,33	27,11	19,83	
f_6	26,37	25,68	22,20	
f_7	26,56	25,83	28,01	
f_8	24,81	26,33	26,36	
Hladina akustického tlaku, jasnost, ostrost tónu a tonalita				
L_p [dB _{SPL}]	65	63,6	66	
Jasnost [-]	9,86	10,71	13,09	
Ostrost [Acum]	0,64	0,71	0,72	
Tonalita [%]	78,3	73,5	74,7	
//				
Nást.	Lidl LBG 282G	Lidl LBG 282G	Lidl LBG 282G	Lidl LBG 282G
Ladění	B			
Nátr.	Vincent Bach 10	E. Schmid 7,5	D. Wick 5	Amati 11
Úroveň vyšších harmonických složek po odečtu f_1 [dB]				
f_1	0			
f_2	16,52	14,46	14,73	16,57
f_3	14,66	13,71	21,24	17,31
f_4	22,74	20,72	23,49	24,53
f_5	25,12	22,47	26,76	28,27
f_6	26,48	24,80	28,06	29,57
f_7	26,77	25,95	26,84	29,08
f_8	25,72	25,23	27,42	27,51
Hladina akustického tlaku, jasnost, ostrost tónu a tonalita				
L_p	65,1	65,8	66,8	66,6
BR	15,2	13,9	12,3	11,1
$Ostr.$	0,71	0,71	0,76	0,78
$Ton.$	76,5	76,8	76,4	75,8

Jako první byl nahrán vzorek na dvojitý lesní roh V. F. Červený CHR 681, dále 3 vzorky lesnic a celkem 4 vzorky u jedné lesnice, abychom viděli přímý vliv nátrubku. Zajímavostí je, že u 3 ze 4 nástrojů s totožným nátrubkem Bach 10 pozorujeme, že 2. harmonická složka je silnější než 3. harmonická, od 4. harmonické složky pozorujeme velmi podobnou intenzitu harmonických složek v 1. i ve 2. pásmu spektra.

Nátrubek E. Schmid 7,5 má v této poloze podobné zvukobarevné vlastnosti jako nátrubek Bach 10. Subjektivně nejlíbivější tón pochází z nátrubku D. Wick 5, který má ve spektru největší rozestup mezi 2. a 3. harmonickou složkou ve prospěch 3. Tento tón je nejvíce „uchopitelný“ a na poslech příjemně kulatý. Nátrubek Amati se jeví jako nejostřejší, zde je jasně patrný vliv menší hloubky nálevky. Rezonance nátrubku se ve spektru projevuje poměrně intenzivně.

Formantové oblasti spatřujeme na kmitočtu kolem 400 Hz s rozpětím přibližně 150 Hz. Tato formantová oblast je barevně určující především u lesního rohu V. F. Červený 681, u ostatních lesnic se projevuje více intenzivních formantových oblastí (okolo 1,1 kHz a 1,9 kHz. Mimořádné zintenzivnění formantových oblastí je pozorovatelné u tónu snímaného „odrazem“. Naopak u nátrubků Wick 5 a Amati 11 vidíme poměrně hladkou křivku, což indikuje nízkou intenzitu formantových oblastí (nicméně to neznamena, že nejsou ve spektru přítomny).



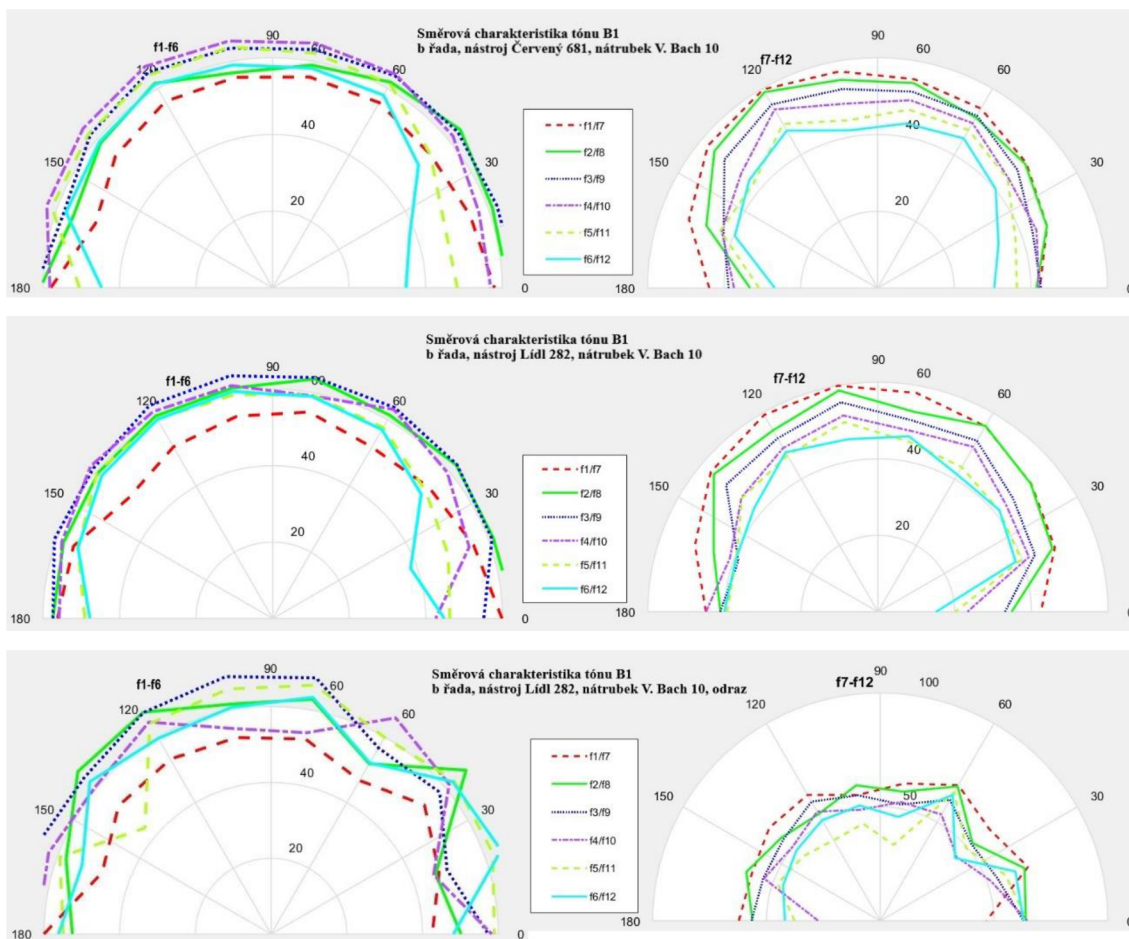
Obr. 6.18: Určení formantových oblastí tónu B₁ u měřených lesnic

Tab. 6.8: Porovnávací tabulka tónu B₁ – odraz od dřevotřískové zdi

Hraný tón	B1 (58,27 Hz)	
Nástroj	Lidl LBG 282G "přím"	Lidl LBG 282G "odraz"
Ladění	F/B	
Nátrubek	Vincent Bach 10	
Úroveň vyšších harmonických složek po odečtu f_1 [dB]		
f_1	0	
f_2	16,52	5,30
f_3	14,66	10,14
f_4	22,74	18,11
f_5	25,12	12,55
f_6	26,48	18,19
f_7	26,77	22,07
f_8	25,72	19,37
Hladina akustického tlaku, jasnost, ostrost tónu a tonalita		
L_p [dB SPL]	65,1	64,7
Jasnost [-]	15,2	12,64
Ostrost [Acum]	0,71	0,59
Tonalita [%]	76,5	78,2

Odražený tón je dle Tab. 6.6 ve spektru podstatně rozmanitější. První složka se přiblížila ostatním, 2., 3. a 4. zaznamenala pokles a stoupají navzájem schodovitě. 5. harmonická složka zaznamenala výrazný propad o 12,5 dB. Zajímavostí je, že 7. harmonická složka zaznamenala velmi nízký pokles, oproti sousedícím harmonickým složkám tedy výrazně vyčnívá.

Směrové charakteristiky vybraných nástrojů (obr. 6.18 – 6.21) při hře „napřímo“ ukázkově opisují polokružnice. Intenzita vyzařování jednotlivých složek do všech úhlů odpovídá intenzitě složek změřených spektrálním mikrofonom. U odražených vzorků je viditelný útlum při úhlu 60° u 1. až 6. harmonické složky, resp. při úhlu 45° u 7. až 12. harmonické složky vyjma 4. harmonické, která je paradoxně při úhlu 60° nejintenzivnější.



Obr. 6.19 - 6.21: Směrová charakteristika tónu B₁

6.8 Analýza tónu a

U tónu a hraného přirozenými lesními rohy uvidíme naprosto zásadní rozdíl ve zobrazení spektra jednotlivých nástrojů (tab. 6.9). Zatímco referenční řada byla nahrána lesním rohem opatřeným ventily, tón u přirozeného lesního rohu byl zahrán ucpáním roztrubu nástroje rukou tak, aby byl o půl tónu snižen tón B, který je součástí přirozené řady B lesnice.

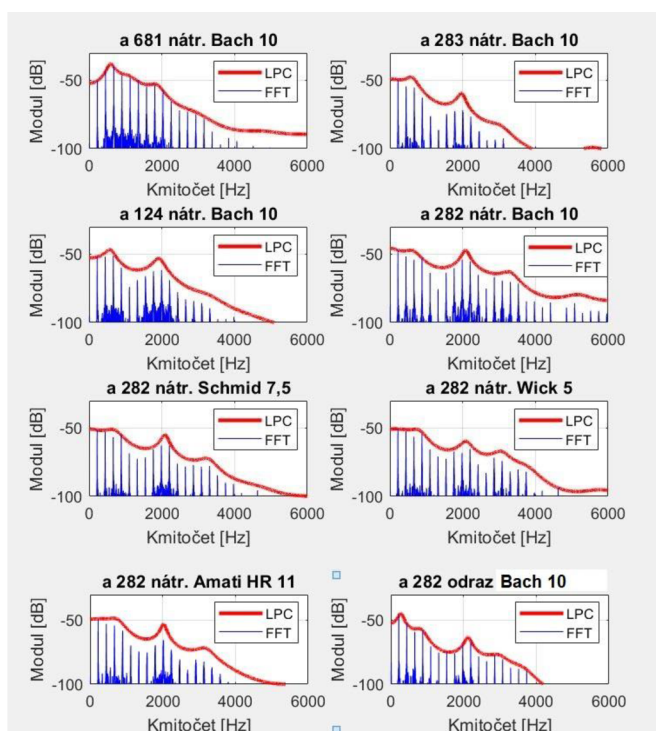
Tab. 6.9: Porovnávací tabulka tónu a (lesnice)

Hraný tón	a (220 Hz)			
Nástroj	Červený CHR 681	Amati ABG 283	Jiráček 124	
Ladění	F/B	B	B	
Nátrubek	Vincent Bach 10			
Úroveň vyšších harmonických složek po odečtu f_1 [dB]				
f_1	0			
f_2	7,68	4,82	0,21	
f_3	10,52	5,75	0,92	
f_4	4,28	-13,04	-7,75	
f_5	1,99	-26,69	-21,90	
f_6	0,29	-36,74	-16,89	
f_7	-4,13	-25,03	-13,93	
f_8	-3,73	-23,22	-10,49	
Hladina akustického tlaku, jasnost, ostrost tónu a tonalita				
L_p [dB _{SPL}]	76,5	67	67,9	
Jasnost [-]	4,33	3,15	4,68	
Ostrost [Acum]	0,88	0,57	0,88	
Tonalita [%]	87,5	67,2	65,8	
//				
Nást.	Lidl LBG 282G	Lidl LBG 282G	Lidl LBG 282G	Lidl LBG 282G
Ladění	B			
Nátr.	Vincent Bach 10	E. Schmid 7,5	D. Wick 5	Amati 11
Úroveň vyšších harmonických složek po odečtu f_1 [dB]				
f_1	0			
f_2	-4,62	-1,43	-1,79	-4,01
f_3	-6,96	-5,26	-5,86	-5,23
f_4	-5,52	-4,01	-3,37	-9,27
f_5	-16,62	-17,02	-15,02	-21,00
f_6	-28,47	-21,09	-20,28	-25,59
f_7	-16,57	-20,10	-21,85	-25,36
f_8	-13,12	-14,19	-15,49	-20,63
Hladina akustického tlaku, jasnost, ostrost tónu a tonalita				
L_p	70	66,7	67,2	68,3
BR	5,6	4,93	5,38	3,66
Ostr.	1,06	0,86	0,72	0,75
Ton.	65,9	67,9	69,8	71,5

Již na první pohled lze pochopit, proč byl vymyšlen ventilový systém. Vzorok přirozených lesních rohů totiž barevně vůbec neodpovídají tónové řadě přirozené tónové řady. U nástroje Jiráček 124 můžeme pozorovat, že první 3 harmonické mají téměř totožnou intenzitu. Zatímco u ostatních lesnic vidíme, že nejslabší je právě 6. harmonická složka,

u tohoto nástroje je 6. harmonická výrazně intenzivnější. U ostatních nátrubků jsou rozestupy mezi jednotlivými alikvótními tóny znatelně menší. Vyšší intenzita 4. harmonické je nejspíš způsobena rezonancí nátrubku. Největší faktor ovlivnění spektra a intenzity jednotlivých složek je zde ruka a její umístění v ozvučniku.

Naprosto zřejmá formantová oblast se vyskytuje kolem kmitočtu 600 Hz. Ta je nejméně markantní u nástroje Lidl LBG 282. V grafu odrazu z tohoto nástroje se však vytvarovala formantová oblast kolem 300 Hz a dále kolem 800 Hz. Další formantovou oblastí je oblast kolem 2 kHz a kolem 3 – 3,2 kHz.



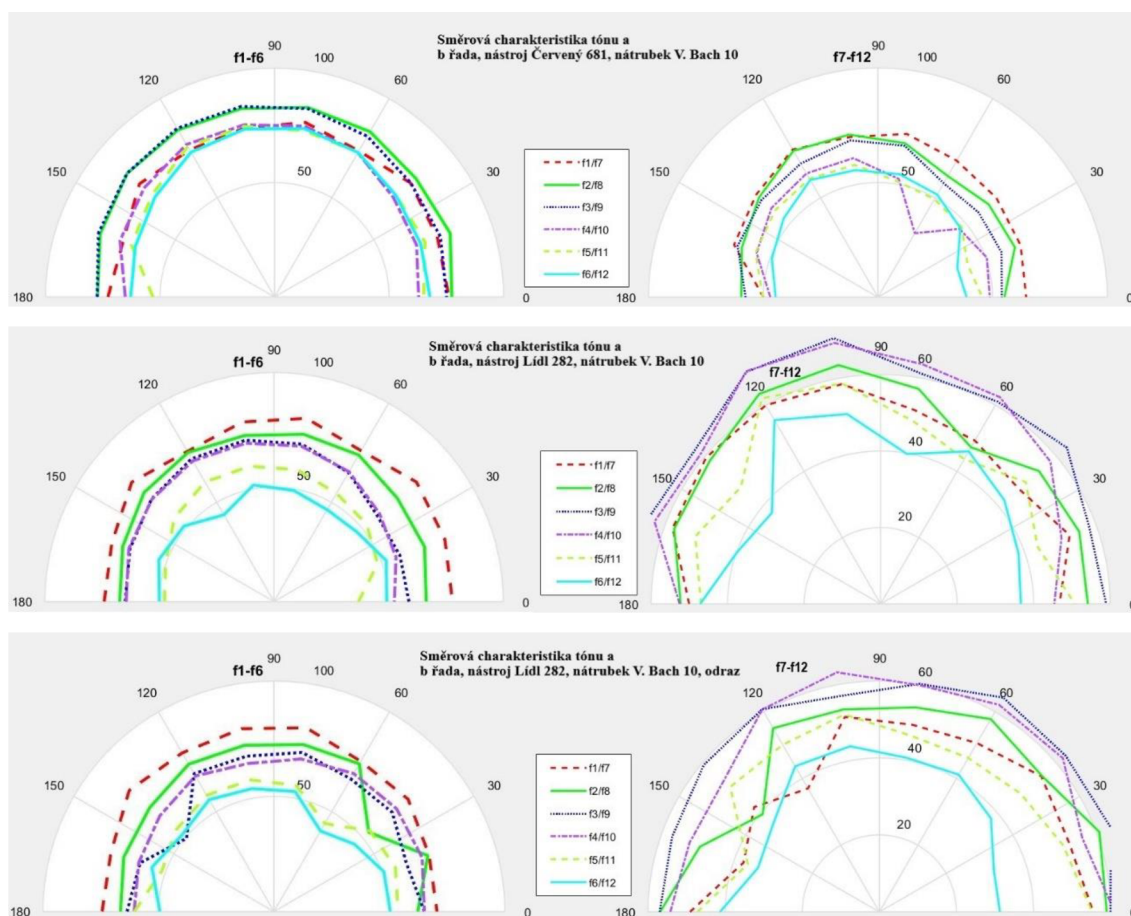
Obr. 6.22 Určení formantových oblastí tónu a u měřených lesnic

Tab. 6.10: Porovnávací tabulka tónu a (lesnice) – odraz od dřevotřískové zdi

Hraný tón	a (220 Hz)	
Nástroj	Lidl LBG 282G "přímá"	Lidl LBG 282G "odraz"
Ladění	B	
Nátrubek	Vincent Bach 10	
Úroveň vyšších harmonických složek po odečtu f_1 [dB]		
f_1	0	
f_2	-4,62	-5,90
f_3	-6,96	-12,56
f_4	-5,52	-11,25
f_5	-16,62	-23,93
f_6	-28,47	-28,77
f_7	-16,57	-27,94
f_8	-13,12	-29,35
Hladina akustického tlaku, jasnost, ostrost tónu a tonalita		
L_p [dB _{SPL}]	70	68
Jasnost [-]	5,6	3,13
Ostrost [Acum]	1,06	0,41
Tonalita [%]	65,9	81,6

Vzorky odražené mají ještě významněji utlumené spektrum než vzorky nahrané napřímo. Největší útlum je pozorovatelný u 7. a 8. harmonické složky. Zvuková barva je zde dotvořena více se projevujícími formantovými oblastmi.

Směrové charakteristiky referenčního lesního rohu a lesnice s odrazem jsou v této poloze nesmírně podobné. Dokonce ani u odraženého tónu nepoznáme ve směrové charakteristice žádné stínění, jednotlivé harmonické složky jsou celkem rozptýleny po prostoru před hráčem.



Obr. 6.23 - 6.25: Směrová charakteristika tónu a (lesnice)

6.9 Analýza tónu b^1

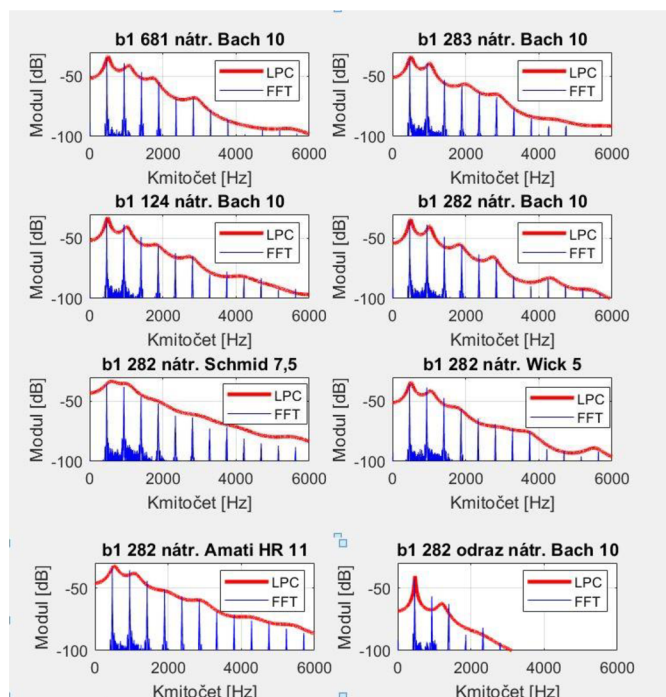
Jako nejvyšší nahraný tón na b lesnici byl nahrán tón b^1 , který zní o 3 oktávy výše, než tón B_1 , analyzovaný v podkapitole 6.7. Tón b^1 je součástí tónové řady přirozeného lesního rohu, jeho intonaci není nutné upravovat ventily či „cpaním“, jak tomu bylo např. v případě tónu a.

Tab. 6.11: Porovnávací tabulka tónu b¹

Hraný tón	b1 (466,16 Hz)		
Nástroj	Červený CHR 681	Amati ABG 283	Jiráček 124
Ladění	F/B	B	B
Nátrubek	Vincent Bach 10		
Úroveň vyšších harmonických složek po odečtu f ₁ [dB]			
f ₁	0		
f ₂	-4,05	-4,13	-4,40
f ₃	-11,35	-18,05	-14,73
f ₄	-19,82	-23,31	-21,68
f ₅	-33,82	-28,08	-28,12
f ₆	-33,19	-32,41	-30,85
f ₇	-42,95	-42,30	-45,66
f ₈	-50,91	-49,58	-43,46
Hladina akustického tlaku, jasnost, ostrost tónu a tonalita			
L _p [dBspl]	79,7	80,1	81,3
Jasnost [-]	2,04	1,96	2,34
Ostrost [Acum]	0,95	0,96	0,95
Tonalita [%]	95,7	84,2	88,8
//			
Nást.	Lidl LBG 282G	Lidl LBG 282G	Lidl LBG 282G
Ladění	B		
Nátr.	Vincent Bach 10	E. Schmid 7,5	D. Wick 5
			Amati 11
Úroveň vyšších harmonických složek po odečtu f ₁ [dB]			
f ₁	0		
f ₂	-2,96	-2,36	-1,74
f ₃	-13,15	-10,64	-10,22
f ₄	-20,32	-16,43	-17,19
f ₅	-27,66	-26,41	-22,92
f ₆	-32,71	-27,76	-25,05
f ₇	-46,09	-36,94	-34,55
f ₈	-54,21	-36,02	-37,17
Hladina akustického tlaku, jasnost, ostrost tónu a tonalita			
L _p	79,9	81,2	81,9
BR	1,77	2,37	2,03
Ostr.	0,94	1,02	1,05
Ton.	90,3	88,5	91,7

Ve vysokém tónovém rejstříku se výrazné rozdíly ve spektru jednotlivých nástrojů smazávají, větší rozdíl ve spektru je pozorovatelný mezi jednotlivými nátrubky. Ukázalo se, že nátrubky s polobaňatou či méně hlubokou nálevkou mají menší dynamický rozestup, než je tomu v případě hlubší, kuželovité nálevky. U nátrubků dále můžeme vyzorovat vliv intenzity 3. harmonické složky na numerické vyjádření ostrosti.

U každého nástroje s použitím nátrubku V. Bach 10 se velmi ostře projeví 4 formantové oblasti, a to přibližně nad 1., 2. a 4. harmonickou složkou. U ostatních nátrubků se křivky vyhladily, dokonce je problém dané formantové oblasti vůbec rozpoznat. U odraženého vzorku se vyhladily dvě formantové oblasti, zato první dvě jsou vizuálně intenzivnější než je tomu u vzorků napřímo.



Obr. 6.26: Určení formantových oblastí tónu b^1 u měřených lesnic

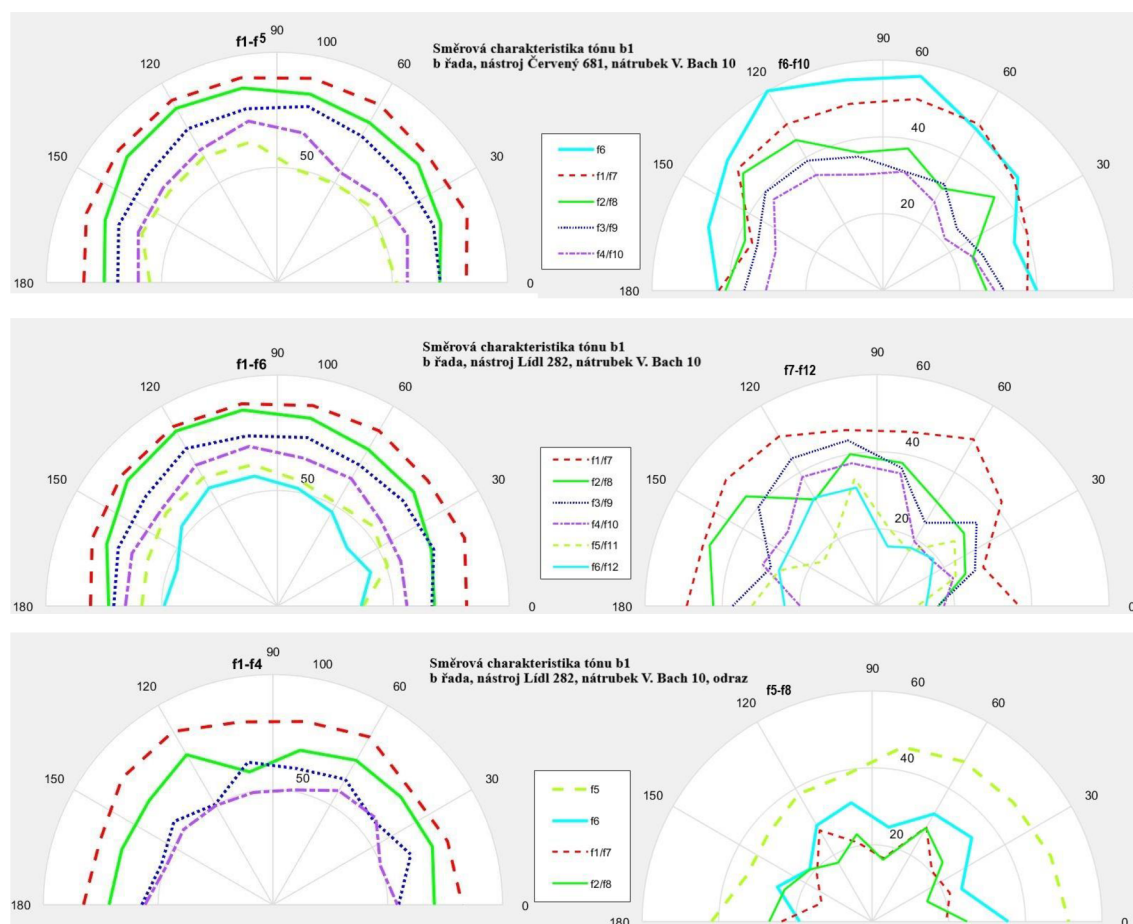
Tab. 6.12: Porovnávací tabulka tónu b^1 – odraz od dřevotřískové zdi

Hraný tón	b1 (466,16 Hz)	
Nástroj	Lídl LBG 282G "přímou"	Lídl LBG 282G "odraz"
Ladění	F/B	
Nátrubek	Vincent Bach 10	
Úroveň vyšších harmonických složek po odečtu f_1 [dB]		
f_1	0	
f_2	-2,96	-13,86
f_3	-13,15	-19,91
f_4	-20,32	-44,52
f_5	-27,66	-38,96
f_6	-32,71	-50,99
f_7	-46,09	-64,68
f_8	-54,21	-56,44
Hladina akustického tlaku, jasnost, ostrost tónu a tonalita		
L_p [dB SPL]	79,9	72,2
Jasnost [-]	1,77	1,4
Ostrost [Acum]	0,94	0,69
Tonalita [%]	90,3	88,1

Jak je z tabulky 6.12 patrné, jednotlivé harmonické odraženého vzorku mají výrazně nižší intenzitu než u vzorku neodraženého. Zejména 4. 6. a 7. harmonická je silně potlačena. Naopak pokles intenzity u 5. harmonické je ve srovnání s ostatními složkami násobně menší.

Směrové charakteristiky nástrojů V. F. Červený 681 a Lídl LBG 282 jsou pro prvních 5 složek poměrně rovnoměrné, graf odrazu lesnice LBG 282 poukazuje

na zlom u 2. harmonické složky na 100° . U vyšších harmonických složek vidíme tvarovou rozmanitost, způsobenou rukou v roztrubu či stínem nástroje a hráče.



Obr. 6.27 – 6.29: Směrová charakteristika tónu b^1

6.10 Srovnání psychoakustických veličin – B řada

Nyní srovnáme jednotlivé psychoakustické veličiny ve spodním, středním a vysokém tónovém rejstříku B lesnic. Ve spodní poloze jsme analyzovali tón B_1 , který je zároveň nejhlubším analyzovaným tónem. Ve střední poloze jsme provedli analýzu tónu a , stejně jako u F řady, tudíž máme společný průsečík všech nástrojů a nátrubků. Ve vyšším tónovém rejstříku byl nahrán tón b^1 , který je (na rozdíl od tónu h^1 F lesnice) součástí přirozené tónové řady B lesnice. Podobně, jako tomu bylo v podkapitole 6.6, srovnáme hladinu intenzity akustického tlaku, jas, ostrost a tonalitu jednotlivých nástrojů, a to jako rozdíl oproti průměrné hodnotě uvedených veličin.

Hladina intenzity akustického tlaku u tónu **kontra B** je u nástrojů velmi podobná, od průměrné hodnoty 65,6 dB se největší odchylka rovná hodnotě cca 2 dB, což jsou hodnoty velmi podobné hladině intenzity tónu F (podkap. 6.6). Snímání odrazem zde má na intenzitu ak. tlaku zanedbatelný vliv. U tónu **a** je průměrná hodnota akustického tlaku vskutku pouze orientační, neboť je logické, že při ucpání korpusu bude intenzita akustického tlaku nižší. Průměrná hodnota tedy činí 69,1 dB, přičemž intenzita lesního rohu využívající ventily je o 7,5 dB vyšší, ostatní lesnice tedy mají hladinu ak. tlaku nižší než je samotný průměr. Tón **b¹** mohl znít opět bez ucpávky, proto se L_p liší od průměru 80,6 dB jen o max. cca. 1,5 dB. Obecně lze tvrdit, že nástroje B řady byly mnohem lépe akusticky srovnány, než tomu bylo u F řady.

Jasnost opět klesá s rostoucí výškou tónu. Zatímco ve spodní poloze nabývá jasnost hodnotu kolem 12-15, ve vyšších polohách se pohybuje okolo 2. U **B₁** je průměrná hodnota jasnosti 12,1, přičemž jako jasnější se jeví tóny zahrané na konkrétní lesnici v kombinaci s nátrubkem, na který je hráč zvyklý. Nižší, i když stále nadprůměrnou hodnotu jasnosti má zvukový vzorek sejmutý odrazem. U tónu **a** byla průměrná hodnota jasnosti 4,5, přičemž jako nejjasnější se opět jevila hodnota znějící z lesnice Lidl LBG 282, hodnota získaná ze vzorku z odrazu je však oproti průměru o více než čtvrtinu nižší. Vzorek vysokého rejstříku ukázal výsledek zcela obrácený, a sice, že se doposud nejjasnější lesnice s daným nátrubkem stala tou nejméně jasnou.

Ostrost je ve spodním rejstříku velmi podobná, pohybuje se kolem hodnoty 0,7 acumů. Ostrost velmi mírně roste s výškou hraného tónu, ve všech pásmech si je však hodnota ostrosti podobná, a to od 0,7 do 1,1 acumů u vzorků hraných „napřímo“. Tón markantně zjemňuje právě odraz od zdi, který snižuje ostrost i o více než polovinu.

Tonalita je patrně nejkolisavější jednotkou z našeho výběru. To příliš neplatí o nízkém rejstříku lesního rohu, kde se všechny analyzované vzorky pohybují okolo 76 %. Již na tónu **a** je tomu zcela jinak. Hodnota některých vzorků je pouze kolem 65 %, při hře na stejný nátrubek a nástroj snímané odrazem je naopak hodnota výrazně nadprůměrná (81,6 %). Tento jev je opět způsoben ucpáním roztrubu rukou. Ve vysoké tónové poloze si (co se tonality týče) nejlépe vede vzorek natočen lesním rohem s ventily (více jak 95%), právě zde však pozorujeme odchylku cca 5% od průměrné hodnoty 90%. Odraz od zdi nepatrně snižuje tonalitu (cca 2 %).

ZÁVĚR

Hlavním úkolem této bakalářské práce je komplexní popis lesního rohu, a to po stránce konstrukční, vývojové, mechanické a především tónové. Byla proto provedena analýza spektra harmonických složek v různých polohách tónového rozsahu lesních rohů a lesnic za použití rozdílných nátrubků, dále pak vyzařovací charakteristiky a identifikace formantových oblastí. K osvětlení způsobu měření a analýzy slouží teoretická část, která obsahuje veškeré informace, na jejichž základě bylo nahrávání, měření a zpracování těchto dat uskutečněno.

V úvodu práce proběhl popis nástroje, jakož i jeho jednotlivých částí a uvedení základních materiálů pro výrobu nástroje i nátrubků. Kapitola o historii je věnována zejména úpravám a proměnám lesního rohu v kontextu času.

V textu práce lze též nalézt zapojení měřicího řetězce, dále stručné vysvětlení principu analýzy, která byla prováděna v prostředí Matlab a poslední kapitola práce nás seznamuje s výsledky provedené tónové analýzy.

Nahrávání vzorků provedl jeden hráč, který je absolventem konzervatoře na tento nástroj. Z přinesených nástrojů byly pro měření vzorků vybrány dva dvojité F/B lesní rohy, jeden od tradiční brněnské firmy Josef Lídla, a druhý z továrny V. F. Červený, jeden jednoduchý studentský lesní roh od firmy a 3 přirozené B lesní rohy od českých firem Amati Kraslice, Josef Lídla a M. Jiráček & synové. Pro analýzu byl dále použit nátrubky světových firem Vincent Bach, Engelbert Schmid, Denis Wick a Amati Kraslice. Po podrobném popisu nástrojů a nátrubků následuje úvaha o vlivu použitých materiálů a mechanických rozměrů na obsah tónového spektra. Zároveň byly objeveny rezonance dutin nátrubků, tedy nálevky a stopky.

Samotné měření je do jisté míry ovlivněno nátiskovým stavem hráče během pořizování zvukových vzorků, jakož i herní pohodlí na nástroje i nátrubek, který používá během praktické hry. Zajímavé by bylo srovnání totožných tónových vzorků, nahraných jiným hráčem, nebo umělými ústy. U dražších nástrojů je evidentní podobnost spektra v různých výškových polohách, u studentských modelů či levnějších lesnic můžeme pozorovat nevyrovnanost jednotlivých vzorků. Zajímavý je i vliv poslechu „odrazem“, kdy lze vidět jasné změny v tónovém spektru. Podle změřených směrových charakteristik se optimální osa vyzařování pohybuje většinou kolem 60° a 120° z pohledu hráče.

LITERATURA A ZDROJE

- [1] Osobní konzultace ve firmě Josef Lídl
- [2] STIBOR, Josef. Metodika hry na lesní roh: Pro posluchače Konzervatoře a JAMU v Brně. Brno, 2003.
- [3] ŽŮRKOVÁ, Tereza. Výroba nátrubkových dechových nástrojů v českých zemích v 18. a 19. století se zaměřením na lesní rohy [online]. Brno, 2016 [cit. 2019-12-4]. Disertační práce. Masarykova univerzita, Filozofická fakulta. Vedoucí práce Vladimír Maňas Dostupné z: http://is.muni.cz/th/145790/ff_d/
- [4] OSMUN, Bob. Alternate horn mouthpiece shapes [online] [cit. 2019-12-5]. Dostupné z: <https://blog.osmun.com/2009/12/28/alternate-horn-mouthpiece-shapes/>
- [5] STIBOR, Josef. Dějiny a literatura lesního rohu: Pro posluchače Konzervatoře a JAMU v Brně. Brno, 2005.
- [6] Nástroje tvorba tónu, spektrum, rezonátory, vyzařování [online]. Brno. Audified [cit. 2019-12-10]. Dostupné z: http://www.audified.com/projekt/vavcjamu/vyuka/page95/files/V_Nastroje.pdf
- [7] KOHOUT, Josef. Metodika hry na lesní roh. 1. vyd. Brno: JAMU v Brně, 1986
- [8] SYROVÝ, Václav. Hudební akustika. 3., dopl. vyd. V Praze: Akademie múzických umění, 2013. Akustická knihovna Zvukového studia Hudební fakulty AMU. ISBN 978-80-7331-297-8.
- [9] SMETANA, Ctirad. Praktická elektroakustika. 1. vyd. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1981.
- [10] SMĚKAL, Zdeněk. Analýza signálů a soustav. Brno: FEKT VUT v Brně 2012
- [11] SUCHÁNEK, Tomáš. Analýza spektra klarinetů od různých výrobců. Brno, 2019, 76 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce: MgA. Mgr. Ondřej Jirásek, Ph.D.
- [12] MIŠUREC, Jiří , SMĚKAL, Zdeněk. Číslíkové zpracování signálů. Brno: FEKT VUT v Brně, 2011
- [13] WALACH, Jan. Aplikace Fourierovy analýzy na rozpoznávání kvality samohlásek podle jejich formantů. Olomouc, 2013, 46 s. Bakalářská práce. Univerzita Palackého v Olomouci, Přírodovědecká fakulta, Katedra matematické analýzy a aplikací matematiky.
- [14] Dvojitý lesní roh LHR 867 Josef Lídl Brno [online]. Brno: Clarina Music, 2019 [cit. 2019-12-20]. Dostupné z: http://www.joseflidl.cz/cs/nastroje/lesni_rohy/dvojite_lesni_rohy/lhr_867/
- [15] Catalogue of mouthpieces Vincent Bach [online]., Elkhart. Conn-Selmer, Inc., A division of Steinway Musical Instruments, Inc. [cit. 2019-12-20]. Dostupné z: https://www.bachbrass.com/application/files/4614/8521/7763/AV2BA901_Origin_al_1889_web.pdf
- [16] Nátrubek Vincent Bach. Eshop Melody [online]. Žilina, TM Sound 2019 [cit. 2019-12-20]. Dostupné z: https://www.melodyshop.cz/ostatni-natrubky/vincent-bach-mouthpiece-horn--single-double-horn--standard-serie-336-10/?gclid=EA1aIQobChMluYfNwtO95gIVhbTtCh2c5gNgEAQYASABEgIebvD_BwE

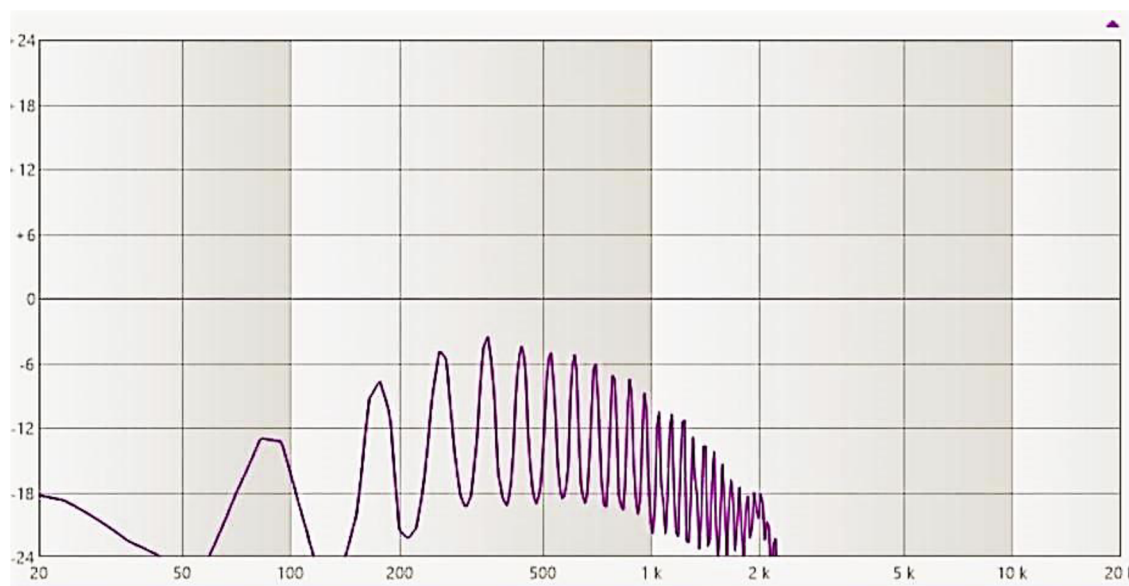
- [17] Denis Wick 5 mouthpiece [online] Poole, Denis Wick Products Ltd. [cit. 2019-12-20]. Dostupné z: <https://www.deniswick.com/product/classic-french-horn-mouthpiece-silver-plated/>
- [18] Dvojitý lesní roh CHR 681 V. F. Červený [online]. Hradec Králové: V.F. Červený a synové [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: <http://www.vfcerveny.cz/cz/cylindrove/lesni-rohy/item/94-chr-681-781>
- [19] Dvojitý lesní roh CHR 681 V. F. Červený [online]. Musikpunkt shop 2020 [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: <https://www.musikpunkt.ch/blasinstrumente-zubehoer/blechblasinstrumente/waldhorn/doppelhorn-bbf/waldhorn-in-b/f-cerveny-chr-681-dbc-abschraubbar>
- [20] Jednoduchý lesní roh LHR 321Z Josef Lidl Brno [online]. Brno: Clarina Music, 2020 [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: <https://www.clarina.cz/josef-lidl-brno-lhr-321z-lesni-roh-in-f-es>
- [21] Přirozený lesní roh LBG 282G Josef Lidl Brno [online]. Brno: Clarina Music, 2020 [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: <https://www.clarina.cz/josef-lidl-brno-lbg-282-gz-lesovka-zlata-mosaz>
- [22] Přirozený lesní roh ABG 283K Amati Kraslice [online]. Hostěrádky-Rešov, M. Jiracek & sons 2020 [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: <https://shop.jiracek.eu/signalni-a-lovecke-nastroje/b-lesnice-amati--sada-s-pouzdem/>
- [23] Přirozený lesní roh model 124 M. Jiráček & sons [online]. Hostěrádky-Rešov, M. Jiracek & sons 2020 [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: <https://shop.jiracek.eu/lesni-rohy/b-lesnice--lesovka-lovecky-roh--m-jiracek-sons--model-124-kompletni-sada/>
- [24] Nátrubek E. Schmid 7,5 [online]. Brno: Clarina Music, 2020 [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: <https://www.clarina.cz/engelbert-schmid-natrubek-pro-lesni-roh-75-traditional>
- [25] Nátrubek E. Schmid 7,5 [online]. Thomann GmbH, 2020 [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: http://www.thomann.de/gb/bruno_tilz_eschmid_75_french_horn.htm
- [26] Nátrubek Amati HR A13 11 [online]. Amati Kraslice, 2020 [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: http://www.amati.cz/images/ke_stazeni/NATRUBKY.pdf
- [27] Nátrubek Amati HR A13 11 [online]. Jistebník, Hudební nástroje Mariáš, 2020 [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: <http://www.tuba.cz/tuba-cz/eshop/2-1-PRISLUSENSTVI/81-3-Natrubky-na-LESNI-ROH/5/32736-Amati-natrubek-VIRTUOSO-pro-lesni-roh-A13-11>
- [28] CIBUĽA, Marek Analýza sytosti spektra a směrovosti vyzářování u barokního, moderního a plastového pozounu: bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2015. 42 s. Vedoucí práce byl MgA. Mgr. Ondřej Jirásek, Ph.D.

SEZNAM PŘÍLOH

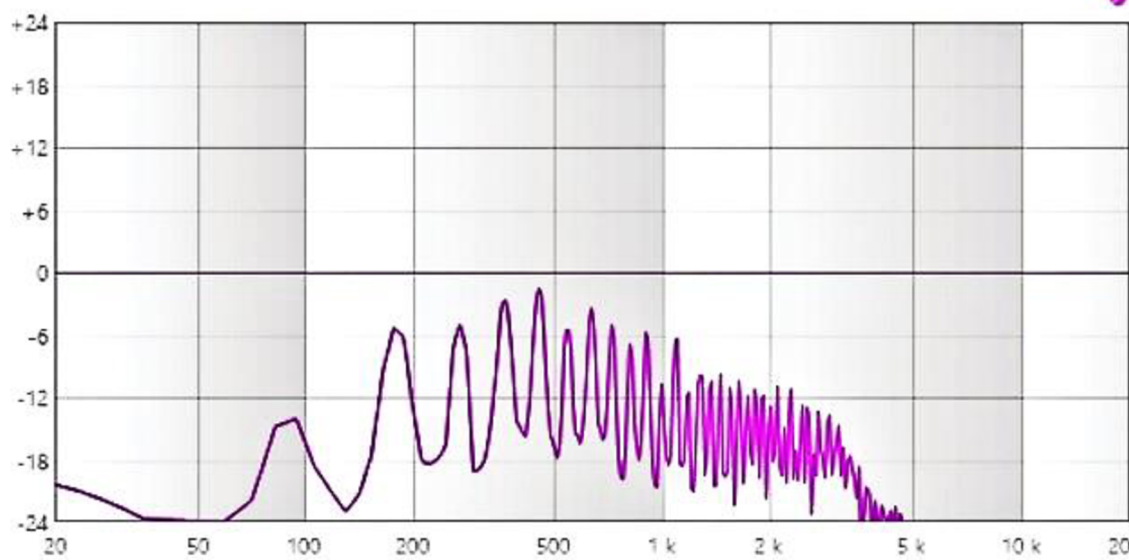
A: Spektrum harm. složek vzorků v reálném čase, nástroj J. Lidl LHR 867	72 - 74
B: Spektrum harm. složek vzorků v reálném čase, nástroj J. Lidl LGB 282G.....	75 - 77
C: Obsah .zip souboru Přílohy	78

PŘÍLOHY

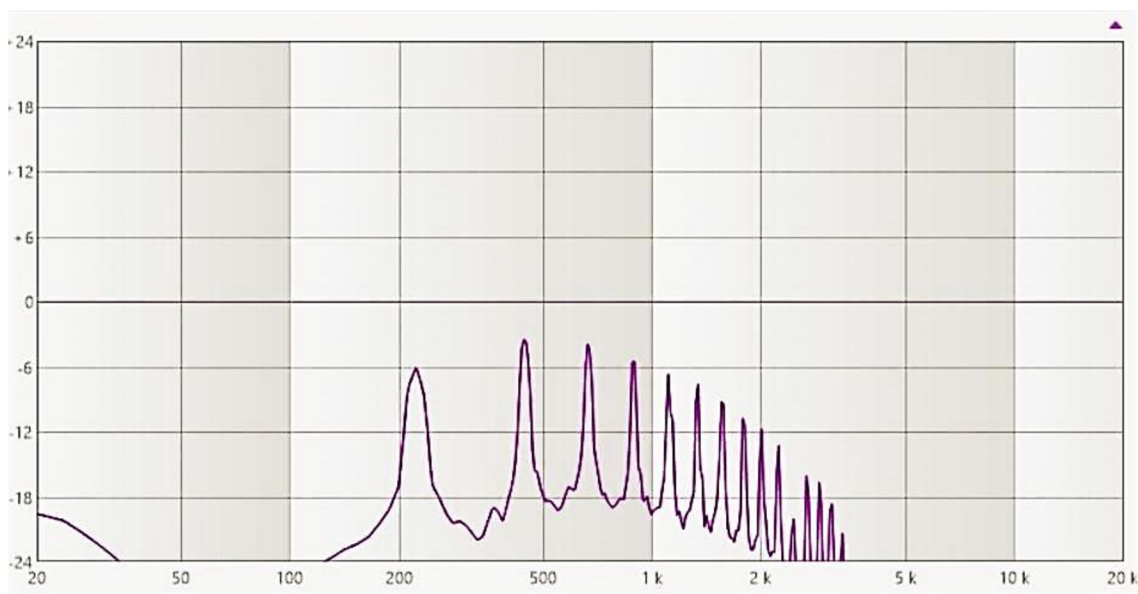
A: Spektrum harmonických složek vzorků v reálném čase, nástroj Josef Lidl LHR 867



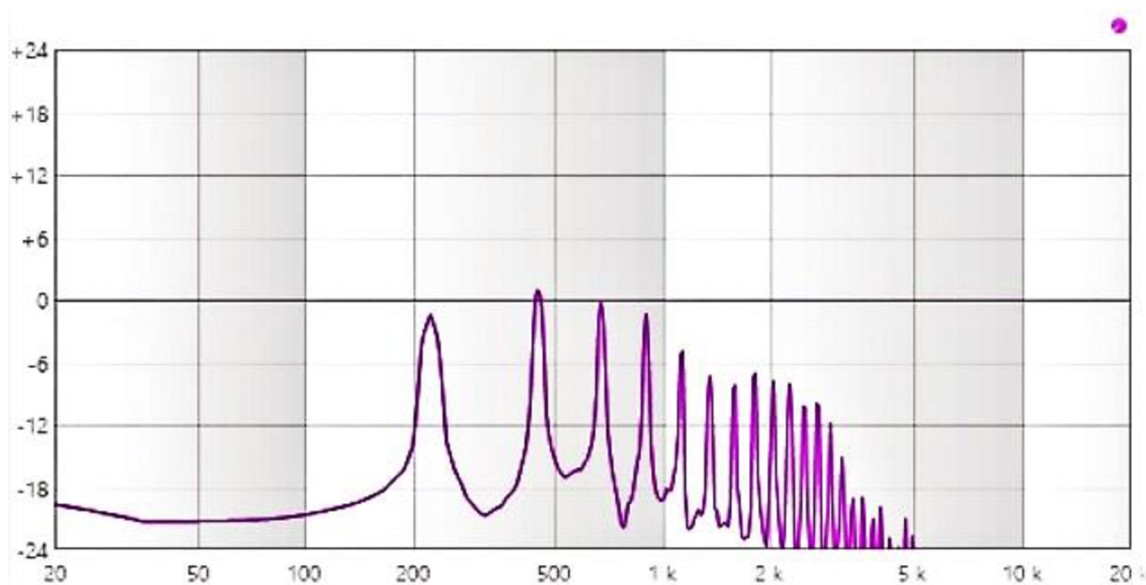
A1: Modulová kmitočtová charakteristika spektra tónu F (f hmaty, nátrubek V. Bach 10)



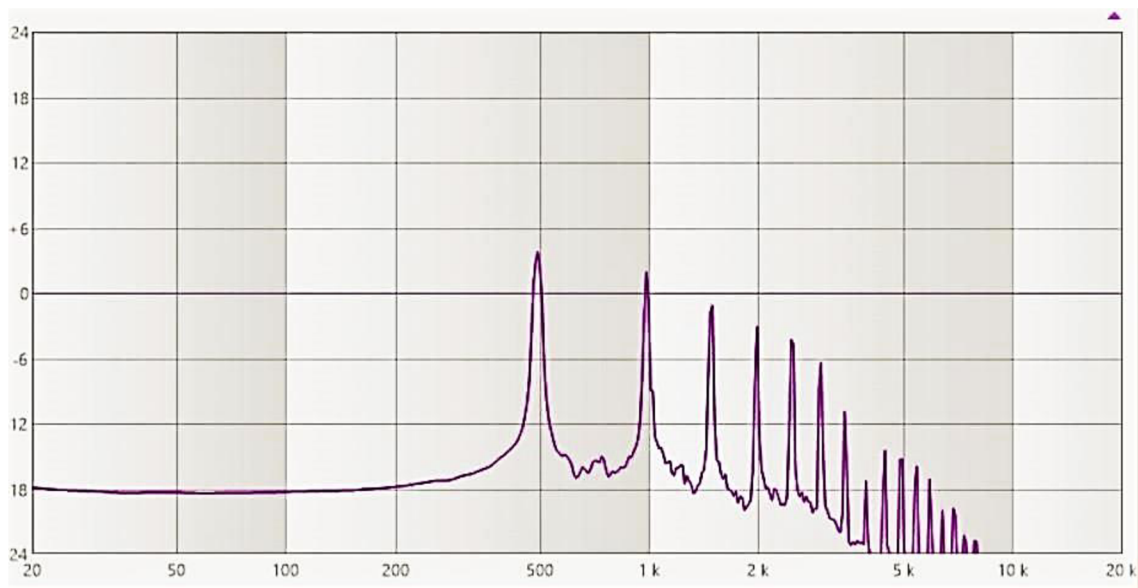
A2: Modulová kmitočtová charakteristika spektra tónu F s odrazem od zdi (f hmaty, nátrubek V. Bach 10)



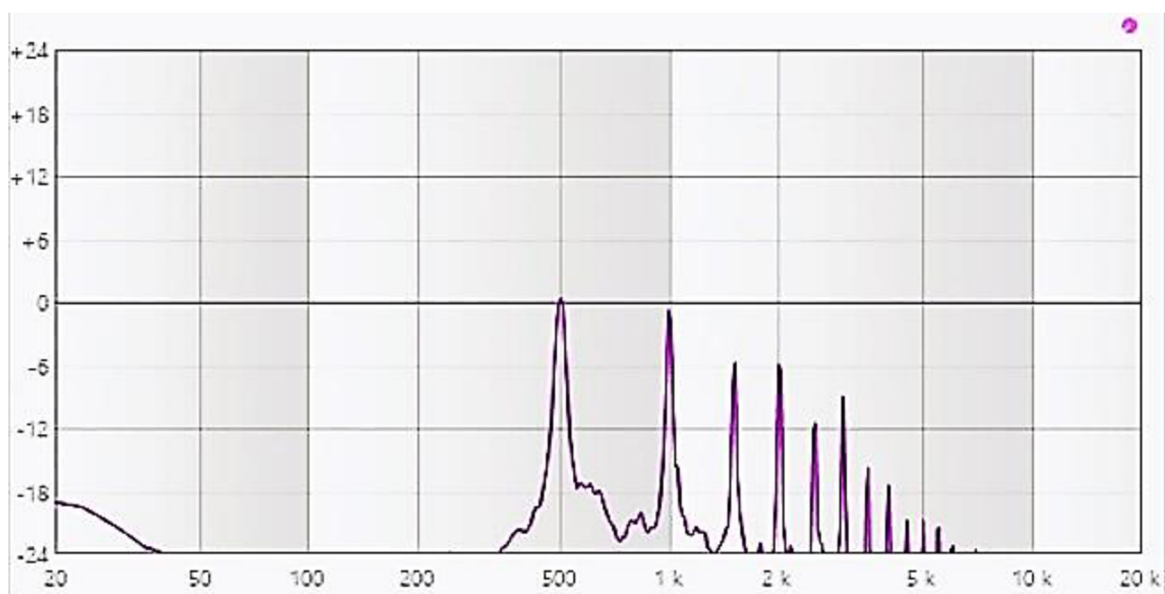
A3: Modulová kmitočtová charakteristika spektra tónu a (f hmaty, nátrubek V. Bach 10)



A4: Modulová kmitočtová charakteristika spektra tónu a s odrazem od zdi (f hmaty, nátrubek V. Bach 10)

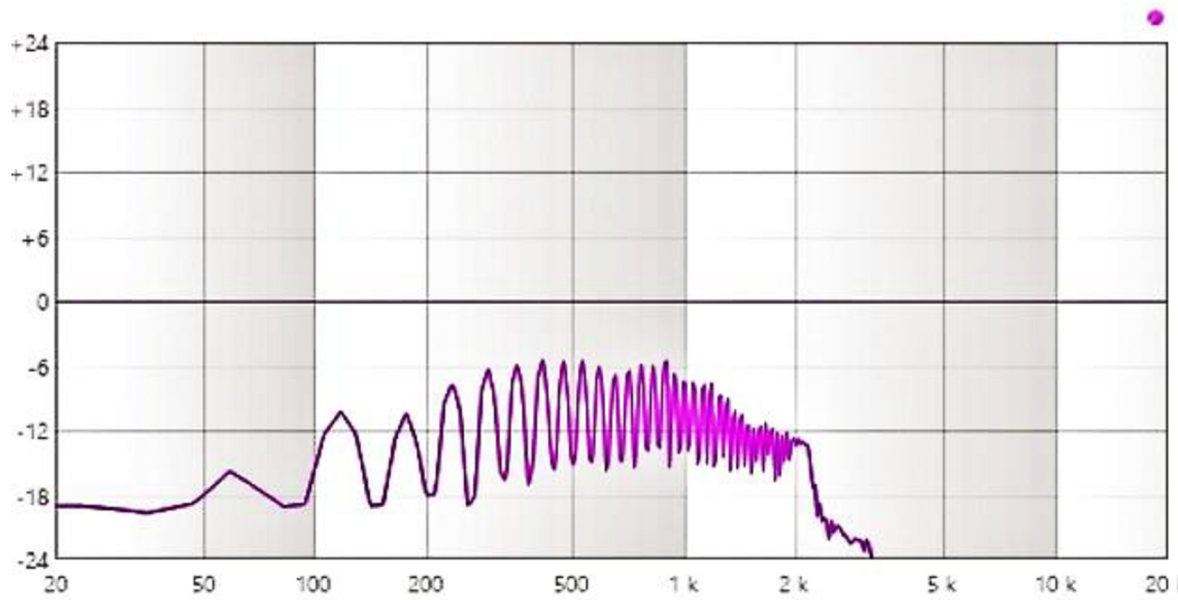


A5: Modulová kmitočtová charakteristika spektra tónu h^1 (f hmaty, nátrubek V. Bach 10)

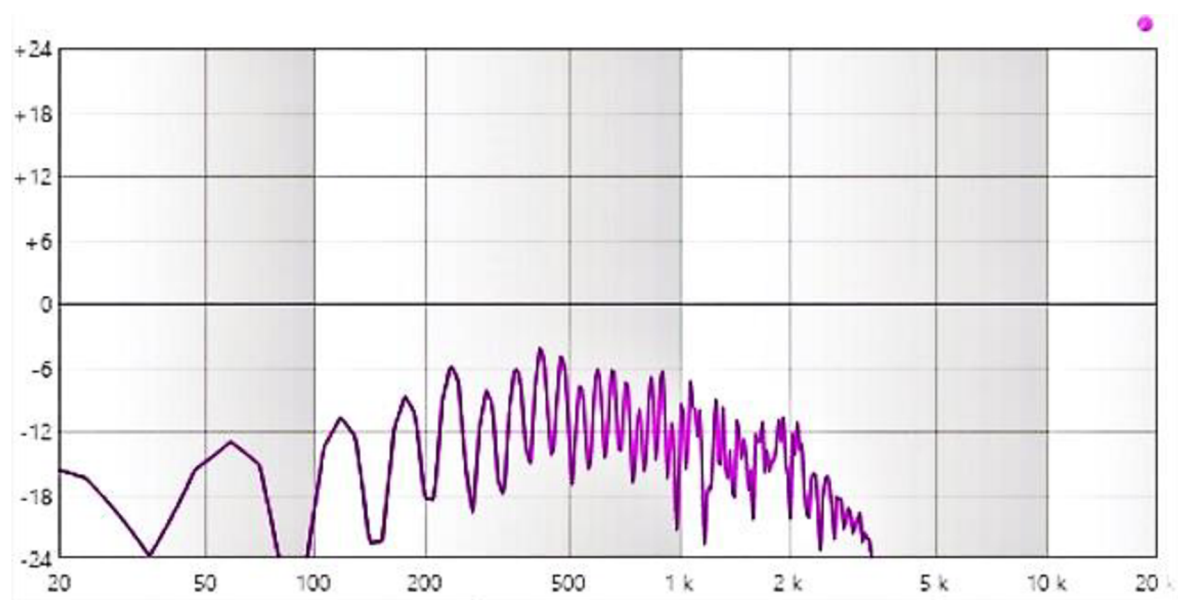


A6: Modulová kmitočtová charakteristika spektra tónu h^1 s odrazem od zdi (f hmaty, nátrubek V. Bach 10)

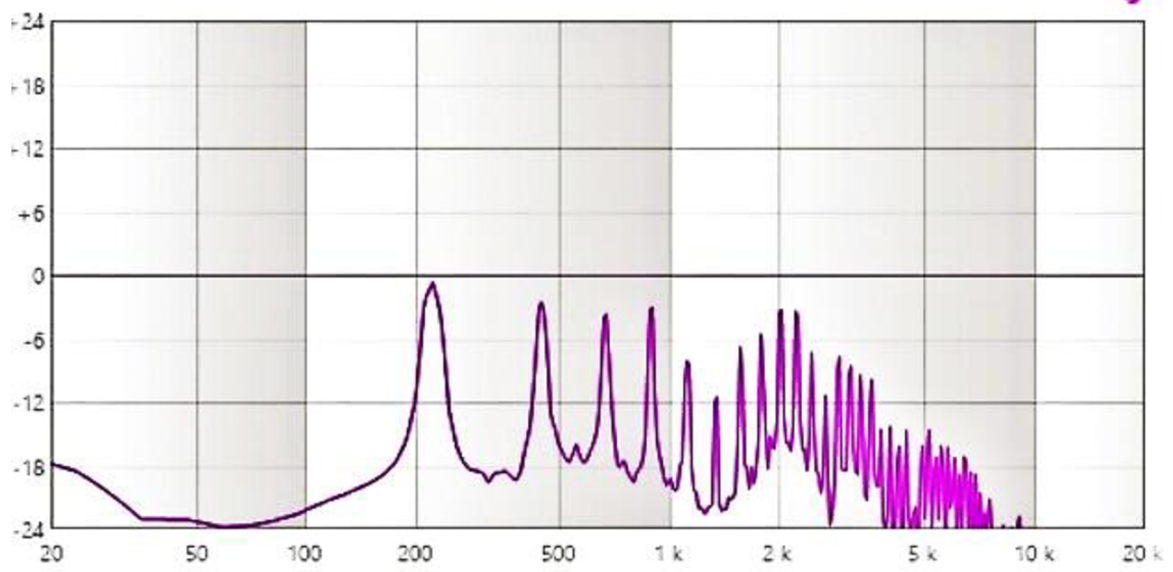
B: Spektrum harmonických složek vzorků v reálném čase, nástroj Josef LídI LBG 282G



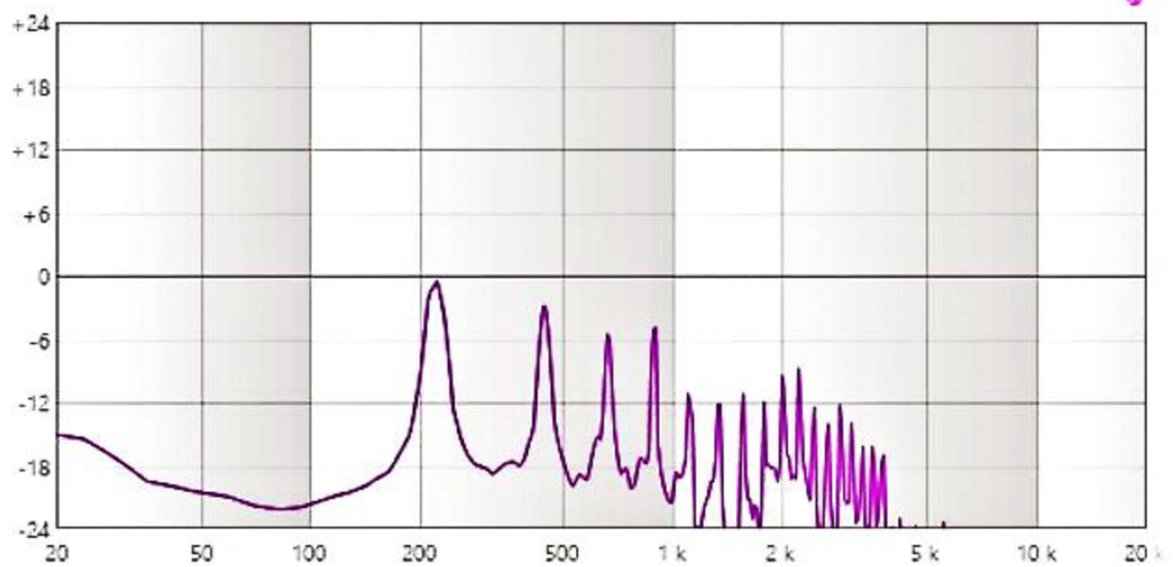
B1: Modulová kmitočtová charakteristika spektra tónu B₁ (lesnice, nátrubek V. Bach 10)



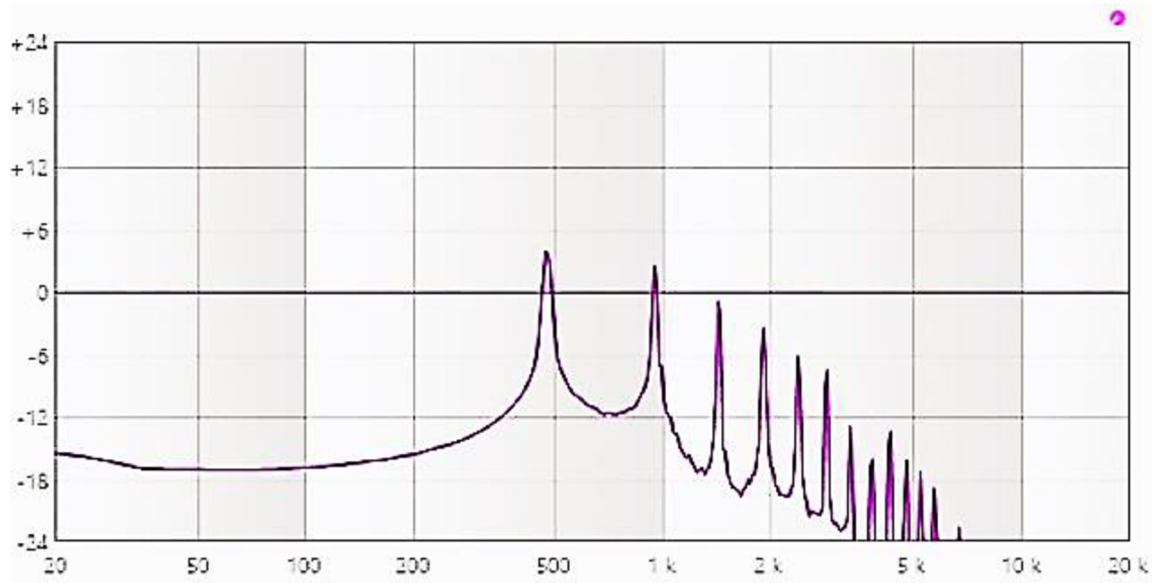
B2: Modulová kmitočtová charakteristika spektra tónu B₁ s odrazem od zdi (lesnice, nátrubek V. Bach 10)



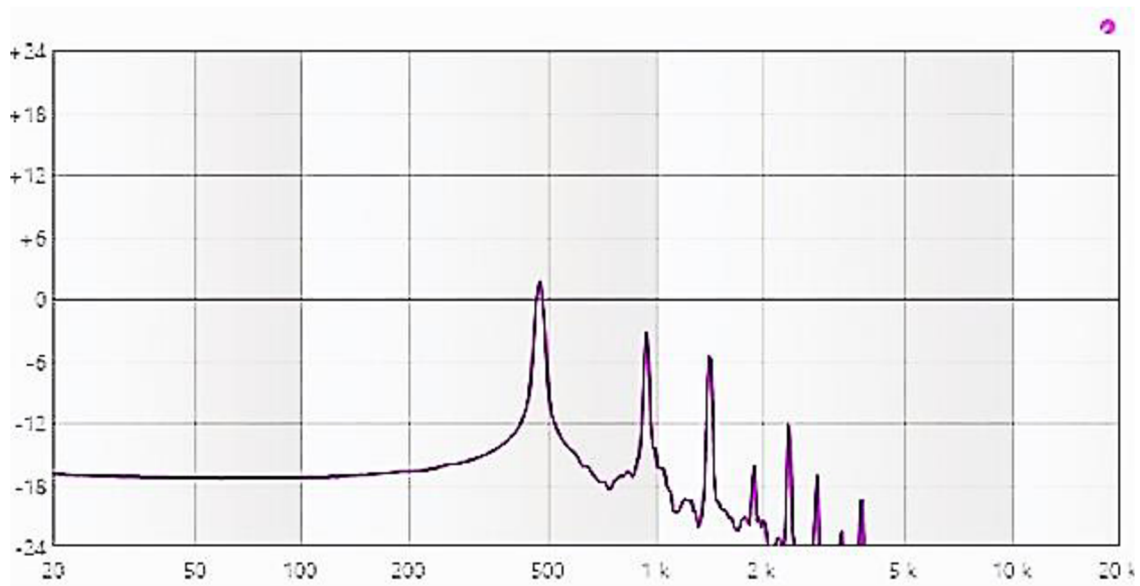
B3: Modulová kmitočtová charakteristika spektra tónu a (lesnice, nátrubek V. Bach 10)



B4: Modulová kmitočtová charakteristika spektra tónu a s odrazem od zdi (lesnice, nátrubek V. Bach 10)



B5: Modulová kmitočtová charakteristika spektra tónu b^1 (lesnice, nátrubek V. Bach 10)



B6: Modulová kmitočtová charakteristika spektra tónu b^1 s odrazem od zdi (lesnice, nátrubek V. Bach 10)

C: Obsah .zip souboru Přílohy

Příložený .zip soubor obsahuje tyto dvě složky:

1. MATLAB: obsahuje 12 .m (přípona pro aplikaci Matlab) souborů s funkcemi a skripty, používanými pro analýzu spektra, LPC a vykreslení směrových charakteristik. Ve složce je i textový soubor s uvedením zdroje těchto souborů a odkazu k pramenu původních .m souborů.

2. Zvukové vzorky: tato složka je rozdělena na další dvě podsložky Směrové charakteristiky a Analýza spektra.

2a. Směrové charakteristiky: ve složce jsou obsaženy 3 podsložky, a sice kalibrační vzorky pro směrové mikrofony, vzorky tónu **a** pro lesní roh Josef Lídler LHR 867 a vzorky téhož tónu pro lesnici Josef Lídler LBG 282G.

2b. Analýza spektra: složka obsahuje 7 audio souborů, a to kalibrační vzorek pro spektrální mikrofon B&K, 3 vzorky tónů lesního rohu Josef Lídler LHR 867 s nátrubkem V. Bach 10, které jsou analyzovány v této práci (kap. 6.2 – 6.5) a 3 vzorky tónů lesnice Josef Lídler LBG 282G, taktéž analyzovaných v této práci (kap. 6.6 – 6.9).