

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

SPEKTRÁLNÍ ANALÝZA FLÉTNOVÝCH VARHANNÍCH PÍŠŤAL A JEJICH SROVNÁNÍ

SPECTRAL ANALYSIS OF FLUTE ORGAN WHISTLES AND THEIR COMPARISON

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Tomáš Sommer

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

MgA. Mgr. Ondřej Jirásek, Ph.D.

BRNO 2018

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Audio inženýrství**
Ústav telekomunikací

Student: Tomáš Sommer

ID: 186191

Ročník: 3

Akademický rok: 2017/18

NÁZEV TÉMATU:

Spektrální analýza flétnových varhanních píšťal a jejich srovnání

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Nejméně u třech vybraných varhan porovnejte, jakou barvu generují jejich flautové píšťaly. Porovnejte, jak se na barvě podílí různé stopové výšky píšťal, jejich kryty, smyky, principály a jazyky. Vezme v úvahu i v menzury. Výsledky porovnejte mezi sebou a zobecněte dosažené poznatky. Pro analýzu vytvořte vlastní nástroje v prostředí MATLAB nebo jiném.

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. Kapitoly o varhanách. Praha: AMU, 2004. ISBN 80-7331-009-0

Termín zadání: 5.2.2018

Termín odevzdání: 29.5.2018

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

Konzultant:

prof. Ing. Jiří Mišurec, CSc.
předseda oborové rady

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 práce se zaměřuje na problematiku spektrální analýzy flétnových rejstříků varhanních píšťal. První část práce se věnuje terminologii týkající se varhanních píšťal. Teoretická část se také zaměřuje na problematiku harmonické analýzy s využitím matematických metod zpracování signálů, které tuto analýzu umožňují. Druhá část se zabývá metodou měření konkrétních varhan, pořízením zvukových vzorků, jejich vyhodnocením a popisem spektra.

KLÍČOVÁ SLOVA

amplitudová obálka, barva zvuku, FFT, SFFT, Rieger-Kloss, spektrální analýza, varhany, varhanní píšťala

ABSTRACT

This work is focused on the problems of spectral analysis of flutes stops in organ pipes. The first part of this work is about terminology of organ pipes. This theoretical part is also focused on the problem of harmonic analysis with the use of mathematical signal processing methods, which allows this analysis. The second part of this work deals with measuring methods of specific organs and acquiring sound samples and their evaluation and spectrum description.

KEYWORDS

amplitude envelope, FFT, spectral analysis, SFFT, Rieger-Kloss, organ, organ pipes, timbre

SOMMER, Tomáš. *Analýza srovnání spekter flétnových varhanních píšťal*. Brno, 2018, 66 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce: MgA. Mgr. Ondřej Jirásek, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Analýza srovnání spekter flétnových varhanních píšťal“ jsem vypracoval(a) samostatně pod vedením vedoucího 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(ka) uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil(a) autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl(a) nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom(a) následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora(-ky)

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu MgA. Mgr. Ondřeji Jiráskovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Brno

.....

podpis autora(-ky)



Faculty of Electrical Engineering
and Communication
Brno University of Technology
Purkynova 118, CZ-61200 Brno
Czech Republic
<http://www.six.feec.vutbr.cz>

PODĚKOVÁNÍ

Výzkum popsany v této bakalářské práci byl realizován v laboratořích podpořených z projektu SIX; registrační číslo CZ.1.05/2.1.00/03.0072, operační program Výzkum a vývoj pro inovace.

Brno

.....
podpis autora(-ky)



EVROPSKÁ UNIE
EVROPSKÝ FOND PRO REGIONÁLNÍ ROZVOJ
INVESTICE DO VAŠÍ BUDOUCNOSTI



OBSAH

Úvod	11
1 Konstrukce varhan	12
1.1 Varhanní píšťaly	12
1.1.1 Retné píšťaly	12
1.1.2 Jazykové píšťaly	14
1.1.3 Varhanní hlasy	14
1.1.4 Tvary varhanních píšťal	16
1.2 Menzura	18
2 Fyzikální podstata vzniku tónu	19
2.1 Tvorba tónu v píšťale	19
2.2 Stojaté vlnění	20
3 Hudební signál	24
3.1 Časový průběh hudebního signálu	24
3.2 Rozdělení hudebního signálu	26
3.3 Harmonická analýza	27
3.4 Diskrétní Fourierova transformace	28
3.5 Krátkodobá Fourierova transformace – STFT	29
4 Realizace v prostředí MATLAB	31
4.1 Grafické rozhraní aplikace	31
4.2 Funkce FFT a Harmonické složky	32
4.3 Funkce Spektrogram a Spektrogram 3D	32
4.4 Porovnání vzorků	33
4.5 Funkce Časový průběh harmonických složek	33
5 Měření varhan	34
5.1 Popis a metoda nahrávání zvukových vzorků	34
5.2 Použitá zařízení	36
5.3 Měřené rejstříky	36
5.3.1 Kryt 8'	36
5.3.2 Flétna trubicová 8'	36
5.3.3 Flétna kopulová 4'	36
5.4 Měřené nástroje	36
5.4.1 Rieger-Kloss opus 3466	38
5.4.2 Rieger-Kloss opus 3487	39

5.4.3	Rieger-Kloss opus 3519	40
6	Výsledky měření a porovnání	41
6.1	Kryt 8'	41
6.2	Flétna trubicová 8'	43
6.3	Flétna kopulová 4'	43
6.4	Porovnání tónu c^0 napříč rejstříky	46
6.5	Neharmonicita	52
6.6	Šum pozadí tónů	53
7	Závěr	54
	Literatura	55
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	57
	Seznam příloh	58
A	Obsah přiloženého CD	59
B	Tabulky naměřených hodnot	60

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Boční schématický řez píšťalou	13
1.2	Schéma jazykové píšťaly	15
1.3	Označení ovládacího prvku	16
1.4	Absolutní výška stopových poloh rejstříků	17
2.1	Vznik třecích tónů u varhanní píšťaly	20
2.2	Kmitání vzdušného jazyčku	21
2.3	Stojaté vlnění v otevřené píšťale	22
2.4	Stojaté vlnění v uzavřené píšťale	22
3.1	Obecné schéma ADSR obálky	24
3.2	Obecné zjednodušené schéma ADSR obálky perkusních tónů	25
3.3	Vymezení délky tranzientu	26
3.4	Zobrazení spektra tónu c^1 rejstříku Flétna trubicová 8' pomocí DFT	29
3.5	Příklad okének	30
4.1	Aplikace v prostředí MATLAB	31
5.1	Zobrazení rozměrů a poloha mikrofону DBX-RTA při snímání varhan Rieger-Kloss opus 3466	34
5.2	Zobrazení rozměrů a poloha mikrofону DBX-RTA při snímání varhan Rieger-Kloss opus 3487	35
5.3	Zobrazení rozměrů a poloha mikrofону DBX-RTA při snímání varhan Rieger-Kloss opus 3519	35
5.4	Měřené píšťaly – nákres	37
5.5	Měřené varhany Rieger-Kloss 3466	38
5.6	Měřené varhany Rieger-Kloss 3487	39
5.7	Měřené varhany Rieger-Kloss opus 3519	40
6.1	Spektrum analyzovaných tónů rejstříku Kryt 8'	42
6.2	Spektrum analyzovaných tónů rejstříku Flétna trubicová 8'	44
6.3	Spektrum analyzovaných tónů rejstříku Flétna kopulová 4'	45
6.4	Spektrogram píšťaly tónu c^0 rejstříku Kryt 8'	46
6.5	Spektrogram píšťaly tónu c^0 rejstříku Flétna trubicová 8'	47
6.6	Spektrogram píšťaly tónů C_0 rejstříku Flétna kopulová 4'	47
6.7	Spektrogram píšťaly tónů c^0 rejstříku Principál 8'	48
6.8	Spektrogram píšťaly tónů c^0 rejstříku Trompeta 8'	49
6.9	Spektrogram píšťaly tónů c^0 rejstříku Salicionál 8'	49
6.10	Spektrogram píšťaly tónů c^0 rejstříku Salicionál 8'	50
6.11	Časový průběh harmonických složek porovnávaných vzorků tónu c^0	51
6.12	Vysunutí stojaté vlny z píšťaly	52
6.13	Spektrum šumu motoru varhan opus 3466	53

SEZNAM TABULEK

1.1	Přehled vedlejších hlasů od různých stopových základů	17
B.1	Tabulka neharmonicit analyzovaných tónů rejstříku Kryt 8' varhan opus 3466	60
B.2	Tabulka neharmonicit analyzovaných tónů rejstříku Flétny trubcové 8' varhan opus 3487	61
B.3	Tabulka neharmonicit analyzovaných tónů rejstříku Flétny kopulové 4' varhan opus 3466	62
B.4	Tabulka hramonických složek tónů C_0, c^0, c^1 varhan Rieger-Kloss opus 3466	63
B.5	Tabulka hramonických složek tónů c^3, c^3 varhan Rieger-Kloss opus 3466	63
B.6	Tabulka hramonických složek tónů C_0, c^0, c^1 varhan Rieger-Kloss opus 3487	64
B.7	Tabulka hramonických složek tónů c^3, c^3 varhan Rieger-Kloss opus 3487	64
B.8	Tabulka hramonických složek tónů C_0, c^0, c^1 varhan Rieger-Kloss opus 3519	65
B.9	Tabulka hramonických složek tónů c^3, c^3 varhan Rieger-Kloss opus 3519	65
B.10	Tabulka porovnání harmonických složek tónu c^0 napříč rejstříky různých skupin hlasů	66

ÚVOD

V této bakalářské práci se věnuji analýze a srovnání spekter zvuku vzniklého ve varhanních píšťalách. Zvolil jsem zaměření na flétnové rejstříky. Pomocí teoretických poznatků vycházejících z užití literatury, s využitím vlastních naměřených vzorků a jejich analýzou, se snažím vysvětlit a popsat rozdíly, které se týkají zvukového spektra varhanního tónu. V práci se zabývám měřením konkrétních varhan, následným zpracováním zvukových vzorků a jejich vyhodnocením.

První část této práce je uvedením do problematiky organologie a seznámením s terminologií týkající se varhanních píšťal. Zmiňovány jsou zde materiály použité k výrobě píšťal. Tato kapitola představuje píšťaly retné a jazykové, jejich konstrukce, a vysvětluje rozdíly. Popisuje typy tvarů rezonátoru píšťaly a jeho vliv na barvu tónu. Objasňuje, co to jsou varhanní hlasy, jejich pojmenovávání a označení a pojmy menzura, nosnost tónu, schopnost mísení tónů.

Další kapitola se zabývá vznikem tónů v retné píšťale. Popisuje principy třecích tónů a vzdušného jazýčku, vysvětluje rozdíl mezi nimi. Zmiňuje také průběh stojatého vlnění uvnitř otevřené a kryté píšťaly.

Třetí kapitola popisuje časový průběh hudebního signálu a ADSR obálku. Popisuje o rozdělení hudebních signálů a o matematických operacích využívaných při analýze signálů.

Čtvrtá kapitola popisuje vytvořenou aplikaci v prostředí MATLAB pro analýzu spektra zvuku varhan, její grafické prostředí, jednotlivé skripty a jejich parametry.

Pátá kapitola obsahuje informace o praktické realizaci měření, zvolené metodě, měřených nástrojích a konkrétních flétnových rejstřících.

V šesté kapitole se nacházejí výsledky měření. Je uvedeno porovnání změřených vzorků tónů mezi stejnými rejstříky navzájem. Poté je provedeno srovnání s jinými rejstříky varhan ze skupiny principálů, smyků a jazyků. Dále je komentováno jejich spektrum a vliv harmonických složek na výslednou barvu zvuku.

1 KONSTRUKCE VARHAN

Cílem této kapitoly je seznámit čtenáře s terminologií z oblasti varhanářství a uvést jej do problematiky konstrukce nástroje.

Mezi širokou veřejností nalezneme předpoklad, že čím větší varhany, tím jsou lepší. Toto podporuje i další tvrzení, že větší varhany jsou hlasitější, což pro veřejnost může být rozhodujícím kritériem pro posouzení kvality. Z hlediska kvality zvuku jsou rozhodující jiné okolnosti, a to zejména tyto čtyři okruhy faktorů:

- a) akustický prostor a umístění varhan
- b) rejstříková dispozice
- c) menzurace píšťal
- d) intonace a ladění píšťal [7].

1.1 Varhanní píšťaly

Varhany jsou složeny z několika stovek nebo tisíc píšťal. Každá píšťala je naladěna právě na jeden určitý tón. A mezi sebou se píšťaly liší svou výškou, barvou, hlasitostí, konstrukcí, materiálem.

K výrobě píšťal se podle požadované barvy zvuku používá dřevo (tvrdé i měkké) a kov. Dřevěné píšťaly mají zvuk měkčí, zastřenější, kovové píšťaly jasnější a pevnější. Ve varhanářství se pro výrobu kovových píšťal používá varhanní kov, což je slitina cínu a olova v různém poměru, a legující prvky měď, zinek, a mosaz. Poměr slitiny je různý. Varhanářské firmy vyrábějící píšťaly jej mají součástí svého výrobního tajemství. Nej kvalitnější směsi (s obsahem cínu více než 75 %) se používají pro výrobu prospektových píšťal principálových rejstříků. Pro flétnové hlasy se používají slitiny s větším obsahem olova. Znějí měkčeji a temněji. Měď a mosaz se používají vyjimečně, spíše pro vylepšení estetické stránky. Zinek se používá jako levné řešení u velkých píšťal. Mezi varhanáři nalezneme názor, že zinkem lze nahradit většinu kovových píšťal a ušetřit tak náklady při stavbě nástroje. Renomovaní varhanáři se tomuto kovu zcela vyhýbají, protože přináší ztrátu zvukové kvality. Primární cíl je vždy získat osobitou zvukovou kvalitu. [7]

Ve varhanách nalezneme dva typy píšťal:

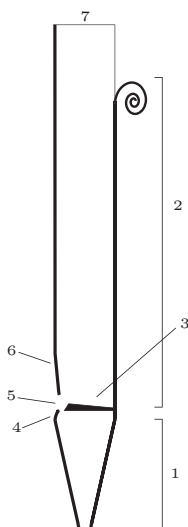
1. *retné* nebo-li *labiální*
2. *jazykové* nebo-li *linguální*

1.1.1 Retné píšťaly

Základ varhanního zvuku tvoří retné píšťaly. Bělský uvádí, že velké varhany mají 80 % retných a 20 % jazykových píšťal. [1] U nástrojů v ČR (zdejší provenience) je

tento poměr častokrát větší ve prospěch retných píšťal.

U varhanní labiální píšťaly rozlišujeme tři hlavní části: nohu, tělo a výřez. Noha slouží k přívodu vzduchu ze vzdušnice a k usazení píšťaly na vzdušnici. Její délka nemá vliv na tón, její průměr ano. Nohu a tělo odděluje kovová nebo dřevěná destička nazvaná jádro. Vzduch vychází úzkou jádrovou štěrbinou (průlinkou) z nohy píšťaly. V tomto místě je možné provést tzv. vpich (vryp, zářez) do materiálu přední hrany jádra. Barokní píšťaly vpichy neměly nebo jich na šířku labia byl malý počet (3 až 7) a jednalo se o úzké a nepříliš hluboké zářezy. Vpichy tzv. romantického typu jsou hlubší a klínovitého tvaru. Vlivem zářezu dochází k usměrnění proudění částic vzduchu a lepšímu, konkrétnímu nasazení tónu. Vzdálenost mezi spodním a horním rtem se označuje jako výška výřezu labia. Zvýšením výšky výřezu, zůstane-li tlak zachován, dojde k poklesu vyšších harmonických složek ve spektru. Délka těla přímo závisí na frekvenci tónu, který má píšťala vydávat. Změnou délky těla dochází ke změně frekvence, tohoto se využívá k ladění píšťal. [1, 7]



Obr. 1.1: Boční schématický řez píšťalou: 1 – noha, 2 – tělo, 3 – jádro, 4 – dolní ret, 5 – jádrova štěrbinu, 6 – horní ret, 7 – ústí.

Zakončení píšťal na jejich ústí je různé a tím se liší způsob ladění (liší se podle konstrukce). U krytých a jazykových píšťal je způsob ladění stejný po staletí. Kryté kovové píšťaly se ladí posouváním kloboučku, dřevěné pomocí zátky. Zejména u kovových otevřených píšťal existují dva odlišné způsoby. Přibližně do roku 1880 se píšťaly ladily seříznutím ústí na potřebnou tónovou výšku a posléze přesným doladěním pomocí tzv. ladícího kuželu (Stimmhorn). Tento barokní způsob byl více pracný, ale umožnil naladění na přesnou výšku a ladění bylo stálé na několik let. Přesné zaříznutí má za následek čistý, výškově i strukturou klidný tón. Ke konci

19. století s rozšířením tovární výroby v rámci usnadnění práce se přešlo na jiný způsob ladění. Akustická výška píšťaly se upravovala úzkým kovovým páskem, který vznikl říznutím na ústí píšťaly. Rolováním kovového plátku (stůčka) se upravuje rozhodující akustická výška. Tento způsob byl mnohem rychlejší, jak při ladění nového nástroje při jeho stavbě, tak i pozdějším přeladování. Zrušil však všechny výhody barokního způsobu ladění. Takto naladěné píšťaly vydrží něco déle než jeden rok. Často se také vyřezání ladícího pásku provádělo i značně níž pod ústím píšťaly. Nad ladícím výřezem zbylo i několik desítek centimetrů těla píšťaly, které sice nemá vliv na výšku tónu, ale může vytvářet např. parazitní rezonance. [1, 7]

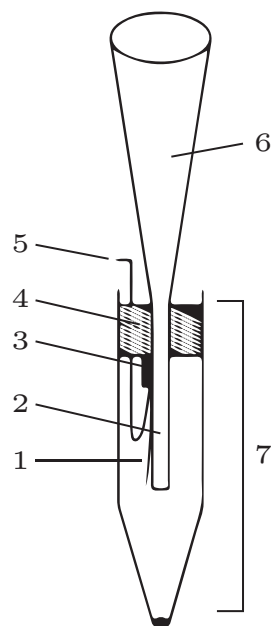
Je-li prostor nad píšťalami nízký, je možné zejména hluboké píšťaly (dřevěné i kovové) jednou nebo dvakrát lomit (krepovat) bez znatelné změny zvukové barvy. Některým píšťalám se přidávají po obou stranách výřezu tzv. vousy. Vousy usměrňují proudění částic vzduchu a umožňují tak jasnější, zřetelnější, silnější nástup i znění tónu.

1.1.2 Jazykové píšťaly

Dalším typem píšťal, které ve varhanách nalezneme jsou jazykové píšťaly. Jazyková píšťala se skládá z pouzdra a ozvučnice. V pouzdře je umístěný mosazný plátek – jazýček, připevněný klínkem. Pronikající vzduch (excitátor) rozkmitá mírně zahnutý jazýček (oscilátor), který kmitá frekvencí základního kmitočtu. Hlavou prochází ladící tyčinka, která přitlačuje ručičkou jazýček. Zkracováním nebo prodlužováním jazýčku (pohybem tyčinky nahoru a dolu) se píšťala ladí. Do hlavy je zasunuta dřevěná nebo kovová ozvučna (rezonátor). Výšku tónu určuje výhradně kmitající kovový jazýček. Délka ozvučny ovlivní výšku tónu jen nepatrně, zato má velký podíl na tvorbě barvy zvuku. Svým tvarem a délkou ovlivňuje poměr vyšších harmonických složek. Válcové i čtyřboké ozvučny zdůrazňují pouze liché parciální tóny, trychtýřové podporují vznik všech parciálních tónů. [1]

1.1.3 Varhanní hlasy

Píšťaly se stejným zvukovým charakterem (shodnou barvou) a dalšími společnými parametry jsou obvykle uspořádány v půltónové stupnici do řad, které nazýváme *rejstříky*. Řady píšťal je možno použít samostatně nebo v kombinaci s jinými pro vytvoření určité barvy zvuku. Zvuk rejstříku je spojen s jeho názvem, který vychází z názvu hudebního nástroje (flétna, viola, gamba, hoboje, fagot, trumpet), nebo z imitace zvukového jevu (Vox Humana – hlas lidský, Unda maris – mořská vlna), nebo z typu jeho konstrukce (Kryt, Flétna špičatá). Tyto názvy usnadňují



Obr. 1.2: Schéma jazykové píšťaly: 1 – jazyk, 2 – pouzdro, 3 – klínek, 4 – hlava, 5 – ladící tyčinka, 6 – rezonátor, 7 – pouzdro s jazykem.

orientaci ve varhanních hlasech a napomáhají varhaníkovi při registraci.¹ Avšak jen těžko nalezneme rejstříky se stejným názvem a zcela stejným zvukem u dvou různých varhan. Je to dáno dobou vzniku, konkrétní konstrukcí píšťal, varhanářskou firmou, regionem apod.

Varhanní rejstříky bývají označeny na jeho ovládacím prvku (sklopce či manubriu²) nebo v jeho okolí (obvykle nad nebo pod) těmito parametry:

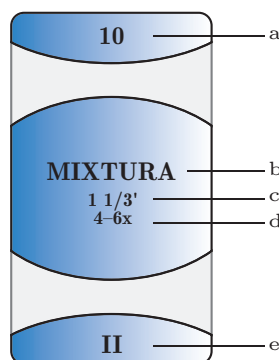
1. Pořadové číslo rejstříku.
2. Slovní název rejstříku
3. Číselné označení polohy rejstříku
4. U smíšených hlasů se označuje počet řad píšťal
5. Příslušnost klaviatuře. Označení manuálu nebo pedálu.

Všechny varhanní rejstříky nezní ve stejné poloze. Některé zní o oktávu, dvě nebo tři výš jiné o jednu až dvě oktávy níž. Těmto rejstříkům říkáme transponující. Díky tomu varhany pokrývají svým rozsahem celé slyšitelné spektrum zvuku.

Poloha rejstříku se udává ve stopové délce a je odvozena od délky největší píšťaly rejstříku, píšťaly velkého C. Pro názornost nejhlubší píšťala 8' netransponujícího

¹Registrací označujeme kombinaci aktuálně zvolených rejstříků při interpretaci skladby nebo při volné hře. Registrátor je pak člověk, který pomáhá varhaníkovi při jeho interpretaci s přepínáním předem nastavených kombinací.

²=táhlo



Obr. 1.3: Označení ovládacího prvku – sklopky: a – pořadové číslo, b – název, c – stopová výška, d – počet řad píšťal, e – příslušnost ke klaviatuře.

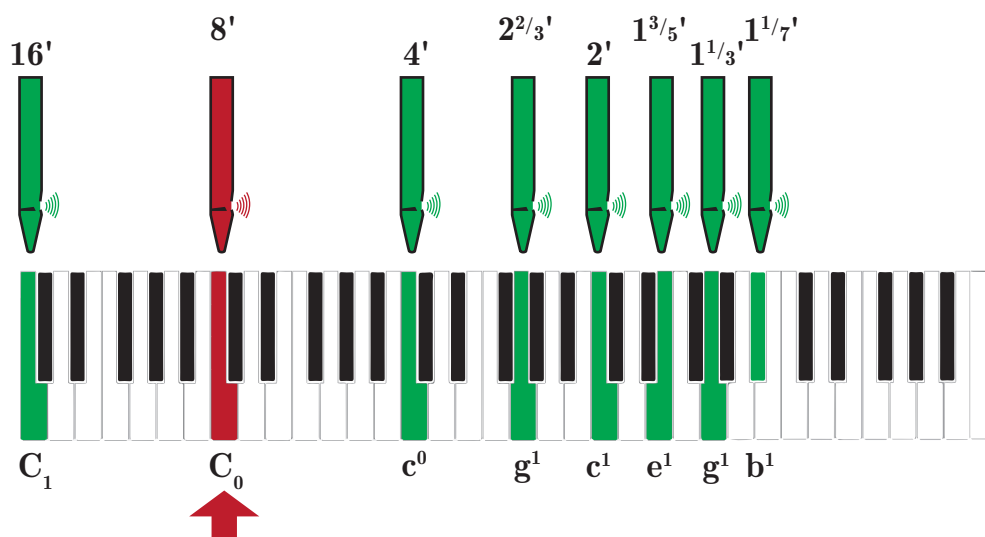
rejstříku je přibližně dlouhá $8 \times 32 = 256$ cm. Ostatní rejstříky jsou transponující a mohou mít označení $32'$, $16'$, $4'$, $2'$, $1'$. Při stisku velkého C třicetidvoustopového rejstříku zní tón o 2 oktávy níž, to je subkontra C (C_{-2}). Jedná se o největší a nejhlouběji znějící hlas. Frekvence tónu subkontra C je 16 Hz, což je dolní hranice slyšitelného pásma zvuku. Naopak nejvyšší tón u jednostopového rejstříku na klávese c^4 , zní tón c^7 , má frekvenci 16,4 kHz, což je horní mez slyšitelnosti. Z toho vyplývá, že varhany jako jediný nástroj mohou mít rozsah až 9 oktáv a pokrývají celé slyšitelné frekvenční pásmo zvuku. Tato stopová výška platí jen u otevřených píšťal. Kryté píšťaly se až na vzácné výjimky označují shodně, přestože jejich skutečná velikost je poloviční.

Celými čísly značíme rejstříky v oktávové poloze a souborně jim říkáme základní hlasy. Naproti tomu máme hlasy vedlejší (pomocné, též označované jako alikvoty). Jedná se o rejstříky v poloze některých harmonických tónů označovaných zlomky např. $2^2/3'$, $1^3/5'$, $1^1/7'$ apod. Jmenovatel zlomku značí vždy pořadové číslo tónu v harmonické řadě (třetiny jsou kvinty, pětiny tercie, sedminy septimy). Samotné užití těchto hlasů význam nemá. Nabývá ho až ve spojení se základními hlasy, kdy dochází k umělému zesílení určitých harmonických tónů základních hlasů. Jako příklad bylo uvedeno jen několik alikvótů. Skutečných alikvótů je mnohem více, mohou být odvozeny od různých základních hlasů. [2]

1.1.4 Tvary varhanních píšťal

Zvuková rozmanitost varhan závisí také na tvaru jednotlivých píšťal. Rozlišujeme píšťaly *otevřené*, *kryté*, *nebo polokryté*

Tělo (rezonátor) může mít po celé své délce stejný průřez, nebo se může měnit. V každé skupině mohou být píšťaly rejstříků válcové (čtyřboké), kónické (směrem



Obr. 1.4: Absolutní výška stopových poloh rejstříků – Při zahrání tónu velké C zní příslušná píšťala hlasu určité stopové výšky

Tab. 1.1: Přehled vedlejších hlasů od různých stopových základů

Základní hlas	32'	16'	8'	4'	2'	1'
3. harmonická – kvinta	$10 \frac{2}{3}'$	$5 \frac{1}{3}'$	$2 \frac{2}{3}'$	$1 \frac{1}{3}'$	$\frac{2}{3}'$	$\frac{1}{3}'$
5. harmonická – tercie	$6 \frac{2}{5}'$	$3 \frac{1}{5}'$	$1 \frac{3}{5}'$	$\frac{4}{5}'$	$\frac{2}{5}'$	$\frac{1}{5}'$
7. harmonická – septima	$4 \frac{4}{7}'$	$2 \frac{2}{7}'$	$1 \frac{1}{7}'$	$\frac{4}{7}'$	$\frac{2}{7}'$	$\frac{1}{7}'$
9. harmonická – nona	$3 \frac{5}{9}'$	$1 \frac{7}{9}'$	$\frac{8}{9}'$	$\frac{4}{9}'$	$\frac{2}{9}'$	$\frac{1}{9}'$

nahorů zužující), trychtýřové (směrem nahoru rozšiřující) a kombinované. Válcové i čtyřboké píšťaly se chovají akusticky stejně, jejich tvar je dán volbou materiálu. Otevřené retné píšťaly mají plný, fundamentální zvuk. Otevřené, kovové píšťaly mají např. principálové rejstříky v různých polohách vytvářející charakteristický zvuk varhan. Píšťaly širší menzury (viz 1.2) než principál mají měkčí tón a označují se jako flétnové hlasy. Opakem jsou píšťaly užší menzury. Jejich zvuk je ostřejší a podobný zvuku smyčcových nástrojů a proto se označují jako smyky nebo smýkavé hlasy. Některé válcové otevřené píšťaly jsou konstruovány tak, že píšťala přefukuje o oktávu výše do 2. harmonické složky díky malé dírci přibližně uprostřed rezonátoru.

Kryté píšťaly mají ústí uavřené zátkou nebo kloboučkem. Jejich tón je o oktávu hlubší při stejné délce těla píšťaly. Zvuk krytů je temný, dutý, protože je složen především z lichých harmonických tónů. Některé kryty zdůrazňují 3. harmonickou složku. Vedle základního tónu je zřetelně slyšet kvintu. Tento rejstřík se jmenuje

Kvintadena.

Uprostřed mezi krytými a otevřenými píšťalami se nacházejí polokryty. Jejich kloboučkem prochází různě dlouhá a široká trubička umožňující spojení vzduchového sloupce v těle píšťaly s okolním vzduchem. Zvuk polokrytů je flétnovitý.

1.2 Menzura

Souhrn rozměrových vztahů u píšťaly samotné a mezi píšťalami navzájem nazýváme *menzurací*. Menzura píšťaly udává v první řadě sílu tónu, protože udává objem vzdušného sloupce. Široká píšťala pak vydává silnější tón než stejně dlouhá úzká píšťala, ale potřebuje také více vzduchu. Široká píšťala vytváří nízký obsah vyšších harmonických složek, proto její barva bude kulatější. Úzké píšťaly budou mít tón naopak ostřejší. Barvu a sílu tónu lze též upravit výškou a šířkou výřezu. Vytvoříme-li úzce menzurované píšťale úzký a vysoký výřez můžeme docílit kulatého tónu. A naopak dáme-li široké píšťale nízký a široký výřez dostaneme tón ostrý. [15]

Nosnost tónu není určena hlasitostí, ale jeho energetickými vlastnostmi. Je definována jako „*odolnost tónu proti ztrátě svého výkonu v závislosti na vzdálenosti od nástroje*“ [16]. O nosnosti rozhoduje frekvenční průběh absorpce resp. doba dozvuku v daném prostoru. Vyšší harmonické složky jsou nepříznivé pro přenos v akustickém prostoru vzhledem k své nízké energii. Důležitý pro nosnost tónu je sinový fundament (1. harmonická složka) tónu. Tón silný a také nosný dokáže poskytnout píšťala o široké menzuru.

Schopnost mísení tónu různých hlasů (rejstříků) souvisí s překrýváním (maskováním) jejich vyšších harmonických tónů mezi sebou a také s podobností frekvenčních struktur a jejich vzájemným doplňováním. Dobře mísící schopnost budou mít hlasy s malým počtem vyšších harmonických složek jako jsou např. flétny a kryty. Dochází k vzájemnému podpoření frekvenčních struktur a vzniká vyrovnaná barva. Špatnou mísící schopnost mají úzce a ostře menzurované hlasy, zejména smyky. [15]

Zvolení menzurace by měla vycházet ze zvukového pojetí celku, mísení jednotlivých hlasových sborů a poté z charakteru tónu v celém rozsahu rejstříku. Výběr menzurace by měl zohlednit akustické vlastnosti prostoru. [17]

2 FYZIKÁLNÍ PODSTATA VZNIKU TÓNU

Každá píšťala je podle definice Syrového „samostatným hudebním nástrojem jako vhodně uspořádaný systém, schopný mechanického rozkmitání hmoty“.[14] Akustický systém každého hudebního nástroje obsahuje 3–4 funkční části: excitátor, oscilátor, rezonátor, radiátor. U retné píšťaly je excitátorem proud vzduchu, oscilátorem vzdušný jazýček, rezonátorem vzdušný sloupec, radiátorem výřez píšťaly. U jazykové píšťaly je excitátor opět proud vzduchu, oscilátorem kovový jazýček, rezonátorem vzdušný sloupec a radiátorem ústí píšťaly.

2.1 Tvorba tónu v píšťale

Fyzikální příčinou vzniku tónu v retné varhanní píšťale je periodické zhušťování a zředování počtu vzduchových částic před labiem, což způsobuje zvyšování a snižování tlaku těchto částic na jiné částice. Dochází tedy k periodické proměně tlaku, která je příčinou znění píšťaly. Zhušťování a zředování vzduchových částic před labiem je způsobeno proudem vzduchu, který vystupuje z nohy štěrbinou (průlinkou) a rozráží se na horním rtu labia na proudění dovnitř píšťaly a na proudění vystupující ven. [7]

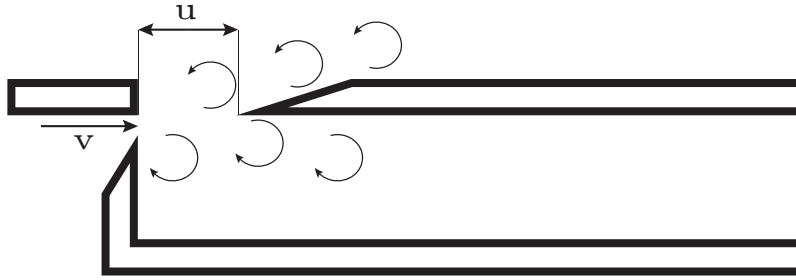
Proudění přes úzkou štěrbinu nebo přes ostrou hranu mění ustálený vzdušný tok na turbulentní (vířivé) proudění. Vzniklé vzdušné víry se periodicky opakují a dávají za vznik tzv. třecím tónům. Přibližná frekvence třecích tónů v ústech píšťaly je dána vztahem

$$f \approx 0,2 \frac{v}{u}, \quad (2.1)$$

kde v je rychlost proudění vzduchu a u je výška výřezu úst. Vzdálenost vírů je menší než výška výřezu a jejich počet není konstantní. Proto má třecí tón charakter filtrovaného šumu. Jeho frekvenční spektrum obsahuje také řadu neharmonických maxim vedle šumové složky. K nasazení tónu píšťaly dojde odpovídá-li frekvence třecího tónu přibližně frekvenci, na kterou je píšťala naladěna. [5, 14]

Vlivem vzdušného sloupce rezonátoru (těla píšťaly) dochází ke vzniku vzdušného jazýčku v ústech píšťaly. Jeho mechanismus je obdobný jako kmitání průrazného kovového jazýčku. Kmitající vzdušný jazýček je oscilátor, jehož kmity nejen zesiluje, ale také filtruje rezonátor. Základní vlastnosti tónu – výška, hlasitost a barva – jsou ovlivňovány rezonátorem, protože energie vzdušného sloupce je větší než energie vzdušného jazýčku.

Při proudění dovnitř těla píšťaly se zde zvyšuje hustota částic vzduchu, ty působí zpětně tlakem na další částice proudící z průlinky a mění jejich dráhu. Další částice



Obr. 2.1: Vznik třecích tónů u varhanní píšťaly

už nepostupují dovnitř píšťaly, ale část z nich se přidává k proudění směrem ven a zbývající část se stáčí obloukem k zadní stěně píšťaly. Kolem ní postupují směrem dolů a kolem jádra ven z píšťaly, kde směřuje stále více částic. Před labiem roste hustota částic a stoupá akustický tlak. Uvnitř dochází k poklesu hustoty částic, takže částice uvnitř píšťaly nepůsobí tlakem na následující proudění ze štěrbiny. Proudění se vrací ze směru ven zpět dovnitř. Část proudění směřujícího ven se přidává k proudění směřujícího dovnitř, jelikož vně píšťaly je teď větší akustický tlak. Znovu narůstá hustota částic uvnitř píšťaly a celý děj se opakuje. Perioda střídání proudění částic je ovlivněna objemem vzduchového sloupce v rezonátoru. Toto střídání směru proudění ven a dovnitř nazýváme z „makro-hlediska“ jako kmitání vzdušného jazýčku. [7, 18]

Proudění vzduchu není homogenní. Částice mají v různých místech různou rychlost, proto dochází ke vzniku vzdučných vírů. Víření se odehrává krátkodobě, nahodile a lokálně a je zdrojem šumové složky (viz třetí tóny).

2.2 Stojaté vlnění

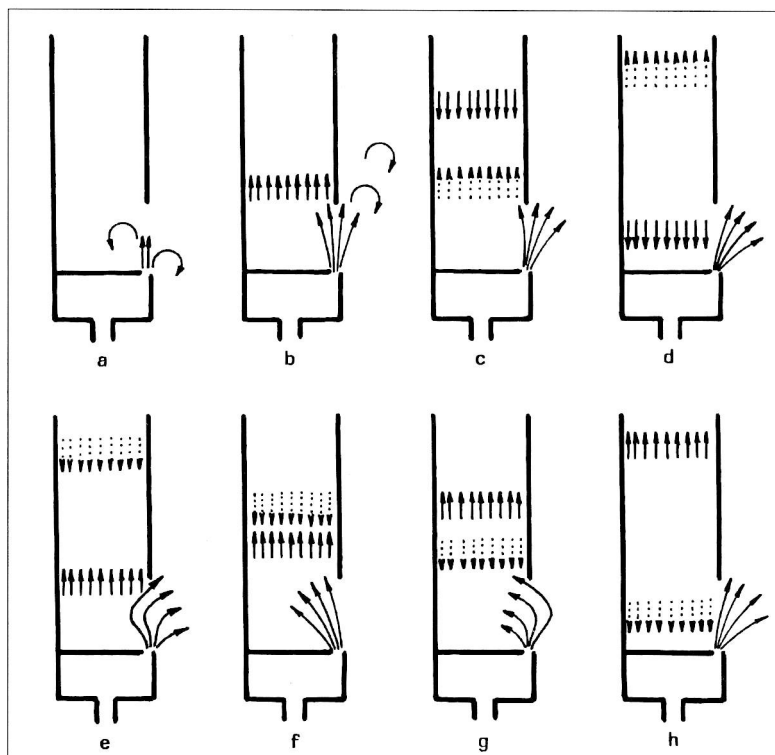
Zvukovod (tělo) píšťaly by měl mít specifické rezonanční vlastnosti podmíněné existencí stojatého vlnění, zatímco např. pro zvukovod reproduktoru je ideální vyrovnaný přenos v celém slyšitelném frekvenčním pásmu. Websterova vlnová rovnice popisuje šíření zvukových vln ve zvukovodech:

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} + \frac{d\psi}{dx} \frac{d}{dx}(\ln S) + k^2\psi = 0, \quad (2.2)$$

kde ψ je fázor rychlostního potenciálu, S je průřezová funkce zvukovodu a $k = \frac{\omega}{c}$ [6].

U varhanních píšťal můžeme uvažovat zvukovod konstantního průřezu. Ve válcovém zvukovodu pro akustický tlak platí vztah

$$p(x, t) = [Ae^{-jkx} + Be^{jkx}]e^{j\omega t}, \quad (2.3)$$



Obr. 2.2: Kmitání vzdušného jazýčku (převzato z [14])

který popisuje vlnu přímou, generovanou oscilátorem (vzdušným jazýčkem) a vlnu odraženou od otevřeného nebo uzavřeného konce vlnovodu. Interferencí těchto dvou vln vzniká stojatá vlna pouze na frekvencích, které odpovídají rezonančním módům vzuchového sloupce. [14]

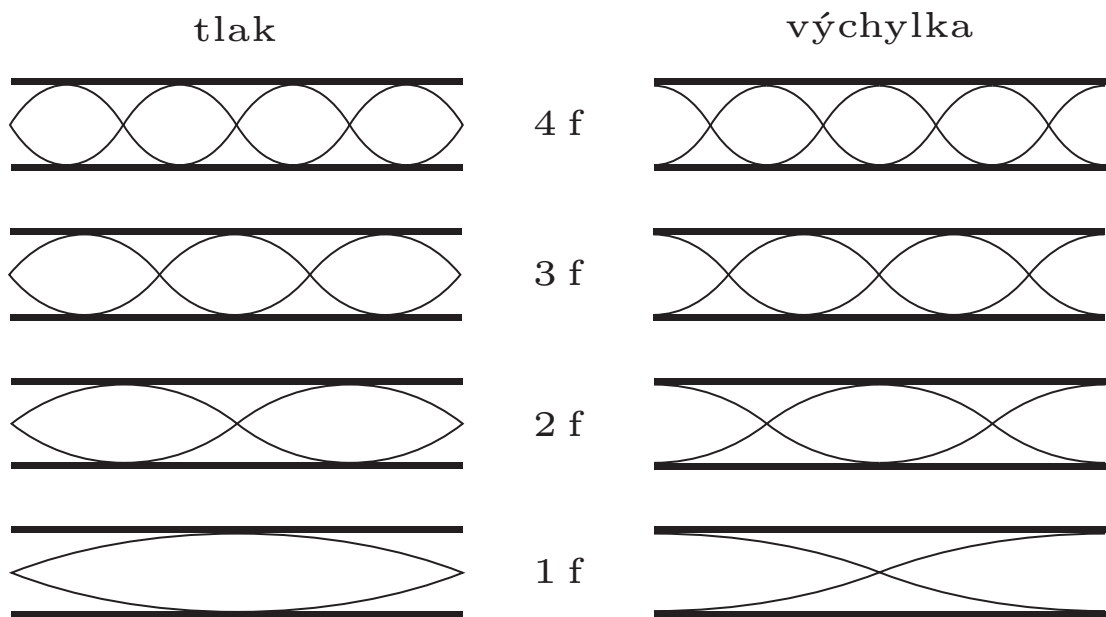
Vlna se od otevřeného konce odráží se stejnou fází. V ústech píšťaly a na otevřeném konci mají částice vzduchu maximální výchylku a rychlost – pohybová kmitna. Uprostřed píšťaly je výchylka částic minimální (ideálně nulová) – pohybový uzel. A zároveň zde odražená vlna s přímou vlnou vytváří místo s největším tlakem – tlakovou kmitnu.

Délka rezonátoru válcové otevřené píšťaly je rovna polovině vlnové délky frekvence základního tónu (fundamentu, $n = 1$). Vzduchový sloupec rezonátoru je schopen kmitat v celistvých násobcích základní frekvence. Frekvence tónů a jeho harmonických složek je pro otevřenou píšťalu dána vztahem

$$f_n = n \frac{c}{2l}, \quad (2.4)$$

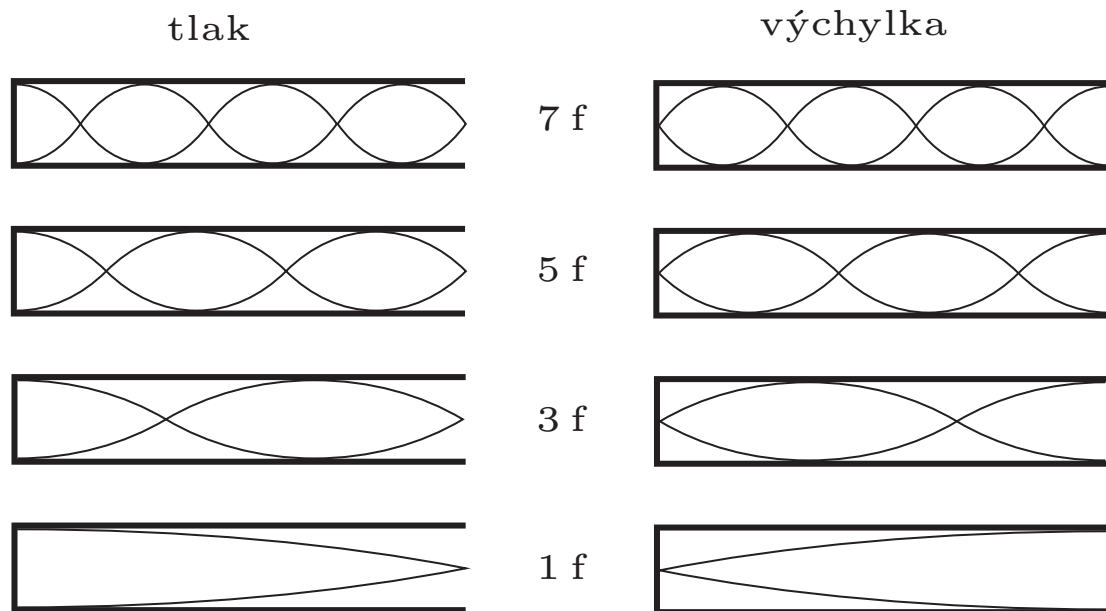
kde n je číslo harmonické složky, c je rychlost šíření zvuku a l je délka trubice.

U kryté píšťaly se vlna odráží s opačnou fází od uzavřeného konce. Vzniká zde místo s největším tlakem – tlaková kmitna a současně pohybový uzel. V ústech



Obr. 2.3: Stojaté vlnění v otevřené píšťale

píšťaly je stejně jako u otevřené píšťaly pohybová kmitna. Délka rezonátoru kryté píšťaly je rovna čtvrtině vlnové délky frekvence fundamentu.



Obr. 2.4: Stojaté vlnění v uzavřené píšťale

Frekvence tónů a jeho harmonických složek je pro krytou píšťalu dána vztahem

$$f_n = (2n - 1) \frac{c}{4l}, \quad (2.5)$$

kde n je číslo harmonické složky, c je rychlost šíření zvuku a l je délka trubice. Frekvence harmonických složek u kryté píšťaly mohou nabývat hodnot $f, 3f, 5f, 7f$ apod. [5, 15]

3 HUDEBNÍ SIGNÁL

3.1 Časový průběh hudebního signálu

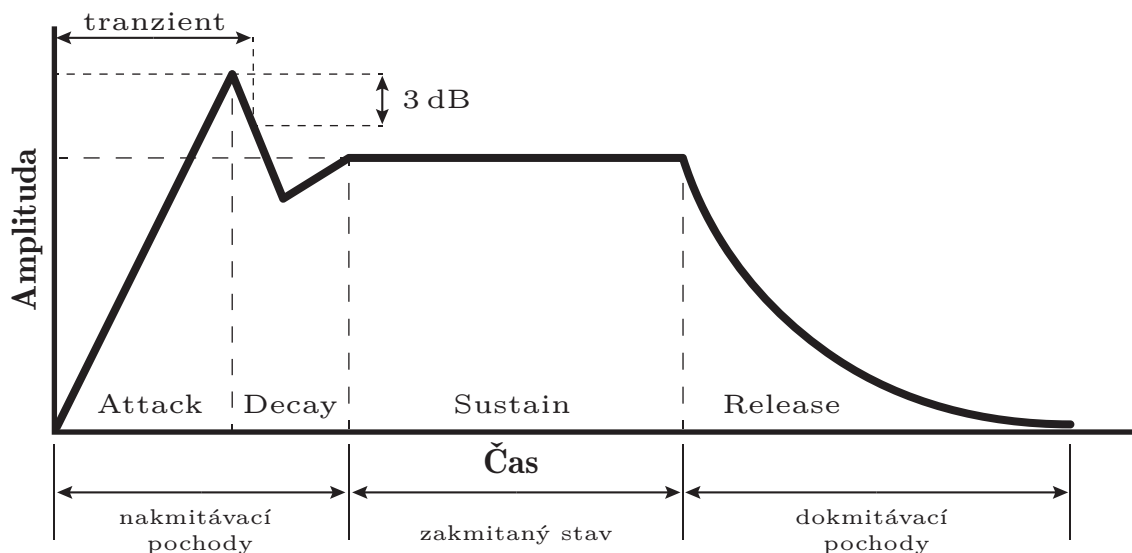
Tzv. časový průběh tónu či zvuku vykresluje změny amplitudy v závislosti na čase. Z velikosti a rychlosti tvarových změn lze usuzovat tónový nebo hlukový charakter zvuku. Periodické změny budou naznačovat tónový charakter, nahodilé změny budou příslušet hlukům nebo šumům. Vizuální analýza časového průběhu signálu umožňuje jen odhad vlastnosti signálu (frekvenční poměry, frekvenční strukturu).

Při změně měřítka časové osy úměrně délce tónu uvidíme obrys, tzv. amplitudovou nebo časovou obálku. Prvotně lze časovou obálku považovat za modulační funkci $A(t)$, která ovlivňuje maximální amplitudu signálu. Lze ji jednoduše vyjádřit vztahem:

$$f(t) = A(t) \cdot g(t), \quad (3.1)$$

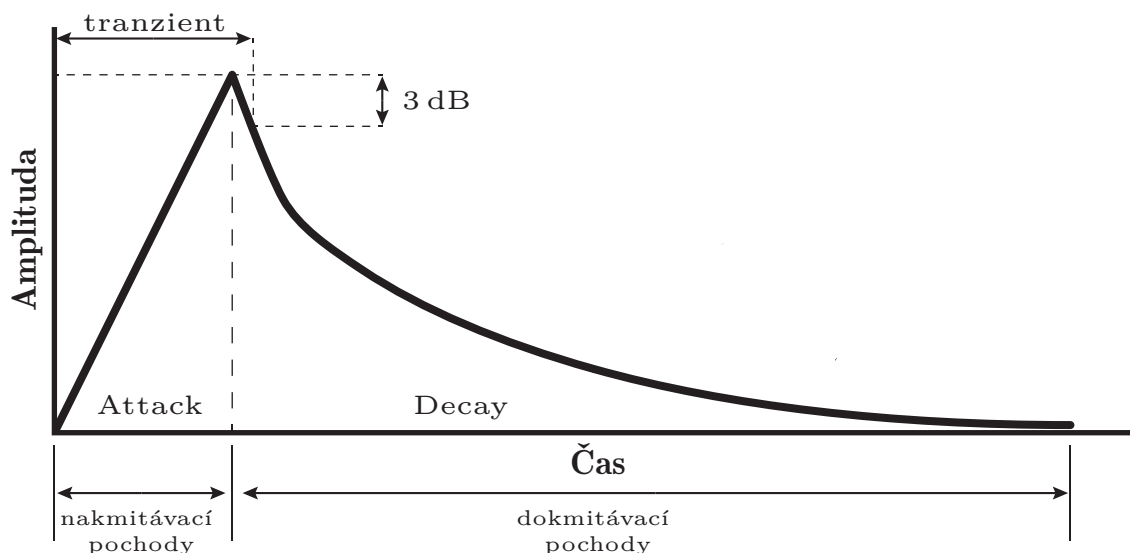
kde $A(t)$ je obálka reálného signálu, $g(t)$ je nemodulovaný signál. [14]

Časová obálka umožňuje typologicky rozlišovat tóny či zvuky na perkusní a neperkusní, které vykazují nakmitávací pochody, zakmitaný stav a oblast dokmitávacích pochodů. Označení základních částí obálky A – attack (náběh), D – decay (útlum), S – sustain (zazdržení), R – release (doznívání).



Obr. 3.1: Obecné schéma ADSR obálky

Perkusní tóny nevykazují zakmitaný stav. Rozlišujeme pouze nakmitávací a dokmitávací pochody.



Obr. 3.2: Obecné zjednodušené schéma ADSR obálky perkusních tónů

Podobně jako u časových obálek signálů existuje rozdělení hudebních nástrojů na perkusní a neperkusní. Souvisí s průběhem energie dodávané oscilátoru daného hudebního nástroje (struně, jazýčku). V případě impulzního buzení se jedná o nástroj perkusní (např. úder kladívka – klavír). V případně buzení kontinuální energií jde o nástroj neperkusní (např. tah smyčce – housle, proud vzduchu – flétna).

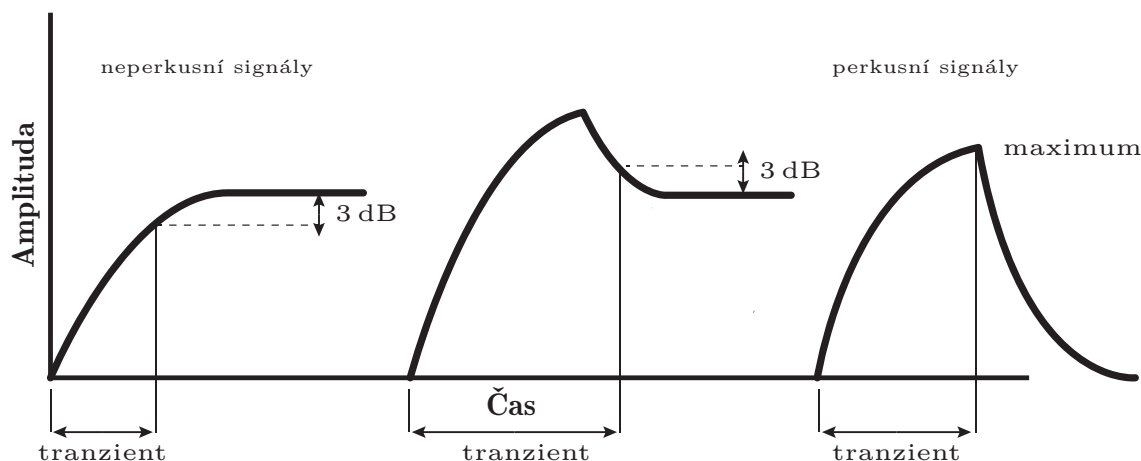
Jednotlivé přechody mezi oblastmi ADSR obálky jsou při analýze reálného tónu těžko rozeznatelné. Obecně je lze rozdělit na oblasti nakmitávacích a dokmitávacích pochodů s velkou rychlostí velkých změn, kterou nazýváme tranzient tónu, a na oblast zakmitaného stavu malou rychlostí malých změn, kterou označujeme za kvazistacionární část tónu. [14]

Délka tranzientu se vymezuje tzv. 3 dB definicí (viz obr. 3.1). Řádově se délka tranzientu pohybuje od několika milisekund po stovky milisekund v závislosti na typu nástroje, technice a stylu hry. Tranzient přispívá ze subjektivního hlediska k indentifikaci zdroje zvukového signálu.

Kvazistacionární část převažuje u většiny tónů proporčně v celkové délce trvání. Nese informaci o výšce, hlasitosti a barvě tónu. V dynamické rovině této části hovoříme o periodických změnách amplitudy – tremolo a o tzv. fluktuacích ustálené hladiny dynamiky¹.

Při analýze je věnována malá pozornost dokmitávacím pochodům, protože jsou

¹Fluktuace ustálené hladiny dynamiky popsal v roce 1965 Antonín Špelda. Souvisí s interakcemi spřezaných částí nástroje a odpovídají hladině dynamiky a technice hry. Hráč tyto fluktuace téměř není schopen ovlivnit.



Obr. 3.3: Vymezení délky tranzientu

často maskovány dozvukem prostoru zejména u neperkusních signálů. V jiném případě mohou dokmitávací pochody maskovat samotný dozvuk.

Kromě změny měřítka časové osy lze podle literatury [14] získat výpočtem obálku tzv. analytického (komplexního) signálu $z(t)$

$$z(t) = x(t) - jy(t), \quad (3.2)$$

imaginární část $y(t)$ je dána Hilbertovou transformací H tónu – reálného signálu $x(t)$, kde

$$y(t) = H\{x(t)\} = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x(\tau)}{\tau - t} d\tau. \quad (3.3)$$

Obálka analytického tvaru $E(t)$ je dána vztahem

$$E(t) = \sqrt{x^2(t) + y^2(t)}. \quad (3.4)$$

3.2 Rozdělení hudebního signálu

Vzájemné uspořádání frekvenčních složek je označováno jako frekvenční struktura a její grafický zápis jako frekvenční spektrum.

Hudební signály můžeme rozdělit podle náhodnosti jejich průběhů na signály deterministické a stochastické. Deterministické signály jsou takové, které lze popsat matematickou funkcí nebo posloupností. Dále se dělí na deterministické signály periodické a deterministické signály neperiodické. Periodický signál se v pravidelném

časovém intervalu stále opakuje a lze jej popsat vztahem:

$$s(t) = s(t + T_1), \quad (3.5)$$

kde T_1 je základní perioda signálu. Periodický signál můžeme rozdělit na harmonický a neharmonický. Harmonický signál je definován funkcí sinus nebo kosinus:

$$u(t) = U_m \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{T_1}t + \varphi_1\right), \quad (3.6)$$

kde maximální hodnota U_m je amplituda signálu, φ_1 je počáteční fáze a kmitočet je roven $f_1 = 1/T_1$. Úhlový kmitočet $\omega_1 = 2\pi f_1 = 2\pi/T_1$. [11]

U stochastických (nahodilých) signálů nelze přesně stanovit jejich hodnotu, ale lze ji pouze odhadnout s určitou pravděpodobností.

3.3 Harmonická analýza

Podobně jako můžeme světlo rozložit pomocí skleněného hranolu na jednotlivé složky, můžeme jakýkoli jiný signál rozložit na jednotlivé složky. Harmonickou analýzou nazýváme operaci, kdy jakýkoli periodický signál můžeme rozložit na součet harmonických složek (jedné až nekonečně mnoho). Harmonické složky jsou celistvými násobky základního tónu (fundamentu). Každá složka má rozdílnou amplitudu, vykreslením do grafu získáme amplitudové frekvenční spektrum. Toho můžeme využít při analýze hudebního tónu. Spolu s teoretickými znalostmi o tvorbě zvuku ve varhanní píšťale můžeme objektivně porovnat a popsat barvu zvuku píšťal.

Francouzský matematik a fyzik Jean Baptiste Fourier matematicky popsal harmonickou analýzu roku 1823 jako součet jednotlivých složek o frekvencích $f, 2f, 3f, 4f, \dots$ a jejich amplitudy. Goniometrický tvar Fourierovy řady lze vyjádřit:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} a_k \cos(k\omega_1 t) + b_k \sin(k\omega_1 t). \quad (3.7)$$

Proměnná $k = 1, 2, 3 \dots$ udává pořadové číslo harmonické složky o frekvenci $k\omega$. Koeficienty Fourierovy řady vypočítáme podle vzorců

$$a_0 = \frac{2}{T_1} \int_0^{T_1} s(t) dt, \quad (3.8)$$

$$a_k = \frac{2}{T_1} \int_0^{T_1} s(t) \cos(k\omega_1 t) dt, \quad (3.9)$$

$$b_k = \frac{2}{T_1} \int_0^{T_1} s(t) \sin(k\omega_1 t) dt, \quad (3.10)$$

kde proměnná $k = 1, 2, 3 \dots$ udává pořadové číslo harmonické složky o frekvenci $k\omega$.

Tutéž řadu je možné napsat též ve tvaru:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} A_k(k\omega t + \varphi_k), \quad (3.11)$$

kde

$$A_k = \sqrt{a_k^2 + y_k^2}. \quad (3.12)$$

S rozvojem Fourierovy řady se setkáme i v komplexním tvaru:

$$f(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_k e^{jk\omega t}, \quad (3.13)$$

kde

$$c_k = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) e^{-jk\omega t} dt. \quad (3.14)$$

[9, 11]

3.4 Diskrétní Fourierova transformace

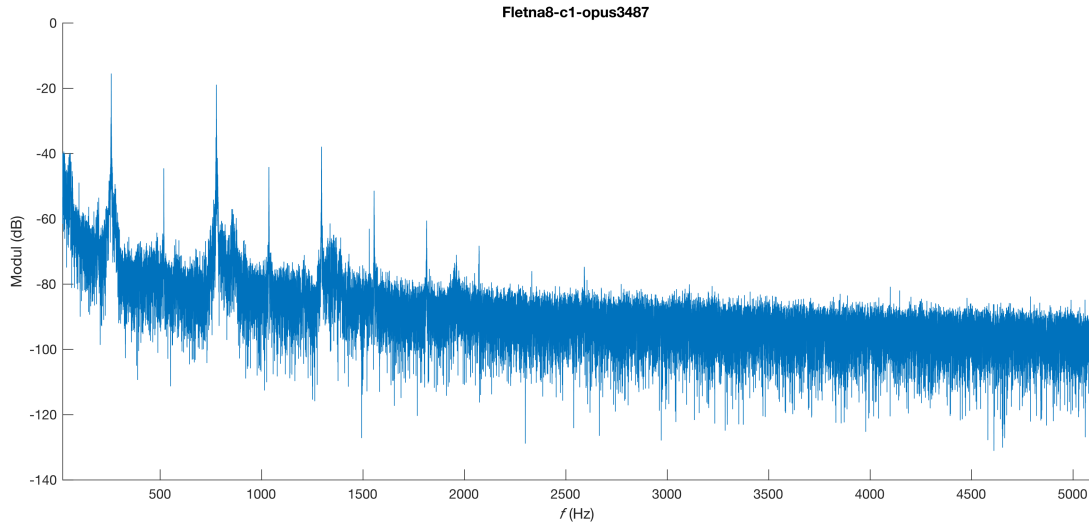
Máme-li zvukový signál v digitální podobě převedeme obecný problém harmonické analýzy do roviny numerického řešení Fourierových řad a integrálů. Diskrétní Fourierova transformace – DFT slouží k digitální analýze signálu.

Pro diskrétní obraz $S[k]$ a posloupnosti $s[n]$ přímé a zpětné Fourierovy transformace platí:

$$\tilde{S}[k] = \sum_{n=0}^{N-1} \tilde{s}[n] e^{-jk\frac{2\pi}{N}n}, k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (3.15)$$

$$\tilde{s}[n] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \tilde{S}[k] e^{jk\frac{2\pi}{N}n}, n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (3.16)$$

kde N je počet vzorků signálu a k je číslo pořadí spektrální složky, n je vzorek ve frekvenční doméně. [9, 11]



Obr. 3.4: Zobrazení spektra tónu c^1 rejstříku Flétna trubicová 8' pomocí DFT

3.5 Krátkodobá Fourierova transformace – STFT

Krátkodobá Fourierova transformace je lineární transformace používaná pro výpočet spektra signálů v čase. Zatímco Fourierova transformace je vhodná pro analýzu stacionárních signálů. To je jejichž parametry se v čase nemění. Pro nestacionární signály je vhodná právě krátkodobá Fourierova transformace. Parametry signálů jako je např. fáze, amplituda, frekvence se mohou v čase měnit. Výpočet krátkodobé Fourierovy transformace využívá právě funkce *spectrogram*, která je implementována v prostředí MATLAB.

Výpočet STFT v časové oblasti uvádí vztah

$$X(\tau, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)w(t - \tau)e^{-j\omega t} dt, \quad (3.17)$$

kde $x(t)$ je vstupní signál a $w(t)$ je funkce okénka. Pro výpočet STFT v diskrétní oblasti platí

$$X(m, \omega) = \sum_{n=1}^{\infty} x[n]w[n - m]e^{-j\omega t}, \quad (3.18)$$

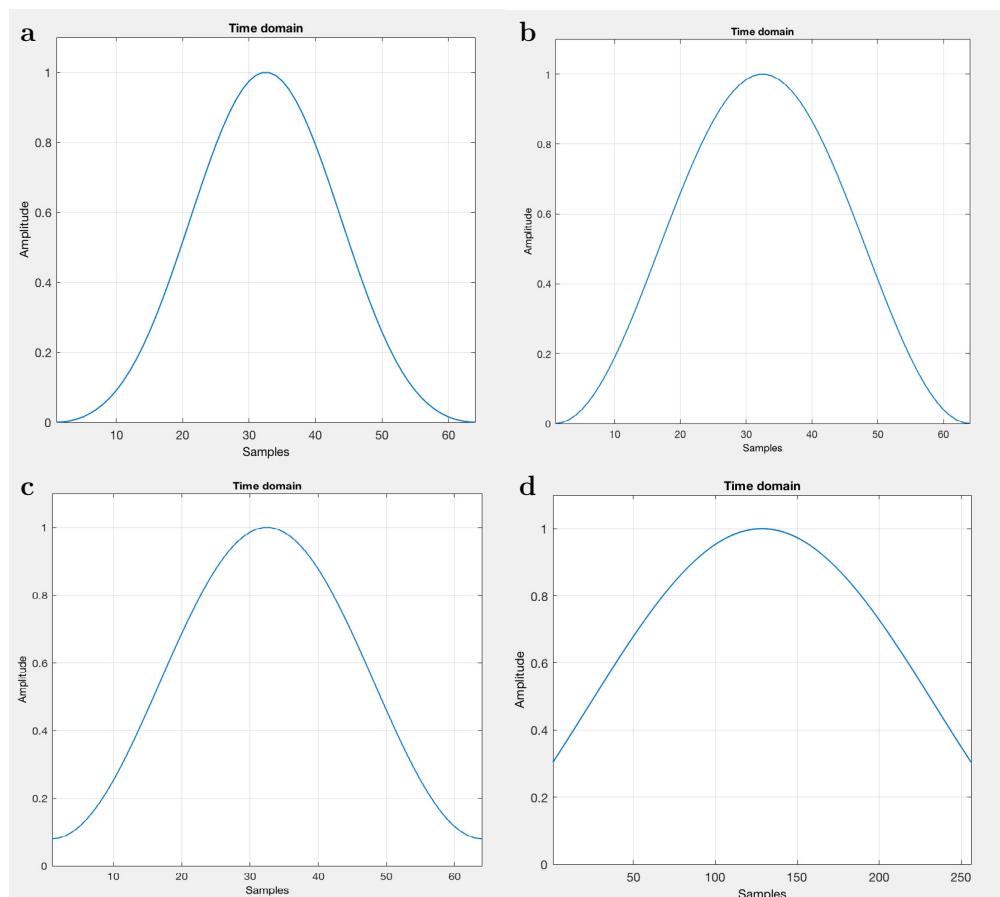
kde $x[n]$ je vstupní signál a $w[n]$ funkce okénka. [4, 19]

Při výpočtu STFT dojde k rozdělení signálu na jednotlivé segmenty, které lze považovat za stacionární a v nich se provede postupně výpočet DFT. Každý vypočtený segment poskytuje informaci o spektru, čase a frekvenci. Velikost segmentů určuje nastavená velikost okna.

Při provádění výpočtu DFT se předpokládá, že se jedná o konečný počet souboru vzorků signálu, který tvoří jeho periodu. Měřený signál však nebývá periodou nebo jejím celočíselným násobkem. Rozdílnost měřeného signálu může mít za následek zkrácení vlny, tudíž dojde k diskontinuitě – k ostrému přechodu. Tyto nespojitosti mohou ve spektru generovat složky, které ve skutečnosti nejsou v signálu přítomny. Tento jev se nazývá spectral leaking. Použitím okna můžeme tento jev minimalizovat. V praxi se využívají například Hannovo, Hemingovo, Blackmanovo, Kaiserovo okno a jiné.

Funkce Hammingova a Hannova okna mají sinusové tvary. Obě okna vedou k širokému vrcholu. Hannovo se na obou koncích dotkne nuly, což eliminuje veškerou diskontinuitu. Hammingovo nedosahuje zcela nuly, a proto má stále slabé diskontinuity signálu.

Obecně platí, že okno Hanning (Hann) je uspokojivé v 95% případů. Má dobré rozlišení frekvence a snižuje tzv. prosakování ve spektru (spectral leakage). Pokud nepoužíváme žádné okno signál je spojen pravoúhlým oknem. [20]



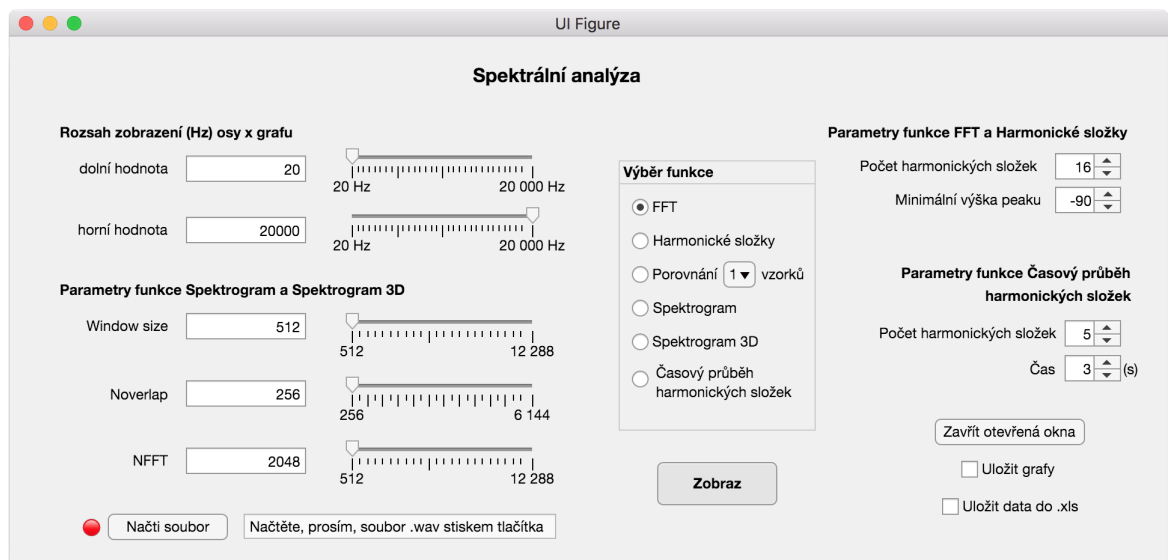
Obr. 3.5: Příklad okének: a – Hannovo, b – Blackmannovo, c – Hemingovo, d – Kaiserovo

4 REALIZACE V PROSTŘEDÍ MATLAB

Součástí zadání práce bylo vytvořit vhodný nástroj pro analýzu nahraných vzorků a porovnání spektra signálu. Tato aplikace slouží k analýze souborů ve zvukovém formátu .wav. Nejdříve bylo vytvořeno uživatelské grafické rozhraní, díky kterému uživatel může nastavit parametry funkcí, výpočtů a vykreslení grafů. Poté byly sestaveny, přizpůsobeny a implementovány jednotlivé skripty tak, aby komunikovaly s uživatelským rozhraním.

4.1 Grafické rozhraní aplikace

Grafické rozhraní aplikace bylo vytvořeno pomocí interaktivního nástroje APP DESIGNER, který je součástí prostředí MATLAB od verze 2016b. Jeho hlavní výhodou je jednoduché ovládání a nastavení parametrů pomocí několika prvků a to bez nutnosti zásahu do zdrojového kódu.



Obr. 4.1: Aplikace v prostředí MATLAB

Nejprve je třeba vybrat zvukový soubor ve formátu .wav. Stisknutím tlačítka *Načti soubor* se spustí pomocný skript, který umožňuje načtení jednoho nebo více souborů. Poté si může uživatel vybrat z těchto funkcí, které mu aplikace nabízí:

- FFT
- Harmonické složky
- Porovnání vzorků
- Spektrogram

- Spektrogram 3D
- Amplitudový průběh

Dále uživatel nastaví příslušné parametry k dané funkci. Má možnost si zvolit funkci *Uložit graf*, která každý zobrazený graf automaticky uloží, nebo funkci *Uložit data do .xls*. Ta při použití funkce *FFT* nebo *Harmonické složky* vygeneruje soubor ve formátu .xls, který obsahuje data o pozicích a síle harmonických složek vzorku. Po stisknutí tlačítka *Zobraz* dojde ke spuštění příslušného skriptu, výpočtu hodnot a vykreslení grafu.

Aplikace byla vyvíjena a testována v prostředí MATLAB verze 2016b na platformě Mac OS X 10.12.

4.2 Funkce FFT a Harmonické složky

Po výběru funkce FFT nebo funkce Harmonické složky dojde ke spuštění skriptu *FFT_findpeaks.m*, kde dojde nejprve k přečtení audiovzorku, poté k výpočtu FFT pomocí zabudované funkce MATLABu. Nato pomocí funkce `findpeaks` dojde k nalezení 1. harmonické složky (fundamentu). Nacházejí se zde ochranné podmínky, které byly přidány v průběhu testování aplikace. Zajišťují změnu parametru funkce `findpeaks` pokud nebude 1. harmonická složka nalezena. Další podmínka ošetřuje situaci pokud by šumová složka o frekvenci 100 Hz, která se vyskytovala u vzorků tonů varhan Rieger-Kloss opus 3466, byla výraznější než fundament analyzovaného tónu. Na základě fundamentu dojde k vyhledání vyšších harmonických složek. Poté dojde k zavolání skriptu *graf_FFT.m*, kdy se podle volby vykreslí graf DFT spektra, nebo graf na základě získaných dat funkcí `findpeaks` (špičky) – nalezené harmonické složky podle zadaných parametrů.

Pro funkce *FFT* a *Harmonické složky* lze nastavit parametry *počet harmonických složek* a *minimální výšku peaku*. Podle hodnoty těchto parametrů je pak pomocí funkce `findpeaks` nalezen počet zadaných vyšších harmonických složek, který mají větší sílu než nastavená hodnota minimální výšky peaku.

4.3 Funkce Spektrogram a Spektrogram 3D

Spektrogram slouží k vykreslení průběhu harmonických složek signálu v čase. Výpočet spektrogramu je realizován pomocí zabudované funkce MATLABu `spectrogram`, která využívá STFT – krátkodobou Fourierovu transformaci.

Funkce přebírá parametry Window size – počet vzorků na jedno okno, Noverlap – počet překrývajících se vzorků mezi okny a NFFT – z kolika bodů bude vypočtena STFT. Dojde k vykreslení a zobrazení spektrogramu.

4.4 Porovnání vzorků

Funkce *Porovnání vzorků* vykreslí do jednoho grafu harmonické složky načtených vzorků. Využívá skript *porovnaní_FFT.m*, který je vychází ze skriptu *FFT_findpeaks.m*. Je upraven pro omezený počet cyklů podle počtu srovnávaných vzorků. Funkce přebírá parametry zadané v uživatelském prostředí: *počet harmonických složek* a *minimální výšku peaku* a *zadaný počet srovnávaných vzorků*.

4.5 Funkce Časový průběh harmonických složek

Funkce vychází z dat vestavěné funkce *spectrogram* a dochází k vykreslení časového průběhu amplitud jednotlivých harmonických složek. Uživatel může nastavit parametr: *počet harmonických složek* a *čas*.

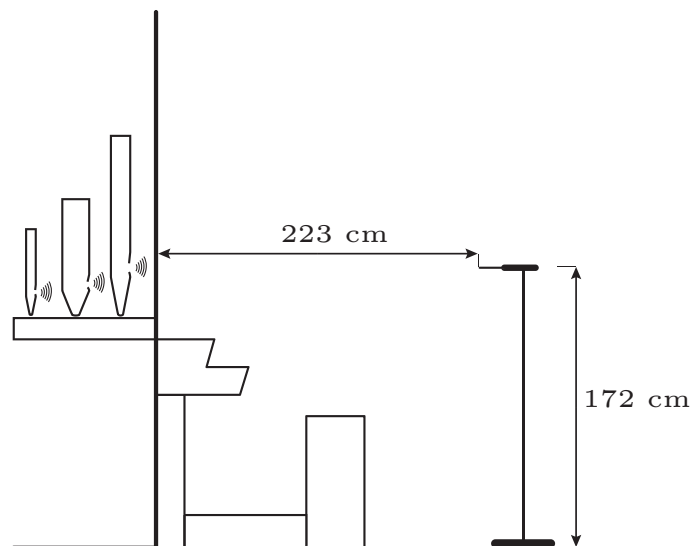
5 MĚŘENÍ VARHAN

5.1 Popis a metoda nahrávání zvukových vzorků

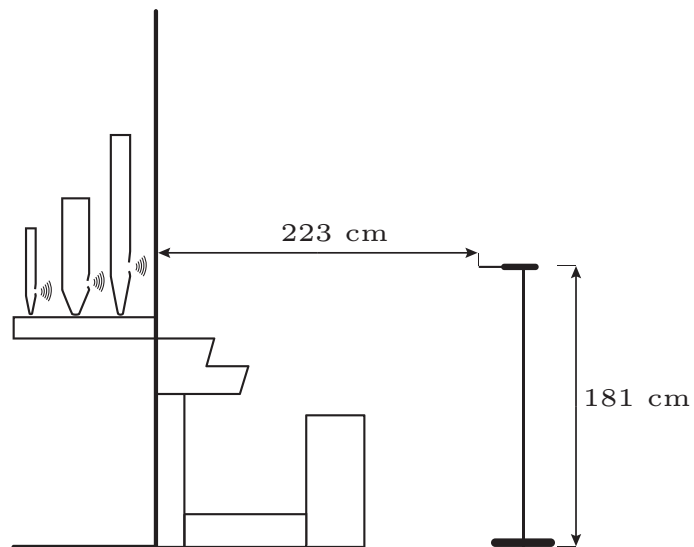
Pro spektrální analýzu varhanních píšťal byl zvolen postup nahrání vzorků tónů v intervalech malé tercie (tj. 3 půltóny) a to v celém rozsahu klaviatury. Byly vybrány „tóny“ klaviatury manuálu ($C_0, Es_0, Fis_0, A_0, \dots, es^3, fis^3$). Protože se práce týká zejména analýzy flétnových rejstříků, byly k měření vybrány rejstříky Flétna trubicová 8', Kryt 8' a Flétna kopulová 4'. Tyto rejstříky se nejčastěji vyskytují v dispozicích českých varhan a tudíž bylo možné najít nástroje pro realizaci měření. Záznam zvuku byl pořízen ve spolupráci se studentem konzervatoře. Jak uvádí Syrový v literatuře [14] u varhan „*lze jednoduše vyloučit vliv subjektu hráče – z procesu generace tónu*“.

Snímání bylo provedeno monofonně za použití stabilně umístěného všesměrového kondenzátorového mikrofону, se kterým se v průběhu měření jednoho nástroje nepohybovalo. Mikrofon byl namířen na prospekt varhan a ve vzdálenosti od nástroje, tak aby se nacházel ve volném akustickém poli. Na obrázcích můžeme vidět polohu mikrofónu a jeho vzdálenost.

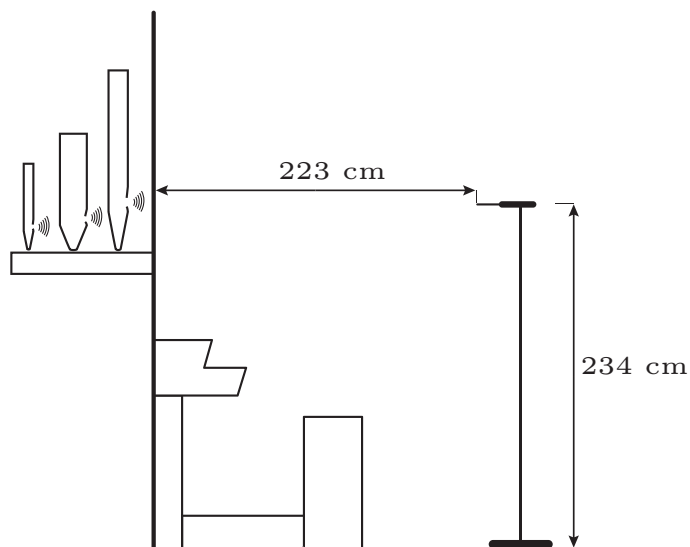
Vzorky byly rozstříhány po jednotlivých tónech, normalizovány a uloženy do souborů. Vzorky nebyly jinak zvukově upravovány. Normalizace byla provedena v DAW Logic Pro X, aby se eliminoval rozdíl hlasitostí jednotlivých tónů a nástrojů a bylo možné srovnat sílu jednotlivých harmonických složek.



Obr. 5.1: Zobrazení rozměrů a poloha mikrofónu DBX-RTA při snímání varhan Rieger-Kloss opus 3466



Obr. 5.2: Zobrazení rozměrů a poloha mikrofonu DBX-RTA při snímání varhan Rieger-Kloss opus 3487



Obr. 5.3: Zobrazení rozměrů a poloha mikrofonu DBX-RTA při snímání varhan Rieger-Kloss opus 3519

5.2 Použitá zařízení

K měření byl použit jeden měřicí mikrofon DBX-RTA. Jednalo se o malomembránový kondenzátorový mikrofon s všesměrovou charakteristikou a citlivostí $-63 \text{ dB} \pm 3 \text{ dB}$ a vyrovnanou frekvenční charakteristikou s malým nárůstem citlivosti kolem 10 kHz .¹ Analogový signál byl převeden na digitální pomocí zvukové karty Steinberg ur22 mkII a zaznamenán do DAW software Logic Pro X. Stopy byly pořizovány s vzorkovací frekvencí 48 kHz a bitovou hloubkou 24 bit .

5.3 Měřené rejstříky

5.3.1 Kryt 8'

Píšťala je dřevěná, čtyřboká, shora kryta dřevěnou zátkou. Zdůrazňuje základní tón a tvoří liché vyšší harmonické složky (kvinta, tercie, apod.). Zvuk je temný, dutý. Má poloviční délku. S oblibou se využívá jako fundament některého manuálu u nástrojů, které nemají prostor na $8'$ otevřené píšťaly.

5.3.2 Flétna trubicová 8'

Konstrukčně se jedná o kovový polokrytý rejstřík. Ústí píšťaly je zakryto kloboučkem, kterým prostupuje různě dlouhá a široká trubička. Tělo píšťaly má podobně jako u krytých píšťal přibližně poloviční délku. Zvukově má charakter krytu obohacený o sudé harmonické složky.

5.3.3 Flétna kopulová 4'

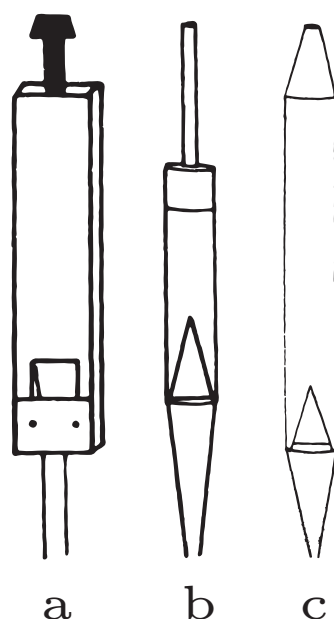
Rejstřík je tvořen otevřenými kovovými píšťalami. Tělo píšťal je ze $\frac{2}{3}$ válcové a v $\frac{1}{3}$ se kónicky zužuje. Délka rezonátoru odpovídá polovině vlnové délky tónu.

5.4 Měřené nástroje

V rámci praktické části bakalářské práce byly změřeny troje varhany československé firmy Rieger-Kloss z konce 70. let minulého století. Jedná se o malé nástroje v průměru se 13 rejstříky s velmi podobnou dispozicí.

Krnovská firma sehrála důležitou ekonomicko-hospodářskou roli v českých zemích. Na počátku všeho stál varhanář Franz Rieger, který od 50. let 19. století postavil 32 varhan zejména mechanické traktury se zásuvkovou vzdušnicí. V roce

¹Informace získány z webových stránek výrobce www.dbxpro.com/en/products/rta-m

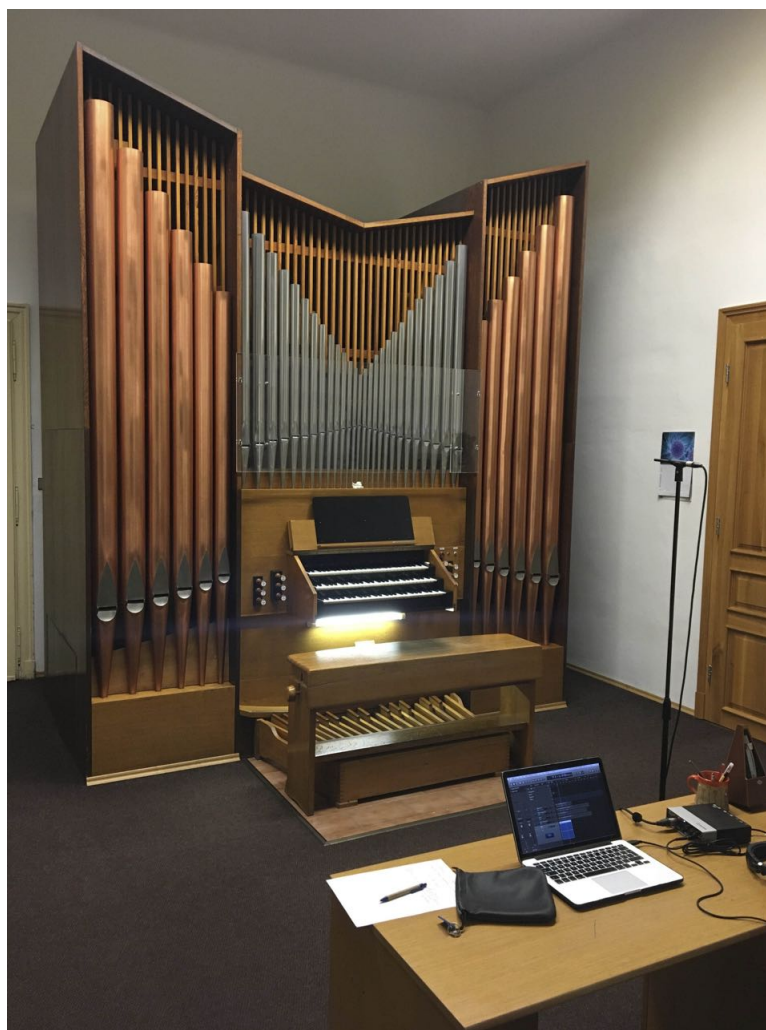


Obr. 5.4: Měřené píšťaly – nákres. Kryt 8' – a, Flétna trubicová 8' – b, Flétna kopulová 4' – c.

1873 jeho synové Otto a Gustav založili oficiálně firmu Gebrüder Rieger (bratři Riegrové) a začali své nástroje značit opusovými čísly. V roce 1897 začala firma vyrábět také tónovou pneumatickou trakturu. Od roku 1904 do roku 1920 vedl firmu Otto Rieger mladší, byl ovlivněn reformními myšlenkami ohledně stavby a konstrukce královských nástrojů. V té době se stavěly nástroje s pneumatickou nebo elektropneumatickou trakturou a romantickou dispozicí. Na počátku 20. století byla firma na vrcholu. Vlastnila několik konstrukčních patentů a patřila do světové špičky stavitelů varhan. Po smrti Otto Riegera mladšího v roce 1920 se stal ředitelem firmy a později i vlastníkem Ing. Josef von Glatter-Götz. Mezi lety 1920 a 1945 vyrobila firma přes tisíc nástrojů. Zakázky v Československu čítaly 460 nástrojů, zbytek firma exportovala do Maďarska, Německa, Polska, do severských zemí (Finsko, Švédsko), nebo do Jižní Afriky. Od roku 1938 výroba v podstatě stagnovala a během války byly továrny i stroje zničeny. V roce 1948 proběhlo zestátnění, firma figurovala pod názvem Továrna na varhany. V roce 1950 došlo ke spojení s další krnovskou varhanářskou firmou Josef Kloss a začala se používat značka Rieger-Kloss. Přelomová byla 60. léta 20. století, kdy se firma začala vracet ke konstrukci mechanické traktury a zásuvkové vzdušnice. Poslední varhany s opusovým označením 3732 firma vyrobila v roce 2011 a exportovala je do Číny. Poté firma několikrát změnila majitele a 15. března 2018 proběhla v médiích zpráva, že se firma nachází v insolvenční. [10, 12]

5.4.1 Rieger-Kloss opus 3466

Jako první byly změřeny varhany firmy Rieger-Kloss opus 3466 na Konzervatoři Brno postavené v roce 1975. Tyto varhany mají 3 manuály, fyzicky vystavěné jen dva. Druhý manuál – hlavní stroj– disponuje rejstříky Flétna trubicová 8', Principál 4', Flétna lesní 2' a Mixtura 1 $\frac{1}{3}$ '. Třetí manuál – pozitiv – obsahuje Kryt 8', Flétnu kopulovou 4', Principál 2', Seskvialtera 1 $\frac{3}{5}$ ' a Akutu 1'. První manuál slouží jako spojení 2. a 3. manuálu a nemá vlastní řady píšťal. Rozsah manuálů je od C_0 do g^3 a pedálu od C_0 do f^1 . Pedál je osazen čtyřmi hlasy Subbas 16', Principál 8', Oktávbas 4' a Oktáva 2'.



Obr. 5.5: Měřené varhany Rieger-Kloss 3466

Hlavní stroj je umístěn na středu varhan přímo před hráčem. V prospektu se nacházejí píšťaly Principálu 4', zbývající hlasy jsou umístěny za dřevěnou mřížkou uvnitř varhan. Pozitiv je postaven za hlavním strojem do žaluziové skříně, která má

uzavíratelná dvířka. Tato dvířka lze od hracího stolu pomocí otočného pedálu ovládat nohou. Lze tak jednoduše měnit dynamiku celého druhého manuálu. V průběhu měření byla žaluzie otevřena. Pedál je postaven na bocích nástroje. V prospektu se nacházejí nejhlubší píšťaly Principálu 8', které obsahují větší příměs mědi, a za nimi jsou vystavěny zbylé pedálové hlasy.

Nástroj je určen pro potřeby výuky. Je jemněji intonován, aby nerušil okolní prostory budovy a aby byl zvuk přijatelný pro poslech i po delší době. Pro odtlumení přímého zvuku byly před prospektové píšťaly Principálu 4' instalovány pevné plexisklové desky.

5.4.2 Rieger-Kloss opus 3487

Druhé varhany, Rieger-Kloss opus 3487, postavila krnovská firma v kostele v Ostravě-Třebovicích v roce 1978. Varhany tvoří dvě skříně. V první skříně přímo před varhaníkem je umístěn hlavní stroj (1. manuál) za ním pak v žaluziové skříně 2. manuál. Po pravé straně varhaníka je zvlášť skříň, ve které se nacházejí pedálové píšťaly. Varhany mají mechanickou trakturu a 14 rejstříků, po šesti v manuálech a dva v pedálu. První manuál je postaven na Krytu 8', dále má Salicionál 8', Principál 4', Flétna zobcová 4', Flétna příčná 2' a Mixtura 1 $\frac{1}{3}$ '. Druhý manuál disponuje rejstříky Flétna trubicová 8', Roh kamzíkový 8', Flétna kopulová 4', Principál 2', Seskvialtera 1 $\frac{3}{5}$ ' a Akuta 1'. Pedál má Echobas 16' a Oktávbas 8'.



Obr. 5.6: Měřené varhany Rieger-Kloss 3487

Nachází se zde manumbrium s názvem Subbas 16', které po vytažení zvýší přírodní tlak vzduchu do celého pedálového stroje. Toto zařízení bylo do varhan přidáno při generální opravě v roce 2000 varhanářem Smolkou z Opavy, aby se zesílil zvuk pedálu, který byl nepoměrně tichý vůči ostatním strojům. Varhany byly v roce 2015 laděny laděním Neithard 1732 Kleine Stockt, kdy a^1 odpovídá 443,3 Hz při 22,4 °C.

Varhany mají však několik nedostatků. Vzhledem k malému prostoru na kůru a k výšce klenby pouhých 2,8 m zde nebylo možné postavit nástroj s osmistopým základem otevřených píšťal. Dochází k situacím, kdy mezi prvním a druhým manuálem je rozdíl 4 °C, což už se projeví znatelně na výšce tónů. Pedálová skříň, která se nachází bokem za sloupem, nemá dostatečné možnosti šíření zvuku do prostoru.

5.4.3 Rieger-Kloss opus 3519

Varhany Rieger-Kloss opus 3519 byly postaveny v kostele svatého Mikuláše v Ostravě-Porubě v roce 1981. Varhany jsou umístěny na varhanní empoře na levé straně v přední části kostela. Mají mechanickou trakturu a 14 rejstříků. V prvním manuálu je to Pommer krytý 8', Principál 8', Flétna trubicová 8', Salicionál 8', Oktáva 4' a Mixtura 1 $\frac{1}{3}$ '. V druhém manuálu se nachází Kryt 8', Principál 4', Flétna kopulová 4', Roh kamzíkový 2', Seskvialtera 1 $\frac{1}{3}$ ' a Akuta 1'. Pedál má pouze 2 rejstříky a to Subbas 16' a Principálbas 8'. Varhany mají rozsah manuálů je od C_0 do a^3 a pedálu od C_0 do f^1 a jsou laděny při 16 °C na a^1 438 Hz. [8]



Obr. 5.7: Měřené varhany Rieger-Kloss opus 3519

6 VÝSLEDKY MĚŘENÍ A POROVNÁNÍ

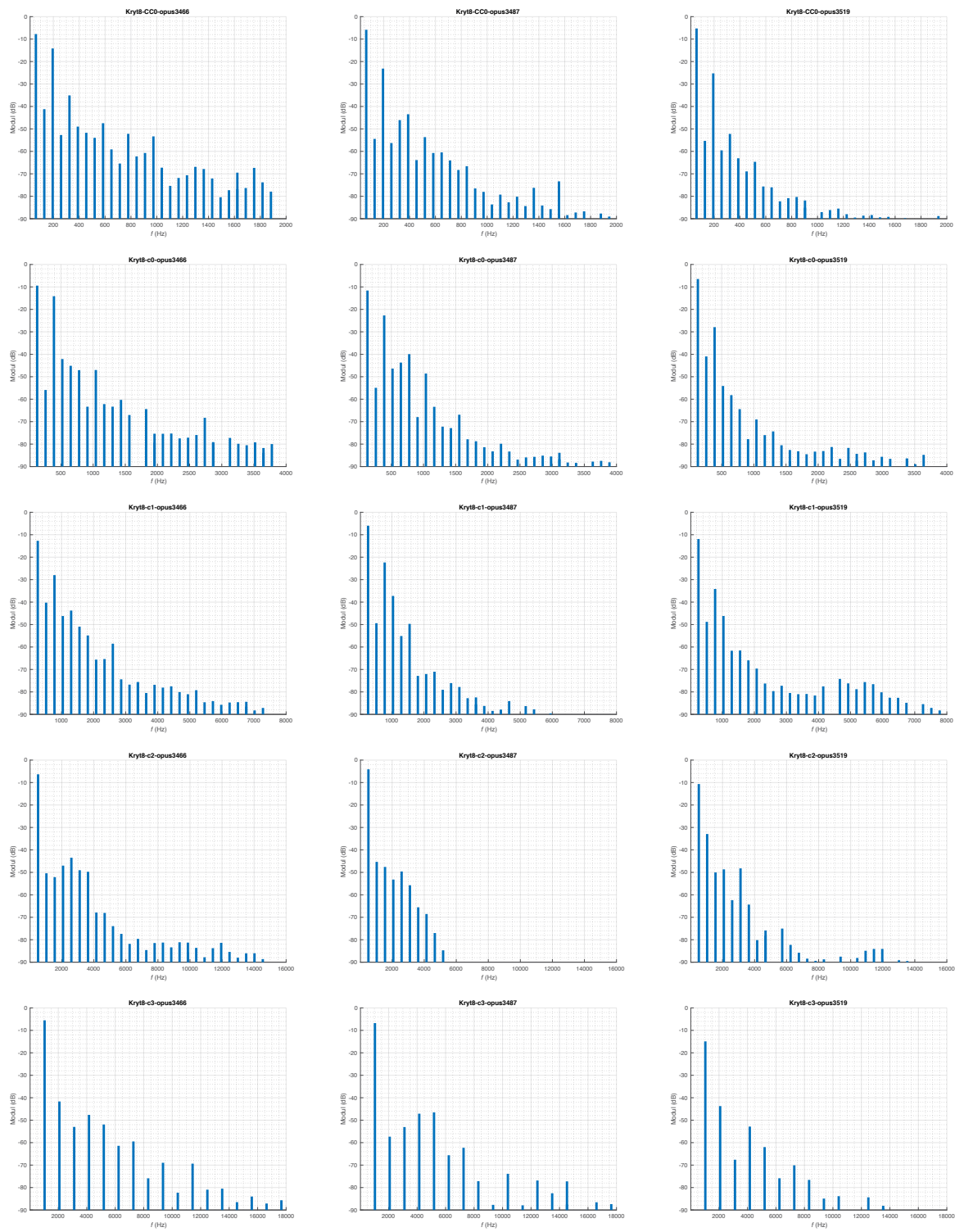
Nahrané vzorky byly zpracovány pomocí aplikace, vytvořené pro účel této práce v prostředí MATLAB. Analyzovány a hodnoceny byly vybrané tóny C_0 , c^0 , c^1 , c^2 , c^3 u všech měřených rejstříků varhan opus 3466, 3487, 3519. Následně byl zvolen jeden tón k porovnání spektra píšťal napříč jednotlivými rejstříky, které zastupovaly skupinu krytů, flétnových, principálových, smykových a jazykových hlasů.

6.1 Kryt 8'

Nejprve začneme sledováním základní harmonické složky u nejnižšího tónu C_0 . Fundament je nejsilnější ze všech harmonických složek, s odstupem od šumu 80 dB. Druhá harmonická složka je zřetelně slabší než první. U varhan opus 3487 a opus 3519 je to o 50 dB, u varhan opus 3466 jen o 34 dB. Varhany opus 3466 mají velmi výraznou 3. harmonickou složku, jen o 7 dB slabší než fundament. U zbylých varhan je tento rozdíl 20 dB. U varhan opus 3466 a 3519 je výrazná ještě 5. harmonická složka. U varhan opus 3487 si naopak můžeme všimnout 6. harmonické složky, která je silnější než čtvrtá a pátá.

U tónu c^0 je po fundamentu u všech varhan zřetelná 3. harmonická složka. Varhany opus 3487 mají opět výraznou 6. harmonickou. U tónu c^1 u varhan opus 3487 a opus 3519 je výrazná po 3. harmonické taky 4. harmonická složka. U varhan opus 3466 a vzorku tónu c^2 je 3. harmonická potlačena s rozdílem 46 dB oproti fundamentu. U vzorku tónu c^3 varhan opus 3466 a 3419 se projevuje 2. a 4. harmonická složka. Třetí harmonická je oproti předešlým tónům slabá.

Celkově lze o píšťalách rejstříku Kryt 8' říci, že reflektují lichou povahu spektra. Nejvýraznější je po fundamentu 3. harmonická složka, která tvoří dutou a tupou barvu zvuku. Svou roli také hraje 5. harmonická složka, která tvoří nazální témbr. U varhan opus 3487 je velmi zřetelná 6. harmonická, která tvoří jas tónu. Předpokládám, že u těchto varhan je to díky tomu, že je tento rejstřík umístěn na prvním manuálu a je hrubě intonován aby poskytoval fundament pro ostatní rejstříky jiných stop, místo Principálu 8', který zde chybí. U tónu c^3 je zřetelná změna poměru spektrálních čar. Přisuzuji to tomu, že vy vyšších polohách jsou dřevěné píšťaly změněny za kovové kvůli jednodušší výrobě a posléze jsou dointonovány k dřevěným. Bohužel v případě varhan Rieger-Kloss jsou tyto vrchní tóny rejstříků tvořené kovovými píšťalami, zvukově méně kvalitní.



Obr. 6.1: Spektrum analyzovaných tónů rejstříku Kryt 8'

6.2 Flétna trubicová 8'

U tónu C_0 varhan opus 3466 je třetí harmonická složka stejně silná jako fundament, dále je výrazná také 5. a 7. harmonická složka. Druhá, čtvrtá a šestá harmonická jsou slabší. Opět se projevuje lichá povaha spektra. U varhan opus 3487 je zajímavý rozdíl 1. a 2. harmonické, který činí 57 dB. Sedmá harmonická je velmi potlačena. Rozdíl oproti fundamentu činí 72 dB, naopak čitelná je 8. harmonická.

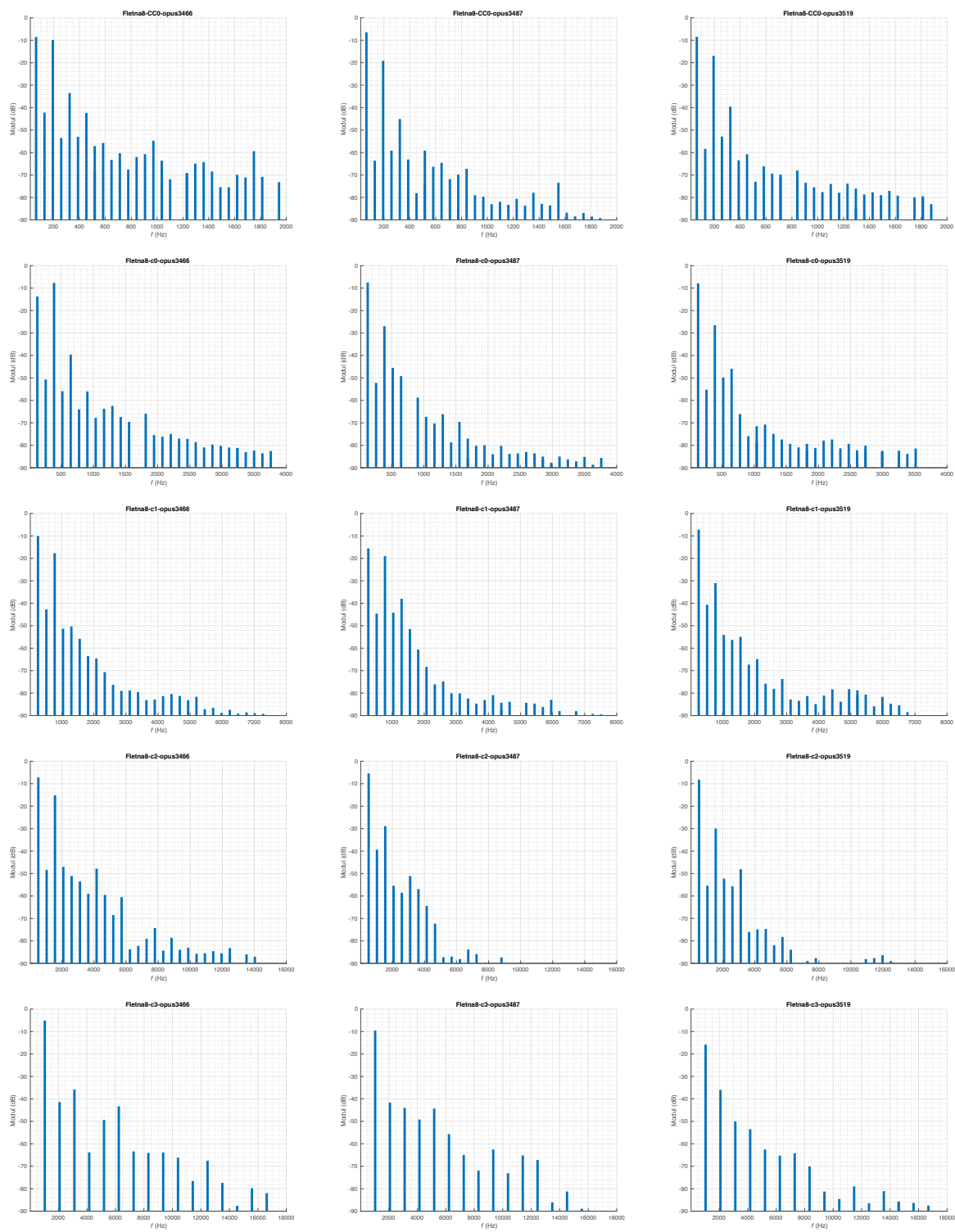
U varhan opus 3466 a vzorku tónu c^0 je třetí harmonická složka dokonce silnější než samotný fundament. Šestá harmonická složka zcela chybí u varhan opus 3487 a je zde naopak patrná 4. a 5. harmonická. Pro tón c^1 je u varhan opus 3466 a 3519 zřejmá 1. a 3. harmonická složka, u varhan opus 3487 se projevuje i 5. harmonická. U tónu c^2 varhan opus 3487 a 3519 je kromě 1. a 3. harmonické zřetelná také tercie – 6. harmonická. Na druhou stranu vyšší harmonické v pásmu klastrů nemají téměř žádnou energii. U tónu c^3 varhan 3466 je 4. harmonická potlačena. U varhan opus 3519 je výrazná 2. harmonická, naopak ostatní jsou slabší.

Píšťaly rejstříku Flétna trubicová 8' mají zvláště ve spodních polohách čitelnou 5. a 7. harmonickou složku. Čím více postupujeme z basu do diskantu tím se tyto harmonické vytrácejí. U varhan opus 3519 není v žádném ze vzorků výrazná 7. harmonická složka. Rejstřík u těchto varhan je více kulatější s dutější a více se blíží ke krytům. U zbylých varhan je více průraznější, jasnější a bryskní.

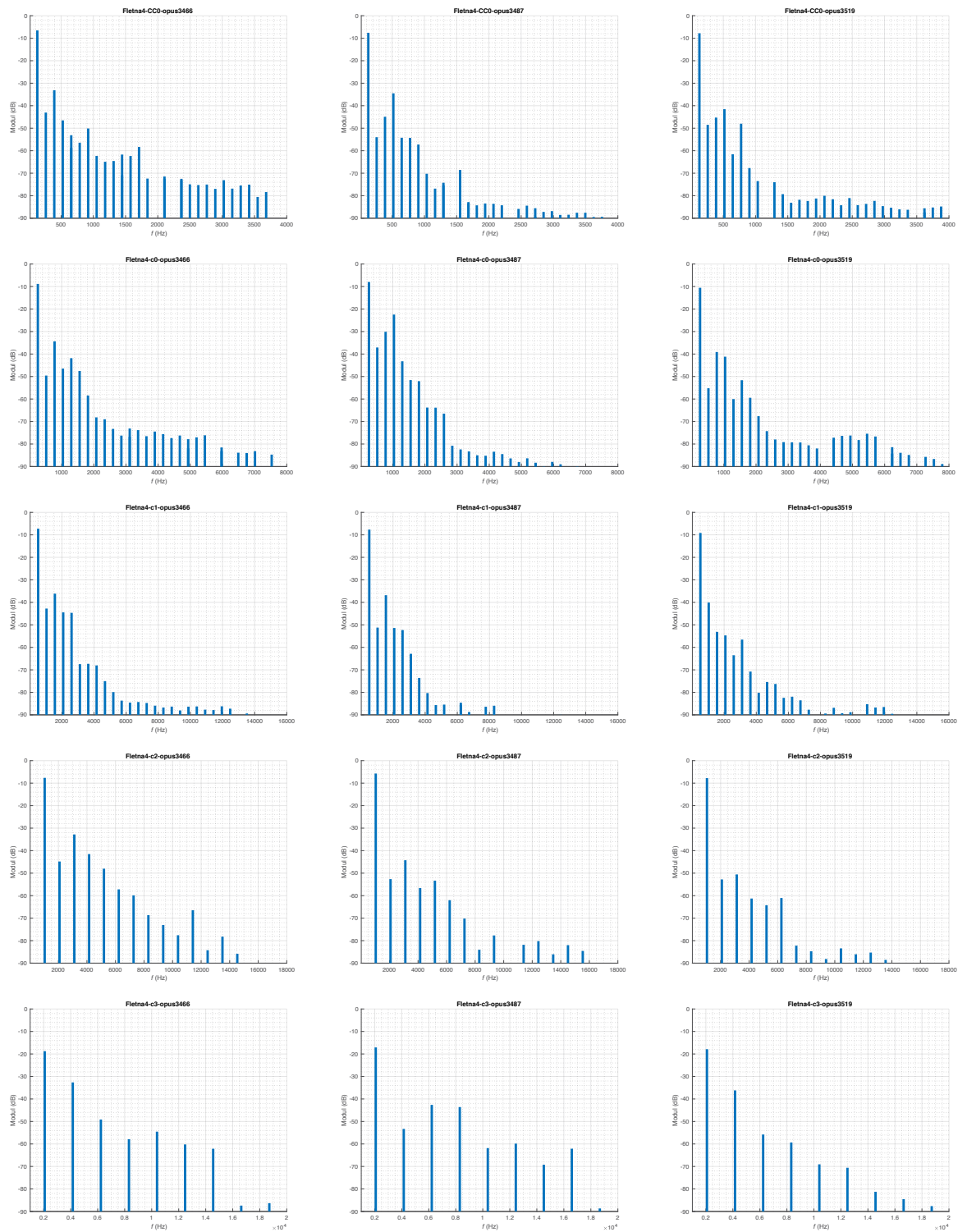
6.3 Flétna kopulová 4'

U varhan opus 3487 a 3519 má tón C_0 vedle fundamentu nezvýraznější 4. harmonickou, s rozdílem 27 dB a 34 dB. Pátá harmonická složka je potlačena. U varhan 3466 je silná 3. harmonická. U tónu c^0 mají varhany opus 3519 zřetelnou 3. a 4. harmonickou. Jejich vzájemný rozdíl je jen 2 dB. U varhan opus 3487 je silná 2., 3. i 4. harmonická. Postupují kaskádovitě s rozdílem 7 dB.

U tónu c^1 varhan opus 3466 a 3487 je výrazná 3. harmonická složka. Tónu bude převládat dutost. U varhan opus 3519 jsou 3. a 4. harmonická slabší než u tónu c^0 a C_0 . U tónu c^2 varhan opus 3466 je výrazná 3. harmonická. Spektrum tónu varhan opus 3487 má lichou povahu se zřetelnou 5. harmonickou. U varhan opus 3519 je čitelných jen 6 harmonických složek, energie vyšších je zanedbatelná. U tónu c^3 varhan opus 3466 je slabá 4. harmonická, zřetelné jsou 1., 3. a 5. harmonická. U varhan opus 3487 a 3519 nepřevažuje síla lichých harmonických. Je to částečně způsobeno tím, že píšťaly u posledních tónů jsou klasicky otevřené bez kónického zakončení.



Obr. 6.2: Spektrum analyzovaných tónů rejstříku Flétna trubicová 8'



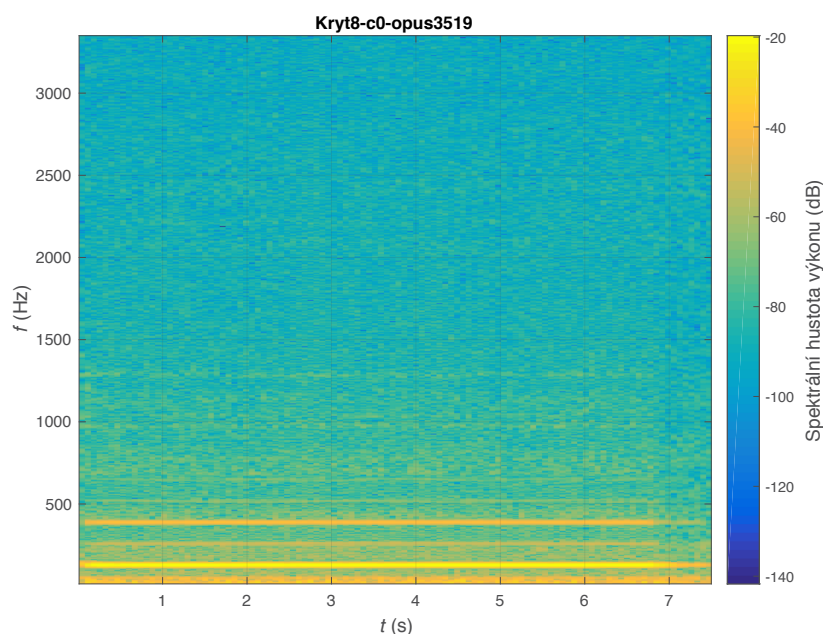
Obr. 6.3: Spektrum analyzovaných tónu rejstříku Flétna kopulová 4'

Píšťaly rejstříku Flétna kopulová 4' mají měkkou, dutou barvu. Čtvrtá harmonická složka přidává jasnost. Vzhledem k malé energii v pásmu klastrů není zvuk píšťal ostrý. U varhan opus 3466 má průběh spektra lichou povahu, zatímco u varhan opus 3487 a 3519 se jedná o typický flétnový průběh podle literatury [1, 15]

6.4 Porovnání tónu c^0 napříč rejstříky

Pro porovnání píšťal napříč rejstříky Krytu 8', Flétna trubicová 8', Flétna kopulová 4', Principál 8', Trompeta 8' a Salicionál 8' jsem zvolil tón c malé oktávy.

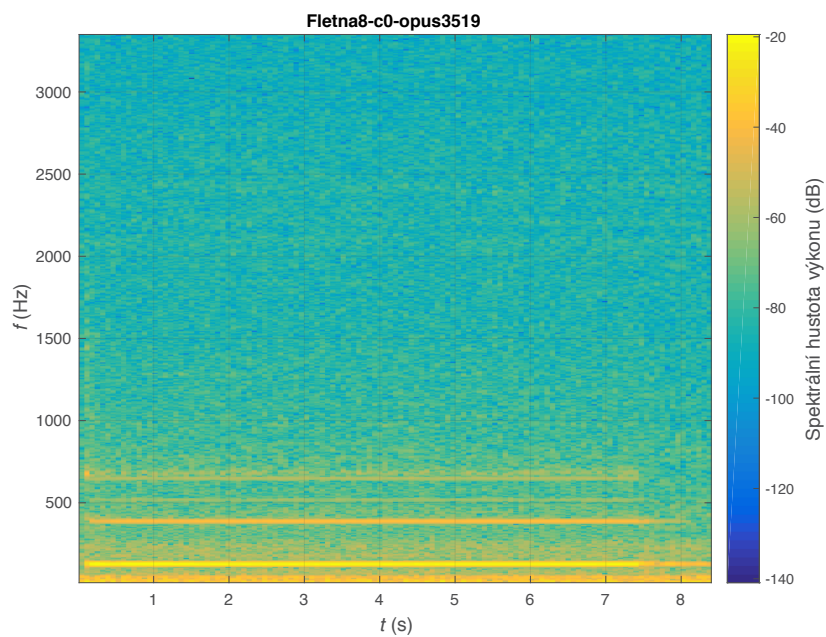
Ze spektrogramu píšťaly Krytu 8' je zřetelný fundament a 3. harmonická složka. Díky měkkému a dutému tónu se rejstřík bude dobře pojit s ostatními hlasy a to jak se smyky tak i z principály. Protože nemá výrazné vyšší harmonické je vhodný také pro doprovod jiného nástroje nebo zpěvu.



Obr. 6.4: Spektrogram píšťaly tónu c^0 rejstříku Kryt 8'

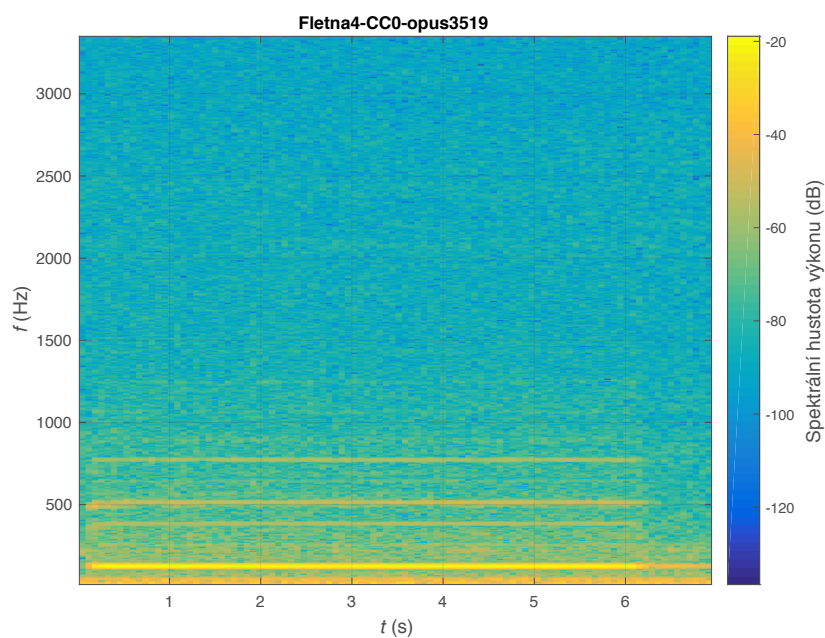
U píšťaly Flétny trubicové 8' je čitelná první, třetí a pátá harmonická složka. Tón tím získává nazální témbur. Rejstřík se bude dobře mísit s jinými flétnovými a principálovými hlasy.

U rejstříku Flétna kopulová 4' byl vybrán tón klávesy C_0 , jehož absolutní výška odpovídá tónu c^0 , jelikož se jedná o transponující rejstřík. Ze spektrogramu je čitelná první, třetí, čtvrtá a pátá harmonická složka. Tón je jasnější, ale stále měkký. Tento



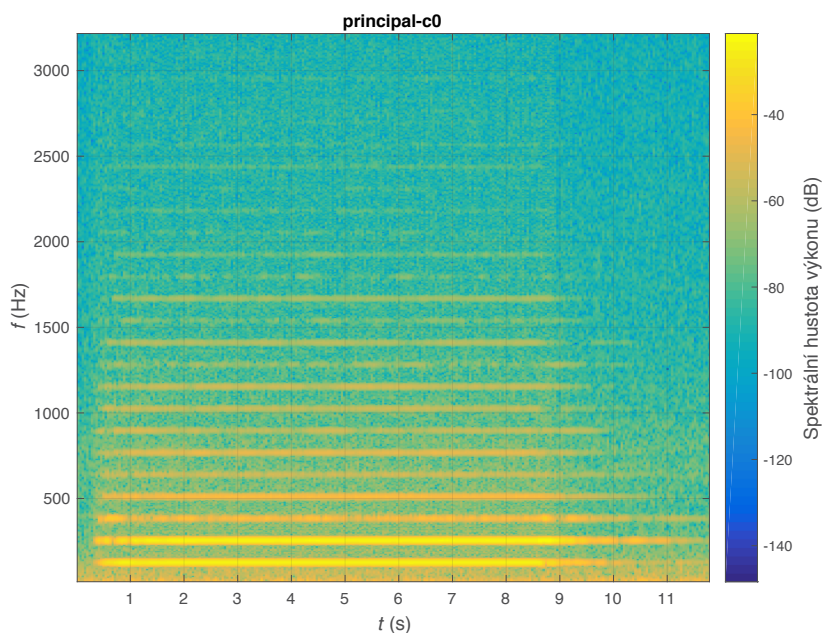
Obr. 6.5: Spektrogram píšťaly tónu c^0 rejstříku Flétna trubicová 8'

rejstřík se často využívá v kombinaci s Krytem 8' a to jak při sólové hře tak i při doprovodu jiného nástroje.



Obr. 6.6: Spektrogram píšťaly tónů C_0 rejstříku Flétna kopulová 4'

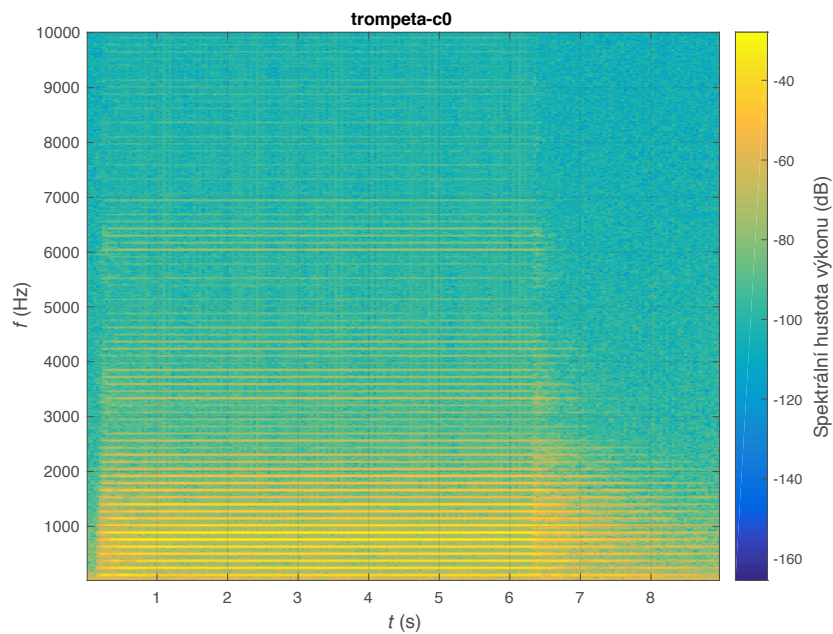
Ze spektrogramu píšťaly Principálu 8' lze vyčíst výraznou 2. harmonickou složku, která je stejně silná jako fundament. Přináší tónu mohutnost. Třetí a čtvrtá harmonická se liší rozdílem 20 dB od fundamentu. Píšťala obsahuje velké množství vyšších harmonických a to jak v intervalovém pásmu tak i v pásmu klastrů. Tón tím získává jasnost, brysknost a ostrost. Principálu 8' tvoří základ varhan, takže musí poskytnout mohutný a nosný tón, na který je dále možné stavět další hlasy. Často se pojí s flétnovými hlasy právě pro podporu fundamentu, případně pro změkčení tónu, je-li příliš průrazný.



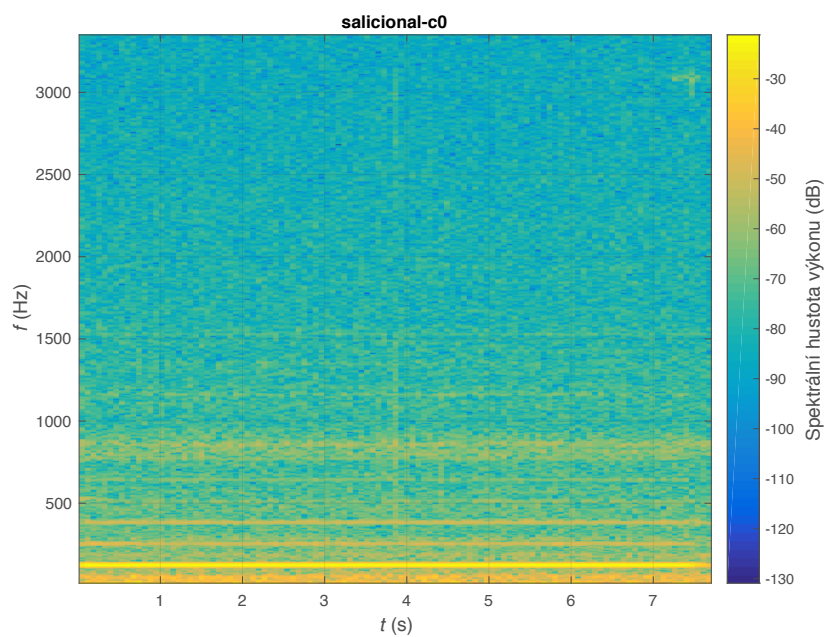
Obr. 6.7: Spektrogram píšťaly tónů c^0 rejstříku Principál 8'

Tón rejstříku Trompeta 8' má velmi bohaté spektrum. Jedná se o jazykový rejstřík. Jazyček generuje velké množství vyšších harmonických složek, které jsou „upraveny“ ozvučnou, která v tomto případě slouží jako filtr. Druhá až sedmá harmonická složka je silnější než samotný fundament. Zřetelné harmonické se nacházejí i v kvaziharmonickém pásmu mezi 3500 Hz a 5000 Hz a v šumovém pásmu mezi 6000 Hz a 7000 Hz. Tón Trompety 8' je mohutný, sytý, ostrý a průrazný.

Tento rejstřík je vhodný pro sólové použití nebo pro kombinaci se základními hlasy, nebo pak do pléna či tutti varhan. Dobře se mísí s principály, kryty a s flétnovými hlasy. Trompeta má po stisku klávesy malou latenci do rozeznění tónu. Proto se k ní často přidává 4' principál, který konkretizuje nástup tónu zvláště pak při interpretaci rychlých hodnot.

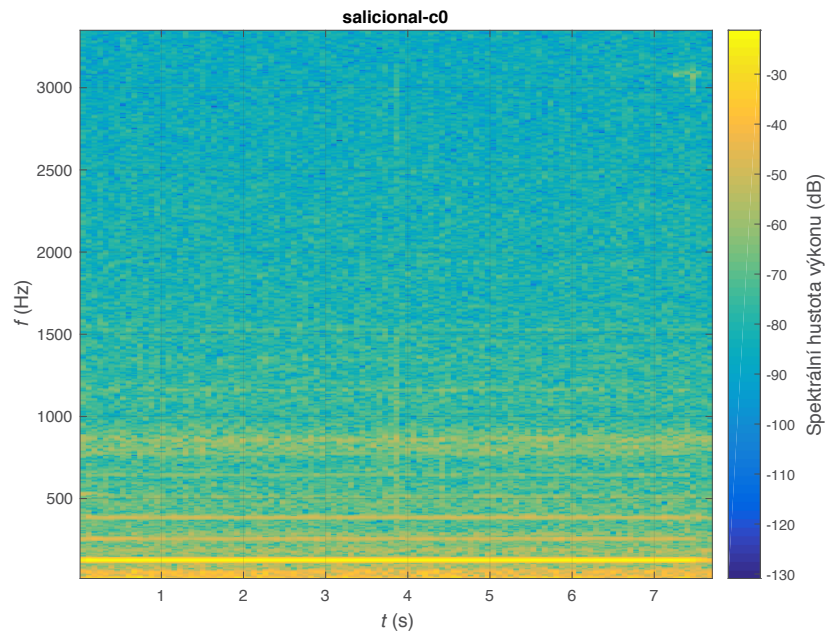


Obr. 6.8: Spektrogram píšťaly tónů c^0 rejstříku Trompeta 8'

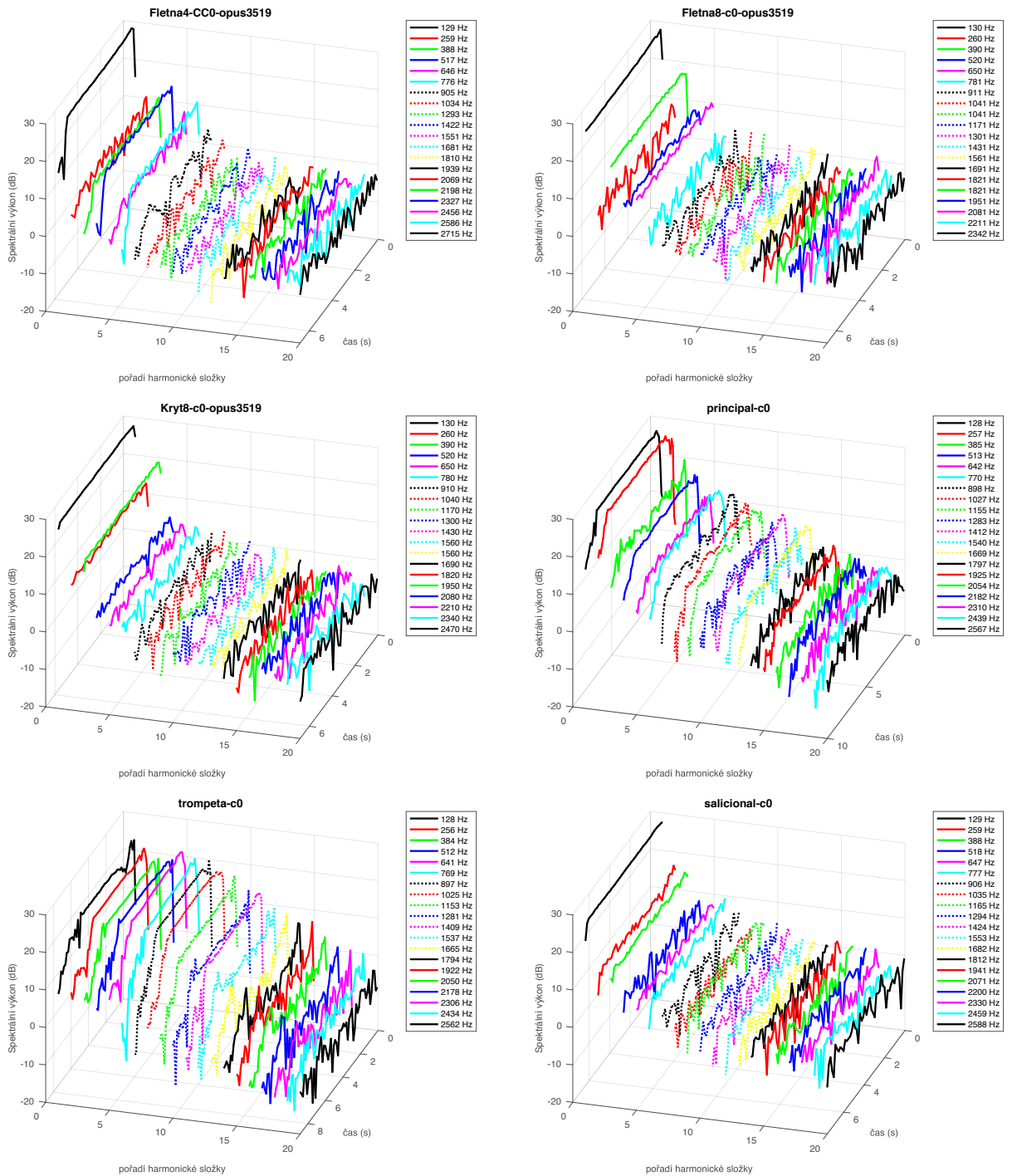


Obr. 6.9: Spektrogram píšťaly tónů c^0 rejstříku Salicional 8'

Spektrum Salicionálu 8' je chudé. Vedle zřetelného fundamentu obsahuje 2. a 3. harmonickou složkou odstupem 20 dB a 4., 5. a 6. harmonickou s odstupem 40 dB od fundamentu. Jedná se o velmi slabý smýkavý rejstřík, který je vhodné používat s jinými hlasy, zejména s flétnovými. Narozdíl od příkladů, které uvádí literatura, kde často smýkavé rejstříky mají silnější druhou harmonickou než fundament. Je to dáno tím, že smyky jsou konstruovány s velmi úzkými menzurami a ještě tak, aby přefukovaly do 2. harmonické. Takovým příkladem je Gamba, nebo Cello.



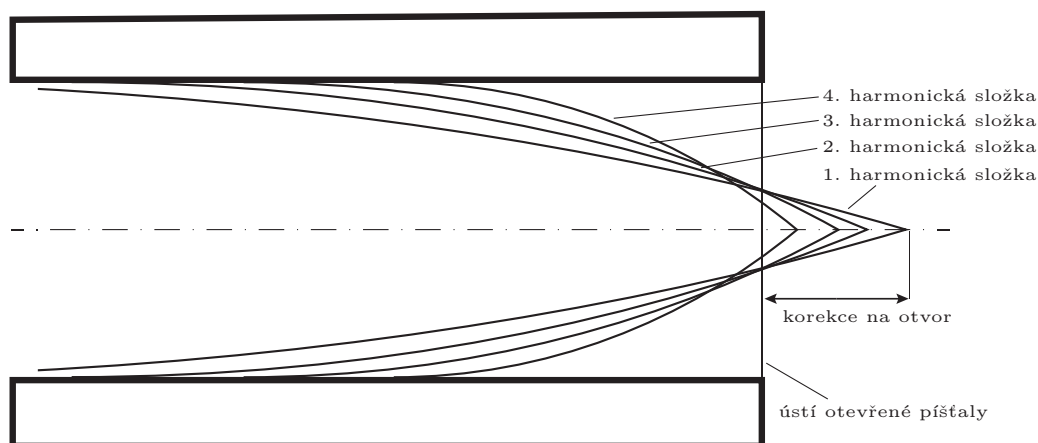
Obr. 6.10: Spektrogram píšťaly tónů c^0 rejstříku Salicionál 8'



Obr. 6.11: Časový průběh harmonických složek porovnávaných vzorků tónu c^0

6.5 Neharmonicita

Jedná se o nesoulad teoretických frekvenčních poloh vyšších harmonických s jejich realnými polohami. Neharmonicita má původ v akustické délce vzduchového sloupce, která je větší než délka těla píšťaly o tzv. korekci na ústa a korekci na otvor. Postupné vyrovnání částic vzduchu uvnitř a vně píšťaly způsobuje vysunutí pohybových kmiten a uzlů ven z píšťaly.



Obr. 6.12: Vysunutí stojaté vlny z píšťaly

Na neharmonicitu má vliv tlak vzduchu, výška výřezu a průměr píšťaly. Se stoupajícím tlakem se zeslabuje 1. harmonická a vyšší harmonické se posouvají do míst, které frekvenčně souhlasí s rezoncemi vzduchového sloupce. Ke stejnému posunu dojde při změně výšky výřezu. Široce menzurovaná píšťala s méně bohatým spektrem má nejvíce neharmonické uspořádání módů. Naopak úzce menzurovaná píšťala má téměř harmonické uspořádání. [15]

V průběhu měření a analýzy tónu rejstříku Kryt 8', Flétna trubicová 8' a Flétna kopulová 4' nebyly zjištěny žádné velké odchylky neharmonicity. U tónu C_0 rejstříku Kryt 8' varhan opus 3466 činila neharmonicity vyšších harmonických složek odchylku 0,435 centu. U rejstříku Flétna kopulová 4' tón C_0 to bylo 0,523 centu. U rejstříku Flétna trubicová 8' varhan opus 3487 je odchylka 1,3 centu. U ostatních tónů rejstříků je odchylka po zaokrouhlení jen několik tisícín centů.

Všechny tyto odchylky jsou tak nepatrné, že nemají žádný negativní vliv na kvalitu tónu. Naměřené a vypočtené hodnoty neharmonicity jsou uvedeny v tabulkách B.1, B.2 a B.3 v příloze.

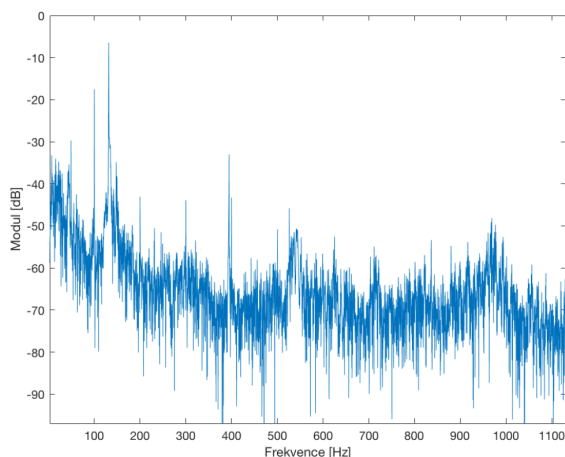
6.6 Šum pozadí tónů

Akustická měření varhan značně komplikuje vliv prostoru, který je od zvuku varhan neoddelitelný. V ideálním případě akustická měření probíhají v bezodrazové komoře. Tam však mohou proběhnout jen měření jednotlivých píšťal. V případě této práce nebylo možné provést měření v bezodrazové komoře, protože by to vyžadovalo postavit v komoře malý nástroj, který by zajišťoval stálý tlak vzduchu a umožňoval pomocí traktury ovládat ventil pod píšťalou.

Nejvíce jsem se u výsledku měření v reálném prostoru potýkal s hlukem pozadí měřených tónů. Ten je především způsoben šumem motoru a unikajícím vzduchem přes netěsnosti ve vzduchovém hospodářství varhan.

Ve spektru u všech vzorků varhan opus 3466 je čitelná tónová složka o frekvenci 100 Hz a její harmonické složky o frekvenci 200 Hz, 300 Hz, 400 Hz a 500 Hz, které jsou součástí šumu pocházejícího z nástroje. Jejich zdrojem je motor varhan a šum podporuje i unikající vzduch v netěsnostech vzduchového vedení a kontaktů v samotném nástroji. Příčinou je rezonance rotorových a statorových plechů motoru. Složka o frekvenci 100 Hz vzniká díky magnetickým silám působícím v elektromotoru přenesením frekvence 50 Hz z elektrické rozvodné sítě. Za jednu amplitudu se transformátorové plechy v motoru magnetizují a demagnetizují dvakrát, vždy v kladné a poté v záporné půlplně. Díky tomu vznikají mezi plechy pnutí, které vytvářejí šumovou složku o frekvenci 100 Hz. [3]

V průběhu analýzy spektra vzorků jsem se se šumem skutečně potýkal, zejména se silnou základní 100 Hz složkou. Uvedené řešení, které jsem použil je popsáno v kapitole 4.2.



Obr. 6.13: Spektrum šumu motoru varhan opus 3466

7 ZÁVĚR

Tato práce si stanovila za cíl analyzovat spektrum flétnových rejstříků varhanních píšťal. Vzhledem ke komplexnosti problematiky nejprve byla zmíněna terminologie z oblasti organologie, byly popsány druhy píšťal, jejich konstrukce a tvary. Dále byl vysvětlen princip vzniku tónu ve varhanní píšťale a průběh stojatého vlnění v kryté a otevřené píšťale.

Třetí kapitola se zabývala časovým průběhem hudebního signálu, ADSR obálkou, harmonickou analýzou a problematikou výpočtu FFT, DFT a STFT.

V rámci této práce byla vytvořena aplikace v prostředí MATLAB pro analýzu naměřených zvukových vzorků. Aplikace disponuje uživatelským rozhraním, ve kterém lze nastavit parametry funkcí, výpočtů a vykreslení grafů. Uživatelské rozhraní komunikuje s jednotlivými sestavenými skripty.

Dále byla popsána metoda měření, nahrávání hudebních vzorků. Podrobně byly popsány měřené nástroje a vybrané flétnové rejstříky varhan.

V šesté kapitole se nacházel výběr vzorků, které byly podrobeny analýze. Byly zde komentovány spektrální průběhy zkoumaných tónů C_0, c^0, c^1, c^2, c^3 , měřených rejstříků Kryt 8', Flétna trubicová 8' a Flétna kopulová 4'. Dále byly porovnány spektrogramy a vlastnosti píšťal jednotlivých varhanních hlasů zastupujících skupinu krytů, flétnových, principálových, smykových a jazykových sborů. Byl uveden výsledek výpočtu odchylek neharmonicit vyšších harmonických složek a rozebrán problém šumu na pozadí analýzy tónu varhanních píšťal.

O analyzovaných flétnových píšťalách lze obecně říci, že jsou zvukově měkkého tónu. Jejich zvukové vlastnosti určují zejména 1., 3., 4. a 5. harmonická složka. Zřídka kdy se vyskytují výrazné vyšší harmonické složky. Píšťaly nemají velkou mohunost a nosnost jako píšťaly ze skupiny principálů nebo jazyků, za to mají velmi dobrou mísící schopnost, se všemi skupinami hlasů. A proto se často používají na změkčení barvy tónu jiných rejstříků, na sólovou hru v menší dynamice nebo k doprovodu jiného hudebního nástroje nebo zpěvu.

LITERATURA

- [1] BĚLSKÝ, Vratislav. *Nauka o varhanách*. 4. vyd., (V Editio Bärenreiter Praha vyd. 1.). Praha: Editio Bärenreiter, 2000. ISBN 80-86385-04-3.
- [2] BERNAT, Petr. Vedlejší hlasy *Anatomie varhan* [online]. 2010, poslední aktualizace 2.1.2010 [cit. 27.11.2017]. Dostupné z URL: <http://www.anatomie-varhan.cz/texty/varhany/anatomie/pistaly_hlasy_vedlejsi.htm>.
- [3] CSANYI, Edvard. How Power Transformer Produces Acoustical Noise?. *Electrical engineering portal* [online]. 5.12.2012 [cit. 26.05.2018]. Dostupné z URL: <<http://electrical-engineering-portal.com/how-power-transformer-produces-acoustical-noise>>.
- [4] GÁLVEZ, Mario Garrido. *The Feedforward Short-Time Fourier Transform*. Dostupné také z URL: <<https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1014928/FULLTEXT01.pdf>>
- [5] GEIST, Bohumil. *Akustika jevy a souvislosti v hudební teorii a praxi*. 1. vyd., Praha: Muzikus, 2008. ISBN 80-86253-31-7.
- [6] HORA, Petr. *Akustické jevy v kontinuu*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2001. Dostupné z URL: <www.cdm.cas.cz/czech/hora/vyuka/ajk/ajk.pdf>.
- [7] KOUKAL, Petr a Zdeněk OTČENÁŠEK. *Problematika restaurování zvuku varhan*. Vyd. 1. V Telči: Národní památkový ústav, 2017. ISBN 978-80-906167-8-3.
- [8] KRÁTKÝ, Jiří. *Vstupní organologická zpráva*. Ostrava, 2006.
- [9] NEVŘIVA, P. a Martin PIEŠ *Soustavy a signály* Vyd. 1. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2012. 293 s.
- [10] PECHÁČEK, Martin. *Jihlavské varhany*. Brno, 2013. Masarykova univerzita, Filozofická fakulta, Ústav hudební vědy. Vedoucí práce PhDr. Petr Macek, Ph.D.
- [11] SMĚKAL, Z. *Analýza signálů a soustav: BASS* Vyd. 1. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2012. 251 s. ISBN 978-80-214-4453-9.
- [12] SMĚLÍKOVÁ, Dorota. *Meziválečné hudební dění v Krnově na stránkách dobového tisku*. Olomouc, 2014. Bakalářská práce. Univerzita Palackého v Olomouci, Pedagogická fakulta, Katedra hudební výchovy. Vedoucí práce Mgr. Gabriela Coufalová, Ph.D.

- [13] SMĚLÝ, P. *Analýza časově proměnného spektra klavírů*: bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2016. 80 s. Vedoucí práce MgA. Mgr. Ondřej Jirásek, Ph.D.
- [14] 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.
- [15] SYROVÝ, Václav. *Kapitoly o varhanách*. Vyd. 2., dopl., přeprac. V Praze: Akademie múzických umění, 2004. Akustická knihovna (Akademie múzických umění v Praze. Hudební fakulta. Zvukové studio). ISBN 80-7331-009-0.
- [16] SYROVÝ, Václav. Zvuk varhan - symbióza akustiky a umění. *Disk*. Praha: Akademie múzických umění, 2006, **2006**(16), str.7-17. ISSN 1213-8665. Dostupné z URL: <<http://zvuk.hamu.cz/vyzkum/dokumenty/Lit31z.pdf>>.
- [17] SYROVÝ, Václav. *Zvukový design varhan a moderní chrámový prostor*. Brno: Sborník konference s mezinárodní účastí: Moderní sakrální stavby, Fakulta architektury VUT, 2002. str.39-43. Dostupné z URL: <<http://marc.hamu.cz/vyzkum/dokumenty/Lit94.pdf>>.
- [18] ŠVEJDA, Martin. *Diagnostika varhanní píšťaly sledováním proudu vzduchu metodou Particle Image Velocimetry*. Nové trendy akustického spektra 2014. Zvolen: Technická univerzita vo Zvoleně. str 157-167. Dostupné z URL: <<http://marc.hamu.cz/vyzkum/dokumenty/Lit202.pdf>>
- [19] The Short-Time Fourier Transform. *DSPrelated.com* [online]. [cit. 2018-05-26]. Dostupné z URL: <https://www.dsprelated.com/freebooks/sasp/Short_Time_Fourier_Transform.html>.
- [20] *Understanding FFTs and Windowing* [online]. [cit. 2018-05-27]. Dostupné z URL: <<http://download.ni.com/evaluation/pxi/Understanding%20FFTs%20and%20Windowing.pdf>>.

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

FFT	Fast Fourier transform – rychlá Fourierova transformace
DFT	Discrete Fourier transform – diskrétní Fourierova transformace
STFT	Short-Time Fourier Transform – krátkodobá Fourierova transformace
8'	označení stopové výšky píšťaly pomocí symbolu „'“
DAW	Digital Audio Workstation – elektronické zařízení nebo v tomto případě software používaný k záznamu zvuku

SEZNAM PŘÍLOH

A	Obsah přiloženého CD	59
B	Tabulky naměřených hodnot	60

A OBSAH PŘILOŽENÉHO CD

/	
—	vzorky..... adresář s naměřenými vzorky
—	normalizovane..... adresář normalizovaných vzorků
—	Rieger-Kloss_opus3466
—	Rieger-Kloss_opus3487
—	Rieger-Kloss_opus3519
—	rejstriky_k_porovnaní
—	nenormalizovane..... adresář nenormalizovaných vzorků
—	Rieger-Kloss_opus3466
—	Rieger-Kloss_opus3487
—	Rieger-Kloss_opus3519
—	namerena_data.xls..... naměřená data v tabulkách v souboru .xls
—	fotky..... fotografie měřených nástrojů
—	aplikace..... aplikace a její skripty

B TABULKY NAMĚŘENÝCH HODNOT

Neharmoničita varhany Ostrava-Třebovice, Rieger-Kloss op. 3487 Flétna trubicová 8'															
	C_0			C^0			C^1			C^2			C^3		
	f [Hz]	f_{hor} [Hz]	%	f [Hz]	f_{hor} [Hz]	%	f [Hz]	f_{hor} [Hz]	%	f [Hz]	f_{hor} [Hz]	%	f [Hz]	f_{hor} [Hz]	%
1	64,60	64,60	0,000	129,63	129,63	0,000	259,04	259,04	0,000	518,00	518,00	0,000	1 036,62	1 036,62	0,000
2	129,10	129,20	-0,075	259,26	259,26	0,000	518,07	518,07	0,000	1 036,00	1 036,00	0,000	2 073,23	2 073,23	0,000
3	193,66	193,80	-0,075	388,89	388,89	0,000	777,11	777,11	0,000	1 554,00	1 554,00	0,000	3 109,85	3 109,85	0,000
4	258,21	258,40	-0,075	518,52	518,52	0,000	1 036,14	1 036,14	0,000	2 072,00	2 072,00	0,000	4 146,47	4 146,47	0,000
5	322,76	323,00	-0,075	648,15	648,15	0,000	1 295,18	1 295,18	0,000	2 590,00	2 590,00	0,000	5 183,09	5 183,09	0,000
6	387,31	387,60	-0,075	777,78	777,78	0,000	1 554,21	1 554,21	0,000	3 108,00	3 108,00	0,000	6 219,70	6 219,70	0,000
7	451,86	452,20	-0,075	907,41	907,41	0,000	1 813,25	1 813,25	0,000	3 626,00	3 626,00	0,000	7 256,32	7 256,32	0,000
8	516,41	516,80	-0,075	1 037,04	1 037,04	0,000	2 072,28	2 072,28	0,000	4 144,00	4 144,00	0,000	8 292,94	8 292,94	0,000
9	580,97	581,40	-0,075	1 166,67	1 166,67	0,000	2 331,32	2 331,32	0,000	4 662,00	4 662,00	0,000	9 329,56	9 329,56	0,000
10	645,52	646,00	-0,075	1 296,30	1 296,30	0,000	2 590,35	2 590,35	0,000	5 180,00	5 180,00	0,000	10 366,17	10 366,17	0,000
11	710,07	710,60	-0,075	1 425,93	1 425,93	0,000	2 849,39	2 849,39	0,000	5 698,00	5 698,00	0,000	11 402,79	11 402,79	0,000
12	774,62	775,20	-0,075	1 555,56	1 555,56	0,000	3 108,42	3 108,42	0,000	6 216,00	6 216,00	0,000	12 439,41	12 439,41	0,000
13	839,17	839,80	-0,075	1 685,19	1 685,19	0,000	3 367,46	3 367,46	0,000	6 734,00	6 734,00	0,000	13 476,02	13 476,02	0,000
14	903,72	904,40	-0,075	1 814,82	1 814,82	0,000	3 626,49	3 626,49	0,000	7 252,00	7 252,00	0,000	14 512,64	14 512,64	0,000
15	968,28	969,00	-0,075	1 944,44	1 944,44	0,000	3 885,53	3 885,53	0,000	7 770,00	7 770,00	0,000	15 549,26	15 549,26	0,000
16	1 032,83	1 033,60	-0,075	2 074,08	2 074,08	0,000	4 144,56	4 144,56	0,000	8 288,00	8 288,00	0,000	16 585,87	16 585,87	0,000

Tab. B.1: Tabulka neharmonicit analyzovaných tónů rejstříku Kryt 8' varhan opus 3466

Neharmonicita varhany Ostrava-Třebovice, Rieger-Kloss op. 3487 Flétna trubicová 8'															
	C_0			c^0			c^1			c^2			c^3		
	f [Hz]	f_{vor} [Hz]	%	f [Hz]	f_{vor} [Hz]	%	f [Hz]	f_{vor} [Hz]	%	f [Hz]	f_{vor} [Hz]	%	f [Hz]	f_{vor} [Hz]	%
1	64,60	64,60	0,000	129,63	129,63	0,000	259,04	259,04	0,000	518,00	518,00	0,000	1 036,62	1 036,62	0,000
2	129,10	129,20	-0,075	259,26	259,26	0,000	518,07	518,07	0,000	1 036,00	1 036,00	0,000	2 073,23	2 073,23	0,000
3	193,66	193,80	-0,075	388,89	388,89	0,000	777,11	777,11	0,000	1 554,00	1 554,00	0,000	3 109,85	3 109,85	0,000
4	258,21	258,40	-0,075	518,52	518,52	0,000	1 036,14	1 036,14	0,000	2 072,00	2 072,00	0,000	4 146,47	4 146,47	0,000
5	322,76	323,00	-0,075	648,15	648,15	0,000	1 295,18	1 295,18	0,000	2 590,00	2 590,00	0,000	5 183,09	5 183,09	0,000
6	387,31	387,60	-0,075	777,78	777,78	0,000	1 554,21	1 554,21	0,000	3 108,00	3 108,00	0,000	6 219,70	6 219,70	0,000
7	451,86	452,20	-0,075	907,41	907,41	0,000	1 813,25	1 813,25	0,000	3 626,00	3 626,00	0,000	7 256,32	7 256,32	0,000
8	516,41	516,80	-0,075	1 037,04	1 037,04	0,000	2 072,28	2 072,28	0,000	4 144,00	4 144,00	0,000	8 292,94	8 292,94	0,000
9	580,97	581,40	-0,075	1 166,67	1 166,67	0,000	2 331,32	2 331,32	0,000	4 662,00	4 662,00	0,000	9 329,56	9 329,56	0,000
10	645,52	646,00	-0,075	1 296,30	1 296,30	0,000	2 590,35	2 590,35	0,000	5 180,00	5 180,00	0,000	10 366,17	10 366,17	0,000
11	710,07	710,60	-0,075	1 425,93	1 425,93	0,000	2 849,39	2 849,39	0,000	5 698,00	5 698,00	0,000	11 402,79	11 402,79	0,000
12	774,62	775,20	-0,075	1 555,56	1 555,56	0,000	3 108,42	3 108,42	0,000	6 216,00	6 216,00	0,000	12 439,41	12 439,41	0,000
13	839,17	839,80	-0,075	1 685,19	1 685,19	0,000	3 367,46	3 367,46	0,000	6 734,00	6 734,00	0,000	13 476,02	13 476,02	0,000
14	903,72	904,40	-0,075	1 814,82	1 814,82	0,000	3 626,49	3 626,49	0,000	7 252,00	7 252,00	0,000	14 512,64	14 512,64	0,000
15	968,28	969,00	-0,075	1 944,44	1 944,44	0,000	3 885,53	3 885,53	0,000	7 770,00	7 770,00	0,000	15 549,26	15 549,26	0,000
16	1 032,83	1 033,60	-0,075	2 074,07	2 074,07	0,000	4 144,56	4 144,56	0,000	8 288,00	8 288,00	0,000	16 585,88	16 585,88	0,000

Tab. B.2: Tabulka neharmonicit analyzovaných tónů rejstříku Flétny trubicové 8' varhan opus 3487

Neharmonicita varhany Konzervatoř Brno, Rieger-Kloss op. 3466 Flétna kopulová 4'																
	C_0			c^0			c^1			c^2			c^3			
	f [Hz]	f_{nom} [Hz]	%	centy	f [Hz]	f_{nom} [Hz]	%	centy	f [Hz]	f_{nom} [Hz]	%	centy	f [Hz]	f_{nom} [Hz]	%	centy
1	131,40	131,40	0,000	0,000	259,72	259,72	0,000	0,000	519,86	519,86	0,000	0,000	1 039,71	1 039,71	0,000	0,000
2	262,88	262,80	0,030	0,520	519,43	519,43	0,000	0,000	1 039,71	1 039,71	0,000	-0,002	2 079,42	2 079,42	0,000	-0,002
3	394,32	394,20	0,030	0,523	779,15	779,15	0,000	0,000	1 559,57	1 559,57	0,000	-0,001	3 119,13	3 119,13	0,000	-0,001
4	525,76	525,60	0,030	0,524	1 038,86	1 038,86	0,000	0,000	2 079,42	2 079,42	0,000	-0,002	4 158,85	4 158,85	0,000	-0,002
5	657,20	657,00	0,030	0,522	1 298,58	1 298,58	0,000	0,000	2 599,28	2 599,28	0,000	-0,001	5 198,56	5 198,56	0,000	-0,001
6	788,64	788,40	0,030	0,523	1 558,29	1 558,29	0,000	0,000	3 119,13	3 119,14	0,000	-0,001	6 238,27	6 238,27	0,000	-0,001
7	920,08	919,80	0,030	0,523	1 818,01	1 818,01	0,000	0,000	3 638,99	3 638,99	0,000	-0,001	7 277,98	7 277,98	0,000	-0,001
8	1051,52	1 051,20	0,030	0,524	2 077,72	2 077,72	0,000	0,000	4 158,85	4 158,85	0,000	-0,001	8 318,41	8 318,41	0,000	-0,001
9	1182,96	1 182,60	0,030	0,523	2 337,44	2 337,44	0,000	0,000	4 678,70	4 678,70	0,000	-0,001	9 358,40	9 358,40	0,000	-0,001
10	1314,40	1 314,00	0,030	0,523	2 597,15	2 597,15	0,000	0,000	5 198,56	5 198,56	0,000	-0,001	10 398,11	10 398,11	0,000	-0,001
11	1445,84	1 445,40	0,030	0,523	2 856,87	2 856,87	0,000	0,000	5 718,41	5 718,42	0,000	-0,001	11 438,41	11 438,41	0,000	-0,001
12	1577,28	1 576,80	0,030	0,523	3 116,58	3 116,58	0,000	0,000	6 238,27	6 238,27	0,000	-0,001	12 478,54	12 478,54	0,000	-0,001
13	1708,72	1 708,20	0,030	0,523	3 376,30	3 376,30	0,000	0,000	6 758,12	6 758,13	0,000	-0,001	13 518,67	13 518,67	0,000	-0,001
14	1840,16	1 839,60	0,030	0,523	3 636,01	3 636,01	0,000	0,000	7 277,98	7 277,98	0,000	-0,001	14 558,81	14 558,81	0,000	-0,001
15	1971,60	1 971,00	0,030	0,523	3 895,73	3 895,73	0,000	0,000	7 797,83	7 797,84	0,000	-0,001	15 598,96	15 598,96	0,000	-0,001
16	2103,04	2 102,40	0,030	0,523	4 155,44	4 155,44	0,000	0,000	8 317,69	8 317,70	0,000	-0,001	16 639,09	16 639,09	0,000	-0,001

Tab. B.3: Tabulka neharmonicit analyzovaných tónů rejstříku Fletny kopulové 4' varhan opus 3466

harmonická	C_0						c_0						c^1					
	Kryt 8'		Flétna trubcová 8'		Flétna kopulová 4'		Kryt 8'		Flétna trubcová 8'		Flétna kopulová 4'		Kryt 8'		Flétna trubcová 8'		Flétna kopulová 4'	
	f [Hz]	[dB]	f [Hz]	[dB]	f [Hz]	[dB]	f [Hz]	[dB]	f [Hz]	[dB]	f [Hz]	[dB]	f [Hz]	[dB]	f [Hz]	[dB]	f [Hz]	[dB]
1.	64.90	-7.75	64.80	-8.53	131.40	-6.52	130.29	-9.43	129.58	-13.76	259.72	-8.83	259.94	-12.71	259.89	-10.03	519.86	-7.28
2.	129.83	-41.20	129.56	-42.19	262.88	-43.04	260.57	-55.90	259.17	-50.68	519.43	-49.57	519.88	-40.24	519.78	-42.75	1039.71	-42.77
3.	194.75	-14.17	194.34	-9.86	394.32	-33.14	390.86	-14.14	388.75	-7.66	779.15	-34.38	779.83	-28.00	779.68	-17.71	1559.57	-36.15
4.	259.67	-52.72	259.12	-53.48	525.76	-46.52	521.14	-42.12	518.33	-55.94	1038.86	-46.47	1039.77	-46.21	1039.57	-51.34	2079.42	-44.46
5.	324.58	-35.07	323.89	-33.49	657.20	-53.11	651.43	-45.13	647.92	-39.63	1298.58	-41.84	1299.71	-43.77	1299.46	-50.32	2599.28	-44.66
6.	389.50	-48.97	388.67	-52.99	788.64	-56.45	781.71	-47.07	777.50	-64.03	1558.29	-47.53	1559.65	-50.93	1559.35	-55.83	3119.13	-67.46
7.	454.41	-51.71	453.45	-42.32	920.08	-50.13	912.00	-63.35	907.08	-56.01	1818.01	-58.43	1819.59	-54.86	1819.24	-63.56	3638.99	-67.31
8.	519.33	-53.96	518.23	-57.10	1051.52	-62.31	1042.29	-47.00	1036.67	-67.80	2077.72	-68.15	2079.54	-65.63	2079.14	-64.57	4158.85	-68.03
9.	584.25	-47.46	583.01	-55.73	1182.96	-64.91	1172.57	-62.19	1166.25	-63.71	2337.44	-68.99	2339.48	-65.36	2339.03	-70.67	4678.70	-75.01
10.	649.16	-59.11	647.79	-63.23	1314.40	-64.58	1302.86	-63.32	1295.83	-62.47	2597.15	-73.29	2599.42	-58.54	2598.92	-76.35	5198.56	-79.90
11.	714.08	-65.41	712.57	-60.27	1445.84	-61.71	1433.14	-60.31	1425.41	-67.39	2856.87	-76.25	2859.36	-74.39	2858.81	-79.01	5718.41	-83.69
12.	779.00	-52.19	777.35	-67.60	1577.28	-62.35	1563.43	-67.05	1555.00	-69.56	3116.58	-73.10	3119.30	-76.75	3118.70	-78.79	6238.27	-84.55
13.	843.91	-62.25	842.12	-61.97	1708.72	-58.33	1693.72		1684.58		3376.30	-73.82	3379.25	-75.63	3378.60	-79.59	6758.12	-84.31
14.	908.83	-60.73	906.90	-60.73	1840.16	-72.39	1824.00	-64.41	1814.16	-65.96	3636.01	-76.52	3639.19	-80.49	3638.49	-83.13	7277.98	-84.73
15.	973.74	-53.33	971.68	-54.71	1971.60		1954.29	-75.38	1943.75	-75.44	3895.73	-74.46	3899.13	-76.82	3898.38	-82.84	7797.83	-85.92
16.	1038.66	-68.23	1036.46	-63.63	2103.04	-71.45	2084.57	-75.40	2073.33	-76.20	4155.44	-75.60	4159.07	-78.07	4158.27	-81.32	8317.69	-86.75
17.	1103.58	-75.38	1101.24	-71.95	2234.47		2214.86	-75.29	2202.91	-74.94	4415.16	-77.36	4419.01	-77.52	4418.16	-80.40	8837.55	-86.34
18.	1168.49	-71.84	1166.02		2365.91	-72.50	2345.14	-77.47	2332.50	-77.02	4674.87	-76.22	4678.96	-80.08	4678.05	-81.26	9357.40	-88.04
19.	1233.41	-70.64	1230.80	-69.43	2497.35	-74.95	2475.43	-77.14	2462.08	-77.17	4934.59	-77.85	4938.90	-81.03	4937.95	-83.16	9877.26	-86.36
20.	1298.33	-66.91	1295.58	-64.92	2628.79	-75.27	2605.71	-75.94	2591.66	-78.60	5194.30	-77.02	5198.84	-79.23	5197.84	-81.64	10397.11	-86.27
21.	1363.24	-67.85	1360.35	-64.28	2760.23	-75.03	2736.00	-68.29	2721.25	-80.94	5454.02	-76.13	5458.78	-84.61	5457.73	-87.15	10916.97	-87.70
22.	1428.16	-72.07	1425.13	-68.45	2891.67	-76.96	2866.29	-79.11	2850.83	-79.67	5713.73		5718.73	-84.10	5717.62	-86.54	11436.82	-87.87
23.	1493.08	-80.44	1489.91	-75.39	3023.11	-73.09	2996.57		2980.41	-80.24	5973.45	-81.52	5978.67	-85.74	5977.51	-88.89	11956.68	-86.22
24.	1557.99	-77.30	1554.69	-75.45	3154.55	-76.85	3126.86	-77.25	3109.99	-81.01	6233.16		6238.61	-84.72	6237.41	-87.46	12476.53	-89.45
25.	1622.91	-69.48	1619.47	-69.89	3285.99	-75.46	3257.14	-79.86	3239.58	-81.17	6492.88	-83.85	6498.55	-84.58	6497.30	-89.15	12996.39	
26.	1687.82	-76.33	1684.25	-71.04	3417.43	-75.07	3387.43	-80.51	3369.16	-83.01	6752.59	-84.14	6758.49	-86.56	6757.19	-88.58	13516.25	-89.39
27.	1752.74	-67.35	1749.03	-59.40	3548.87	-80.54	3517.71	-79.22	3498.74	-82.35	7012.31	-83.17	7018.44	-88.25	7017.08	-89.12		
28.	1817.66	-73.80	1813.81	-70.83			3648.00	-81.74	3628.33	-83.55			7276.97	-89.23				

Tab. B.4: Tabulka hramonických složek tónů C_0, c^0, c^1 varhan Rieger-Kloss opus 3466

	c^2						c^3					
	Kryt 8'		Flétna trubcová 8'		Flétna kopulová 4'		Kryt 8'		Flétna trubcová 8'		Flétna kopulová 4'	
	f [Hz]	[dB]	f [Hz]	[dB]	f [Hz]	[dB]	f [Hz]	[dB]	f [Hz]	[dB]	f [Hz]	[dB]
	519.48	-6.33	519.81	-7.18	1038.09	-7.64	1039.27	-5.53	1039.00	-5.14	2078.77	-18.76
	1038.95	-50.42	1039.61	-48.43	2076.18	-44.82	2078.54	-41.67	2078.00	-41.41	4157.54	-32.64
	1558.43	-52.13	1559.42	-15.14	3114.28	-32.80	3117.81	-53.00	3117.00	-35.80	6236.31	-49.14
	2077.91	-47.00	2079.22	-47.02	4152.37	-41.52	4157.08	-47.63	4156.00	-63.82	8315.08	-57.90
	2597.38	-43.48	2599.02	-51.05	5190.46	-48.02	5196.35	-51.92	5195.00	-49.37	10393.85	-54.52
	3116.86	-49.05	3118.83	-53.53	6228.55	-57.21	6235.62	-61.41	6234.00	-43.31	12472.62	-60.21
	3636.34	-49.74	3638.63	-59.00	7266.64	-59.87	7274.89	-59.47	7273.00	-63.37	14551.39	-62.12
	4155.81	-67.87	4158.44	-47.85	8304.73	-68.66	8314.16	-75.89	8312.00	-64.05	16630.15	-87.39
	4675.29	-68.07	4678.24	-59.50	9342.83	-73.03	9353.43	-68.97	9351.00	-63.87	18708.92	-86.32
	5194.77	-73.95	5198.05	-68.50	10380.92	-77.59	10392.70	-82.30	10390.00	-66.19		
	5714.24	-77.39	5717.85	-60.54	11419.01	-66.49	11431.97	-69.36	11429.00	-76.60		
	6233.72	-81.84	6237.66	-83.73	12457.10	-84.27	12471.24	-80.95	12468.00	-67.50		
	6753.20	-79.63	6757.46	-82.24	13495.19	-78.21	13510.51	-80.51	13507.00	-77.41		
	7272.67	-84.61	7277.27	-79.00	14533.28	-85.83	14549.78	-86.50	14546.00	-87.60		
	7792.15	-81.47	7797.07	-74.28			15589.05	-84.01	15585.00	-79.81		
	8311.63	-81.27	8316.88	-84.32			16628.32	-87.11	16624.00	-81.97		
	8831.10	-83.39	8836.68	-78.59			17667.59	-85.67				
	9350.58	-81.13	9356.49	-85.95								
	9870.06	-85.58	9876.29	-83.01								
	10389.53	-83.63	10396.10	-85.73								
	10909.01	-87.81	10915.90	-85.47								
	11428.49	-83.76	11435.71	-84.56								
	11947.96	-81.38	11955.51	-85.49								
	12467.44	-85.42	12475.32	-83.18								
	12986.92	-88.01	12995.12									
	13506.39	-86.06	13514.93	-86.01								
	14025.87	-86.03	14034.73	-87.03								
	14545.35	-88.62										

Tab. B.5: Tabulka hramonických složek tónů c^3, c^3 varhan Rieger-Kloss opus 3466

harmonická	C_0						c_0						c^1					
	Kryt S'		Flétna trubnicová S'		Flétna kopulová 4'		Kryt S'		Flétna trubnicová S'		Flétna kopulová 4'		Kryt S'		Flétna trubnicová S'		Flétna kopulová 4'	
	f [Hz]	[dB]	f [Hz]	[dB]	f [Hz]	[dB]	f [Hz]	[dB]	f [Hz]	[dB]	f [Hz]	[dB]	f [Hz]	[dB]	f [Hz]	[dB]	f [Hz]	[dB]
1.	64.90	-7,75	64.80	-8,53	131.40	-6,52	130.29	-9,43	129.58	-13,76	259.72	-8,83	259.94	-12,71	259.89	-10,03	519.86	-7,28
2.	129.83	-41,20	129.56	-42,19	262.88	-43,04	260.57	-55,90	259.17	-50,68	519.43	-49,57	519.88	-40,24	519.78	-42,75	1 039.71	-42,77
3.	194.75	-14,17	194.34	-9,86	394.32	-33,14	390.86	-14,14	388.75	-7,66	779.15	-34,38	779.83	-28,00	779.68	-17,71	1 559.57	-36,15
4.	259.67	-52,72	259.12	-53,48	525.76	-46,52	521.14	-42,12	518.33	-55,94	1 038.86	-46,47	1 039.77	-46,21	1 039.57	-51,34	2 079.42	-44,46
5.	324.58	-35,07	323.89	-33,49	657.20	-53,11	651.43	-45,13	647.92	-39,63	1 298.58	-41,84	1 299.71	-43,77	1 299.46	-50,32	2 599.28	-44,66
6.	389.50	-48,97	388.67	-52,99	788.64	-56,45	781.71	-47,07	777.50	-64,03	1 558.29	-47,53	1 559.65	-50,93	1 559.35	-55,83	3 119.13	-67,46
7.	454.41	-51,71	453.45	-42,32	920.08	-50,13	912.00	-63,35	907.08	-56,01	1 818.01	-58,43	1 819.59	-54,86	1 819.24	-63,56	3 638.99	-67,31
8.	519.33	-53,96	518.23	-57,10	1 051.52	-62,31	1 042.29	-47,00	1 036.67	-67,80	2 077.72	-68,15	2 079.54	-65,63	2 079.14	-64,57	4 158.85	-68,03
9.	584.25	-47,46	583.01	-55,73	1 182.96	-64,91	1 172.57	-62,19	1 166.25	-63,71	2 337.44	-68,99	2 339.48	-65,36	2 339.03	-70,67	4 678.70	-75,01
10.	649.16	-59,11	647.79	-63,23	1 314.40	-64,58	1 302.86	-63,32	1 295.83	-62,47	2 597.15	-73,29	2 599.42	-58,54	2 598.92	-76,35	5 198.56	-79,90
11.	714.08	-65,41	712.57	-60,27	1 445.84	-61,71	1 433.14	-60,31	1 425.41	-67,39	2 856.87	-76,25	2 859.36	-74,39	2 858.81	-79,01	5 718.41	-83,69
12.	779.00	-52,19	777.35	-67,60	1 577.28	-62,35	1 563.43	-67,05	1 555.00	-69,56	3 116.58	-73,10	3 119.30	-76,75	3 118.70	-78,79	6 238.27	-84,55
13.	843.91	-62,25	842.12	-61,97	1 708.72	-58,33	1 693.72		1 684.58		3 376.30	-73,82	3 379.25	-75,63	3 378.60	-79,59	6 758.12	-84,31
14.	908.83	-60,73	906.90	-60,73	1 840.16	-72,39	1 824.00	-64,41	1 814.16	-65,96	3 636.01	-76,52	3 639.19	-80,49	3 638.49	-83,13	7 277.98	-84,73
15.	973.74	-53,33	971.68	-54,71	1 971.60		1 954.29	-75,38	1 943.75	-75,44	3 895.73	-74,46	3 899.13	-76,82	3 898.38	-82,84	7 797.83	-85,92
16.	1 038.66	-68,23	1 036.46	-63,63	2 103.04	-71,45	2 084.57	-75,40	2 073.33	-76,20	4 155.44	-75,60	4 159.07	-78,07	4 158.27	-81,32	8 317.69	-86,75
17.	1 103.58	-75,38	1 101.24	-71,95	2 234.47		2 214.86	-75,29	2 202.91	-74,94	4 415.16	-77,36	4 419.01	-77,52	4 418.16	-80,40	8 837.55	-86,34
18.	1 168.49	-71,84	1 166.02		2 365.91	-72,50	2 345.14	-77,47	2 332.50	-77,02	4 674.87	-76,22	4 678.96	-80,08	4 678.05	-81,26	9 357.40	-88,04
19.	1 233.41	-70,64	1 230.80	-69,43	2 497.35	-74,95	2 475.43	-77,14	2 462.08	-77,17	4 934.59	-77,85	4 938.90	-81,03	4 937.95	-83,16	9 877.26	-86,36
20.	1 298.33	-66,91	1 295.58	-64,92	2 628.79	-75,27	2 605.71	-75,94	2 591.66	-78,60	5 194.30	-77,02	5 198.84	-79,23	5 197.84	-81,64	10 397.11	-86,27
21.	1 363.24	-67,85	1 360.35	-64,28	2 760.23	-75,03	2 736.00	-68,29	2 721.25	-80,94	5 454.02	-76,13	5 458.78	-84,61	5 457.73	-87,15	10 916.97	-87,70
22.	1 428.16	-72,07	1 425.13	-68,45	2 891.67	-76,96	2 866.29	-79,11	2 850.83	-79,67	5 713.73		5 718.73	-84,10	5 717.62	-86,54	11 436.82	-87,87
23.	1 493.08	-80,44	1 489.91	-75,39	3 023.11	-73,09	2 996.57		2 980.41	-80,24	5 973.45	-81,52	5 978.67	-85,74	5 977.51	-88,89	11 956.68	-86,22
24.	1 557.99	-77,30	1 554.69	-75,45	3 154.55	-76,85	3 126.86	-77,25	3 109.99	-81,01	6 233.16		6 238.61	-84,72	6 237.41	-87,46	12 476.53	-89,45
25.	1 622.91	-69,48	1 619.47	-69,89	3 285.99	-75,46	3 257.14	-79,86	3 239.58	-81,17	6 492.88	-83,85	6 498.55	-84,58	6 497.30	-89,15	12 996.39	
26.	1 687.82	-76,33	1 684.25	-71,04	3 417.43	-75,07	3 387.43	-80,51	3 369.16	-83,01	6 752.59	-84,14	6 758.49	-86,56	6 757.19	-88,58	13 516.25	-89,39
27.	1 752.74	-67,35	1 749.03	-59,40	3 548.87	-80,54	3 517.71	-79,22	3 498.74	-82,35	7 012.31	-83,17	7 018.44	-88,25	7 017.08	-89,12		
28.	1 817.66	-73,80	1 813.81	-70,83			3 648.00	-81,74	3 628.33	-83,55			7 276.97	-89,23				

Tab. B.6: Tabulka harmonických složek tónů C_0, c^0, c^1 varhan Rieger-Kloss opus 3487

c^2						c^3					
Kryt S'		Flétna trubnicová S'		Flétna kopulová 4'		Kryt S'		Flétna trubnicová S'		Flétna kopulová 4'	
f [Hz]	[dB]	f [Hz]	[dB]	f [Hz]	[dB]	f [Hz]	[dB]	f [Hz]	[dB]	f [Hz]	[dB]
518.00	-4,11	518.00	-5,43	1 036.04	-5,73	1 037.35	-6,76	1 036.62	-9,56	2 073.77	-17,09
1 036.00	-45,32	1 036.00	-39,40	2 072.08	-52,66	2 074.69	-57,34	2 073.23	-41,66	4 147.55	-53,31
1 554.00	-47,58	1 554.00	-28,90	3 108.12	-44,27	3 112.04	-53,06	3 109.85	-43,98	6 221.32	-42,62
2 072.00	-53,20	2 072.00	-55,45	4 144.16	-56,62	4 149.39	-47,10	4 146.47	-49,19	8 295.09	-43,59
2 590.00	-49,61	2 590.00	-58,51	5 180.20	-53,32	5 186.73	-46,53	5 183.09	-44,31	10 368.86	-61,83
3 108.00	-55,73	3 108.00	-51,13	6 216.24	-62,01	6 224.08	-65,61	6 219.70	-55,67	12 442.64	-59,85
3 626.00	-65,56	3 626.00	-56,94	7 252.28	-70,18	7 261.43	-62,30	7 256.32	-64,95	14 516.41	-69,23
4 144.00	-68,55	4 144.00	-64,39	8 288.32	-84,05	8 298.77	-77,16	8 292.94	-71,96	16 590.18	-62,10
4 662.00	-77,02	4 662.00	-72,31	9 324.36	-77,69	9 336.12	-87,71	9 329.56	-62,52	18 663.95	-88,66
5 180.00	-84,71	5 180.00	-87,23	10 360.40	-95,30	10 373.47	-73,87	10 366.17	-73,07	20 737.73	-84,41
5 698.00	-90,83	5 698.00	-86,99	11 396.44	-81,84	11 410.81	-87,93	11 402.79	-65,15	22 811.50	-89,98
6 216.00	-90,73	6 216.00	-88,14	12 432.48	-80,21	12 448.16	-76,86	12 439.41	-67,18		
6 734.00	-99,87	6 734.00	-83,84	13 468.52	-86,07	13 485.51	-82,56	13 476.02	-86,06		
7 252.00	-95,92	7 252.00	-85,89	14 504.55	-82,01	14 522.85	-77,25	14 512.64	-81,23		
7 770.00	-90,54	7 770.00	-89,93	15 540.59	-84,58	15 560.20		15 549.26	-88,90		
8 288.00	-97,59	8 288.00	-91,89	16 576.63	-98,86	16 597.55	-86,57	16 585.88	-92,28		
8 806.00	-92,41	8 806.00	-87,38	17 612.67	-97,07	17 634.89	-87,38	17 622.49	-94,37		
9 324.00	-93,47	9 324.00	-89,94	18 648.71	-98,86	18 672.24		18 659.11	-94,71		
9 842.00	-102,08	9 842.00	-92,73	19 684.75	-103,02	19 709.59	-95,43	19 695.73	-96,33		
10 360.00	-96,27	10 360.00	-93,61			20 746.93	-98,68	20 732.35	-97,52		
10 878.00	-97,98	10 878.00	-94,61			21 784.28	-107,79	21 768.96	-97,29		
11 396.00		11 396.00	-93,57			22 821.63	-108,12	22 805.58	-98,87		
11 914.00	-96,36	11 914.00	-93,61			23 858.97	-109,75	23 842.20	-98,66		
12 432.00	-93,40	12 432.00	-92,89								
12 950.00	-97,46	12 950.00	-92,17								
13 468.00	-97,75	13 468.00									
		13 986.00	-95,50								
		14 504.00	-96,31								

Tab. B.7: Tabulka harmonických složek tónů c^3, c^3 varhan Rieger-Kloss opus 3487

harmonická	C_0						c_0						c^1					
	Kryt S'		Flétna trubnicová S'		Flétna kopulová 4'		Kryt S'		Flétna trubnicová S'		Flétna kopulová 4'		Kryt S'		Flétna trubnicová S'		Flétna kopulová 4'	
	f [Hz]	[dB]	f [Hz]	[dB]	f [Hz]	[dB]	f [Hz]	[dB]	f [Hz]	[dB]	f [Hz]	[dB]	f [Hz]	[dB]	f [Hz]	[dB]	f [Hz]	[dB]
1.	64.90	-7,75	64.80	-8,53	131.40	-6,52	130.29	-9,43	129.58	-13,76	259.72	-8,83	259.94	-12,71	259.89	-10,03	519.86	-7,28
2.	129.83	-41,20	129.56	-42,19	262.88	-43,04	260.57	-55,90	259.17	-50,68	519.43	-49,57	519.88	-40,24	519.78	-42,75	1 039.71	-42,77
3.	194.75	-14,17	194.34	-9,86	394.32	-33,14	390.86	-14,14	388.75	-7,66	779.15	-34,38	779.83	-28,00	779.68	-17,71	1 559.57	-36,15
4.	259.67	-52,72	259.12	-53,48	525.76	-46,52	521.14	-42,12	518.33	-55,94	1 038.86	-46,47	1 039.77	-46,21	1 039.57	-51,34	2 079.42	-44,46
5.	324.58	-35,07	323.89	-33,49	657.20	-53,11	651.43	-45,13	647.92	-39,63	1 298.58	-41,84	1 299.71	-43,77	1 299.46	-50,32	2 599.28	-44,66
6.	389.50	-48,97	388.67	-52,99	788.64	-56,45	781.71	-47,07	777.50	-64,03	1 558.29	-47,53	1 559.65	-50,93	1 559.35	-55,83	3 119.13	-67,46
7.	454.41	-51,71	453.45	-42,32	920.08	-50,13	912.00	-63,35	907.08	-56,01	1 818.01	-58,43	1 819.59	-54,86	1 819.24	-63,56	3 638.99	-67,31
8.	519.33	-53,96	518.23	-57,10	1 051.52	-62,31	1 042.29	-47,00	1 036.67	-67,80	2 077.72	-68,15	2 079.54	-65,63	2 079.14	-64,57	4 158.85	-68,03
9.	584.25	-47,46	583.01	-55,73	1 182.96	-64,91	1 172.57	-62,19	1 166.25	-63,71	2 337.44	-68,99	2 339.48	-65,36	2 339.03	-70,67	4 678.70	-75,01
10.	649.16	-59,11	647.79	-63,23	1 314.40	-64,58	1 302.86	-63,32	1 295.83	-62,47	2 597.15	-73,29	2 599.42	-68,54	2 598.92	-76,35	5 198.56	-79,90
11.	714.08	-65,41	712.57	-60,27	1 445.84	-61,71	1 433.14	-60,31	1 425.41	-67,39	2 856.87	-76,25	2 859.36	-74,39	2 858.81	-79,01	5 718.41	-83,69
12.	779.00	-52,19	777.35	-67,60	1 577.28	-62,35	1 563.43	-67,05	1 555.00	-69,56	3 116.58	-73,10	3 119.30	-76,75	3 118.70	-78,79	6 238.27	-84,55
13.	843.91	-62,25	842.12	-61,97	1 708.72	-58,33	1 693.72		1 684.58		3 376.30	-73,82	3 379.25	-75,63	3 378.60	-79,59	6 758.12	-84,31
14.	908.83	-60,73	906.90	-60,73	1 840.16	-72,39	1 824.00	-64,41	1 814.16	-65,96	3 636.01	-76,52	3 639.19	-80,49	3 638.49	-83,13	7 277.98	-84,73
15.	973.74	-53,33	971.68	-54,71	1 971.60		1 954.29	-75,38	1 943.75	-75,44	3 895.73	-74,46	3 899.13	-76,82	3 898.38	-82,84	7 797.83	-85,92
16.	1 038.66	-68,23	1 036.46	-63,63	2 103.04	-71,45	2 084.57	-75,40	2 073.33	-76,20	4 155.44	-75,60	4 159.07	-78,07	4 158.27	-81,32	8 317.69	-86,75
17.	1 103.58	-75,38	1 101.24	-71,95	2 234.47		2 214.86	-75,29	2 202.91	-74,94	4 415.16	-77,36	4 419.01	-77,52	4 418.16	-80,40	8 837.55	-86,34
18.	1 168.49	-71,84	1 166.02		2 365.91	-72,50	2 345.14	-77,47	2 332.50	-77,02	4 674.87	-76,22	4 678.96	-80,08	4 678.05	-81,26	9 357.40	-88,04
19.	1 233.41	-70,64	1 230.80	-69,43	2 497.35	-74,95	2 475.43	-77,14	2 462.08	-77,17	4 934.59	-77,85	4 938.90	-81,03	4 937.95	-83,16	9 877.26	-86,36
20.	1 298.33	-66,91	1 295.58	-64,92	2 628.79	-75,27	2 605.71	-75,94	2 591.66	-78,60	5 194.30	-77,02	5 198.84	-79,23	5 197.84	-81,64	10 397.11	-86,27
21.	1 363.24	-67,85	1 360.35	-64,28	2 760.23	-75,03	2 736.00	-68,29	2 721.25	-80,94	5 454.02	-76,13	5 458.78	-84,61	5 457.73	-87,15	10 916.97	-87,70
22.	1 428.16	-72,07	1 425.13	-68,45	2 891.67	-76,96	2 866.29	-79,11	2 850.83	-79,67	5 713.73		5 718.73	-84,10	5 717.62	-86,54	11 436.82	-87,87
23.	1 493.08	-80,44	1 489.91	-75,39	3 023.11	-73,09	2 996.57		2 980.41	-80,24	5 973.45	-81,52	5 978.67	-85,74	5 977.51	-88,89	11 956.68	-86,22
24.	1 557.99	-77,30	1 554.69	-75,45	3 154.55	-76,85	3 126.86	-77,25	3 109.99	-81,01	6 233.16		6 238.61	-84,72	6 237.41	-87,46	12 476.53	-89,45
25.	1 622.91	-69,48	1 619.47	-69,89	3 285.99	-75,46	3 257.14	-79,86	3 239.58	-81,17	6 492.88	-83,85	6 498.55	-84,58	6 497.30	-89,15	12 996.39	
26.	1 687.82	-76,33	1 684.25	-71,04	3 417.43	-75,07	3 387.43	-80,51	3 369.16	-83,01	6 752.59	-84,14	6 758.49	-86,56	6 757.19	-88,58	13 516.25	-89,39
27.	1 752.74	-67,35	1 749.03	-59,40	3 548.87	-80,54	3 517.71	-79,22	3 498.74	-82,35	7 012.31	-83,17	7 018.44	-88,25	7 017.08	-89,12		
28.	1 817.66	-73,80	1 813.81	-70,83			3 648.00	-81,74	3 628.33	-83,55			7 276.97	-89,23				

Tab. B.8: Tabulka hromonických složek tónů C_0 , c^0 , c^1 varhan Rieger-Kloss opus 3519

c^2						c^3					
Kryt S'		Flétna trubnicová S'		Flétna kopulová 4'		Kryt S'		Flétna trubnicová S'		Flétna kopulová 4'	
f [Hz]	[dB]	f [Hz]	[dB]	f [Hz]	[dB]	f [Hz]	[dB]	f [Hz]	[dB]	f [Hz]	[dB]
518.00	-4,11	518.00	-5,43	1 036.04	-5,73	1 037.35	-6,76	1 036.62	-9,56	2 073.77	-17,09
1 036.00	-45,32	1 036.00	-39,40	2 072.08	-52,66	2 074.69	-57,34	2 073.23	-41,66	4 147.55	-53,31
1 554.00	-47,58	1 554.00	-28,90	3 108.12	-44,27	3 112.04	-53,06	3 109.85	-43,98	6 221.32	-42,62
2 072.00	-53,20	2 072.00	-55,45	4 144.16	-56,62	4 149.39	-47,10	4 146.47	-49,19	8 295.09	-43,59
2 590.00	-49,61	2 590.00	-58,51	5 180.20	-53,32	5 186.73	-46,53	5 183.09	-44,31	10 368.86	-61,83
3 108.00	-55,73	3 108.00	-51,13	6 216.24	-62,01	6 224.08	-65,61	6 219.70	-55,67	12 442.64	-59,85
3 626.00	-65,56	3 626.00	-56,94	7 252.28	-70,18	7 261.43	-62,30	7 256.32	-64,95	14 516.41	-69,23
4 144.00	-68,55	4 144.00	-64,39	8 288.32	-84,05	8 298.77	-77,16	8 292.94	-71,96	16 590.18	-62,10
4 662.00	-77,02	4 662.00	-72,31	9 324.36	-77,69	9 336.12	-87,71	9 329.56	-62,52	18 663.95	-88,66
5 180.00	-84,71	5 180.00	-87,23	10 360.40	-95,30	10 373.47	-73,87	10 366.17	-73,07	20 737.73	-84,41
5 698.00	-90,83	5 698.00	-86,99	11 396.44	-81,84	11 410.81	-87,93	11 402.79	-65,15	22 811.50	-89,98
6 216.00	-90,73	6 216.00	-88,14	12 432.48	-80,21	12 448.16	-76,86	12 439.41	-67,18		
6 734.00	-99,87	6 734.00	-83,84	13 468.52	-86,07	13 485.51	-82,56	13 476.02	-86,06		
7 252.00	-95,92	7 252.00	-85,89	14 504.55	-82,01	14 522.85	-77,25	14 512.64	-81,23		
7 770.00	-90,54	7 770.00	-89,93	15 540.59	-84,58	15 560.20		15 549.26	-88,90		
8 288.00	-97,59	8 288.00	-91,89	16 576.63	-98,86	16 597.55	-86,57	16 585.88	-92,28		
8 806.00	-92,41	8 806.00	-87,38	17 612.67	-97,07	17 634.89	-87,38	17 622.49	-94,37		
9 324.00	-93,47	9 324.00	-89,94	18 648.71	-98,86	18 672.24		18 659.11	-94,71		
9 842.00	-102,08	9 842.00	-92,73	19 684.75	-103,02	19 709.59	-95,43	19 695.73	-96,33		
10 360.00	-96,27	10 360.00	-93,61			20 746.93	-98,68	20 732.35	-97,52		
10 878.00	-97,98	10 878.00	-94,61			21 784.28	-107,79	21 768.96	-97,29		
11 396.00		11 396.00	-93,57			22 821.63	-108,12	22 805.58	-98,87		
11 914.00	-96,36	11 914.00	-93,61			23 858.97	-109,75	23 842.20	-98,66		
12 432.00	-93,40	12 432.00	-92,89								
12 950.00	-97,46	12 950.00	-92,17								
13 468.00	-97,75	13 468.00									
		13 986.00	-95,50								
		14 504.00	-96,31								

Tab. B.9: Tabulka hromonických složek tónů c^3 , c^3 varhan Rieger-Kloss opus 3519

tón – klávesa	Kryt S'		Flétna trubicová S'		Flétna kopulová 4'		Salicionál S'		Principál S'		Trompeta S'	
	c^0		c^0		C_0		c^0		c^0		c^0	
n-tá harmonická	f [Hz]	[dB]	f [Hz]	[dB]	f [Hz]	[dB]	f [Hz]	[dB]	f [Hz]	[dB]	f [Hz]	[dB]
1.	129,98	-6,49	130,08	-7,90	129,29	-7,79	129,42	-11,41	128,35	-10,94	128,11	-26,06
2.	259,97	-40,97	260,17	-55,24	258,57	-48,49	258,84	-34,07	256,70	-10,33	256,22	-20,93
3.	389,95	-27,93	390,25	-26,52	387,86	-45,27	388,26	-37,32	385,05	-31,01	384,33	-23,61
4.	519,93	-54,11	520,33	-49,78	517,14	-41,55	517,68	-51,17	513,40	-29,67	512,44	-24,00
5.	649,92	-58,19	650,42	-45,93	646,43	-61,56	647,10	-51,44	641,75	-42,39	640,56	-20,86
6.	779,90	-64,44	780,50	-66,10	775,71	-48,00	776,52	-49,25	770,10	-36,32	768,67	-17,59
7.	909,88	-77,79	910,59	-75,95	905,00	-67,70	905,94	-56,97	898,45	-46,09	896,78	-18,44
8.	1 039,87	-69,03	1 040,67	-71,47	1 034,29	-73,50	1 035,36	-64,99	1 026,80	-44,13	1 024,89	-18,21
9.	1 169,85	-76,00	1 170,75	-70,77	1 163,57		1 164,77	-55,89	1 155,15	-43,18	1 153,00	-30,51
10.	1 299,84	-74,36	1 300,84	-74,91	1 292,86	-74,00	1 294,19	-66,90	1 283,50	-59,85	1 281,11	-30,39
11.	1 429,82	-80,51	1 430,92	-77,41	1 422,14	-79,31	1 423,61	-68,99	1 411,84	-48,47	1 409,22	-23,24
12.	1 559,80	-82,63	1 561,00	-79,36	1 551,43	-83,12	1 553,03	-59,66	1 540,19	-63,88	1 537,33	-41,02
13.	1 689,79	-83,20	1 691,09	-80,91	1 680,71	-81,80	1 682,45	-71,17	1 668,54	-52,77	1 665,44	-32,06
14.	1 819,77	-84,52	1 821,17	-82,52	1 810,00	-82,34	1 811,87	-74,26	1 796,89	-69,60	1 793,56	-34,89
15.	1 949,75	-83,35	1 951,25	-81,18	1 939,29	-81,24	1 941,29	-70,52	1 925,24	-63,68	1 921,67	-37,04
16.	2 079,74	-83,10	2 081,34	-77,90	2 068,57	-80,02	2 070,71	-74,32	2 053,59	-78,32	2 049,78	-44,85
17.	2 209,72	-81,30	2 211,42	-77,41	2 197,86	-81,58	2 200,13	-76,97	2 181,94	-71,08	2 177,89	-50,66
18.	2 339,70	-86,57	2 341,50	-81,37	2 327,14	-84,24	2 329,55	-76,02	2 310,29	-76,92	2 306,00	-49,68
19.	2 469,69	-81,70	2 471,59	-79,36	2 456,43	-81,05	2 458,97	-79,84	2 438,64	-70,20	2 434,11	-61,00
20.	2 599,67	-84,34	2 601,67	-82,20	2 585,71	-84,18	2 588,39	-78,33	2 566,99	-75,52	2 562,22	-50,72
21.	2 729,65	-83,70	2 731,75	-80,19	2 715,00	-83,63	2 717,81	-78,54	2 695,34	-82,87	2 690,33	-64,36
22.	2 859,64	-87,23	2 861,84		2 844,29	-82,30	2 847,23	-79,90	2 823,69	-79,86	2 818,44	-67,00
23.	2 989,62	-85,65	2 991,92	-82,47	2 973,57	-84,63	2 976,65	-82,60	2 952,04	-79,39	2 946,56	-66,25
24.	3 119,60	-86,58	3 122,01		3 102,86	-85,32	3 106,07	-77,59	3 080,39	-83,07	3 074,67	-66,50
25.	3 249,59		3 252,09	-82,40	3 232,14	-86,07	3 235,48	-80,43	3 208,74	-86,76	3 202,78	-67,52
26.	3 379,57	-86,45	3 382,17	-83,83	3 361,43	-86,25			3 337,09	-88,53	3 330,89	-52,93
27.	3 509,55				3 490,72		3 494,32	-81,02	3 465,44	-84,71	3 459,00	-65,96
28.	3 509,55	-88,95			3 620,00	-85,59	3 623,74	-81,31			3 587,11	-58,51

Tab. B.10: Tabulka porovnání harmonických složek tónu c^0 napříč rejstříky různých skupin hlasů