



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

ANALÝZA IMPEDANČNÍCH VLASTNOSTÍ KOBYLKY U STRUNNÝCH NÁSTROJŮ

THE ANALYSIS OF IMPEDANCE PROPERTIES OF THE BRIDGE IN STRING INSTRUMENTS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Petr Němec

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

MgA. Mgr. Ondřej Jirásek, Ph.D.

BRNO 2022

Bakalářská práce

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

Student: Petr Němec

ID: 221480

Ročník: 3

Akademický rok: 2021/22

NÁZEV TÉMATU:

Analýza impedančních vlastností kobyly u strunných nástrojů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

V případě nejméně dvou smyčkových a dvou drnkacích strunných nástrojů student pro každý z nástrojů vyrobí minimálně 3 testovací kobyly. Kobyly budou vyrobeny z materiálů, které mají odlišné mechanicko-akustické vlastnosti, a to především akustický odpor. Zaměřte u nich také hustotu, rychlost zvuku, akustickou konstantu ad. parametry. Kobyly budou vyrobeny z různých dřev, ale i z dalších substitučních materiálů. Může u nich rovněž měnit rozměry i tvar.

Nejméně pro dva smyčkové a dva drnkací strunné nástroje vyrobte minimálně tři testovací kobyly. Kobyly budou vyrobeny z materiálů, které mají odlišné mechanicko-akustické vlastnosti, a to především akustický odpor. Změřte u nich také hustotu, rychlost zvuku, akustickou konstantu a další parametry. Kobyly budou vyrobeny z různých dřev, ale i z dalších substitučních materiálů. Můžete u nich rovněž měnit rozměry i tvar. V modelovacím programu (např. ANSYS) proveďte simulaci vibračních a vodivých vlastností kobylek a zvažte ortotropní vlastnosti materiálů. Změřte i mechanicko-akustické vlastnosti kobylek u stávajících dvou smyčkových a dvou drnkacích strunných nástrojů i proveďte jejich simulaci v modelovacím programu. Poté u nástrojů vyměňte kobyly a nahrajte a změřte kmitočtovou charakteristiku vybraných a barevně nejodlišnějších tónů. Ze získaných dat a počítačové simulace vyvodte impedanční vlastnosti kobylek a popište, jak je daný materiál kmitočtově závislý a jaký má vliv na spektrum. Vezměte i v potaz vlastnosti strun a hlavně rezonanční skříně a žebroví, roznášejícího vibrace dále do nástroje.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

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

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

Termín zadání: 7.2.2022

Termín odevzdání: 31.5.2022

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

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

ABSTRAKT

Je známým faktem, že kobylky akustických nástrojů tvoří důležitý prvek v „akustickém obvodu“ těl těchto nástrojů. Jejich funkce zastává akustický filtr, který má vliv především v pásmu 2 – 6 kHz a vyšších frekvencích.

Zůstává zde prostor pro odhalení spojitostí mezi vlivem konkrétních mechanicko–akustických vlastností materiálu samotné kobylky na akustické vlastnosti celého nástroje. Cílem je odhalit tyto spojitosti pro vybrané vzorky materiálů s vlastnostmi v rozsahu běžně používaných materiálů i s vlastnostmi extrémními.

Jsou navrženy experimenty, které změní vlastnosti materiálů a z těchto materiálů se vyrobí kobylky, které jsou následně za konstantních podmínek změřeny.

Na základě výsledků jsou navrženy možné spojitosti a doporučen další výzkum.

KLÍČOVÁ SLOVA

Akustická kytara, housle, strunné hudební nástroje, kytarová kobylka, houslová kobylka, témbra, formant, Youngův modul pružnosti, akustická konstanta, akustická impedance, zvukové spektrum, směrová charakteristika.

ABSTRACT

It is a known fact that stringed instruments bridge makes an important part of "acoustic circuit" of their bodies. Bridge acts as an acoustic filter which has the biggest impact on 2 – 6 kHz band and high frequency bands.

To find the connection between the impact of a specific acoustic and mechanical properties of a bridge and acoustical behavior of the entire instrument remains as a matter of further exploration.

Aim of this thesis is to find the mentioned relations of a chosen materials in an accordance to their mechanical properties within a full range of materials with common bridge properties.

The experiments are designed to determine mechanical and acoustic properties of chosen materials which are then used to fabricate bridges. Subsequently the acoustical behavior of instruments with chosen bridges is determined.

Based upon these findings we propose specific solutions and suggest further research.

KEYWORDS

Acoustic guitar, violin, stringed musical instruments, guitar bridge, violin bridge, timbre, formant, Young's elasticity modulus, acoustic constant, acoustic impedance, sound frequency spectrum, sound radiation.

NĚMEC, Petr. *Analýza impedančních vlastností kobylky u strunných nástrojů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2022, 120 s. Bakalářská práce. Vedoucí práce: MgA. Mgr. Ondřej Jirásek, Ph.D.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení autora: Petr Němec
VUT ID autora: 221480
Typ práce: Bakalářská práce
Akademický rok: 2021/22
Téma závěrečné práce: Analýza impedančních vlastností kobylinky u strunných nástrojů

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné 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 uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom 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*

*Autor podepisuje pouze v tištěné verzi.

PODĚKOVÁNÍ

Předně bych chtěl poděkovat vedoucímu semestrální práce panu MgA. Mgr. Ondřeji Jiráskovi, Ph.D. za odborné vedení, pomoc při měření, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci. Dále bych chtěl poděkovat doc. Ing. Jiřímu Schimmelovi, Ph.D. za ochotu a pomoc při měření v bezodrazové komoře a za vypůjčení vybavení. Za ochotné vypůjčení techniky bych rovněž rád poděkoval svému kolegovi Ondřeji Pernicovi. Také bych rád poděkoval Dominiku Poločkovi za propůjčení svého nástroje a ochoty zúčastnit se měření. V neposlední řadě děkuji také firmě Furch, která propůjčila testovací rezonanční tělo kytary a vyrobila některé kytarové kobylinky.

Obsah

Úvod	14
Cíle práce	15
1 Teoretický úvod	16
1.1 Strunné nástroje	16
1.1.1 Materiály a jejich vlastnosti	16
1.1.2 Funkce kobylky	20
1.1.3 Směrová charakteristika	20
1.1.4 Frekvenční spektrum	21
1.2 Metodika měření	21
1.2.1 Způsob zpracování dat	23
1.2.2 Měření a výpočet mechanicko-akustických vlastností materi- álů kobylek	24
1.2.3 Měření frekvenční a směrové charakteristiky	26
1.3 Hudební akustika	27
1.3.1 Požadavky na hráče	27
1.3.2 Termíny z hudební teorie	28
2 Fyzikální vlastností materiálů kobylek	30
2.1 Vlastnosti kobylek houslí	30
2.2 Vlastnosti kobylek kytar	31
3 Výsledky experimentu s houslemi	35
3.1 Výsledky spektrální analýzy houslí	35
3.1.1 Měření s mikrofonom DPA	35
3.1.2 Měření v bezodrazové komoře mikrofonomem Brüel & Krøjer	37
3.2 Výsledky analýzy směrového vyzařování houslí	38
3.2.1 Hrané primy v pianu	38
3.2.2 Hrané primy ve forte	39
3.2.3 Hrané kvinty v pianu	39
3.2.4 Hrané kvinty ve forte	39
3.2.5 Hrané oktávy v pianu	40
3.2.6 Hrané oktávy ve forte	40
4 Výsledky experimentu s kytarou	41
4.1 Měření spektra kytary	41
4.1.1 Buk lignamon	41

4.1.2	Cocobolo	42
4.1.3	Africký eben	43
4.1.4	Jasan	44
4.1.5	Jatoba	45
4.1.6	Lípa	45
4.1.7	Eben macassar	46
4.1.8	Padouk	47
4.1.9	Smrk	48
4.1.10	Ziricote	48
4.2	Měření směrové charakteristiky kytary	49
4.2.1	Buk lignamon	50
4.2.2	Cocobolo	50
4.2.3	Africký eben	50
4.2.4	Jasan	50
4.2.5	Jatoba	50
4.2.6	Lípa	51
4.2.7	Eben macassar	51
4.2.8	Padouk	51
4.2.9	Smrk	51
4.2.10	Ziricote	51
5	Shrnutí výsledků	52
5.1	Shrnutí spektrální analýzy	52
5.1.1	Shrnutí spektra houslí	52
5.1.2	Shrnutí spektra kytary	53
5.2	Shrnutí analýzy směrové charakteristiky	57
5.2.1	Analýza směrové charakteristiky houslí	57
5.2.2	Analýza směrové charakteristiky kytary	57
	Závěr	58
	Seznam symbolů a zkratk	64
	Seznam příloh	65
A	Obrazová příloha	66
A.1	Výsledky prvního experimentu	66
A.1.1	Grafy kmitočtové charakteristiky houslí	66
A.1.2	Grafy směrové charakteristiky houslí	75
A.2	Výsledky druhého experimentu	81

A.2.1	Grafy kmitočtové charakteristiky kytary	81
A.2.2	Grafy směrové charakteristiky kytary	111
B	Zkrácený výpis kódu z Matlabu	115
B.1	Kód pro vygenerování spektrografů v Matlabu	115
B.2	Kód pro vygenerování směrové charakteristiky v Matlabu	116
C	Obsah elektronické přílohy	119

Seznam obrázků

1.1	Zvukové spektrum prázdných strun houslí z [16]	21
1.2	Výroba kobylek	22
1.3	Vyrobené kytarové kobylky	22
1.4	Screenshot označovaného projektu v Cubase z nahrávání v bezodrazové komoře	24
1.5	Schéma rozestavení mikrofonů v mikrofonním poli pro housle	24
1.6	Přístroj na měření rychlosti zvuku pomocí ultrazvuku	25
1.7	Mikrofony použité při měřeních v bezodrazové komoře	26
1.8	Měření vibrometrem	28
2.1	Srovnání dřevěné a plastové kobylky	30
2.2	Plastová kobylka upevněná na housle	30
2.3	Měření rychlosti šíření zvuku ultrazvukem	32
3.1	Foto z průběhu prvního experimentu 1	35
4.1	Vzorky dřeva před zpracováním do tvaru strunníku (kobylky) 1	41
4.2	Vzorky dřeva před zpracováním do tvaru strunníku (kobylky) 2	44
4.3	Vzorky dřeva před zpracováním do tvaru strunníku (kobylky) 3	47
4.4	Příprava půlkruhu mikrofonů pro měření směrovosti.	49
5.1	Nastavení mikrofonu DPA	52
A.1	Modulová charakteristika javorové kobylky - tón g1	66
A.2	Modulová charakteristika plastové kobylky - tón g1	67
A.3	Modulová charakteristika javorové kobylky - tón d1	67
A.4	Modulová charakteristika plastové kobylky - tón d1	68
A.5	Modulová charakteristika javorové kobylky - tón a1	68
A.6	Modulová charakteristika plastové kobylky - tón a1	69
A.7	Modulová charakteristika javorové kobylky - tón e2	69
A.8	Modulová charakteristika plastové kobylky - tón e2	70
A.9	Modulová charakteristika javorové kobylky - tón g1	70
A.10	Modulová charakteristika plastové kobylky - tón g	71
A.11	Modulová charakteristika javorové kobylky - tón d1	71
A.12	Modulová charakteristika plastové kobylky - tón d1	72
A.13	Modulová charakteristika javorové kobylky - tón a1	72
A.14	Modulová charakteristika plastové kobylky - tón a1	73
A.15	Modulová charakteristika javorové kobylky - tón e2	73
A.16	Modulová charakteristika plastové kobylky - tón e2	74
A.17	Směrová vyzařovací charakteristika - javorová kobylka, hrané primy v pianu	75
A.18	Směrová vyzařovací charakteristika - PLA kobylka, hrané primy v pianu	75

A.19 Směrová vyzařovací charakteristika - javorová kobylka, hrané primy ve forte	76
A.20 Směrová vyzařovací charakteristika - PLA kobylka, hrané primy ve forte	76
A.21 Směrová vyzařovací charakteristika - javorová kobylka, hrané kvinty v pianu	77
A.22 Směrová vyzařovací charakteristika - PLA kobylka, hrané kvinty v pianu	77
A.23 Směrová vyzařovací charakteristika - javorová kobylka, hrané kvinty ve forte	78
A.24 Směrová vyzařovací charakteristika - PLA kobylka, hrané kvinty ve forte	78
A.25 Směrová vyzařovací charakteristika - javorová kobylka, hrané oktávy v pianu	79
A.26 Směrová vyzařovací charakteristika - PLA kobylka, hrané oktávy v pianu	79
A.27 Směrová vyzařovací charakteristika - javorová kobylka, hrané oktávy ve forte	80
A.28 Směrová vyzařovací charakteristika - PLA kobylka, hrané oktávy ve forte	80
A.29 Kmitočtová charakteristika, materiál buk, tón a2	81
A.30 Kmitočtová charakteristika, materiál buk, tón c4	82
A.31 Kmitočtová charakteristika, materiál buk, tóny a3 a c5	83
A.32 Kmitočtová charakteristika, materiál cocobolo, tón a2	84
A.33 Kmitočtová charakteristika, materiál cocobolo, tón c4	85
A.34 Kmitočtová charakteristika, materiál cocobolo, tóny a3 a c5	86
A.35 Kmitočtová charakteristika, materiál eben, tón a2	87
A.36 Kmitočtová charakteristika, materiál eben, tón c4	88
A.37 Kmitočtová charakteristika, materiál eben, tóny a3 a c5	89
A.38 Kmitočtová charakteristika, materiál jasan, tón a2	90
A.39 Kmitočtová charakteristika, materiál jasan, tón c4	91
A.40 Kmitočtová charakteristika, materiál jasan, tóny a3 a c5	92
A.41 Kmitočtová charakteristika, materiál jatoba, tón a2	93
A.42 Kmitočtová charakteristika, materiál jatoba, tón c4	94
A.43 Kmitočtová charakteristika, materiál jatoba, tóny a3 a c5	95
A.44 Kmitočtová charakteristika, materiál lípa, tón a2	96
A.45 Kmitočtová charakteristika, materiál lípa, tón c4	97
A.46 Kmitočtová charakteristika, materiál lípa, tóny a3 a c5	98
A.47 Kmitočtová charakteristika, materiál eben macassar, tón a2	99

A.48	Kmitočtová charakteristika, materiál eben macassar, tón c4	100
A.49	Kmitočtová charakteristika, materiál eben macassar, tóny a3 a c5	101
A.50	Kmitočtová charakteristika, materiál padouk, tón a2	102
A.51	Kmitočtová charakteristika, materiál padouk, tón c4	103
A.52	Kmitočtová charakteristika, materiál padouk, tóny a3 a c5	104
A.53	Kmitočtová charakteristika, materiál smrk, tón a2	105
A.54	Kmitočtová charakteristika, materiál smrk, tón c4	106
A.55	Kmitočtová charakteristika, materiál smrk, tóny a3 a c5	107
A.56	Kmitočtová charakteristika, materiál ziricote, tón a2	108
A.57	Kmitočtová charakteristika, materiál ziricote, tón c4	109
A.58	Kmitočtová charakteristika, materiál ziricote, tóny a3 a c5	110
A.59	Směrová vyzařovací charakteristika kytara, materiál buk	111
A.60	Směrová vyzařovací charakteristika kytara, materiál cocobolo	111
A.61	Směrová vyzařovací charakteristika kytara, materiál eben	111
A.62	Směrová vyzařovací charakteristika kytara, materiál jasan	112
A.63	Směrová vyzařovací charakteristika kytara, materiál jatoba	112
A.64	Směrová vyzařovací charakteristika kytara, materiál lípa	112
A.65	Směrová vyzařovací charakteristika kytara, materiál eben macassar	113
A.66	Směrová vyzařovací charakteristika kytara, materiál padouk	113
A.67	Směrová vyzařovací charakteristika kytara, materiál smrk	113
A.68	Směrová vyzařovací charakteristika kytara, materiál ziricote	114

Seznam tabulek

1.1	Průměrná rychlost zvuku rovnoběžně a kolmo na vlákna v dřevě některých dřevin (převzato z [3])	19
2.1	Přehled zjištěných akustických veličin materiálů kobylek houslí	30
2.2	Činitel pohltivosti dřeva a plastu - převzato z [22] a [23].	31
2.3	Přehled vlastností kobylek od firmy Furch	32
2.4	Přehled zjištěných akustických veličin materiálů kobylek kytar	34
4.1	Porovnání hodnot modulů harmonických složek flažoletů ebenové kobylky	44

Úvod

Může mít mechanická hustota kobylky vliv na spektrum a směrové vyzařování houslí? Jak je tomu u kytary?

Přesněji se tato práce zabývá nepřímou analýzou akusticky impedančních vlastností kobylek strunných nástrojů resp. analýzou spektra a směrového vyzařování houslí s dvěma kobylkami různých mechanicko-akustických vlastností a to především akustické impedance (přesněji její reálné části) a kytarového těla s modifikovaným testovacím krkem pro šest testovacích kobylkami, a čtyři původní kobylky, celkem tedy šest kobylek.

V teoretickém úvodu jsou tři části, jedna se věnuje teorii celkové teorii strunných nástrojů, se zaměřením na věci potřebné a spojené s jejich kobylkami a analýzou vlastností těchto kobylek, ať už ve spektru, či směrovém vyzařování, atd. Druhá část se věnuje samotnému návrhu a metodice měření, tedy experimentů, které jsou hlavním předmětem práce. Poslední kapitola se zabývá více uměleckým pohledem na tematiku a snaží se vysvětlit důležité pojmy z hudební akustiky, které budou v praktické části hrát důležitou roli.

Dále následují tři kapitoly, které odpovídají třem rovinám hudebně akustické analýzy kobylek strunných nástrojů. První analýza samotných fyzikálních vlastností použitých materiálů. Dále analýza dvou různých nástrojů: houslí a kytary.

V kapitole č. 3 je popsán experiment s houslemi. Na základě tohoto experimentu byl navržen experiment pro kytaru.

V neposlední řadě přichází pravděpodobně nejdůležitější kapitola č. 5, která předchází tři části spojuje v souvislostech.

Jelikož bylo analyzováno velké množství vzorků, jsou všechny grafy pro přehlednost v příloze A.

Cíl práce

Cílem práce je zjistit jaký vliv má materiál, a to především hustota, rychlost šíření zvuku, akustická konstanta a reálná část akustického odporu kobylky strunného hudebního nástroje na akustické vlastnosti tohoto nástroje. Provést měření díky kterému lze analyzovat spektrum a směrovost nástroje a posoudit, jaký vliv má na tyto oblasti materiál, ze kterého je vyrobena kobylka, přesněji zmíněné fyzikální vlastnosti tohoto materiálu.

Tato práce se zprvu zaměřujeme na smyčcový nástroj housle, se dvěma různými kobylkami. Jedna z „měkkého“, ortotropního (viz str.16) materiálu - *javorového dřeva*, druhá z „tvrdšího“, izotropního plastu - *Polylactic Acid (PLA)*. Na tomto experimentu je ověřeno zda má další měření smysl a zda lze opravdu pozorovat nějaký rozdíl.

Poté je, na základě prvního experimentu, navržen podobný experiment pro kytaru, tentokrát s větším množstvím kobytek z odlišných materiálů.

Jedním z cílů je aby druhý experiment byl co nejpřesnější, proto by vlastnosti většiny kobytek v druhém experimentu měli být změřeny pro konkrétní vzorky, nikoliv průměrné tabulkové hodnoty.

1 Teoretický úvod

V následujících kapitolách je nejdříve nastíněna teorie o akustice strunných nástrojů, resp. houslí a kytary. Dále je diskutován vliv materiálu (především různých druhů dřevin) na akustiku, resp. na akustické veličiny a obecné mechanicko-akustické vlastnosti různých materiálů. V neposlední řadě bude rozebrána funkce kobylky z hlediska hudební akustiky (o kterých píše např. [1]). Poté je vysvětlena metodika měření, použitá technika, rozestavení mikrofonů v mikrofonním poli, princip výměny kobylek během měření, atd.

Jelikož je cílem práce prozkoumat hudebně-akustický vliv kobylek různých mechanicko-akustických vlastností pokusíme se v následujících kapitolách mimo jiné odůvodnit výběr materiálu a odhadnout jaké rozdíly lze měřením zjistit a očekávat.

1.1 Strunné nástroje

Více do hloubky hovoří o akustice strunných nástrojů například [2]. Zde jsou probrány především dvě oblasti:

a) *Fyzikální vlastnosti kobylek strunných nástrojů* – vlastnosti, které souvisí s vyhodnocením výsledků měření: hustota materiálu kobylek, rychlost šíření zvuku v tomto materiálu, akustická impedance tohoto materiálu, akustická konstanta, atd. To vše rozebráno v kap. 1.1.1

b) *Hudební akustika houslí a kytar* – jaké spektrum mají housle jako celek a kterým směrem vyzařují? Má to kytara stejně? na tyto otázky se pokusí odpovědět kap. 1.1.4 a 1.1.3.

1.1.1 Materiály a jejich vlastnosti

Především se tato práce zaměřuje na konkrétní dostupné materiály, ze kterých jsou vyrobeny testovací kobylky, jež se dále používají v praktické části. Tedy obecně na dřevo a v případě testovací kobylky houslí plast.

Obecné akusticko-mechanické vlastnosti

Na začátek: jaké jsou obecné mechanicko-akustické vlastnosti použitých materiálů?

Základní vlastností dřeva je jeho anizotropie, neboli **ortotropie**, jak např. tvrdí Požgaj, či Bucur v [3], [4] – Hoffman v [5] přináší mírně odlišný pohled, kdy lze na ortotropii nahlížet jako na speciální případ anizotropie. V této práci jsou tyto pojmy brány jako synonyma.

To znamená, že vlastnosti – především **pružnost** a **poddajnost** – které úzce souvisí s akustickými vlastnostmi se v různých rovinách liší svou pružností, pevností a poddajností. [6]

Existují tři roviny pružné symetrie ([3], [4]):

- *příčná rovina \mathbf{L}* , která je kolmá na vlákna, přičemž se zanedbává změna mechanických (pružnostních a pevnostních) vlastností podél výšky kmene,
- *radiální rovina \mathbf{R}* , kterou je možné brát jako rovinu symetrie pružných vlastností jen pokud je zakřivení letokruhů zanedbatelné (poloměr zakřivení r je větší, než 10 cm),
- *tangenciální rovina \mathbf{T}* , když zanedbáme změnu pružnostních vlastností podél průměru kmene.

Ortotropie může způsobit, že se materiál bude chovat jako „slabý“ akustický filtr [7], [4]. Přičemž bylo zpozorováno, že dřevo obecně vykazuje velmi silnou ortotropii (což je dáno uspořádáním jeho buněčné struktury) [4].

Oproti tomu plast je izotropní materiál – tzn. že má v každém směru objemu stejné mechanické vlastnosti [3].

Hustota

Podle Požgaje, [3], hustotu dřeva dává hmotnost jednotkového objemu dřeva při určité vlhkosti:

$$\rho_0 = \frac{m_0}{V_0}, \quad (1.1)$$

kde ρ_0 je hustota, m_0 hmotnost a V_0 objem absolutně vysušeného dřeva.

Pro potřeby naší práce lze zanedbat ostatní druhy hustoty popsané v [3], které uvažují vlhkost dřeva vyšší nežli 30 %. Dřevo ze kterého jsou testovací kobylinky jak pro housle, tak pro kytaru mělo během měření vlhkost přibližně 20 %.

Pro plast uvažujeme obecný vzorec, který platí pro izotropní pevné materiály, tedy $\rho = \frac{m}{V}$.

Youngův modul pružnosti

Moduly pružnosti obecně vyjadřují vnitřní odpor materiálu vůči pružné deformaci. Čím je modul větší, tím větší napětí je potřebné pro vyvolání deformace. Značí se E . [3]

V kontextu této práce budou sloužit jeho tabulkové hodnoty (viz. 2.1) pro první experiment s houslemi jako výchozí bod pro výpočet rychlosti šíření zvuku v daných materiálech.

Woodhouse v [8] upozorňuje, že je třeba dát si pozor na dynamický modul pružnosti, který může být u materiálů 2–20 krát větší.

Pro druhý experiment s kytarou jsou již všechny moduly i další vlastnosti vypočteny z reálně změřených hodnot (tedy jsou přesné pro konkrétní měřené vzorky). Pro dynamický modul pružnosti se dokonce v jednom směru porovnávají dvě metody měření, které mají drobnou odchylku, více do hloubky probráno ve výsledcích měření na straně 31.

Zde je výčet vzorců pro výpočet dynamických modulů používaných v druhém experimentu – postup jejich praktického měření se popisuje později v 1.2.2:

Modul zjištěn z rychlosti šíření zvuku [9], [10], [11]:

$$E = \rho v^2, \quad (1.2)$$

kde ρ je hustota daného vzorku a v je rychlost šíření zvuku v daném materiálu.

Při dosazení $v = L \cdot f$ se dostane modul pomocí frekvenčně rezonanční metody [9], [10], [11]:

$$E = 4\rho f^2 L^2, \quad (1.3)$$

kde f je frekvence, kterou vyzařuje při reakci na impuls ve směru, jehož délku odpovídá L . [9], [10], [11]

Při zanedbání účinků smyku se dá získat modul v ohybu pomocí [9], [10], [11]:

$$E_B = \left(\frac{2f_n}{\gamma_n \pi} \right)^2 \frac{ml^3}{I}, \quad (1.4)$$

kde f_n je frekvence ohybových kmitů, n je číslo módu kmitání (zde 1), m je hmotnost tělesa, l je délka tělesa, γ_n zohlednění vlastního tvaru a platí $\gamma_n = (n + 0,5)^2$, I moment setrvačnosti průřezu tělesa, pro obdélníkový průřez určen vztahem 1.5

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12}, \quad (1.5)$$

kde b je šířka průřezu tělesa a h je výška jeho průřezu.

Rychlost šíření zvuku

Obecně platí rovnice pro rychlost:

$$v = \frac{L}{t}, \quad (1.6)$$

L je vzdálenost, kterou zvuk urazí, za dobu t , neboli v tomto případě za čas šíření elastické vlny (zvuku). [12]

Zároveň pro rychlost šíření zvuku platí podle [3] následující rovnice:

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (1.7)$$

kde E je Youngův modul pružnosti a ρ je hustota materiálu.

Pro experiment založený na principu výpočtu rychlosti šíření zvuku z frekvenční impulsní odezvy v daném směru lze využít rovnici:

$$f = \frac{c}{L}, \quad (1.8)$$

Pro každou dřevinu se poměr těchto rychlostí může lišit, pro výpočet vlastností javoru v prvním experimentu s houslemi postačí výtah z tabulky převzaté z [3]:

Druh dřeviny	Průměrná hustota [kg·m ⁻³]	Průměrné hodnoty modulu pružnosti [MPa]	Průměrná rychlost [m·s ⁻¹]	Poměr zvuku $\frac{c_{\parallel}}{c_{\perp}}$
...
Javor	630	$E_{\parallel} = 9400;$ $E_{\perp} = 915$	$v_{\parallel} = 3826;$ $v_{\perp} = 1194$	3,21
...

Tab. 1.1: Průměrná rychlost zvuku rovnoběžně a kolmo na vlákna v dřevě některých dřevin (převzato z [3])

Akustický odpor

Odpor vůči rovinné zvukové vlně, který lze vypočítat pomocí vzorce [3]:

$$Z = \rho \cdot c = \rho \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (1.9)$$

se nazývá akustický vlnový odpor a značí se Z .

Akustická konstanta

Souvisí s rezonančními vlastnostmi materiálu. Akustická konstanta, neboli konstanta akustického vyzařování říká, jaké jsou rezonanční vlastnosti daného materiálu. [3], [13]

Lze ji vypočítat pomocí vzorce [3]:

$$K_A = \sqrt{\frac{E}{\rho^3}} \quad (1.10)$$

Činitel akustické pohltivosti materiálu

Podle [13] je koeficient absorpce zvuku α dán podílem zvukového výkonu P_a pohlceného prostředím, do něhož vniká zvuk z okolí, a celkového zvukového výkonu P , dopadajícího na povrch tohoto prostředí. Je dán vztahem:

$$\alpha = \frac{P_a}{P}, \quad (1.11)$$

neboli:

$$\alpha = \frac{I_2}{I_1}, \quad (1.12)$$

kde I_2 je rozdíl akustických intenzit, tj. akustické energie dopadající a akustické energie odražené (I_1). [13]

1.1.2 Funkce kobylyky

Vibrující oscilátor, v případě strunných nástrojů struna (jejíž oscilační funkce je aproximací trojúhelníkového signálu [14]), působí silami na horní část kobylyky, která přenáší tyto síly na přední desku těla nástroje. [8]

Energie přenesená přes kobylyku houslí bude modifikována a to typicky dvěma rezonančními pásmy [8]: (a) První okolo 2–3kHz, ve kterém dochází k pohybu horní části kobylyky ze strany na stranu, kdy hlavní osou pohybu je „krk“ kobylyky (viz obr. 2.1); (b) Druhá okolo 6 kHz, ve kterém dochází k pohybu v kolmé ose na první rezonanční pásmo a osa pohybu se nachází níže, v oblasti „nožek“ kobylyky (v případě houslí).

Při spektrální analýze se můžeme soustředit právě na změny v těchto pásmech, která by měla souviset s mechanicko–akustickými rozdíly testovacích kobylyk.

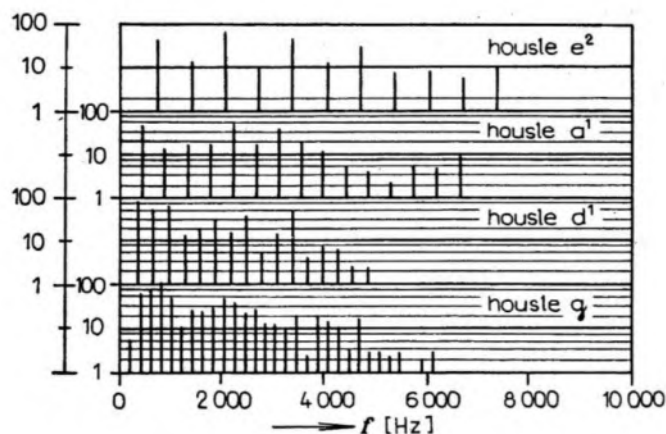
Kytarová kobylyka je v podstatě zjednodušením tohoto modelu, kdy tvar a rozměry kobylyky jsou značně upravené. Kontaktní plocha s horní deskou nástroje je jen jedna a kobylyka je připevněna pevně, jediná snímatelná část je modifikovatelný Bach pražec. Samotný tvar tedy, na rozdíl od kobylyky houslí, nebude hrát až tak důležitou roli. Větší roli hraje samotný materiál kobylyky a fakt, že na kobylyku působí struny, jedná se tedy o nelineární závislost. [15]

1.1.3 Směrová charakteristika

Vyzařování smyčcových, potažmo strunných, nástrojů je velmi komplikovaná záležitost. Směrové charakteristiky vyzařování smyčců jsou různě rozsáhlé výseče prostoru vertikálně i horizontálně v závislosti na frekvenci tónu a stavbě nástroje. Přesto je nutné odhadnout při měření směrové charakteristiky pomyslný střed, tedy hlavní vyzařovací lalok, ve kterém bude největší intenzita akustického tlaku. [13]

Housle mají toto místo ve směru kolmo na přední desku v bodě, kde se nachází kobylyka. To znamená relativně vysoko, jelikož hráč stojí a housle směřují vzhůru. Během měření je kladen důraz na hráče, aby dodržel správné a stále stejné umístění nástroje, viz kap. 1.3.1.

Kytara má hlavní lalok rovněž v ose nástroje a jako osu zvolíme přímkou kolmo na přední desku v místě kde se nachází střed kobylyky, resp. strunníku [15].



Obr. 1.1: Zvukové spektrum prázdných strun houslí z [16]

1.1.4 Frekvenční spektrum

Housle

Výrazná frekvenční pole spektra houslí jsou 1800/2000 – 2500/3000 Hz, kde se projevuje plné spektrální složení nástroje. Zatímco frekvence kolem 1500 Hz jsou podstatně málo výrazné. Hlavní rezonanční oblast houslí se nachází v pásmu okolo 500 Hz; v nejbližším vyšším pásmu 600–800 Hz vykazují rezonanční minimum a další kmitočtové pásmo 800–1200 Hz je rezonančně málo výrazné. [13]

Spektrum prázdných tónů houslí je zobrazeno na obr. 1.1.

V prvním experimentu budou měřeny stejné tóny. Mimo jiné pro lepší srovnání s Geistovým modelem.

Kytara

Spektrum kytary obsahuje je silně ovlivněno celým akustickým obvodem. Oscilátor – struna generuje tón trojúhelníkové funkce, kobylka přenáší vibrace, přičemž se chová jako akustický filtr (typu dolní propust), na přední desku kytary, ze které se vibrace dále roznášejí do celého rezonančního těla, které má své modální oblasti (této tematice se věnuje Trávníčková v [17]). [15]

1.2 Metodika měření

Jsou navrženy celkem dva experimenty, podobného charakteru. První pro dvě houslové kobylky. Tento experiment ukáže, zda má smysl hodnotit vlastnosti materiálů kobylek.

Ve druhém experimentu firma Furch zhotovila rezonanční tělo kytary bez kobyly, a čtyři originální kobyly pro toto tělo, viz obr. 1.2, kde jsou čtyři originální kobyly a vzorky dřeva ze kterých se vyrobí testovací kobyly.



Obr. 1.2: Výroba kobylek

Dále byly změřeny vlastnosti šesti dřevěných vzorků z různých materiálů. Po změření jejich vlastností se z nich podle testovacích kobylek od firmy Furch vyrobily kobyly.



Obr. 1.3: Vyrobené kytarové kobyly

Při samotném měření jsou kobyly upevněny k rezonančnímu tělu kytary, tam jsou přichyceny strunami a kolíky.

V obou experimentech je pro každou kobylku zjištěna směrová vyzařovací charakteristika nástroje v jedné rovině (s orientací viz obr. 1.5) a modulová kmitočtová charakteristika různě barevných tónů různých výšek ve dvou dynamikách nástroje. K těmto tématům více v kap. 1.1.3 a 1.1.4.

V následujících kapitole je zmíněno, jakým způsobem byla zpracována naměřená data.

První měření probíhala v bezodrazové komoře v prostorách VUT, kde se měřila především směrová charakteristika pomocí mikrofonního pole – více v kapitole 1.2.

Druhé kontrolní měření probíhalo v domácím prostředí s mikrofonom *DPA 4099 Core Violin*¹, které sloužilo jako kontrola spektrálního měření v bezodrazové komoře.

Výhodou měření v bezodrazové komoře je velký odstup od šumu signálu a velmi kvalitní technika, kterou laboratoř disponuje (spektrální mikrofón značky Brüel & Kjær). V případě měření spektra kobylky, kdy je potřeba, aby byl snímač co nejbližší kobylce (viz kap. 1.3.1), možnosti technické a možnosti hráče nedovolují ideální umístění mikrofonního snímače co nejbližší kobylce. Z tohoto důvodu proběhlo kontrolní měření i doma.

1.2.1 Způsob zpracování dat

Tato kapitola vysvětluje jakým způsobem se zpracovávala data.

Měřením v bezodrazové komoře jsme získali velké množství zvukových vzorků ve formátu *.WAV*. Nahrávání probíhalo v DAW prostředí *Cubase*, a celkový časový průběh nahrávání byl opatřen poznámkami během nahrávání, viz obr. 1.4.

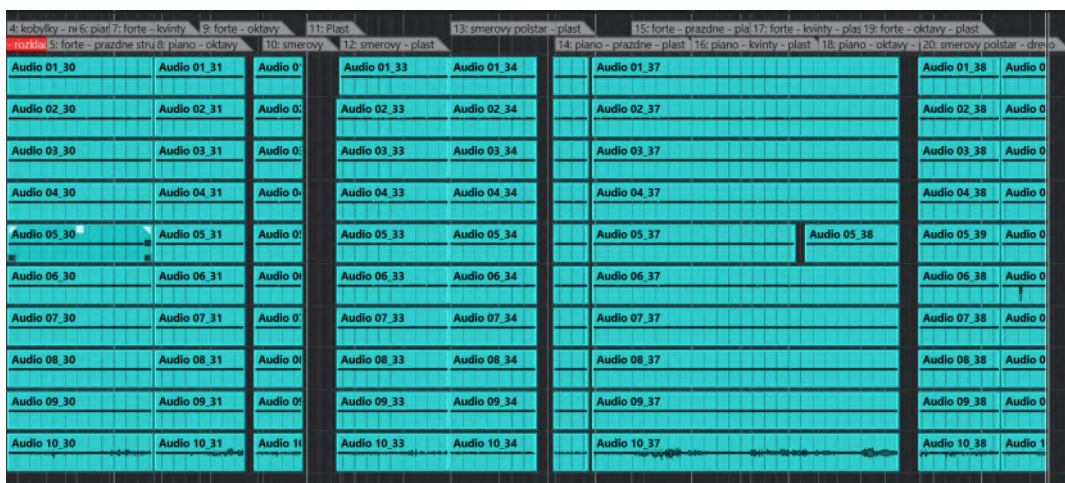
Poznámky rozdělují soubory podle (a) druhu kobylky na kterou bylo hráno; (b) typu dynamiky hry.

Ze všech hraných tónů byly nejdříve vybrány ideální vzorky, které byly poté vyrendrovány (rovněž ve formátu *.WAV* s názvem vzorku a poté analyzovány programem *Matlab*. Kódy pro **Matlab** je k nalezení v příloze na straně 115.

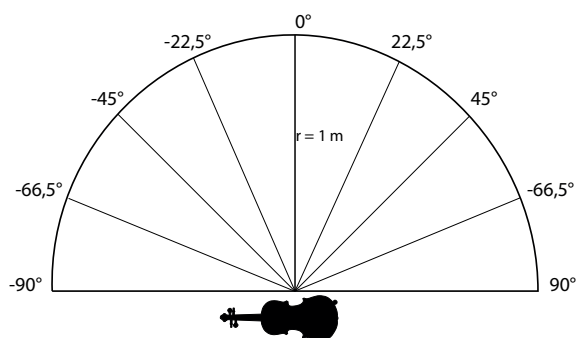
Výstupem **spektrální** analýzy jsou grafy výstupního napětí L_U s jednotkou dBu, které zobrazují závislost úrovně výstupního napětí v dBu ($L_U = 20 \log \frac{U_{IN}}{0,775 \text{ V}}$) nahraného signálu, která odpovídá spektru hraného tónu nástroje. Jelikož porovnáme spektra mezi sebou nikoliv analyzujeme jejich chování samostatně, není potřeba vyšší justace tohoto systému, či převod na úroveň akustického tlaku, ke kterému by bylo nutno nahrát kalibrační soubor i pro spektrální mikrofón.

Výstupem **směrové** analýzy je polární graf, který zobrazuje pro jednotlivé úhly (viz příloha B.2, řádek kódu 313)

¹Stránky výrobce: <https://www.thomann.de/gb/dpa_d_vote_core_4099_violin.htm>



Obr. 1.4: Screenshot označovaného projektu v Cubase z nahrávání v bezdrazové komoře



Obr. 1.5: Schéma rozestavení mikrofonů v mikrofonním poli pro housle

1.2.2 Měření a výpočet mechanicko-akustických vlastností materiálů kobylek

Většina výpočtů je vysvětlena v kap. 1.1.1. Zde je rozšíření o konkrétní postupy a praktický postup měření.

Měření rychlosti šíření zvuku, neboli ultrazvuková metoda

Pro měření je použit přístroj **FAKOPP Ultrasonic Timer**, viz obr. 1.6, který sestává ze dvou sond – vysílací a přijímací a měřícího zařízení. Přístroj měří za jakou dobu dosáhne vyslaný **ultrazvukový impuls** snímací sondy.

Obě sondy jsou přiloženy naproti sobě tak, aby mezi nimi byla délka L vzorku ve směru, ve kterém se zjišťuje rychlost. Pro přesnost měření by tato vzdálenost neměla být menší nežli 18 mm. v našem případě je v tangenciálním směru 20 mm



Obr. 1.6: Přístroj na měření rychlosti zvuku pomocí ultrazvuku

což je na hraně, ale stále měření došlo k nějakým výsledkům. Jedná se o směr, který hraje v experimentu nejmenší roli, proto je možné tuto nepřesnost připustit.

Ze zjištěné doby šíření elastické vlny zvuku a ze známé vzdálenosti mezi měřicími sondami již lze snadno, pomocí rovnice 1.6, spočítat rychlost šíření zvuku v daném směru daného materiálu.

Měření dynamických modulů pružnosti

1. Nejprve jsou vzorky zváženy na váze, díky čemuž se pomocí rovnice 1.1 dá snadno zjistit jejich přesná hustota. Z hustoty lze potom podle rovnice 1.7 zjistit Youngův modul pružnosti za využití rychlosti zjištěné ultrazvukovou metodou (viz kap. 1.2.2),
2. ověření ultrazvukové metody realizuje frekvenčně impulsní odezva, která zjistí rychlost šíření zvuku pomocí vibrometru. Frekvence kterou vzorek v daném směru vydává lze snadno (popsáno v kap. 1.1.1) převést na rychlost a poté pomocí rovnice 1.3 zjistit modul pružnosti,
3. jako poslední je stanoven ohybový modul pružnosti materiálu daného vzorku pomocí frekvence ohybových kmitů – tzn. podložení vzorku v uzlech a vyvolání impulsu v místě, kde je kmitna. v témže místě se snímá mikrofonom frekvence – v tomto případě laserovým vibrometrem (obr. 1.8). Modul pružnosti v ohybu potom odpovídá podle rovnice 1.4.

1.2.3 Měření frekvenční a směrové charakteristiky

Měření frekvenční charakteristiky Pro tato měření v případě houslí byl půjčen nástroj houslisty Dominika Poločka, který se rovněž účastnil měření a dodržoval zásady popsané v 1.3.1. Měřeno bylo mikrofonom firmy Brüel & Kræjer v bezodrazové komoře a poté kontrolní měření v domácím prostředí mikrofonom DPA 4099 Core Universal, obě tato měření probíhala kontaktně ve vzdálenosti 2 mm od kobyčky.

V případě kytary bylo firmou Furch zhotoveno kytarové tělo, viz obr. 1.7 vpravo. pro toto tělo se zhotovil speciálně upravený jednoduchý „krk“ se dvěma mechanikami pro uchycení strun. v samontém těle kytary jsou dvě díry které kolíčky přichycují struny a zároveň kobyčku drží pod konstatním tlakem připevněnou k tělu kytary.

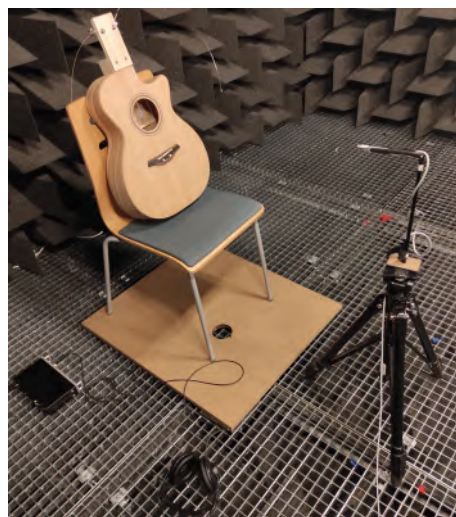
Při standartní výrobě se používá k přichycení navíc lepidlo, které ovšem schne 2 dny. Z tohoto důvodu bylo nutné měření přizpůsobit a přichycení je ponecháno pouze na kolíčích, které ovšem ve všech měřeních mají pokud možno stejné vlastnosti a tedy výsledky by měli být porovnatelné. ²

Měření směrové charakteristiky bylo realizováno podle [16], s úpravou pro 9 mikrofونů (jeden centrální na nulté ose a čtyři další, jeden na každé straně - dohromady pro prostor 180° od zdroje vlnění).

Použity byly měřicí mikrofony AUDIX TM1 (obr. 1.7), které mají velmi vyrovnanou kruhovou charakteristiku.



(a) Audix mikrofون



(b) Mikrofон spektrální Brüel & Kræjer

Obr. 1.7: Mikrofony použité při měřeních v bezodrazové komoře

²Další variantou byla možnost přichycení kobyček dřevařskými svorkami, ovšem to by vytvořilo na těle nekontrolovaný tlak ve dvou bodech, který by mohl naprosto zásadním způsobem změnit akustické vlastnosti experimentu, proto byla tato možnost nakonec zavrhnuta.

Mikrofonního pole sestává z 9 mikrofonů, značky Audix, které jsou vhodné pro měření směrovosti, jejichž kapsle jsou umístěny přesně na obvodu půlkružnice, v případě experimentu s houslemi o poloměru 1 m, v jejímž středu byl umístěn zdroj akustického signálu, resp. kobylka tohoto nástroje. Schéma umístění nástroje lze vidět na obr. 1.5. V případě experimentu s kytarou byl poloměr zmenšen na $r = 0,5$ m. Výška byla nastavena v korespondenci s očekávaným hlavním vyzařovacím lalokem, viz kap. 1.1.3.

1.3 Hudební akustika

1.3.1 Požadavky na hráče

Součástí této práce je měření, ideálně realizované robotem, který by snadno dodržel stejné počáteční podmínky. Pro housle je to náročnější úkol, jelikož tah smyčcem je komplexní pohyb. U kytary je tento úkol lehčí, ale přesto se v této práci nepodařilo robota sehnat a tedy i pro kytaru platí stejné požadavky.

U houslí jsou to - úhel, tlak smyčce, rychlost smyku, s tím související dynamika, dále celkově prostorové umístění nástroje, atd. U kytary je to především pozice nástroje v mikrofonním poli, tlak, velikost výchylky strunny, atd.

To ovšem nebylo možné, proto nastává podobná situace, jakou popisuje Hanzálek v [16]. Z toho důvodu následuje krátký výtah pravidel a požadavků, které se dodržovaly i během měření v této práci.

Hráč by měl během nahrávání:

- dodržet přibližně stejnou dynamiku a délku vzorků - z důvodu obsažení všech složek daného tónu,
- dělat dostatečně dlouhou pauzu mezi jednotlivými tóny, aby se při následné úpravě neprolínaly složky dvou po sobě jdoucích tónů,
- artikulovat tóny pokaždé co nejvíce stejně, a samozřejmě co nejvíce čistě, bez vibráta,
- držet nástroj celou dobu ve středu měřicího půlkruhu, do kterého byly kalibrovány mikrofony (v případě měření v této práci byla ve středu kobylka měřených nástrojů),
- během měření směrové charakteristiky snažit se nepřekážet v ose mikrofonů žádnými objekty, které by způsobily akustický stín.

1.3.2 Termíny z hudební teorie

Dynamika

je hladina intenzity vyzařované akustické energie vyjádřená v decibelech (dB), v hudební terminologii v symbolech dynamiky: *ppp* - pianissimo, *pp*, *p* - piano, *mp* - mezzopiano, *mf* - mezzoforte, *f* - forte, *ff*, *fff* - fortissimo. Těmto hudebním symbolům ovšem neodpovídají pevně stanovené fyzikální hodnoty. [13]

Každopádně během doby se hodnoty relativně ustálily a mezi *p* a *f* je podle [13] rozdíl přibližně 20 (dB ± 5).

Tento poznatek je zde zmínen kvůli měření směrové charakteristiky (kap. 4.2, které probíhalo ve dvou dynamikách - *piano* a *forte*).

V předchozí kapitole byl zmínen pojem *vibrato*. To je technika, při které dochází k periodickému kolísání tónu vyzařovaného nástrojem až o čtvrt tónu ³, jak uvádí Geist v [13],

Více k této technice, např. v [19].

Již z principu je tedy jasné proč je to při měření nežádoucí jev. Způsobilo by jednak interferenci ve směrovém grafu a jednak by se ve spektrogramu objevily parazitní frekvence, což by značně znehodnotilo celé měření.



(a) Vibrometr



(b) Měřený vzorek

Obr. 1.8: Měření vibrometrem

Barva, neboli témbra

„Barva tónu je charakteristická pro každý hudební nástroj i pro lidský hlas. Díky ní od sebe lze odlišit různé nástroje hrající stejný tón. Je dána jeho harmonickými složkami — jejich počtem a intenzitou.“ [17]

³Cent (z latinského centum „set“) je aditivní měrná jednotka (přesněji: pomocná jednotka měření), u které velmi přesné srovnání velikostí je hudebních intervalů možné [18].

U hudebních nástrojů ji dotváří doprovodné zvuky vzniku tónu, např. zvuk trsátka na struně, nebo rozkmitání struny smyčcem. Čím bohatší je spektrum, tím je tón průraznější. Sudé složky ve spektru podporují měkkou a příjemnou bravu, zatímco liché ovlivňují tvrdost a pronikavost. [20]

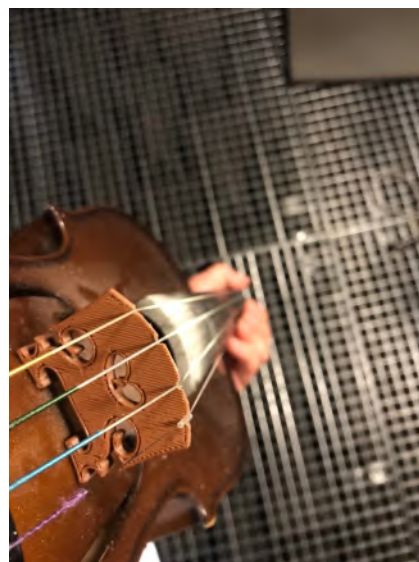
2 Fyzikální vlastností materiálů kobylek

2.1 Vlastnosti kobylek houslí

Oba měřené subjekty lze vidět na obr. 2.1. Nahoře je dřevěná, resp. **javorová**, kobylka, dole plastová kobylka z **PLA**.



Obr. 2.1: Srovnání dřevěné a plastové kobylky



Obr. 2.2: Plastová kobylka upevněná na housle

Materiál	m (g)	V (ml)	ρ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	E ($\text{N} \cdot \text{m}^2$) $\cdot 10^9$
javor	2,13	3,4	626,5	$E_{\parallel} = 9,4$; $E_{\perp} = 0,915$ [3]
PLa	4,9	4	1225	2,3 [21]
	c ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	E_{dyn} ($\text{N} \cdot \text{m}^2$) $\cdot 10^9$	Z_A ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) $\cdot 10^6$	K_A ($\text{m}^4 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)
javor	$c_{\parallel} = 3873,6$; $c_{\perp} = 1208,5$	11	$Z_{\parallel} = 2,43$; $Z_{\perp} = 0,757$	6,7
PLa	1370	4	1,68	1,48

Tab. 2.1: Přehled zjištěných akustických veličin materiálů kobylek houslí

Jaké jsou mechanicko-akustické rozdíly javorové a plastové kobylky? Změřené veličiny jsou zaznamenány v tab.2.1, kde si lze všimnout, že javor je ortotropní materiál, zatímco PLa je izotropní.

V podélné rovině má javor značně vyšší Youngův modul pružnosti, rychlost šíření zvuku, ale i akustickou impedanci a akustický koeficient, než PLA. Oproti tomu v příčné rovině má Youngův modul mnohem menší, rychlosti šíření zvuku a akustickou impedanci trochu menší, nežli PLA. Dalo by se tedy říct, že se jejich vlastnosti překrývají, je ovšem otázkou do jaké míry u javorové kobylky převažuje podélné vlnění nad kolmým.

I přes vyšší hustotu plastové kobylky má PLA menší rychlost šíření zvuku a celkově malý akustický koeficient pouze $1,48 \text{ m}^4 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, ale akustickou impedanci má menší ($1,68 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot 10^6$). Od javorové kobylky lze tedy očekávat větší zkreslení ve vyšších frekvencích, zatímco plastová by mohla mít vyrovnanější spektrum.

Poslední koeficient - akustický činitel pohltivosti materiálu je frekvenčně závislý. Jeho hodnoty pro dřevo obecně a PLA jsou vyneseny v tab. 2.2.

Materiál	Frekvence					
	125	250	500	1000	2000	5000
dřevo	0,05	0,04	0,02	0,04	0,05	0,05
PLa	0,09	0,14	0,17	0,22	0,56	0,96

Tab. 2.2: Činitel pohltivosti dřeva a plastu - převzato z [22] a [23].

Odsud je zřejmé, že zatímco dřevo má relativně nízký koeficient pohltivosti, PLA ho má menší pro nižší frekvence, ale rostoucím kmitočtem roste i koeficient pohltivosti. Co by to mohlo způsobit ve spektru, či směrovosti? Na spektrum by žádný velký vliv být nemusel, ale u směrového vyzařování se dá předpokládat, že s rostoucí frekvencí bude vyzařování méně centrické.

2.2 Vlastnosti kobylek kytar

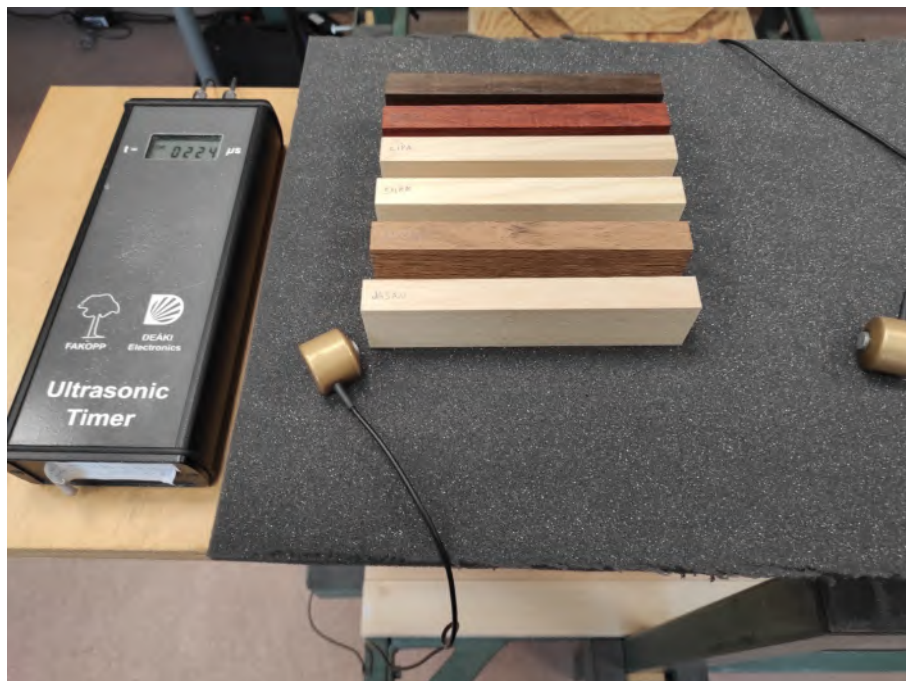
Celkem bylo získáno 6 kytarových kobylek. 4 originální od firmy Furch a 6 vzorků od Mendelovi univerzity.

Originální kobylky od firmy Furch nebylo možno analyzovat kvůli jejich komplikované geometrii. Jsou to *africký eben*, *eben macassar*, *ziricote* a *cocobolo*. Jelikož jsou to standartní druhy dřev pro výrobu kytar, budou hodnoty jejich hustoty a modulu pružnosti převzaty z [24] a [10] a ostatní parametry vypočítány pomocí rovnic 1.7, 1.9 a 1.10, viz tab. 2.3.

Pro 6 vzorků, ze kterých se testovací kobylky teprve vyrobí podle originálních kobylek je navrženo měření. Toto měření proběhlo v Útěchovském areálu Mendelovi

Materiál	ρ (kg/m ³)	E (GPa)	c (m · s ⁻¹)	Z_A (MPa · s · m ⁻¹)	K_A (m ⁴ · kg ⁻¹ · s ⁻¹)
Africký eben	710	12.3	4162,2	2,955	5,86
Eben macassar	710	17.3	4936,2	3,505	6,95
Ziricote	805	10.9	3679,7	2,962	4,57
Cocobolo	1095	18.7	4132,5	4,525	3,77

Tab. 2.3: Přehled vlastností kobytek od firmy Furch



Obr. 2.3: Měření rychlosti šíření zvuku ultrazvukem

univerzity v Brně, která rovněž poskytla těchto 6 vzorků: *jasan*, *javor*, *smrk*, *lípa*, *padouk* a *lignamon buk*¹

Podmínky pro měření byly přibližně pokojové (23 °C), vlhkost měřených vzorků 10–20 %.

Měření bylo realizováno ve třech směrech (osách) označených L, R a T (laterální, radiální a tangenciální). Výpočet dynamického modulu pružnosti má porovnány v podélné rovině L (tab. 2.4) dvě zvýrazněné metody měření, kdy jedna hodnota byla zjištěna pomocí měření ultrazvukem (obr. 2.3) a druhá hodnota byla měřena pomocí frekvenčně impulsní odezvy vzorku změřené optickým (laserovým) mikrofonom (viz kap. 1.2), který lze vidět na obr. 1.8.

¹krom buku lignamonu, což je čpavkem napuštěný buk stlačen za vysokého tlaku a teploty, jsou to vzorky jak známých českých dřevin tak kusy exotických dřevin jako padouk, či jatoba

Více o teorii měření se nachází v kapitole 1.2.2, v následujících odstavcích jsou popsány výsledky.

V tab. 2.4 je vidět, že:

- u všech vzorků přibližně platí, že velikost E ve směrech $L : R : T$ odpovídá přibližně poměru $15 : 5 : 3$,
- největší modul pružnosti v podélném směru měřený metodou ultrazvuku má buk lignamon, jatoba a padouk,
- oproti tomu metoda impulsní odezvy (obr. 1.8) měla nejvyšší hodnoty pro jatobu, padouk a jasan,
- ohybový modul pružnosti je nejvyšší rovněž pro buk lignamon, jatobu a padouk, je tedy možné, že se při měření ultrazvukem tento jev projevil,
- Akustická konstanta zjištěná z modulu pružnosti zjištěného ultrazvukem je nejvyšší pro smrk ($K = 11, 14$), jak se dalo očekávat dle [3]. Dále dosahuje vysoké hodnoty K Lípa,
- reálná část akustické impedance, neboli akustický odpor R dosahuje nejvyšších hodnot (ve všech směrech v přibližně zmíněných poměrech) u buku lignamon, který má zároveň nejnižší akustické konstanty. Nejnižší akustický odpor potom nemá smrk, nýbrž lípa.

Materiál	Směr	Délka (mm)	Váha (g)	T (μs)	v (m·s ⁻¹)	ρ (kg/m ³)	E (GPa) (ultrazvuk)	K _A (m ⁴ kg ⁻¹ s ⁻¹)	Z _A (MPa·s·m ⁻¹)	f _n (Hz) (ohyb, podélně)	E _B (GPa) (ohyb, podélně)	Vlhkost dřeva
Jasan	L	180		36	5000,00		17,10	7,31	3,42	2940	14,85	10-20%
	⊥ R	40,33	99,502	22	1833,18	683,96	2,30	2,68	1,25	16400	23,84	
	↘ T	20,04		14	1431,43		1,40	2,09	0,98			
Jatoba	L	180		34	5294,12		24,02	6,18	4,54	3043	19,89	Pokožové podmínky
	⊥ R	40,03	123,87	20	2001,50	856,96	3,43	2,34	1,72	15158	25,52	
	↘ T	20,06		16	1253,75		1,35	1,46	1,07			
Smrk	L	180		30	6000,00		19,40	11,14	3,23	3385	14,96	
	⊥ R	40,22	79,574	23	1748,70	538,8	1,65	3,25	0,94	13629	12,97	
	↘ T	20,4		14	1457,14		1,14	2,70	0,79			
Lípa	L	180		34	5294,12		13,42	11,06	2,53	3088	11,31	
	⊥ R	40,04	69,637	24	1668,33	478,8	1,33	3,48	0,80	16523	16,94	
	↘ T	20,18		19	1062,11		0,54	2,22	0,51			
Padouk	L	180		38	4736,84		19,23	5,53	4,06	2674	15,28	
	⊥ R	39,89	123,73	22	1813,18	856,91	2,82	2,12	1,55	15000	24,99	
	↘ T	20,11		13	1546,92		2,05	1,81	1,33			
Lignamon buk	L	180		35	5142,86		28,16	4,83	5,48	2955,00	23,42	
	⊥ R	40,02	153,49	19	2106,32	1064,9	4,72	1,98	2,24	10000,00	13,80	
	↘ T	20,01		19	1053,16		1,18	0,99	1,12			

Tab. 2.4: Přehled zjištěných akustických veličin materiálů kobytek kytar

3 Výsledky experimentu s houslemi

3.1 Výsledky spektrální analýzy houslí

Spektrum je analyzováno po tónech. Přesněji jsou vybrány čtyři tóny hrané na prázdných strunách houslí (jak až nyní vyplývá, bylo by možná vhodnější zvolit jiné tóny, kvůli „podpružení“ strun a stabilitě tónu, na druhou stranu z technického hlediska bylo měření díky takto zvoleným tónům pro hráče příjemnější a snáze dosáhl požadovaných podmínek.)



(a) Housle se zatlumeným rezonančním tělem



(b) Nahrávání v bezodrazové komoře

Obr. 3.1: Foto z průběhu prvního experimentu 1

Další odstavce s obrázky se pokusí primárně zaměřit na rezonanční oblasti kobyly, jak nabádá [8] a jak tato práce popisuje v kapitole 1.1.2.

3.1.1 Měření s mikrofonom DPA

V tomto odstavci jsou analyzovány podrobně všechna spektra získaná měřením doma, mikrofonom DPA 4099 CORE VIOLIN (viz kapitola 1.2). Grafy lze nalézt v obrazové příloze.

Tón g1 se základní frekvencí v temperovaném ladění 196 Hz.

Housle s javorovou kobyolkou (viz obr. A.1) mají skutečně silnější harmonickou frekvenci o hodnotě 2 kHz a 6 kHz.

Housle s plastovou kobyolkou (viz obr. A.2) bez zatlumeného těla mají spektrum vyšších harmonických složek (v pásmu od 1200 Hz) celkem rovnoměrně potlačené. Při zatlumení rezonančního těla houslí jsou frekvence 2 kHz, 6 kHz a dokonce pár vyšších zřetelně výraznější. U kobyly z javoru tento jev není pozorován, ale úroveň jejich složek je v případě zatlumeného i nezatlumeného těla vyšší, než pro kobytku plastovou.

Tón d1 se základní frekvencí v temperovaném ladění 293,66 Hz.

Housle s javorovou kobyolkou (viz obr. A.3) mají téměř stejně posílenou frekvenci 2 kHz jako u tónu g1. O něco méně posílená je oblast okolo 6 kHz. Vzhledem k posunu základní frekvence je vidět, že stále výrazná 4. a 5. harmonická frekvence houslí zasahuje do těchto oblastí. Je tedy možné, že posílení frekvencí kobyolkou není součástí harmonické řady hraného tónu, ale je stabilní na frekvencích přibližně kolem 2 kHz a 6 kHz. Zatlumenost těla v tomto případě nedělá velký rozdíl.

Housle s plastovou kobyolkou (viz obr. A.4) pro tón d1 mají nejvýraznější první harmonickou frekvenci, druhá je poměrně slabá, třetí a čtvrtá nastupují až po 1 s. u zatlumeného rezonančního těla houslí je nástup vyšších frekvencí rychlejší a jsou výraznější. Celkový tvar spektra je podobný javorové kobyлке, ale vyšší frekvence jsou slabší - jak řekl houslista v daný moment: „Ta plastová kobyłka zní velmi tupě.“

Tón a1 se základní frekvencí v temperovaném ladění 440 Hz.

Housle s javorovou kobyolkou (viz obr. A.5) mají silnou 1. až 5. harmonickou frekvenci, kdy 4. a 5. jsou nejvíce intenzivní. Poté mají formantovou oblast mezi 3,2 kHz až 4,5 kHz. Další posílená frekvence je až kolem 9 kHz a kolem 15 kHz.

U houslí se zatlumeným rezonančním tělem je spektrum potlačeno rovnoměrně v celé šíři, ale nic se v něm nemění.

Housle s plastovou kobyolkou (viz obr. A.6) mají nejsilnější 1. a 3. harmonickou frekvenci, 2. a 4. jsou slabší, ale stále zřetelné. 5. chybí, ale pak se objevují 8. a 9. harmonická frekvence a s pozdějším nástupem a rychlejším odstupem se objevují frekvence okolo 6 kHz, 10 kHz a 14 kHz.

Tón e2 se základní frekvencí v temperovaném ladění 659,25 Hz.

Housle s javorovou kobyolkou (viz obr. A.7) (jak se zatlumeným tak s nezatlumeným tělem) mají nejsilnější 1. a 2. harmonickou frekvenci. Pak se objevují až u nezatlumeného těla frekvence okolo 8–10 kHz a 13 kHz. U zatlumeného těla se objevuje frekvence okolo 6 kHz.

Housle s plastovou kobyolkou (viz obr. A.8) se v tomto případě chovají téměř stejně jako ty s javorovou.

3.1.2 Měření v bezodrazové komoře mikrofonom Brüel & Krøjer

V této sekci jsou vyhodnoceny podrobně všechna spektra získaná měřením v bezodrazové komoře mikrofonom BRÜEL & KRÆJER. Vyobrazeny jsou v příloze, počínaje stranou 66.

Během měření byl tento mikrofon přemístován z pozice vzdálené 1 m, kdy byl nastaven jako přídavný spektrální mikrofon během měření směrové charakteristiky, do pozice co nejbližší kobylce. Bylo proto nutné měnit jeho citlivost (v tomto případě ji snížit o 40 dB), ale i přes to nebylo umístění ideální a jako takové jej lze porovnat s měřením s mikrofonom DPA, který zase narozdíl od Brüel & Krøjer nemá ideálně rovnou charakteristiku na měření spektra.

Tón g1 se základní frekvencí v temperovaném ladění 196 Hz.

Pro housle s javorovou kobylkou (viz obr. A.9) je znatelný rozdíl mezi zatlumeným a nezatlumeným rezonančním tělem houslí.

Nezatlumené tělo má slabší 1. harmonickou frekvenci, nejsilnější 2. a 4. harmonická frekvence, taktéž výrazné jsou 3. a 5. harmonická frekvence.

Další výrazné frekvence jsou kolem 1,6 kHz a 5 kHz.

Oproti tomu zatlumené tělo má velmi silné i 7., 9., 6. a 8. harmonická frekvence - od nejvýraznější po nejméně výraznou. a další klastrová pásma, která jsou posílena oproti houslím s nezatlumeným tělem.

Housle s plastovou kobylkou (viz obr. A.10) mají spektrum celkově podobné pro zatlumené i nezatlumené tělo.

První harmonická frekvence je lehce potlačena, 2., 3. a 4. harmonické frekvence jsou nejvýraznější. Další frekvence jsou také výrazné, ale ne tolik s postupným útlumem - tak jak bychom od spektra houslí očekávali podle [13].

Tón d1 se základní frekvencí v temperovaném ladění 293,66 Hz.

Housle s javorovou kobylkou (viz obr. A.11) mají spektrum přesně podle [13] - tedy výrazná 1. harmonická, slabší 2., silnější 3. a 5., velmi výrazná 4. a zbytek klastrové oblasti.

Zajímavé je, že opět u zatlumeného rezonančního těla přibývá na výraznosti vyšších harmonických frekvencí především kolem 2,5 kHz, 3,5 kHz a 4,7 kHz. Také je vyrovnanější výraznost prvních 5 harmonických frekvencí.

Housle s plastovou kobylkou (viz obr. A.12) mají spektrum oproti javorové kobylce bohatší na více harmonických frekvencí, ovšem opět jde o spektrum typické pro tón d1 houslí, podle [13], obohacený o více vyšších harmonických frekvencí.

Tón a1 se základní frekvencí v temperovaném ladění 440 Hz.

Housle s javorovou kobylkou (viz obr. A.13) mají výraznou 1. a 2. harmonickou frekvenci. Při zatlumení těla se obejevují frekvence okolo 3 a 4 kHz.

Housle s plastovou kobylkou (viz obr. A.14) mají oproti javorové kobylce výrazné frekvence okolo 3 a 4 kHz i bez zatlumeného těla více, nežli javorová kobylka. Krom toho má ve spektru navíc i frekvenci okolo 8 kHz.

Tón e2 se základní frekvencí v temperovaném ladění 659,25 Hz.

Housle s javorovou kobylkou (viz obr. A.15) mají ve spektru s nezatlumeným tělem výraznou 1. harmonickou frekvenci. Druhá je o dost slabší a další vyšší harmonické se objevují velmi slabě se zpožděným nástupem. Oproti tomu zatlumené tělo má velmi výraznou 2. a 3. harmonickou frekvenci. 4. harmonická frekvence je výrazná, ale značně méně nežli předcházející frekvence. Dále se objevuje frekvence okolo 7 kHz.

Housle s plastovou kobylkou (viz obr. A.16) mají pro nezatlumené i zatlumené tělo velmi podobná spektra, kdy 1. harmonická frekvence je velmi výrazná, stejně jako pro javorovou kobylku, 2. a 3. harmonické frekvence jsou velmi výrazné, 4. harmonická frekvence je poslední zřetelná a dále se již ve spektru zřetelně objevuje pouze frekvence okolo 7 kHz.

Nejdříve zmínka o systematické chybě ke které došlo. I přes snahu o kalibraci mikrofonů měl mikrofon č. 1 větší citlivost, než ostatní mikrofony – proto se mohou zdát výsledky lehce zkreslené a ve všech charakteristikách se objevuje „nelogický“ nárůst hodnoty směrového činitele pro úhel -90° .

Na směrových charakteristikách vyzařování houslí by se dal očekávat podobný tvar jako v [25] (viz kap. 1.1.3).

Cílem je porovnat javorovou a plastovou kobylku.

3.2 Výsledky analýzy směrového vyzařování houslí

3.2.1 Hrané primy v pianu

Prázdné struny houslí (tóny g1 d1 a1 e2) hrané v dynamice piano jsou první, které je zde možno porovnat.

Na obr. A.17 je charakteristika javorové kobylky a na obr. A.18 plastové. Jejich porovnáním lze vidět, že housle s javorovou kobylkou se chovají značně více směrově dopředu – koeficient dosahuje hodnot až 1,5, což znamená, že pro úhel $+22,5^\circ$ je úroveň akustického tlaku $1,5\times$ větší než pro průměrnou všesměrovou hladinu.

Oproti tomu housle s plastovou kobylkou mají směrovost více kulatou (koeficient kolem 1). Prázdné struny nevykazují žádné velké odchylky mezi strunami.

Snad jen v případě tónu e2 je znatelná větší směrovost na $+45^\circ$. To by mohla být odchylka zapříčiněná lidským faktorem

3.2.2 Hrané primy ve forte

Oproti primám v pianu o něco více směrové. Javorová kobylka (obr. A.19) přesahuje hodnotu koeficientu směrovosti 1,5 a to nejvíce pro úhly $\pm 22,5^\circ$. Co se týká směrovosti tónů, pak jsou relativně vyrovnané až na tón e2, který vykazuje znatelnější směrovost.

Plastová kobylka ve forte (obr. A.20) má oproti pianu větší hodnoty koeficientů, ale celková směrovost je podobná – opět je největší míra vyzařování kolem $+22,5-66,5^\circ$. Taktéž platí, že vyšší frekvence vykazují větší směrovost (jak lze předpokládat např. podle [25]).

3.2.3 Hrané kvinty v pianu

Tóny d1 a1 e2 h2, tedy tři tóny jsou stejné jako v předchozím měření, ale jsou drženy na jiné struně, a jeden je vyšší. Nyní jsou to všechno páté polohy (kvinty), lze tedy očekávat jiné chování, nebo bude směrovost stejná? Jak přesná je metoda na to aby se dalo toto chování porovnat?

Směrovost javorové kobylky (obr. A.21) je oproti primám (obr. A.17) lehce výraznější, ale především pro tón h2 (který mezi primami nebyl), což opět potvrzuje předpoklady z [25]. Podobně tón e2 je silně potlačen pro $+90^\circ$.

U plastové kobylky by se mohlo zdát, že dochází k radikální změně, ale je nutné si uvědomit, že rozsah vykreslení není u všech polárních grafů stejný. Ovšem zatímco javorová kobylka v kvintách zaregistrovala pro tón h2 očekávanou změnu, plastová kobylka má neočekávaně silně potlačenu intenzitu na 0. ose a $+22,5^\circ$, zatímco na -45° a na $+66,5^\circ$ vykazuje větší směrovost.

3.2.4 Hrané kvinty ve forte

Velmi podobné výsledkům pro piano. Díky tomu lze částečně odpovědět na otázku z předchozího odstavce. Jak přesná je metoda – výsledky se podobají, tedy skutečně je rozdíl jak mezi primami a kvintami, tak mezi plastovou a javorovou kobylkou.

Pro tóny kvint (obr. A.23) hrané na housle s javorovou kobylkou dostáváme opět výsledek s potlačenou směrovostí na $+90^\circ$.

S plastovou kobylkou (obr. A.24) je výsledkem opět potlačení směrovosti na 0. ose pro tón h2 a zesílení pro $\pm 45^\circ$. Ostatní tóny se chovají relativně kulově.

3.2.5 Hrané oktávy v pianu

Jsou nejvyšší zkoumané tóny a vykazují největší směrovost (s koeficienty blízkými 2). Jsou to tóny g_2 d_2 a_2 e_3 .

Pro javorovou kobylku (obr. A.25) je ve směru $22,5^\circ$ nejvyšší pro tóny g_2 – a_2 . Tón e_3 je nejvíce směrový na 0. ose. Paradoxně nejvyšší směrovost nevykazuje nejvyšší e_3 , ale a_2 . Tón e_3 má drobnou odchylku na $66,5^\circ$.

Plastová kobylka pro oktávy v pianu (obr. A.26) se velmi podobá primám (obr. A.18). Celkově nevýrazná směrovost, lehce silnější pro $22,5^\circ$.

3.2.6 Hrané oktávy ve forte

Jsou poslední vzorky, které zbývá rozebrat.

U houslí s javorovou kobylkou (obr. A.27) je tón g_2 lehce více směrový na $22,5^\circ$, tóny d_2 , a_2 jsou směrové především dopředu a tón e_3 je z nich nejvíce směrový dopředu a zároveň má drobnou odchylku (podobně jako v pianu - obr. A.25) na $+66,5^\circ$.

Plastová kobylka (obr. A.28) má ze všech dosavadních charakteristik nejvíce nejednotnou směrovost. Tón g_2 má relativně stabilní charakteristiku, nevykazující zvláštní směrovost v žádném směru. Tón d_2 je od $66,5^\circ$ silně potlačen, na stejném úhlu a ještě intenzivněji je potlačen tón a_2 , který je ze všech nejvíce směrový dopředu. Tón e_3 je potlačen v pásmu od 0 do 45° a posílen na $-22,5$ a $+66,5^\circ$.

4 Výsledky experimentu s kytarou

4.1 Měření spektra kytary

Spektrum je analyzováno opět po tónech. Měřicí prototyp kytary byl opatřen 2 strunami, proto byly vybrány 2 tóny - A2 o frekvenci 110 Hz a C4 o frekvenci 258 Hz, na které se tyto struny naladily (z tohoto důvodu a také kvůli způsobu přichycení kobylky, resp. strunníku, byly vybrány tóny relativně nízkých frekvencí, přesto však se snahou o co největší barevný rozdíl).

Pro každou strunu byl nahrán vzorek v piano, ve forte a flažolet v polovině délky struny, který generoval dvojnásobek základní frekvence, tedy tóny A3 a C5 (frekvence 220 a 516 Hz).



(a) Buk lignamon



(b) Jasan

Obr. 4.1: Vzorky dřeva před zpracováním do tvaru strunníku (kobylinky) 1

4.1.1 Buk lignamon

Tón a2 (110 Hz) hraný na kobylku z buku lignamonu dynamikou forte (viz obr. A.29 nahoře) se oproti dynamice piano (obr. A.29 dole) liší lehkým zkreslením (tzn. obsahuje více harmonických složek), a větší inharmonicitou v celém spektru¹. Tato inharmonicita je v tomto případě pravděpodobně způsobena nedokonalostmi testovacího modelu, resp. narážením struny do těla kytary při velké příliš velké výchylce.

Zároveň ovšem, dá-li se toto chování do souvislosti s vlastnostmi materiálu – buk lignamon má ze všech vzorků nejvyšší hustotu s průměrnou rychlostí šíření zvuku, přičemž jeho akustická konstanta je ze všech vzorků nejnižší. 1. harmonická složka je (cca o 5–10 dBu) slabší nežli druhá harmonická. Třetí, šestá a desátá harmonická

¹Pozn. tato kobylka měla během měření nejvíce poslechově „tupý zvuk“.

složka je při forte oproti pianu potlačena. V oblasti kolem desáté harmonické složky (frekvence 1100 Hz) by mohla být první formantová oblast, druhá výraznější by potom mohla být kolem 1,9 kHz. vyšší frekvence jsou již signál pod -120 dB, který by mohl obsahovat šum.

Tón c4 (258 Hz) ve forte dochází ke zkreslení spektra a větším inharmonicitám, podobně jako u tónu a2. Pro tón c4 je 1. harmonická složka nejsilnější.

V **pianu** viz obr. A.30 dole, je modul amplitudy 2. harmonické frekvence o 45 dBu slabší oproti modulu 1. harmonické frekvence; 3. harmonická je o 30 dBu slabší nežli 1. harmonická; 4. harmonická je 27 dBu slabší nežli 1. harmonická;

Ve **forte** viz obr. A.30 nahoře, je 2. harmonická posílena o celých 30 dBu; 3. je lehce potlačena - z poklesu o 30 na 35 oproti 1. harmonické; 4. harmonická zůstává stejná

5. – 9. harmonická složka tvoří 1. klastr, 16. – 27. harmonická složka tvoří 2. klastr.

Flazolety (dvounásobné frekvence předchozích dvou tónů) vyvolávají v teorii dokonalé spektrum sinusového signálu. Pro kobylku z buku se projevují navíc parazitní vlastnosti bezodrazové místnosti (rezonanční kmitočty a jejich násobky), viz obr. A.31.

Spektrum tónu a3 obsahuje především první dvě harmonické frekvence. Klastrové oblasti popsané výše se projevují ale v menší míře.

Pro tón c5 platí to samé, projevují se parazitní vlastnosti místnosti, nejvíce výrazné jsou první dvě harmonické frekvence, viz obr. A.31 dole.

4.1.2 Cocobolo

Opět platí, že spektrum tónů ve forte projevuje větší inharmoničnost a složky vyšších frekvencí jsou lehce posíleny – spektrum je bohatší.

Tón a2 kobylky z cocobola má v počátku spektra (tzn. 1.–4.harmonická složka), viz obr. A.32, stejný průběh jako kobylka z buku. Tedy při forte 2. harmonická složka je silnější než první, 3. klesá o téměř 40 dBu oproti 1. harmonické a 4., 5. a 6. pokles o 50 dBu oproti 1. harmonické frekvenci. 5. a 6. složka jsou při forte stejně silné jako 4. složka (hodnota -30 dBu), zatímco v pianu, je 5. složka potlačena.

Další výrazné složky jsou 11.–13.harmonická složka. Dále 16.–20. a 25.složka. Nakonec se objevují výrazně 45. – 47.harmonická složka.

Tón c4 cocobolové kobyly, viz obr. A.33, má v dynamice forte oproti buku výraznou 4. harmonickou frekvenci.

Vyšší frekvence tohoto tónu při dynamice forte mají hřebenový charakter, resp. jsou viditelné laloky formantových oblastí. Oblast mezi 25. – 30. harmonickou frekvencí (2,75–3,3 kHz), 54. – 58. harmonické frekvence (5,9–6,4 kHz), dále okolí 10 kHz, 12 kHz a 15 kHz.

Flázolety mají očekávané spektrum. Parazitní rezonance místnosti, 1. a 3. harmonická. 2. je zcela potlačena.

Pro tón a3 je výrazná 8. harmonická, která byla v původním signálu nevýrazná.

Pro tón c5 se projevuje silná 7. harmonická původního tónu (c4 - 7. harmonická = 1,8 kHz).

4.1.3 Africký eben

Spektrum tónů ve forte projevuje opět větší inharmoničnost a složky vyšších frekvencí jsou lehce posíleny, ale i v pianu je bohatost značná.

Tón a2 ve forte má první a druhou harmonickou frekvenci na podobné úrovni (+16–18 dBu). V pianu je první harmonická -10 dBu a druhá +20 dBu. 3.–5. harmonická frekvence mají stejný průběh v obou dynamikách, viz obr. A.35. 6. harmonická frekvence je ve forte posílena. Stejně tak je ve forte posílena 8. harmonická frekvence.

Pro vyšší harmonické frekvence je spektrum vcelku bohaté (bohatší, nežli u předchozích dvou vzorků). Možné tvoření formantových oblastí lze při dynamice forte pozorovat mezi frekvencemi 1–1,5 kHz, 1,8–2,2 kHz, 2,86 kHz (odpovídá 26. harmonické složce).

Při dynamice piano jsou výrazné ty stejné oblasti, z nich navíc ještě převažují především 11. a 20. harmonická složka. Oblasti jsou mezi 10. – 13. a mezi 19. – 26. harmonickou složkou. Ve forte jsou viditelné oblasti i v okolí 9 a 10 kHz, jedná se již o hladiny kolem -110 dBu.

Tón c4 se v obou dynamikách velmi podobá a obsahuje výraznější formantové laloky, viz obr. A.36. Ve forte je potlačena 3. harmonická složka. Spektrum je v pianu velmi bohaté a vyrovnané. Ve forte je rovněž bohaté, složka na 6,2 kHz (odpovídá přibližně 24. harmonické složce) vystupuje, z jinak vyrovnaného spektra.

Flázolety mají, jak lze vidět na obr. A.37, bohaté spektrum. Relativně výrazné jsou první 4 harmonické frekvence.

1. nejvíce výrazná, 2. a 4. méně výrazné a 3. lehce výrazná. Konkrétní hodnoty v tab. 4.1.



(a) Jatoba



(b) Lída

Obr. 4.2: Vzorky dřeva před zpracováním do tvaru struníku (kobylyky) 2

4.1.4 Jasan

Tón a2 se chová přesně naopak jako u kobylyky z cocobola. Tedy první 4. harmonické složky mají stejnou velikost modulu, ale 5. složka je ve forte potlačena, zatímco v pianu je stejně výrazná jako 4. složka, viz obr. A.38.

Při dynamice forte je prvních sedm složek nejvýraznějších a poté dochází k útlumu o 20 dBu. Zajímavé je, že při dynamice piano jsou 9. – 11. harmonická složka výrazné, stejně jako 13. – 15. harmonická složka. Ve forte jsou výrazné složky 11. a 13.

Tón c4 má taktéž podobnou charakteristiku cocobolu, ale liší se v oblasti středů až vyšších středů, kde jasan má podstatně slabší moduly harmonických složek a tedy celkově méně barevné spektrum, viz obr. A.39. Spektrum je barevnější v pianu, kdy jsou silně posíleny složky 6.–8. harmonické frekvence. Dále je v pianu velmi posílená, oproti forte, složka 16. (4,1 kHz).

Při forte také dochází k vytvarování charakteristiky dle formantových oblastí s laloky 2–8 kHz a 10–13 kHz. Při pianu je tento jev potlačen, vyšších frekvencí je celkově přítomno méně a posíleny jsou především 25., 26. a 30. harmonická složka.

f_1	220 Hz	516 Hz
1. harm.	+20 dBu	-20 dBu
2. harm.	-10 dBu	-45 dBu
3. harm.	-60 dBu	-90 dBu
4. harm.	-40 dBu	-75 dBu

Tab. 4.1: Porovnání hodnot modulů harmonických složek flažoletů ebenové kobylyky

Flážolety resp. jejich spektrum je vyobrazeno na obr. A.40. Tón a3 má spektrum stávající z prvních 4 harmonických frekvencí. Dále se objevují 7. a 8. harmonická frekvence. Úroveň modulů pro tón c5 je řádově třikrát menší, nežli pro tón a3, analýza je tedy méně jednoznačná, ale zdá se, že se spektrum obou flážoletů chová stejně z hlediska vztahů jednotlivých harmonických složek vůči sobě.

4.1.5 Jatoba

Tón a2 který lze vidět na obr. A.41, má opět nejsilnější 2. harmonickou složku. Prvních 6 složek má standardní tvar podobný předchozím kobyilkám. V pianu jsou posíleny první 4 frekvence.

Od 7. harmonické složky začíná první lalok, který má rezonanci přibližně v 1,5 kHz a končí přibližně na 2 kHz, kde začíná druhý lalok s velmi výraznou 26. harmonickou složkou. Popsané laloky jsou ve forte mnohem plnější harmonických frekvencí i inharmonicit, zatímco v pianu je tvoří jen stěžejní harmonické frekvence.

Z vyšších frekvencí se prosazují 4,2 kHz a 5,9 kHz.

Tón c4 kobyilka z jatoby má kmitočtovou modulovou charakteristiku na obr. A.42. Lze si všimnout, že krom 1., 3. a 4. harmonické složky jsou ve forte všechny složky posíleny.

Ve vyšších frekvencích se objevuje lalok mezi 4 a 6 kHz a další potom mezi 9 a 12 kHz.

Flážolety lze prohlédnout na obr. A.43.

Tón a3 má dvě harmonické složky: 1. +20 dBu, 2. -30 dBu Tón c5 obsahuje pouze první dvě harmonické frekvence (již moduly těchto frekvencí jsou velmi slabé).

4.1.6 Lípa

Tón a2 má spektrum silně vytvarované do laloků formantových oblastí, viz obr. A.44. Při dynamice forte se chová následovně:

- první lalok mezi 1.–5. harmonickou frekvencí s vrcholem 2. harmonické,
- druhý lalok výrazná 6. harmonická složka a méně výrazná 7.–8. složka,
- třetí lalok 9.–14. složka s vrcholem na 1,2 kHz (11. složka),
- čtvrtý lalok je již klastr mnoha harmonických od 1,6 kHz do 3,7 kHz, s maximum kolem 2,5 kHz,
- pátý lalok ční přibližně od 3–6 kHz,
- diskutabilně poslední lalok se nachází mezi 7 a 9 kHz. Hodnoty menší než -100 dBu.

V pianu dochází od tohoto spektra k odchylkám na 5., 7. a 11. harmonické frekvenci, které jsou potlačeny a ve čtvrtém laloku dochází naopak k posílení. Poslední lalok v pianu chybí úplně.

Tón c4 neobsahuje až tak výrazné laloky formantových oblastí. Nejvýraznější je první harmonická a sestupně méně výrazné jsou 2.–4. harmonická složka. Dále na obr. A.45 je vidět, že 6.–8. složka jsou v pianu oproti forte potlačeny, s nejsilnější 8. harmonickou složkou o úrovni -55 dBu. 8. harmonická je nejvíce výrazná i při forte. Ve forte je navíc posílen lalok mezi 4–7 kHz.

Flázolety resp. jejich kmitočtovou charakteristiku, lze porovnat na obr. A.46.

Tón a3 má výrazné první 3 harmonické frekvence. Dále si ponechává utlumeně 3. a 4. lalok z tónu a2.

Tón c5 má výrazné první 4 harmonické frekvence.

4.1.7 Eben macassar

Tón a2 kobyłka z Ebenu macassar s charakteristikou na obr. A.47 má oproti předchozím kobyłkám stejně silnou 1. a 2. harmonickou frekvenci (v pianu lehce převažuje 2. harmonická).

Dále, zatímco ve forte je 5. harmonická potlačena (oproti 3. – 5. složce) v pianu je velikost jejího modulu dvakrát tak velká. 7. složka je v pianu potlačena a 8. posílena oproti charakteristice ve forte. Dále jsou v pianu posíleny 10. a 11. harmonická složka, oproti charakteristice ve forte.

Poslední zmíněné složky tvoří vrchol laloku, který se nachází mezi 1,9–3 kHz. Při forte se navíc objevuje lalok mezi 4–6 kHz.

Tón c4 Z obr. A.48 je vidět, že při forte jsou výrazné první 4. harmonické složky a poté dochází ke skoku a zbytek spektra je rozdělen na laloky (z tohoto zbytku je výrazná ještě 8. složka mezi prvním a druhým lalokem):

- první lalok mezi 5. – 8. složkou, což odpovídá 1,2–2 kHz,
- druhý mezi 2–4 kHz,
- třetí, s výraznějším maximem (19. harmonickou složkou 4,9 kHz), než předchozí dva laloky, mezi 4–7 kHz,
- čtvrtý mezi 7–11 kHz,
- pátý mezi 12–17 kHz.

Pro piano je charakteristika celkově vyrovnanější s většími moduly jednotlivých složek.

Flázolety se svými spektry značně liší, viz obr. A.49. Tón a3 má výraznou první až čtvrtou harmonickou složku a méně výrazné, ale přítomné pátou až šestou složku. Tón c5 obsahuje také první 4 harmonické složky, ale 3. složka je téměř dokonale potlačena.



(a) Padouk



(b) Smrk

Obr. 4.3: Vzorky dřeva před zpracováním do tvaru strunníku (kobylinky) 3

4.1.8 Padouk

Tón a2 má poměrně jednoduché spektrum, viz obr. A.50. První dvě harmonické frekvence jsou hlavními při forte téměř shodné, v pianu je vidět více zřetelně druhá harmonická s dvakrát silnějším modulem. 3. až 6. složka mají vyrovnanou hladinu modulu (-30 dBu), 6. o 10 dBu nižší. 4. složka v pianu potlačena o 5 dBu. 7. až 11. složka jsou opět na stejné hladině (-70 dBu) - ve forte 8. složka vystupuje od 10 dBu, v pianu jsou potlačeny 9. a 10. složka.

Dále se objevuje ve spektru lalok mezi 0,9 a 2 kHz. z tohoto laloku vystupuje v obou dynamikách frekvence 990 Hz, což odpovídá 9. harmonické složce.

Tón c4 se spektrem na obr. A.42 má relativně vyrovnaný útlum ve spektru až po 5 kHz. Ve forte je o 10 dBu potlačena 3. a 5. harmonická složka. 6. harmonická složka je potlačena o 20 dBu. 12. harmonická složka je ve forte potlačena úplně.

V pianu je potlačena rovněž 5. složka o 10 dBu, 6. složka o 5 dBu. 8. a 9. harmonická složka jsou oproti spektru ve forte potlačeny - 8. o 20 dBu a 9. o necelých 40 dBu.

Flázolety které lze vidět na obr. A.52, obsahují 2 harmonické složky. Tón a3 má lehce výrazné složky v pravděpodobné formantové oblasti testovací kytary, tedy mezi 0,8 – 3 kHz. Tón c5 má ve stejné oblasti méně výrazné složky, ale také zde jsou.

4.1.9 Smrk

Tón a2 s charakteristikou na obr. A.53 má velmi bohaté spektrum při forte, které ztrácí značné množství harmonických v pianu. Toto spektrum, se do značné míry formuje do laloků formantových oblastí, především v oblasti vyšších harmonických frekvencí.

Při forte jsou první 2 harmonické složky stejně intenzivní. v pianu je první složka potlačena o 10 dBu. 3. – 6. harmonická složka kolísají ve forte mezi -20 a -30 dBu. v pianu jsou 4. – 6. složka oproti forte potlačeny (viz obr. A.53).

Od 7. harmonické složky začíná v podstatě první lalok, maximem na 1,2 kHz (11. harmonická frekvence), a končí kolem 1,8 kHz. Druhý lalok začíná na 2 kHz a končí 4 kHz, s maximem ve forte 2,3 kHz. Třetí lalok mezi 4 – 6 kHz s maximem ve forte 5 kHz (46. harmonická složka).

V pianu jsou laloky potlačeny (téměř o 40 dBu). Třetí lalok je potlačen natolik, že celý nedosahuje ani -120 dBu.

Tón c4 má rovněž velmi bohaté spektrum (to odpovídá předpokladu z analýzy materiálů, kde smrk je materiál s největším akustickým koeficientem. to nutně neznamená, že by měl být ovšem tento materiál „nejvhodnější“), jak lze vidět na obr. A.54.

1. – 4. harmonická složka jsou velmi výrazné; rovněž 5. – 7. složka jsou výrazné – v pianu je 5. složka utlumena.

Vyšší harmonické složky jsou přítomny na úrovni kolem -100 dBu. Spektrum je tedy bohaté na vyšších frekvencích, ale narozdíl od **ebenu** jsou tyto složky slabé intenzity.

Flazolety obsahují pouze dvě harmonické frekvence, viz obr. A.55. Tón c5 má obě složky s intenzitou -60 dBu. Je otázkou zda je tato chyba, ke které došlo například i u kobylky Padouku- obr. A.52, či Jatoby - obr. A.43, zda je způsobena stylem hraní, kdy mohlo být více náročné tuto frekvenci vyvolat bez zatlumení, či zda jde o vliv materiálu kobylky.

4.1.10 Ziricote

Tón a2 má velmi bohaté spektrum. Na obr. A.56 je vidět, že ve forte jsou 1. a 2. harmonická složka stejně hlasité, 5. je potlačena, 6. zesílena (oproti křivce útlumu, která by popisovala vyrovnané spektrum).

V pianu je první harmonická složka potlačena, dále je oproti normálnímu útlumu potlačena 5. harmonická složka, stejně jako ve forte. Dále jsou potlačeny 9. složka o 10 dBu a 10. harmonická složka o 50 dBu.

Ve forte se dále objevují dvě maxima: Na 1,9 kHz a na 2,7 kHz. V pianu jsou maxima v okolí 2 kHz a dále v okolí 4 kHz.

Tón c4 viz obr. A.57, má v pianu celkem vyrovnané spektrum. 5. a 7. harmonická složka jsou lehce potlačeny. Ve forte je toto potlačení zvýrazněno. Zároveň je navíc ve forte potlačena lehce 3. harmonická složka. V okolí 10. harmonické složky (2,6 kHz) je potlačena celá oblast. Dále jsou výrazné především 4 frekvence ve forte, zbytek je oproti nim lehce potlačen. Jsou to 3,6; 5; 6,2 a 8,1 kHz.

Flázolety mají standartní očekávané spektrum, viz obr. A.58. Tón a3 obsahuje primárně první dvě harmonické složky a dále se objevují třetí a čtvrtá s hladinou -60 dBu. Tón c5 má rovněž 4 harmonické složky. První je slabší, nežli druhá. Třetí je téměř zcela potlačena.

4.2 Měření směrové charakteristiky kytary

Podle návrhu v kapitole 1.1.3 byly rozestaveny mikrofony Audix podél obvodu půlkruhu s přesně vyměřenými rozestupy, aby platilo, že se jedná o obvod kruhu a zároveň aby úhel mezi každými dvěma mikrofony měl přesně stejnou velikost – $22,5^\circ$, viz obr. 4.4



Obr. 4.4: Příprava půlkruhu mikrofونů pro měření směrovosti.

Oproti experimentu s houslemi byl poloměr tohoto kruhu 50 cm. V následujících sekcích budou rozebrány směrové charakteristiky jednotlivých kobylek dle jejich materiálu.

Následně se nahrál pro každý mikrofon krátký záznam s nasazeným tónovým kalibrátorem, díky čemuž byla možná pozdější kalibrace (resp. justace) během vyhodnocování výsledků v prostředí Matlabu.

4.2.1 Buk lignamon

Velmi směrové vyzařování, dokonce i pro nižší frekvence, vykazuje buk lignamon, viz obr. A.59. Dle očekávání nejvíce směrový je vyšší tón ve forte. Překvapivě nejméně směrové jsou flázolety. Resp. c5 vykazuje lehkou směrovost, ale nikoliv v oblasti těla a kobyly, nýbrž v oblasti „kytarového krku“ (umístění kytary viz kap. 1.2). Přesněji vyzařuje mezi úhly -45° a $-22,5^\circ$.

4.2.2 Cocobolo

Zde již, jak lze vidět na obr. A.60, má tón a2 očekávaně téměř všesměrové vyzařování, ale je-li zohledněno i chování ostatních tónů, lze vidět, že celá charakteristika vyzařuje směrem -45° .

4.2.3 Africký eben

Tóny prázdných strun vyzařují čím hlubší a větší intenzita tím více dopředu. s rostoucí výškou tónu je vyzařování více směrové a to k úhlu -45° . Flázolet c5 se chová nahodile a má potlačenu směrovost na 0° ose. Nejvíce směrový je na úhlu $67,5^\circ$.

4.2.4 Jasan

Směrem na 0° vyzařuje nejvíce tón a2 v pianu, viz obr. A.62. Ve forte je tento tón více všesměrový.

Tón c4 vyzařuje nejvíce na obě strany v pianu – úhly $\pm 67,5^\circ$. ve forte vykazuje největší směrovost na ose $-22,5^\circ$.

Podobnou směrovost jako tón c4 ve forte má flázolet a3. Flázolet c5 tvoří dva laloky hlavní s maximem na 45° a druhý širší, ale méně výrazný s maximem mezi $-22,5^\circ$ – -45° . akustický stín vzniká na $+22,5^\circ$.

4.2.5 Jatoba

Na charakteristice na obr. A.63 lze vidět, že nižší frekvence, tedy tón a2 v pianu vykazují všesměrový charakter s potlačením na -90° . ve forte převažuje směrovost mezi $-22,5^\circ$ – -45° .

Tón c4, v pianu vyzařuje převážně dopředu na 0. osu. ve forte má na $22,5^\circ$ mírný propad a tvoří tedy podobné laloky jako tón c5 u kobyly z Jasanu.

Flažolet a3 opět vyzařuje nejvíce směrem mezi $-45 - -25^\circ$, ale směrovost je velmi mírná (jedná se stále o relativně nízkou frekvenci). Flažolet c5 směrově vyzařuje stejně jako flažolet a3, ale směrovost je mnohonásobně výraznější.

4.2.6 Lípa

Všechny měřené složky lípy vykazují velmi podobnou směrovost. Nepříliš výrazná, tzn. jeden hlavní lalok, s maximumem nakloněným k $-22,5^\circ$. Jediný flažolet c5 se výrazně liší, a to stínem na $22,5^\circ$ a oslabeným lalokem v kladné části polárního grafu. Viz obr. A.64.

4.2.7 Eben macassar

Oproti předchozím materiálům vyzařuje celkově větší směrovost, především v kladné části polárního grafu - viz obr. A.65.

Nižší frekvence - tón a2 má v obou dynamikách podobnou charakteristiku. Potlačení na -90° , výrazné maximum na $+67,5^\circ$. Vyšší frekvence - tón c4 vyzařuje primárně v ose 0° při pianu, ve forte se objevuje stín na $-22,5^\circ$ a maximum hlavního laloku na -45° .

Flažolety vyzařují relativně vyrovnaně dopředu, s potlačenými boky ($\pm 90^\circ$). Vyšší frekvence vykazují více směrové chování, přesně dle očekávání.

4.2.8 Padouk

Tón a2 je nejvíce směrový pro 0° , viz obr. A.66. Vyšší tón c4 je potlačen všude krom -90° . Flažolet a3 má stejný průběh jako c4 a flažolet C5 je výrazně potlačen na $-22,5^\circ$.

4.2.9 Smrk

Jak lze vidět na obr. A.67, kobyłka z padouku nevykazuje příliš výraznou směrovost. Všechny měřené tóny jsou potlačeny na -90° . Flažolet c5 má navíc lehce potlačenu osu 0° .

4.2.10 Ziricote

Má dokonale odstupňovanou směrovost dle výšky a intenzity tónu, viz obr. A.68. Nižší tóny s menší intenzitou vyzařují více dopředu, s rostoucí výškou dochází k zatlumení kladné části spektra. Flažolet c5 má navíc stín na $22,5^\circ$.

5 Shrnutí výsledků

V této kapitole jsou dány výsledky jednotlivých experimentů do společných souvislostí. Zároveň jsou tyto výsledky rozšířeny o další úvahy a reference.

Nejdříve je diskutována analýza spektra. Zvláště pro housle a zvláště pro kytaru. Dále je teprve rozebrána analýza směrových charakteristik, opět pro housle a kytaru zvláště. Samozřejmě nelze tyto analýzy úplně oddělit, je možné, že se místy jejich působení prolne.

5.1 Shrnutí spektrální analýzy

5.1.1 Shrnutí spektra houslí

Na základě analýzy spektrografů měřených doma - mikrofonem DPA, a v bezodrazové komoře - mikrofonem Brüel & Kræjer, se dá říct, že výsledky měření mikrofonem DPA více vypovídají o vyzařování kobyly jako takové - mikrofon byl umístěn 1–2 mm od kobyly, viz obr. 5.1. Zatímco měření v bezodrazové komoře více vypovídá o chování houslí jako takových.

Byť to nebyl původní záměr, obě analýzy se nakonec hodí a je díky nim možné porovnat nejen vliv kobyly na vyzařovaný tón houslí, ale i ověřit samotné rezonanční vlastnosti kobyly.



Obr. 5.1: Nastavení mikrofonu DPA

5.1.2 Shrnutí spektra kytary

Na základě analýzy spektrografů změřených v bezodrazové komoře mikrofonom Brüel & Kræjer (experiment s houslemi ukázal, že se výsledky jinými mikrofony v domácím prostředí příliš neliší) budou v následujících odstavcích popsány rozdíly mezi kobylkami z různých materiálů a návaznost na změřené vlastnosti těchto materiálů.

U čtyř kobylek nebyly změřeny jejich mechanicko-akustické vlastnosti. Jedná se o původní kobylky vyrobené firmou Furch, které slouží jako předloha pro výrobu samotných testovacích kobylek. Tyto kobylky uvažují pouze tabulkové hodnoty (převzaty z [10], str. 55–57), jelikož nebylo časově možné získat je a pracovat s nimi ve stavu, kdy by měly jednoduchou geometrii (tzn. tvar kvádra), díky které lze jejich vlastnosti snadno změřit, jak tomu bylo u kobylek testovacích, které se vyrobily až po změření mechanicko-akustických vlastností jejich materiálů.

I přes nepřesnou znalost mechanických vlastností 4 původních exotických materiálů lze porovnat, jaké akustické vlastnosti mají tyto materiály, jenž se běžně používají pro výrobu kobylek a kytar. Jsou to cocobolo, africký eben, eben maccassar a ziricote. Jelikož se jedná o exotické materiály, jejich vlastnosti jsou spíše blízké exotickým materiálům měřených vzorků, jako je padouk a jatoba. O tom se však zmíníme později.

Souvislost různé barevnosti tónu v jiné dynamice a směrového vyzařování

Na začátek lze říct, že většina měřených materiálů má podobné spektrum v počátku (prvních šest harmonických frekvencí, které udávají základní kytarový charakter). Tedy tuto část pravděpodobně, stejně jako u houslí, určuje především samotné tělo kytary v kombinaci s funkcí oscilátoru. I v počátku ovšem jsou drobné barevné odlišnosti.

Nejprve v rámci jednoho nástroje/materiálu jsou rozdíly mezi barvou (barvou se zde myslí tvar frekvenční modulové charakteristiky – viz kap. 1.3.2) při dynamice forte a piano. V pianu jsou často potlačeny některé složky. Nelze říci, že by vždy byly potlačeny stejným způsobem, ale velmi často se jedná o liché složky. Ve vyšších frekvencích je poté ve forte zvýrazněn vliv hřebenového filtru (jak ve spektru, tak ve směrových charakteristikách) a spektrum je celkově bohatší, jinými slovy lze říct, že piano má celkově v celém spektru potlačené určité složky.

Není to ovšem tak prosté – větší hlasitost, resp. intenzita tónu, automaticky neznamená přibývání více barvy. Spíše by bylo uvážit, že tento rozdíl je silně svázán se směrovou charakteristikou. V případě experimentu s kytarou bylo spektrum měřeno na referenční ose (0°). Pokud je tedy vidět rozdíl mezi jednotlivými tóny

v referenčním bodě polárního grafu, je pak nutně stejný rozdíl i v jednotlivých frekvenčních charakteristikách těchto tónů.

Uvedme příklad kobyly z materiálu **cocobolo**, která nemá v polárním grafu (obr. A.60) mezi jednotlivými dynamikami téměř žádný rozdíl na 0. ose a rovněž ve spektru (obr. A.32 a A.33) není pozorovatelný příliš veliký rozdíl. Zatímco u kobyly z materiálu **africký eben** lze v polárním grafu (obr. A.61) pozorovat veliký rozdíl na 0. ose mezi jednotlivými dynamikami stejných tónů, a zákonitě i ve spektru (obr. A.35 a A.36) se značně liší barvy stejných tónů v různých dynamikách. V pianu jsou silně potlačeny vyšší frekvence, zatímco ve forte se projevuje více hřebenový filtr, zato však je spektrum bohatší.

Jak souvisí tyto rozdíly s vlastnostmi jednotlivých materiálů? Nejméně se v různých dynamikách na referenční ose liší kobyly z materiálů cocobolo, lípa a částečně eben macassar. Střední odlišnosti vykazují padouk, smrk, buk, jasan a jatoba. Největší rozdíly jsou potom u ziricote a ebenu.

Souvislost vlastností materiálů kobylek se spektrem Kobylky budou popsány postupně od těch s největším akustickým odporem a zároveň nejnižší akustickou konstantou a na základě jejich charakteristik se přidají a porovnají dále všechny ostatní kobyly.

Nejvyšší akustický odpor a zároveň nejvyšší modul pružnosti má **buk lignamon** (modul měřen ultrazvukovou metodou – při kontrole metodou impulsní odezvy měl buk druhý nejmenší dynamický modul, pravděpodobně v tomto jediném měření došlo k chybě odečtu frekvence – viz kap. 1.2.2). Jeho spektrum v pianu není příliš bohaté (viz obr. A.29) – akustický odpor způsobí, že kobylka funguje jako filtr, který nepropustí vyšší frekvence. Při silnějším rozeznění struny je spektrum bohatší v oblasti kolem 5 – 6 kHz. Ve forte má relativně lineární pokles (v jednotkách dB, pokles je tedy ve skutečnosti logaritmický). Při vyšších frekvencích se již rozeznívá více, objevuje se formantová oblast kolem 6,5 kHz, stále je ovšem spektrum nevýrazné.

Kobyly s druhým nejvyšším akustickým odporem jsou kobylka z **jatoby** a z **cocobola**. Tyto dvě kobyly mají velmi podobné frekvenční charakteristiky. Bohužel u cocobola nejsou jeho fyzikální vlastnosti zjištěny ve všech směrech, nýbrž jsou pouze převzaty (viz str. 31).

Od **cocobola** se **jatoba** liší tím, že má jednak nižší akustickou konstantu, což je dáno jeho vyšší hustotou ($\rho_{\text{cocobolo}} = 1095 \text{ kg/m}^3$, zatímco $\rho_{\text{jatoba}} = 856,96 \text{ kg/m}^3$), jednak s tím souvisí i značně vyšší modul pružnosti **jatoby** (zjištěn oběma metodami; $E = 25 \pm 0,5 \text{ GPa}$) oproti tabulkové hodnotě cocobola ($E = 18,7 \text{ GPa}$).

Spektrum kobylek z **jatoby** a **cocobola** má v dynamice piano oproti charakteristice kobyly z buku (obr. A.41) výraznější úroveň mezi 700 – 2000 Hz. V dynamice

forte lze pozorovat výraznější formantové oblasti. **Jatoba** má sice vyšší akustický odpor, nežli **padouk**, avšak padouk má nižší akustickou konstantu.

Jeho spektrum v porovnání s jatobou (obr. A.50) má výrazně (dokonce nejvýrazněji ze všech kobylek) potlačenu úroveň modulů kolem 1,5 kHz (s šířkou pásma 1 kHz). Pro vyšší tón potom jatoba oproti cocobolu má značný propad mezi 2 – 3 kHz. Při nižších frekvencích má posílenou oproti jatobě má úroveň modulů kolem 2 kHz, kde má výrazný lalok. S rostoucí frekvencí základního tónu je u jatoby spektrum „řidké“.

Na základě tohoto se zdá, že vyšší akustická konstanta v kombinaci s vyšším akustickým odporem znamená, že se kobylka chová jako silný filtr. Nejen pro vyšší frekvence, ale i pro pásmo 2 – 6 kHz, na které má i u houslí kobylka největší vliv dle Woodhouse ([8]).

Eben macassar má velikost akustického odporu přibližně $3,5 \text{ MPa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$. Je tedy další v řadě dle velikosti akustického odporu. Jeho akustická konstanta je však mezi dřevinami Furchových kobylek nejvyšší, z testovacích materiálů na podobné úrovni jako jatoba, která má ovšem vyšší hustotu a rychlost šíření zvuku, tomu odpovídá i vyšší modul pružnosti.

Ve spektru se tento rozdíl projevuje silnější formantovou oblastí mezi 1 – 2 kHz pro **jatobu** ve forte, zatímco **eben macassar** má bohatší spektrum v pianu. To je u **jatoby** silně potlačeno, zatímco macassar obsahuje formantový lalok mezi 2 – 3 kHz. Jinými slovy jatoba má v pianu příliš málo energie na přenesení vibrací přes kobylku, o to větší problém se to stává s rostoucí frekvencí, zatímco eben macassar nemá mezi piano a forte veliký rozdíl. Ovšem při dostatečné energii má jatoba posíleno spektrum ve formantových oblastech a vyšších frekvencích. U vyšších frekvencí je rozdíl velmi malý, snad pouze 4. a 5. harmonická složka tónu c4 ve forte (obr. A.42 a A.48) je u jatoby výraznější. V pianu totéž, ale méně výrazně.

Obecně se zdá, že vyšší modul pružnosti ve spojení s relativně vysokým akustickým odporem a nemalou akustickou konstantou znamenají chudé spektrum v pianu, ale o to bohatší ve forte. Zatímco nižší modul pružnosti znamená menší rozdíl v barvě při různé dynamice.

Ani jedna z posledních zmíněných kobylek (tzn. eben macassar, padouk, jatoba, cocobolo a buk lignamon) nepředá tělu frekvence vyšší než 10 kHz s úrovní alespoň -120 dBu při hraní tónu a2. Pro tón c4 platí v podstatě stejná závislost, pouze horní kmitočty se posunul ke 20 kHz a vyšší frekvence nelze kvůli vzorkovacímu teorému a dalším technickým možnostem měření analyzovat.

Jakou vlastnost má zircote jinak než ostatní kobylky, že je jeho spektrum na vyšších kmitočtech bohatší? Co africký eben?

Kobylky ze **zircote** a **afrického ebenu** mají překvapivě nízký akustický odpor (Kolem $2,9 \text{ MPa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$) nižší odpor má již pouze lípa, která má ovšem po smrku

druhou největší akustickou konstantu, přičemž mají zircote a africký eben velmi nízkou akustickou konstantu – africký eben je mezi jatobou a padoukem a zircote má úplně nejmenší konstantu ze všech kobytek.

Jak se tato skutečnost projevuje na spektru zircotové kobytky a kobytky z afrického ebenu? Ještě se nemluvilo o spektru kobytek s vysokou akustickou konstantou a nízkým akustickým odporem. Jsou to **smrk**, **lípa** a **jasan**. Proto dříve, než bude prozkoumán vliv fyzikálních vlastností zircotu a afrického ebenu, který se jeví být komplikovanější, budou probrány zmíněné domácí dřeviny.

Spektrum domácích dřevin se značně liší v pianu a forte – piano má silně potlačeny vyšší frekvence, zato jsou velmi diskrétní moduly jednotlivých harmonických frekvencí a vystupují silně lokální maxima formantových oblastí – např. u smrku 11. a 20. harmonická složka. Jejich spektra jsou, krom smrku, který má z těchto tří nejvyšší modul pružnosti, omezena v podstatě do 10 kHz, kde již nedosahují ani -120 dBu.

Jaké mají vlastnosti? Předně mají relativně nízké hodnoty hustoty. Jsou to materiály se středně velkým modulem pružnosti (v porovnání s ostatními analyzovanými materiály), řádově 13 – 20 GPa. (Je překvapivé, že všechny kobytky od „Furča“ měly v tabulkách nižší hodnoty¹). Dále jsou to materiály s vysokou akustickou konstantou a s nízkým akustickým odporem.

Tedy zdá se, že vysoká akustická konstanta spolu s nízkým akustickým odporem způsobuje slabou, téměř nulovou diverzitu tónu v různých dynamikách.

Teprve nyní lze porovnat **africký eben** a **zircote** a hned na první pohled je jasné srovnání afrického ebenu a smrku. Stejně jako smrk jsou nejvýraznější formantové složky 11. a 20. harmonické složky. Zásadní rozdíl je hladina těchto složek a složek v jejich okolí. Zatímco **smrk** se pohybuje na úrovni -80 – -90 dBu v pianu a -60 dBu ve forte, **africký eben** dosahuje hodnot -60 dBu v pianu a -70 dBu ve forte. Obě oblasti jsou u ebenu relativně souměrné a mají podobnou úroveň, zatímco u smrku převažuje formantová oblast v okolí 2 kHz (20. harmonická složka)

Zdá se, že africký eben a zircote, se střední hodnotou akustické konstanty, nízkým modulem pružnosti, ale zároveň nepřiliš velkou hustotou a tedy nízkým akustickým odporem, mají malý rozdíl tónu v různých dynamikách a jejich spektrum je velmi vyrovnané a bohaté. Je možné že nízký modul pružnosti neposílí formantové oblasti, ale zároveň kombinace akustické konstanty a odporu nezpůsobí ani potlačení.

Závěrem poznámka o jedné ze zajímavých vlastností „originálních“ materiálů (tzn. africký eben, zircote, cocobolo, eben macassar). Mají velmi podobné charakteristiky v různých dynamikách. Stále platí, že piano má více „diskrétní“ průběh, zatímco forte je více „barevné“, ale rozdílem oproti doposud zmíněným testovacím

¹Je otázkou, zda se jedná o stejné hodnoty, jak upozorňuje Woodhouse v [8]. Jelikož se jedná o převzaté hodnoty, nelze přesně určit.

kobyilkám je úroveň, které dosahují moduly jednotlivých harmonických složek. V oblasti mezi 1 – 6 kHz (což podle Woodhouse odpovídá oblasti, ve které se nejvíce projevují vlastnosti kobylek) mají rozmanitá spektra s vyššími úrovněmi modulů.

5.2 Shrnutí analýzy směrové charakteristiky

5.2.1 Analýza směrové charakteristiky houslí

Na základě analýzy polárních grafů zobrazujících směrové vyzařování kobylek za různých podmínek bylo vyzorováno následující:

Vcelku se zdá, že javorová kobylka je směrová nejvíce na nulové ose (směrem dopředu). Zatímco plastová je ve většině polohách více směrová na $22,5^\circ$, ale od frekvence, které odpovídá přibližně tón h2 a výše, dochází k potlačení vyzařování dopředu a housle vyzařují více na strany, přičemž se zvyšujícím se tónem se posouvá „stín“ rovněž doprava.

5.2.2 Analýza směrové charakteristiky kytary

Vzhledem k umístění kytary s kobylkou ve středu dochází u většiny kobylek k posunutí maxima hlavního laloku na $-45 - -22,5^\circ$. Jinak většina kobylek zachovává teoretický předpoklad, že vyšší frekvence jsou více „směrové“.

Při technice flázoletu se často objevuje akustický stín na mezi $0 - 22,5^\circ$. Tato technika spočívá v lehkém zatlumení struny v nějakém bodě, kde tím vznikne uzel [26]. V našem případě byla zvolena polovina struny. Toto zatlumení provádí v experimentu lidská ruka, která tvoří nemalou překážku. Odsud pravděpodobný vznik hřebenového filtru a tudíž i akustického stínu ve zmíněných osách.

Největší směrovost má kobylka z buku lignamonu a to na $+22,5^\circ$. Ze všech použitých vzorků je to vzorek s nejvyšší hmotností, ergo hustotou, jelikož rozměry vzorků jsou téměř totožné, a největším dynamickým modulem a největším akustickým odporem v osách L a R.

Je nutné si uvědomit, že celkově žádný z tónů žádné z kobylek nevykazuje výraznou směrovost, krom buku lignamonu.

Závěr

Cílem práce bylo zjistit, jaký vliv má materiál, a to především hustota, kobylky strunného nástroje na akustické vlastnosti tohoto nástroje. Bylo provedeno vícero experimentů a měření, která byla následně analyzována.

Práce se věnuje celkem čtyřem oblastem:

- mechanicko-akustickým vlastnostem kobylky houslí a kytary, vyrobené ze specifického materiálu,
- spektru akustického signálu různých tónů houslí se zatlumeným a nezatlumeným tělem a kytary,
- směrovému vyzařování akustického signálu pro kobylek houslí a kytary ve dvou různých dynamikách (konkrétně *piano* a *forte*),
- souvislostem předchozích tří bodů a jejich jednotlivých provázanostech.

Při analýze mechanicko-akustických vlastností houslí je nutné vzít v úvahu, že porovnáváme materiály: javorové dřevo a plast PLA; zatímco javorové dřevo je ortotropní materiál, PLA je izotropní. Hodnoty veličiny jako Youngův modul pružnosti, rychlost šíření zvuku, akustickou impedanci a akustický koeficient má javorové dřevo oproti PLA vyšší v podélné rovině zatímco v kolmé rovině dosahuje hodnot menších. Jejich chování se tedy do jisté míry překrývá, může se ovšem lišit s každou frekvencí jiným způsobem, protože podélné a příčné vlnění uvnitř kobylky z javorového dřeva se s každou frekvencí uplatňuje jinak.

Dále při analyzování mechanicko-akustických vlastností vychází najevo, že kobylka z javorového dřeva má v celém frekvenčním spektru zanedbatelný akustický činitel pohltivosti, zatímco kobylka z PLA má s rostoucí frekvencí silně rostoucí koeficient akustické pohltivosti (tab. 2.2). Jak lze vidět na obrázcích A.28, A.24 a A.22, akustický činitel pohltivosti pravděpodobně způsobuje směrovou nevyváženost pro vyšší tóny hrané na housle s plastovou kobylkou - především pro strunu E. Otázkou do budoucna je, zda má vliv pouze akustický činitel pohltivosti, nebo hrají roli i další faktory, případně jaké?

Mechanicko-akustické vlastnosti materiálů použitých na výrobu kytarových kobylek, resp. strunníků, se změřily experimentálně pro šest testovacích vzorků (jsou to vzorky v tab. 2.4).

Dále bylo analyzováno spektrum změřených vzorků. V jaké části spektra se nejvíce projeví vliv kobylky a v jaké vliv těla analyzovaných hudebních nástrojů? Při analýze spektra houslí, porovnáním měření s mikrofonom DPA, který byl při měření umístěn 1–2 mm od kobylky, a měřením v bezodrazové komoře mikrofonom značky Brüel & Krøjer, kdy nebylo možné mikrofonom umístit dostatečně blízko - byť byl stále namířen na kobylku - se ukázalo následující:

- vliv kobylky na spektrum jak uvádí [8] nemusí být výhradně v oblasti kolem 2

a 6 kHz, ale jednoznačně když zatlumíme tělo dochází často k navýšení počtu vyšších harmonických frekvencí (k čemuž často ovšem dochází právě ve zmíněné frekvenční oblasti),

- plastová kobyłka má oproti dřevěné v některých tónech celkově více vyšších harmonických,
- rozdíl ve spektru při snímání z bezprostřední blízkosti oproti velmi krátké vzdálenosti je množství vyšších harmonických frekvencí - kdy čím blíže mikrofon je, tím více a lépe jsou zachycovány. Samozřejmě je to očekávané chování - z takovéto blízkosti by mohlo dojít k vytvoření hřebenového filtru - kruhová vlna ztrácí intenzitu se čtvercem vzdálenosti [27].

Při analýze spektra kytar bylo zjištěno, že:

- charakteristika směrového vyzařování je nutně provázána s frekvenční charakteristikou a naopak,
- vliv hustoty, rychlosti šíření zvuku a modulu pružnosti, potažmo akustického odporu a akustické konstanty, mají specifický vliv na spektrum podle toho, jakou kombinací těchto hodnot daný materiál disponuje.

Bennet v [24] uvádí, že kytarové kobyłky se vyrábí ze dřeva s hustotou v rozmezí 700 – 1200 kg · m⁻³ a s modulem pružnosti v rozmezí 12 – 20 GPa.

Přesné hodnoty vlastností následujících materiálů jsou podrobně vypsány v tabulkách 2.3 a 2.4.

Kobyłky v této práci tato rozmezí splňují, krom dvou materiálů – jatoba a buk lignamon, které mají modul pružnosti v podélném směru vyšší. Smrk a padouk mají rovněž velký modul pružnosti. Co se týká hustoty pak jasan, smrk a lípa měli hustotu nižší. Tedy byly testovány převážně materiály v typickém rozmezí, ale i extrémy, díky kterým vyšlo najevo, jaký vliv mají zmíněná hustota a modul pružnosti – akustická konstanta a akustický odpor – na funkci kobyłky.

Jaký vliv teda mají? Z měření se zdá, že v případě, kdy má materiál vysokou hustotu, ale zároveň vysoký modul pružnosti (buk lignamon), způsobí to, že se kobyłka chová jako akustický filtr a výsledné spektrum nástroje je méně barevné – to i při forte.

Oproti tomu materiál s podobně vysokou hustotou ale polovičním modulem pružnosti (cocobolo, jatoba), který má stále relativně vysoký akustický odpor a velmi nízkou akustickou konstantu má již spektrum lehce posíleno v oblasti mezi 700 – 2000 Hz.

Do stejné kategorie patří i padouk se středně velkou, spíše vyšší hustotou, vysokým modulem pružnosti, střední velikostí akustické konstanty a stále relativně vysokým akustickým odporem.

Další kategorií jsou kobyłky se střední velikostí akustického odporu, ale velmi vysokou akustickou konstantou. To znamená středně nízkou hustotou a středním

modulem pružnosti. Ty mají relativně chudé spektrum v pianu, ale o to bohatší ve forte.

Další kategorií jsou kobyly s nízkým akustickým odporem a nízkou akustickou konstantou (africký eben a ziricote). Tyto kobyly vykazovaly nejbohatší a nejvíce vyrovnané spektrum. Jsou to materiály, které pro kobyly doporučuje i Bennet v [24].

Poslední kategorií jsou kobyly se středním modulem pružnosti a nejmenší hustotou (například smrk, lípa, jasan). Ty mají výrazné formantové oblasti, ale nízké hodnoty vysokých frekvencí oproti např. africkému ebenu, či ziricote.

Modul pružnosti se zdá být zásadním parametrem, který rozhoduje o rozdílnosti spektra mezi pianem a forte.

Nakonec bylo analyzováno směrové vyzařování.

V případě houslí vyzařovaly více směrem dopředu (v modelu této práce směrem 0. osy) housle s javorovou kobylkou, zatímco housle s plastovou kobylkou vyzařovaly v průměru lehce doprava z pohledu hráče, tedy v tomto případě pod úhlem $22,5^\circ$.

Jak souvisí mechanicko-akustické vlastnosti materiálů kobyly a směrové vyzařování houslí? Již byl zmíněn koeficient akustické pohltivosti. Další koeficient, který hraje důležitou roli je akustický koeficient. Ten je u javorového dřeva oproti PLA bezkonkurenčně větší, to by mohl být důvod pro jeho větší směrovost, zatímco housle s PLA kobylkou měly ve všech charakteristikách, oproti houslím s kobylkou z javorového dřeva, drobné odchylky.

Analýza směrového vyzařování kytar neukázala velké směrové chování. Potvrdilo se, že s rostoucí frekvencí je směrovost větší. Nejzajímavější směrovou charakteristiku měl buk lignamon, který má vysokou hustotu a zároveň vysoký modul pružnosti, tedy vysoký akustický odpor a nízkou akustickou konstantu.

U mnoha kobyly se vyzařování lehce nasměrovalo hlavním lalokem k $-22,5^\circ$. To by odpovídalo akustickému stínu ruky, který během nahrávání pravděpodobně způsobil hráč nedbalým držením nástroje. Zároveň při technice flažoletů dochází k vytvoření minima v místě, kde měl hráč ruku ($+22,5^\circ$). To by rovněž odpovídalo akustickému stínu způsobenému difrakcí zvukového vlnění od překážky.

Na úplný závěr návrh pro budoucí výzkum. Prvně by bylo vhodné věnovat se více i umělým materiálům a snažit se napodobit specifické kombinace mechanických vlastností, jež byly popsány v této práci. Navrhnout experiment pro měření směrové charakteristiky, který by dovolil snadnější, časově méně náročné a přesnější měření směrové charakteristiky, ideálně potom s robotizovaným generátorem tónu, který by dokonale zaručil stejné počáteční podmínky a umožnil využití otáčivého ramene v bezodrazové komoře (to by znamenalo obrovské usnadnění měření a umožnilo realizaci více experimentů). Kvůli zřejmé nutnosti presence strun při měření navrhnout další způsoby uchycení a měření kobyly.

Literatura

1. SYROVÝ, Václav. *Hudební akustika*. Praha: AMU, 2003. ISBN 978-80-7331-127-8.
2. JANSSON, Erik. *Acoustic for Violin and Guitar Makers*. Stockholm, Švédsko: Speech, Music, Hearing part of School of Computer Science a Communication, 2002.
Dostupné online z: <<https://www.speech.kth.se/music/acviguit4/index.html>>.
3. POŽGAJ, Alexander. *Štruktúra a vlastnosti dreva*. Bratislava: Príroda, 1993. ISBN 80-07-00600-1.
4. BUCUR, Voichita. Acoustics of Wood. In: *ICSV13*. Centre de Recherches Forestières de Nancy, INRA ; Laboratoire d'Etude et Recherches sur le Matériau Bois (Lermab) UMR 1093; 54280 Champenoux, France, 2006.
5. HOFFMANN, Pavel. *Inovace žebroví kytary Dreadnought*. Brno, 2021. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. [online], [cit. 2021-10-23], Dostupné z: <<https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/133467>>.
6. RITTER, Michael A. *Timber Bridges: Design, Construction, Inspection, and Maintenance*. Washington, DC: United States Department of Agriculture Forest Service, 1990.
Dostupné online z: <https://www.dot.state.mn.us/bridge/pdf/insp/USFS-TimberBridgeManual/em7700_8_chapter03.pdf>.
7. BISSINGER, George. The Violin Bridge As Filter. *Cambridge University Engineering Department*. 2006, s. 482–491. doi: 10.1121/1.2207576.
8. WOODHOUSE, Jim. Body Vibration of the Violin – What Can a Maker Expect to Control? *Cambridge University Engineering Department*. 2016, s. 43–49.
9. *Test Method for Dynamic Youngs Modulus, Shear Modulus, and Poissons Ratio by Impulse Excitation of Vibration*. ASTM International, [b.r.]. Dostupné z DOI: 10.1520/e1876-15.
10. SPROSSMANN, Robert; ZAUER, Mario; WAGENFÜHR, André. Characterization of acoustic and mechanical properties of common tropical woods used in classical guitars. *Results in Physics*. 2017, roč. 7, s. 1737–1742. Dostupné z DOI: 10.1016/j.rinp.2017.05.006.

11. WEGST, U. G. K. Wood for sound. *American Journal of Botany*. 2006, roč. 93, č. 10, s. 1439–1448. Dostupné z DOI: 10.3732/ajb.93.10.1439.
12. HOLZNER, Steven. *Physics For Dummies*. For Dummies, 2004. ISBN 9780764554339.
13. GEIST, Bohumil. *Akustika - jevy a souvislosti v hudební teorii a praxi*. Praha: MUZIKUS s.r.o., 2005. ISBN 978-8086253312.
14. GREN, Per et al. Laser vibrometry measurements of vibration and sound fields of a bowed violin. *Meas. Sci. Technol.* 2006, roč. 17, č. 4, s. 635.
15. ROSSING, Thomas D. Guitars and Lutes. In: *The Science of String Instruments*. Springer New York, 2010, s. 19–58. ISBN 978-1-4419-7109-8. Dostupné z DOI: 10.1007/978-1-4419-7110-4_1.
16. HANZÁLEK, P. *Analýza spektra houslí*. 2017. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. 77 s.
17. TRÁVNÍČKOVÁ, Hana. *Komparace akustických vlastností kytar ze stejné výrobní řady*. 2020. Dipl. pr. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Dostupné také z: <<https://www.vutbr.cz/studenti/zavprace/detail/125871>>.
18. PIERCE, John R. *Zvuk: Hudba s ušima fyziky*. Spektrum – Akademischer Verlag, 1999. ISBN 9783827405449.
19. VACULOVÁ, Kristina. *Vývoj metodiky flétnové hry ve 20. století a její aplikace na současné metodické směry flétnové hry [online]*. 2015 [cit. 2022-05-29]. Dostupné také z: <https://theses.cz/id/up8nof/>. dizertační práce. Janáčkova akademie múzických umění v Brně, Hudební fakulta. Vedoucí práce: prof. Mgr. Václav Kunt.
20. JÄGER, Ondřej. *Návrh konstrukce kytary na základě vlastních tvarů ozvučnice*. 2006. Diplomová práce. Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně. Vedoucí práce Ing. Petr Koňas, Ph.D.
21. NEZNÁMÝ, Autor. *PLA*. 2021. Tech. zpr. SD3D. [Online]. <https://www.sd3d.com/wp-content/uploads/2017/06/MaterialTDS-PLA_01.pdf>.
22. OGUNBOWALE, W.O et al. Acoustical Absorptive Properties of Cotton, Polylactic Acid Batts and Fabrics. *American International Journal of Contemporary Research*. 2012, roč. 2. Č. 11, s. 106.–114.
23. NEZNÁMÝ, Autor. *Absorption Coefficients*. 2021. Tech. zpr. Acoustic Project Bureau. [Online]. <https://www.acoustic.ua/st/web_absorption_data_eng.pdf>.

24. BENNETT, Bradley C. The Sound of Trees: Wood Selection in Guitars and Other Chordophones. *Economic Botany*. 2016, roč. 70, č. 1, s. 49–63. Dostupné z DOI: 10.1007/s12231-016-9336-0.
25. SYROVÝ, Václav. *Akustika*. Praha: Akademie múzických umění, 2014. ISBN 978-80-7331-323-4.
26. ŠTEFL, Vítězslav. Techniky hry? A jaké? 4 - Flažolety. *Muzikus*. 2016, č. 4. Dostupné také z: <https://www.casopismuzikus.cz/workshopy/techniky-hry-jake-4-flazolety>.
27. PŘIKRYL, L. Základy akustiky. *Výzkumné centrum JAMU*. 2020. Dostupné online z: <<https://www.audified.com/projekt/vavcjamu/vyuka/downloads-2/prednasky.html>>.
28. HABIB, Sagar. What is PLA Plastic (Polylactide)? | A Simple and Definitive Guide. *Plastic Ranger*. 2021. Dostupné také z: https://plasticranger.com/what-is-pla-plastic/#What_is_PLA_Plastic. [Online], Verze 26.7 (2021), [rev. 2021-11-26], [cit. 2021-12-02].
29. PEDGLEY, Owain; NORMAN, Eddie. Materials Innovation in Acoustic Guitars: Challenging the Tonal Superiority of Wood. *Leonardo Music Journal* [online]. 2012, roč. 22, s. 17–24 [cit. 2022-05-28]. ISSN 09611215, ISSN 15314812. Dostupné z: <http://www.jstor.org/stable/23343799>.
30. JANSSON, E.V. Violin frequency response – bridge mobility and bridge feet distance. *Applied Acoustics*. 2004, roč. 65, č. 12, s. 1197–1205. Dostupné z DOI: 10.1016/j.apacoust.2004.04.007.

Seznam symbolů a zkratek

- PLA** anglicky *Poly lactide Acid* je typ tvrdého biodegradovatelného platu, často užívaný v domácích 3D tiskárnách. Zde konkrétně <https://gmb.nl/item.aspx?id=9470>
- DAW** anglicky *Digital Audio Workstation* je elektronické zařízení nebo softwarová aplikace pro nahrávání, editování a produkování audio souborů.
- VST** anglicky *Virtual Studio Technology* je softwarové rozhraní pro komunikaci mezi hostitelským programem a zásuvnými moduly, kde tyto moduly slouží ke generování a úpravě digitálního audio signálu. Používá se především v prostředí nahrávacích studií, kde dokáže nahradit některá audio zařízení a simulovat jejich funkci v počítači. Tato technologie byla vyvinuta firmou Steinberg jako otevřený standard dostupný třetím stranám.
- GUI** Grafické uživatelské rozhraní

Seznam příloh

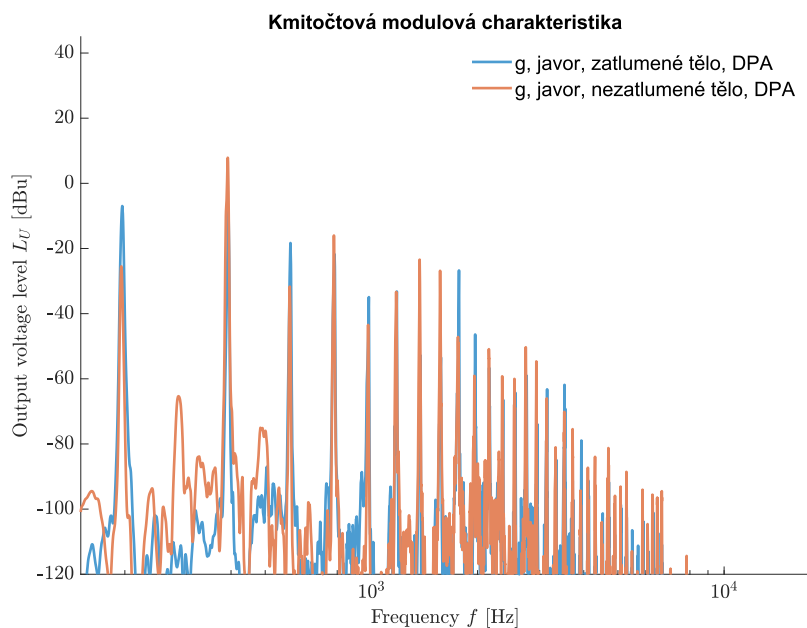
A	Obrazová příloha	66
A.1	Výsledky prvního experimentu	66
A.1.1	Grafy kmitočtové charakteristiky houslí	66
A.1.2	Grafy směrové charakteristiky houslí	75
A.2	Výsledky druhého experimentu	81
A.2.1	Grafy kmitočtové charakteristiky kytary	81
A.2.2	Grafy směrové charakteristiky kytary	111
B	Zkrácený výpis kódu z Matlabu	115
B.1	Kód pro vygenerování spektrografů v Matlabu	115
B.2	Kód pro vygenerování směrové charakteristiky v Matlabu	116
C	Obsah elektronické přílohy	119

A Obrazová příloha

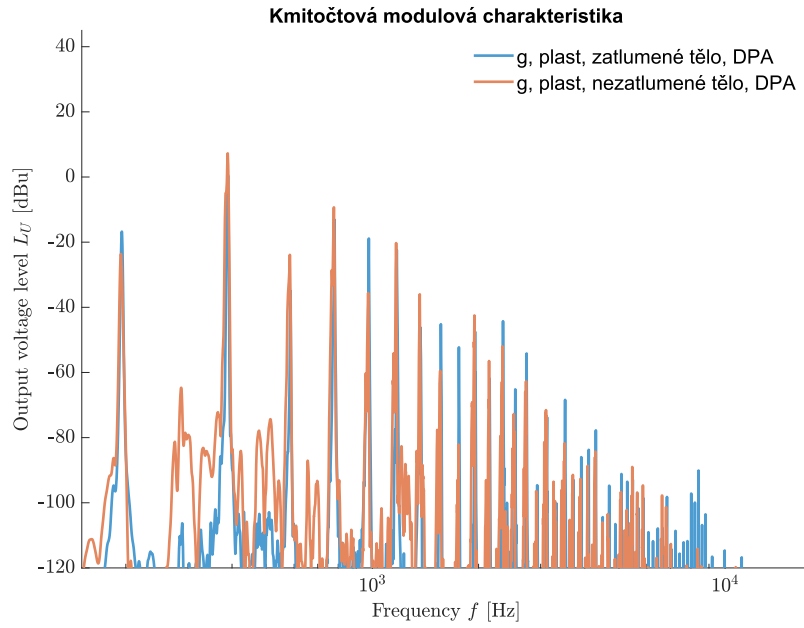
A.1 Výsledky prvního experimentu

A.1.1 Grafy kmitočtové charakteristiky houslí

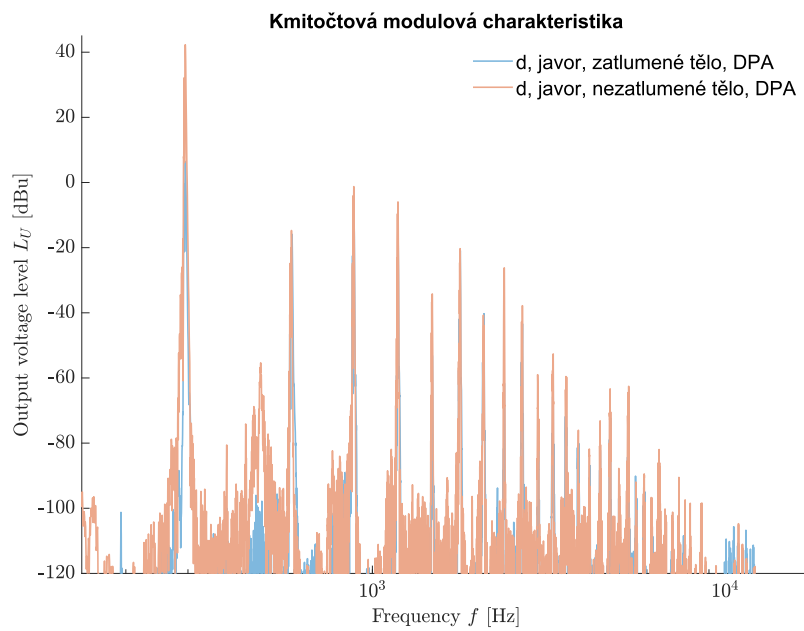
Měření s mikrofonom DPA



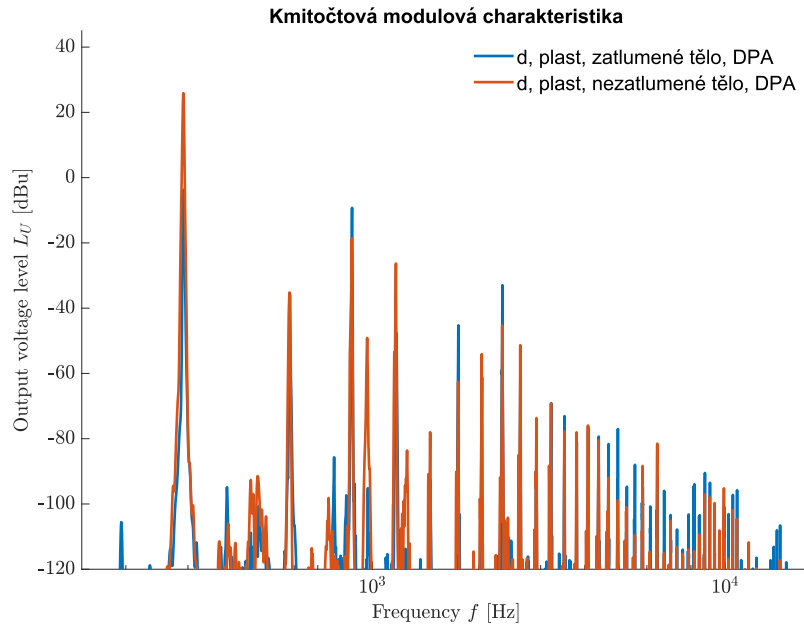
Obr. A.1: Modulová charakteristika javorové kobyly - tón g1



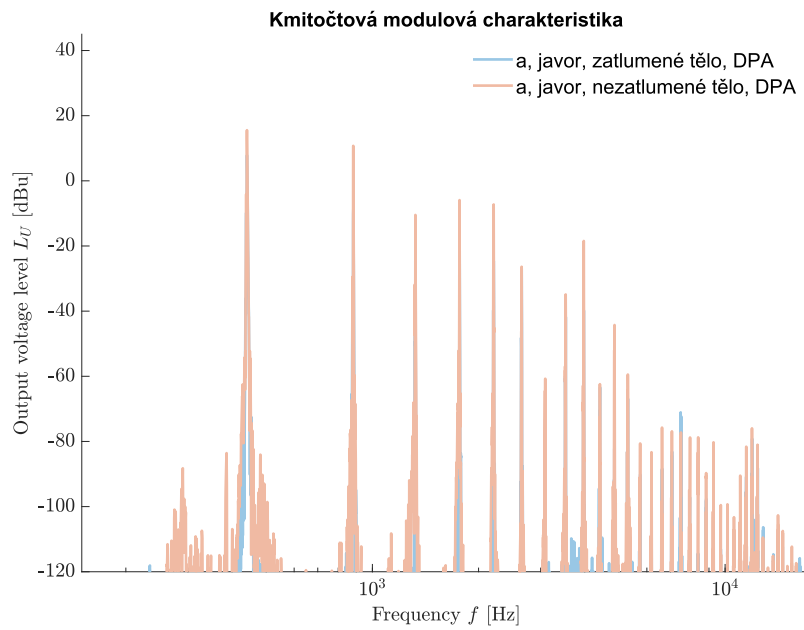
Obr. A.2: Modulová charakteristika plastové kobylinky - tón g1



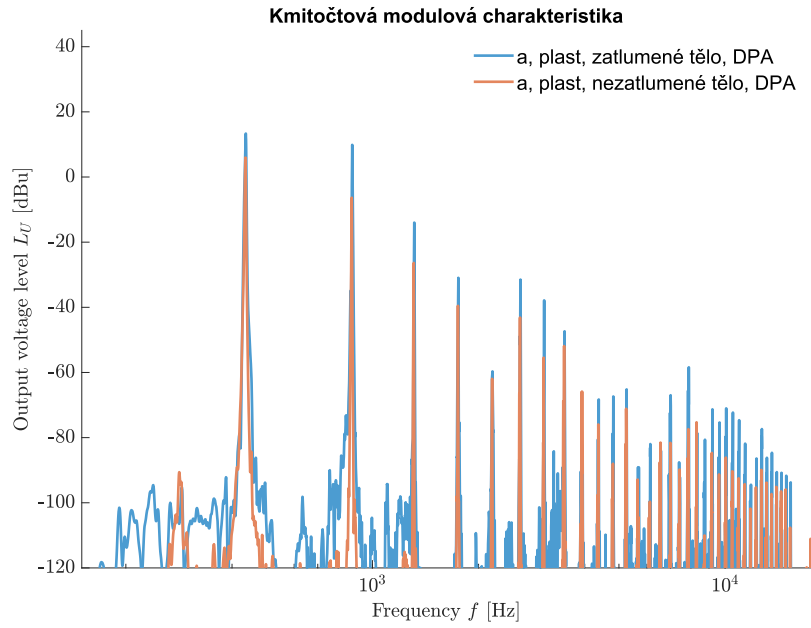
Obr. A.3: Modulová charakteristika javorové kobylinky - tón d1



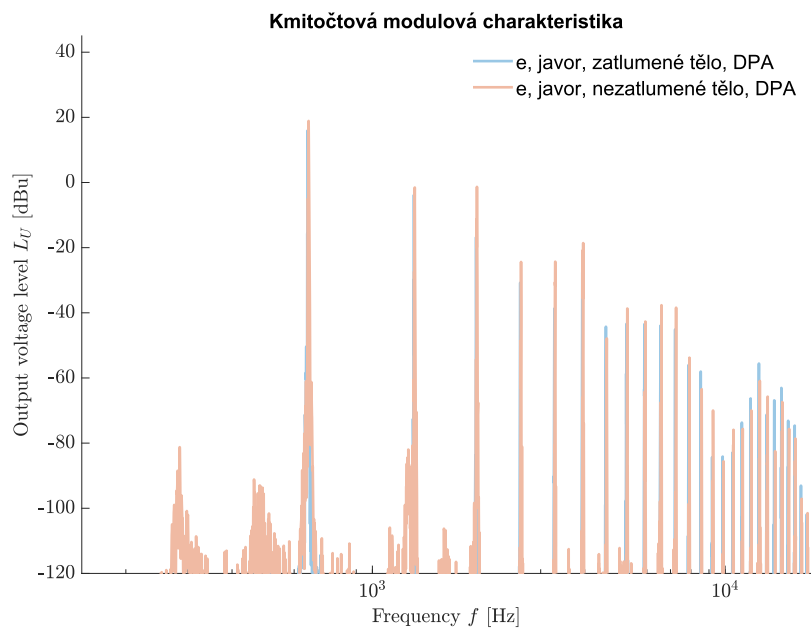
Obr. A.4: Modulová charakteristika plastové kobyly - tón d1



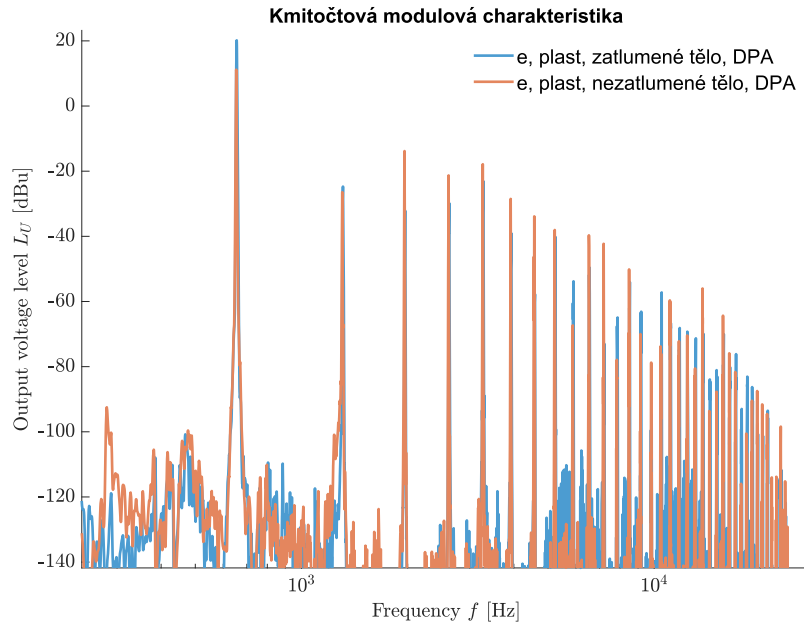
Obr. A.5: Modulová charakteristika javorové kobyly - tón a1



Obr. A.6: Modulová charakteristika plastové kobyly - tón a1

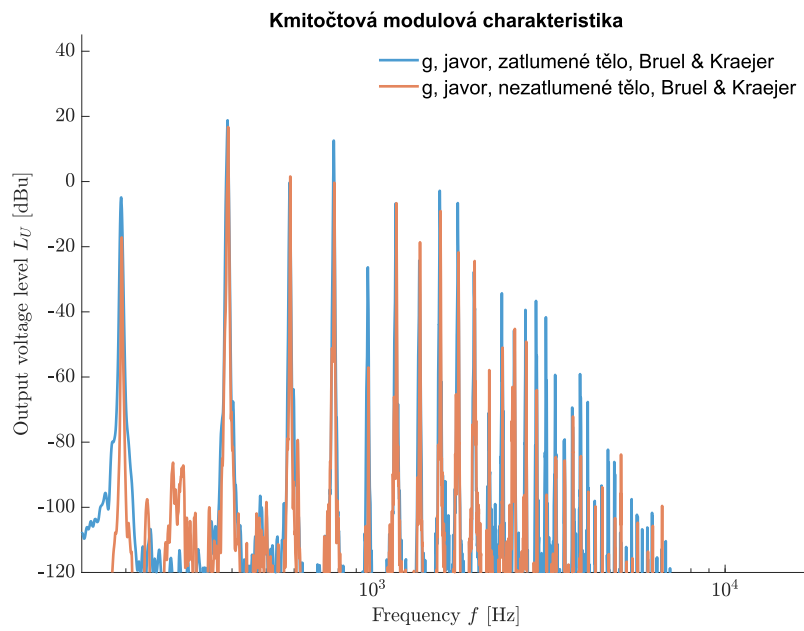


Obr. A.7: Modulová charakteristika javorové kobyly - tón e2

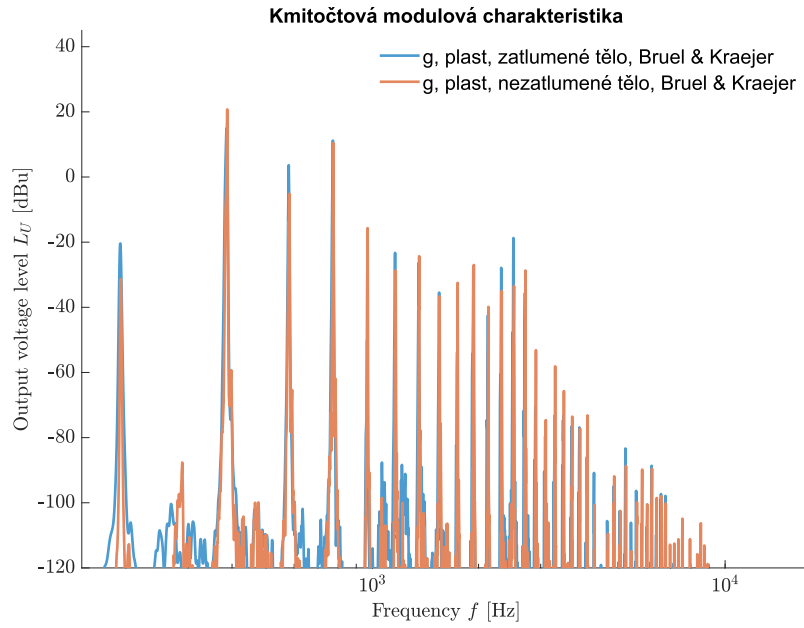


Obr. A.8: Modulová charakteristika plastové kobyly - tón e2

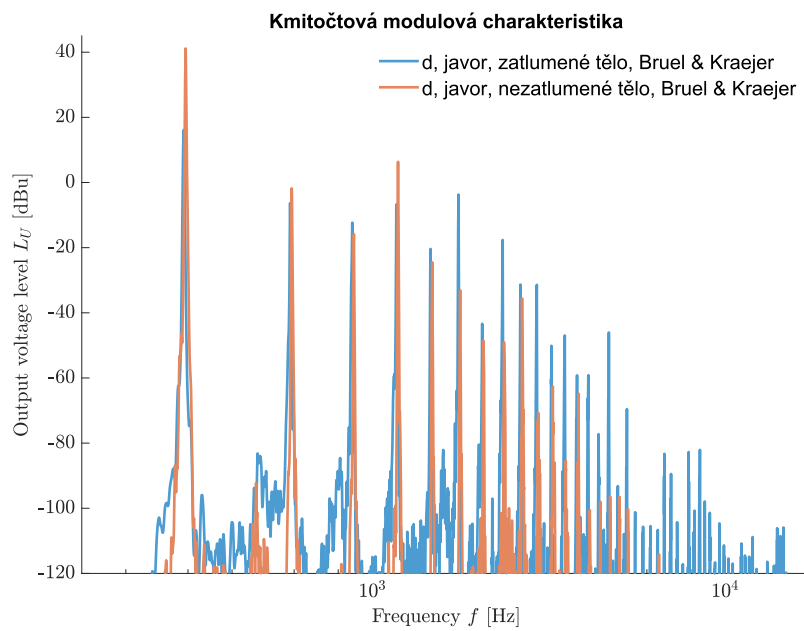
Měření v bezdravové komoře mikrofonom Brüel & Krøjer



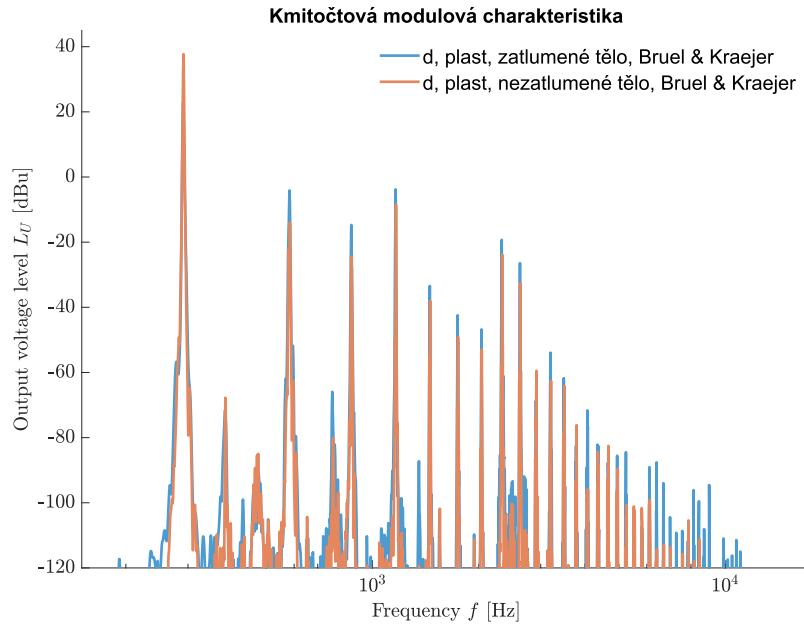
Obr. A.9: Modulová charakteristika javorové kobyly - tón g1



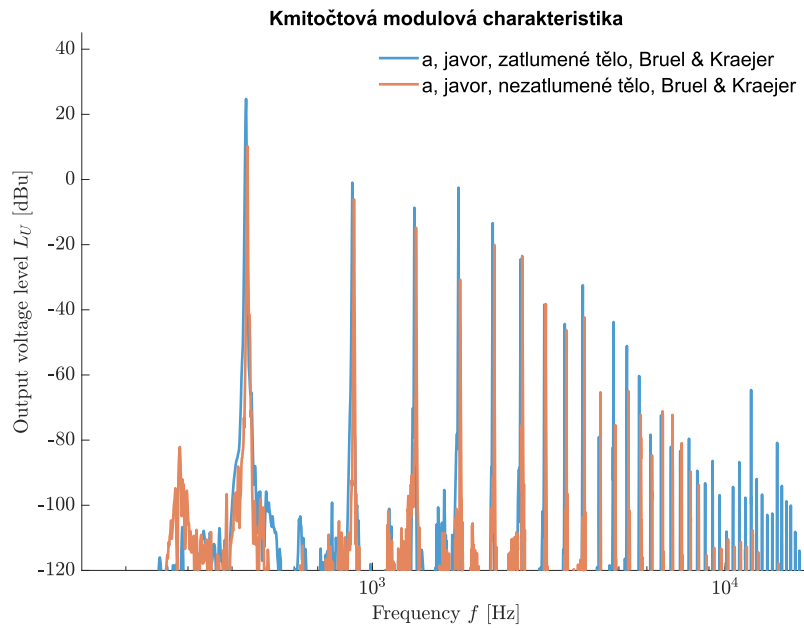
Obr. A.10: Modulová charakteristika plastové kobyly - tón g



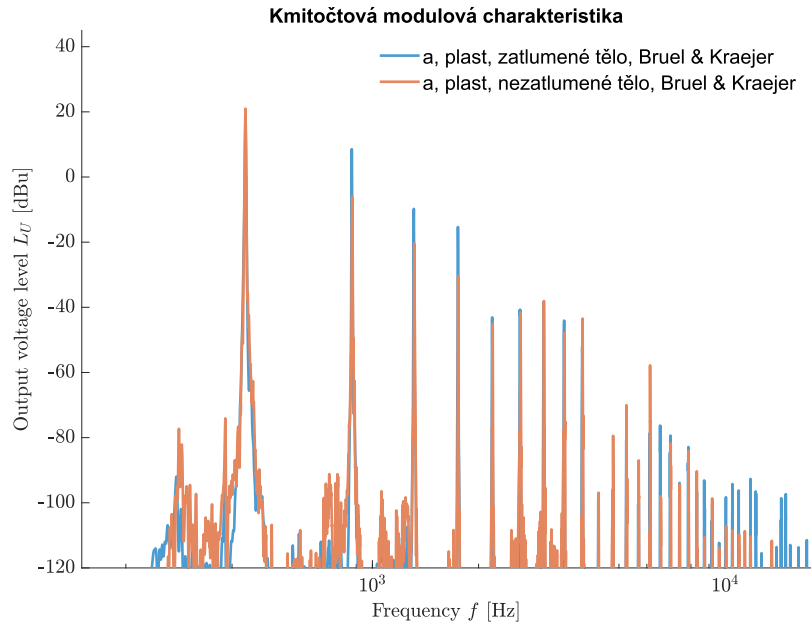
Obr. A.11: Modulová charakteristika javorové kobyly - tón d1



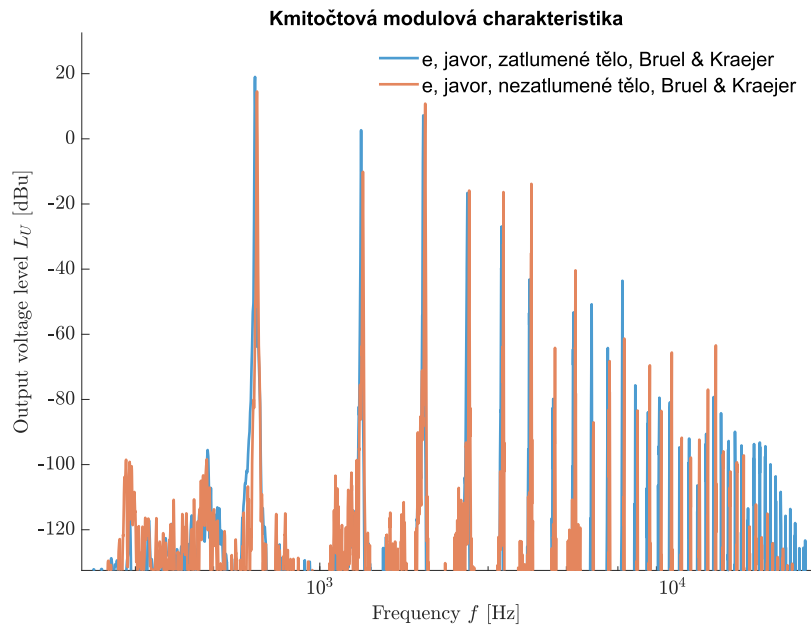
Obr. A.12: Modulová charakteristika plastové kobylky - tón d1



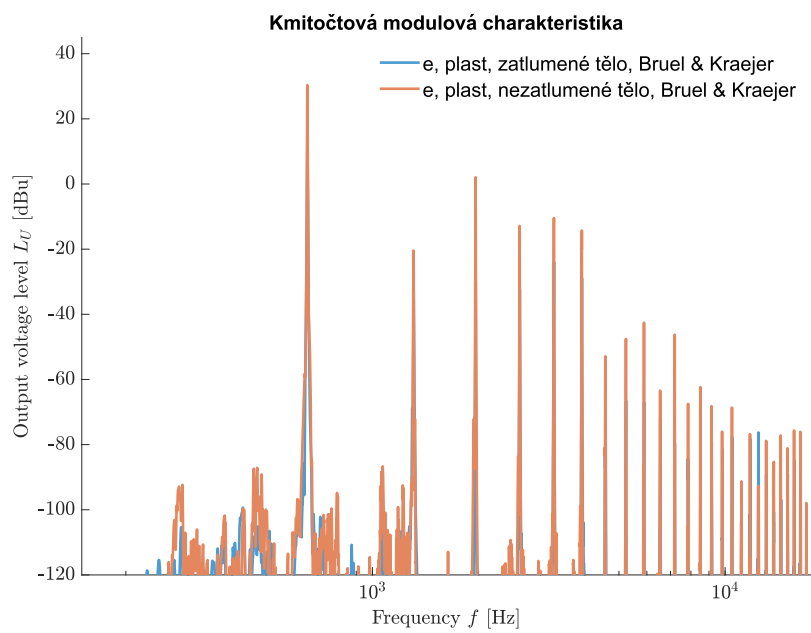
Obr. A.13: Modulová charakteristika javorové kobylky - tón a1



Obr. A.14: Modulová charakteristika plastové kobylky - tón a1

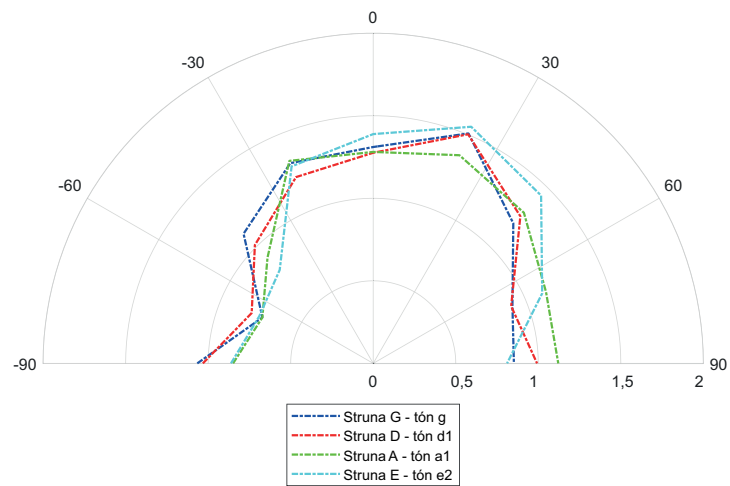


Obr. A.15: Modulová charakteristika javorové kobylky - tón e2

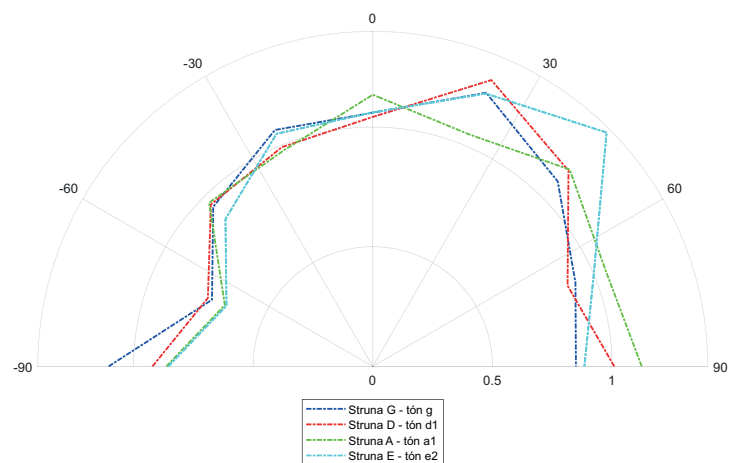


Obr. A.16: Modulová charakteristika plastové kobyly - tón e2

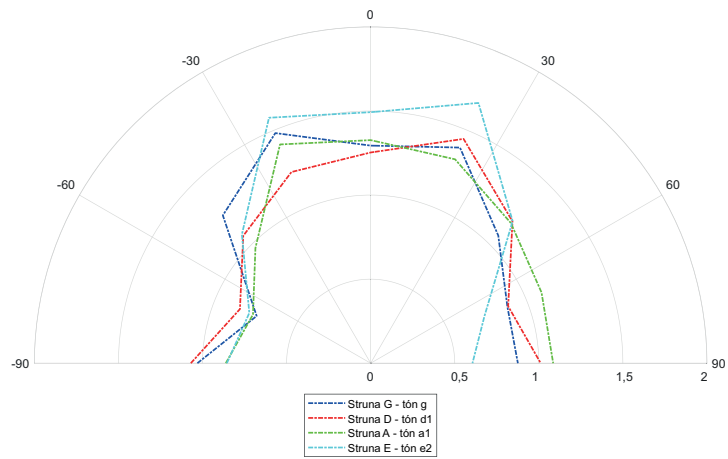
A.1.2 Grafy směrové charakteristiky houslí



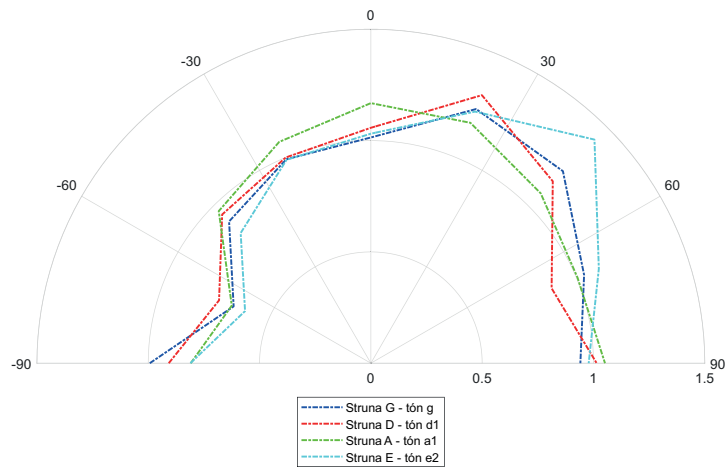
Obr. A.17: Směrová vyzařovací charakteristika - javorová kobylka, hrané primy v pianu



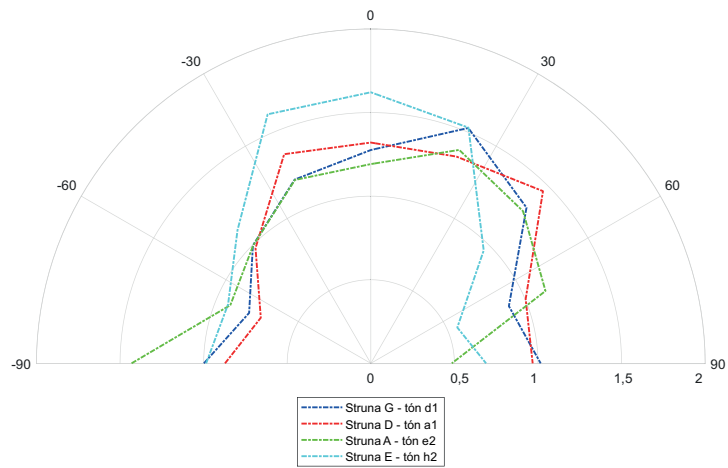
Obr. A.18: Směrová vyzařovací charakteristika - PLA kobylka, hrané primy v pianu



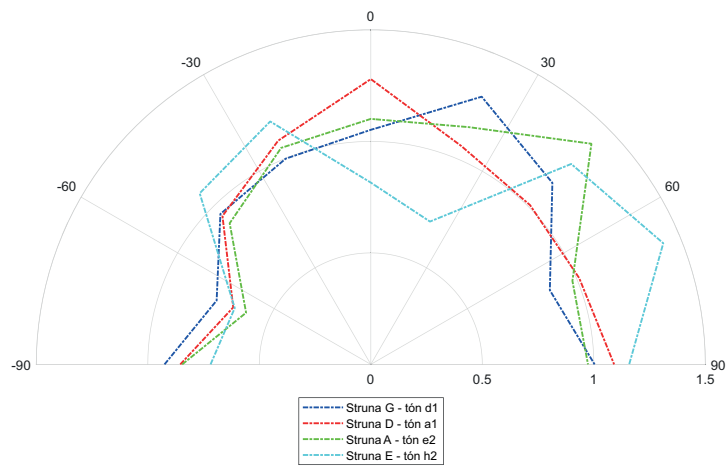
Obr. A.19: Směrová vyzařovací charakteristika - javorová kobylka, hrané primy ve forte



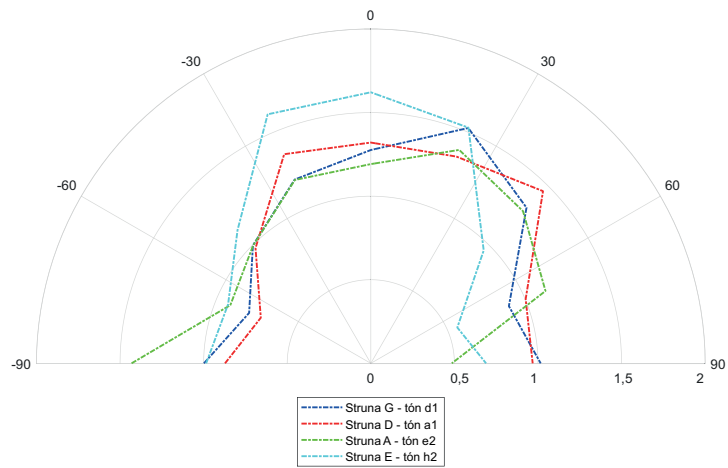
Obr. A.20: Směrová vyzařovací charakteristika - PLA kobylka, hrané primy ve forte



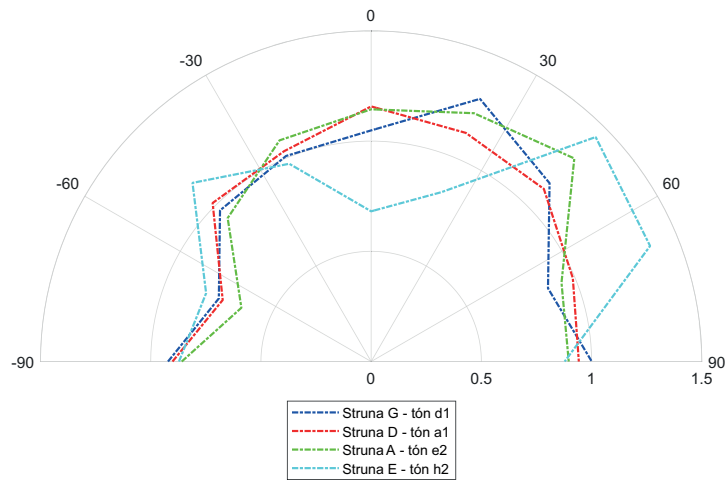
Obr. A.21: Směrová vyzářovací charakteristika - javorová kobyłka, hrané kvinty v pianu



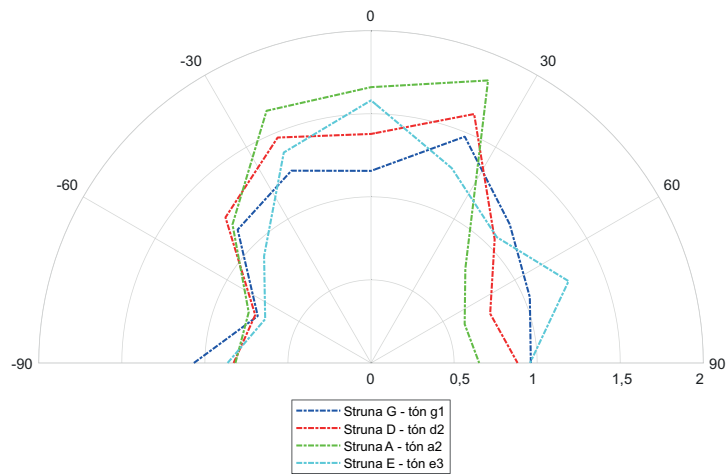
Obr. A.22: Směrová vyzářovací charakteristika - PLA kobyłka, hrané kvinty v pianu



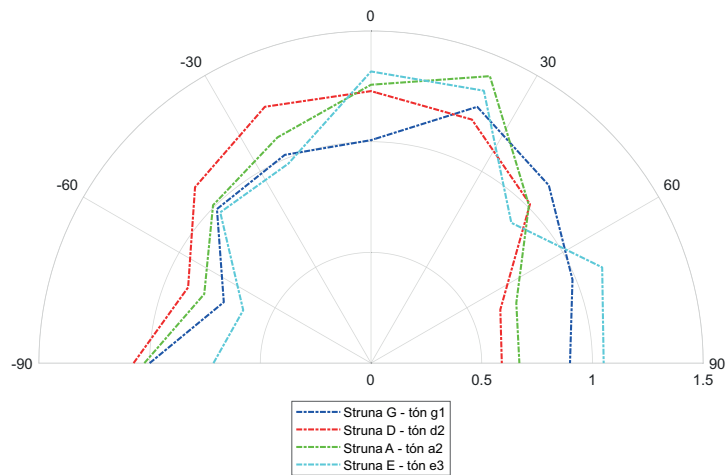
Obr. A.23: Směrová vyzařovací charakteristika - javorová kobylka, hrané kvinty ve forte



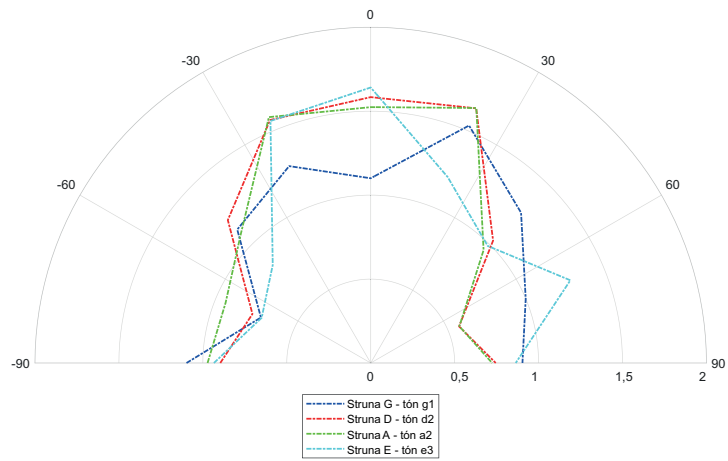
Obr. A.24: Směrová vyzařovací charakteristika - PLA kobylka, hrané kvinty ve forte



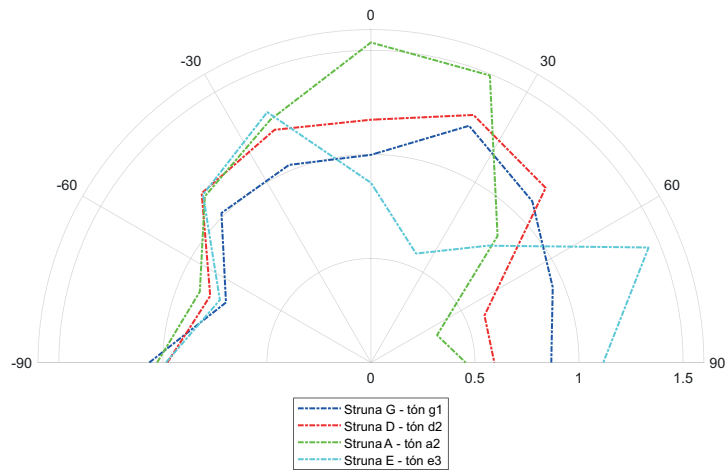
Obr. A.25: Směrová vyzařovací charakteristika - javorová kobyłka, hrané oktávy v pianu



Obr. A.26: Směrová vyzařovací charakteristika - PLA kobyłka, hrané oktávy v pianu



Obr. A.27: Směrová vyzářovací charakteristika - javorová kobyłka, hrané oktávy ve forte

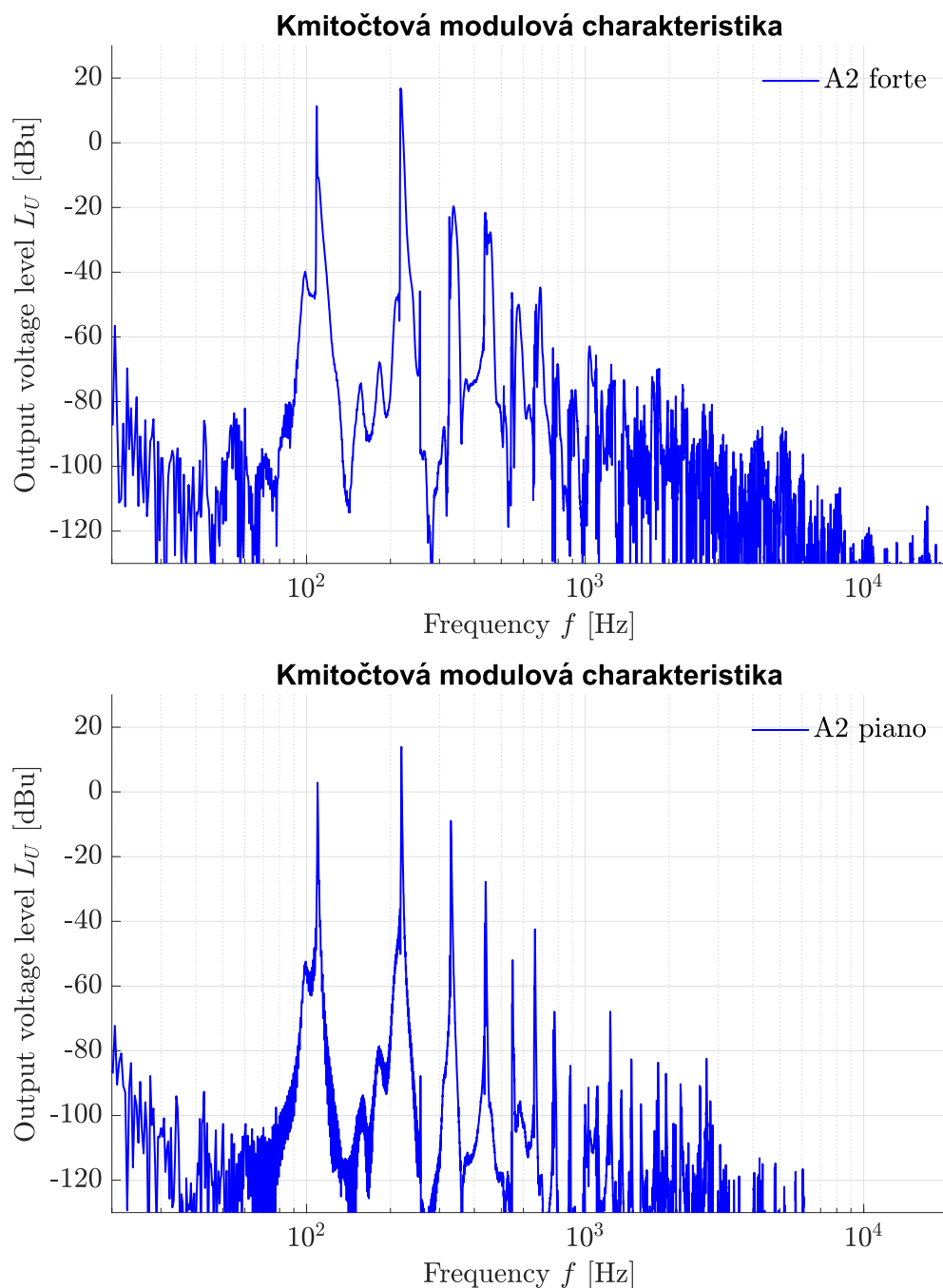


Obr. A.28: Směrová vyzářovací charakteristika - PLA kobyłka, hrané oktávy ve forte

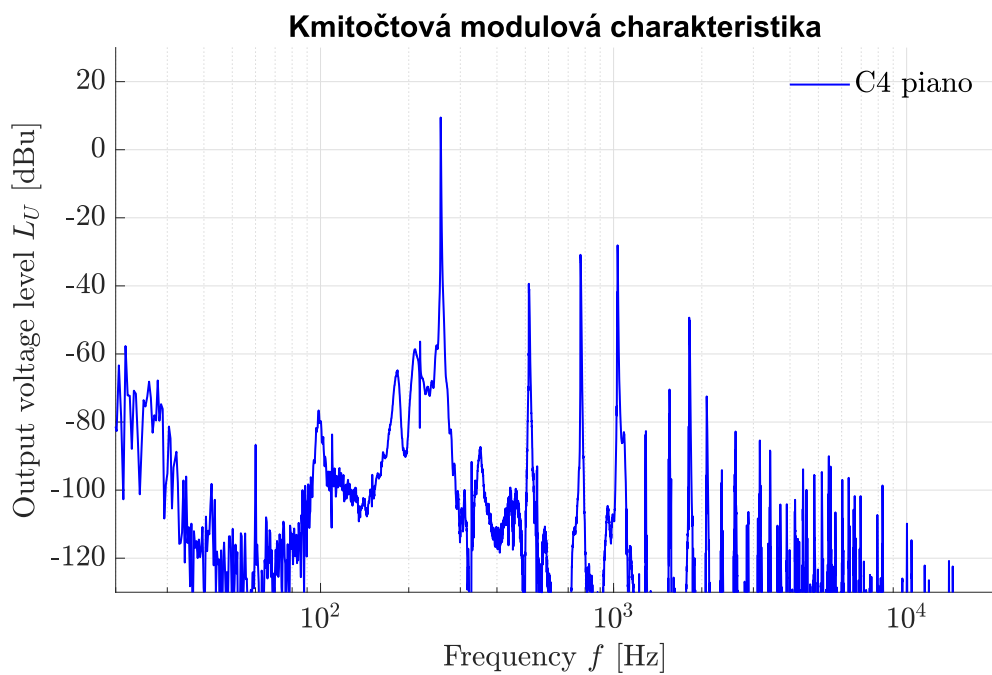
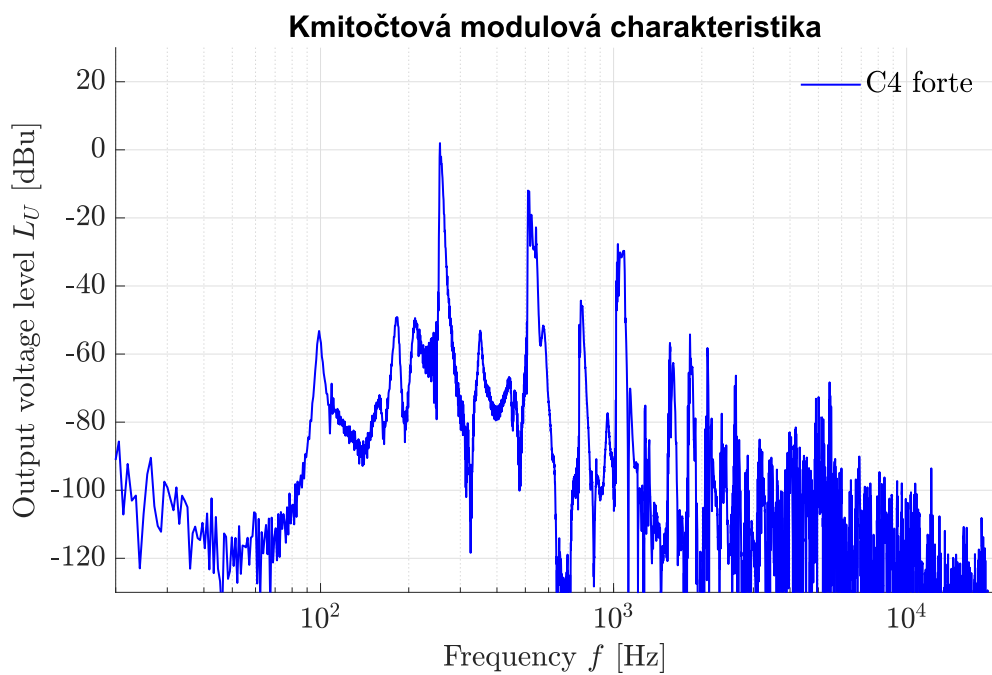
A.2 Výsledky druhého experimentu

A.2.1 Grafy kmitočtové charakteristiky kytary

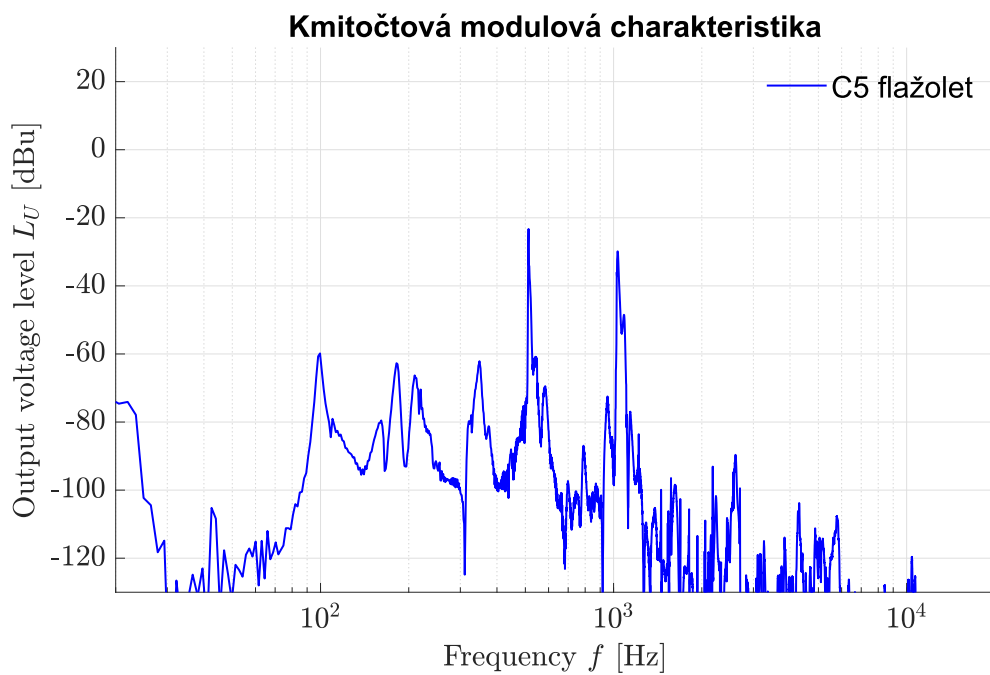
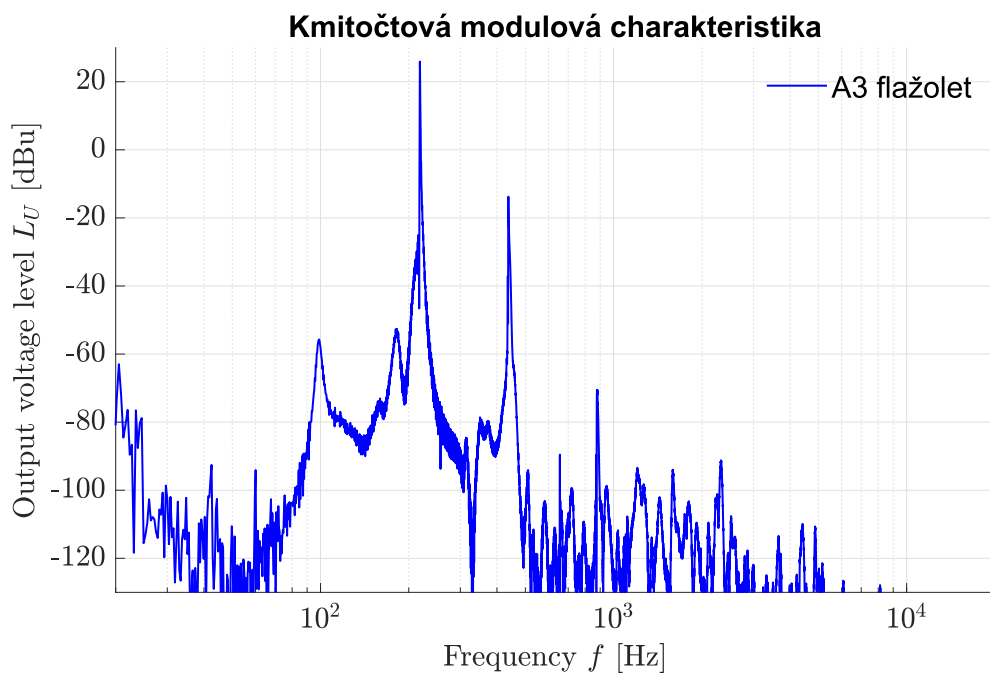
Buk lignamon



Obr. A.29: Kmitočtová charakteristika, materiál buk, tón a2

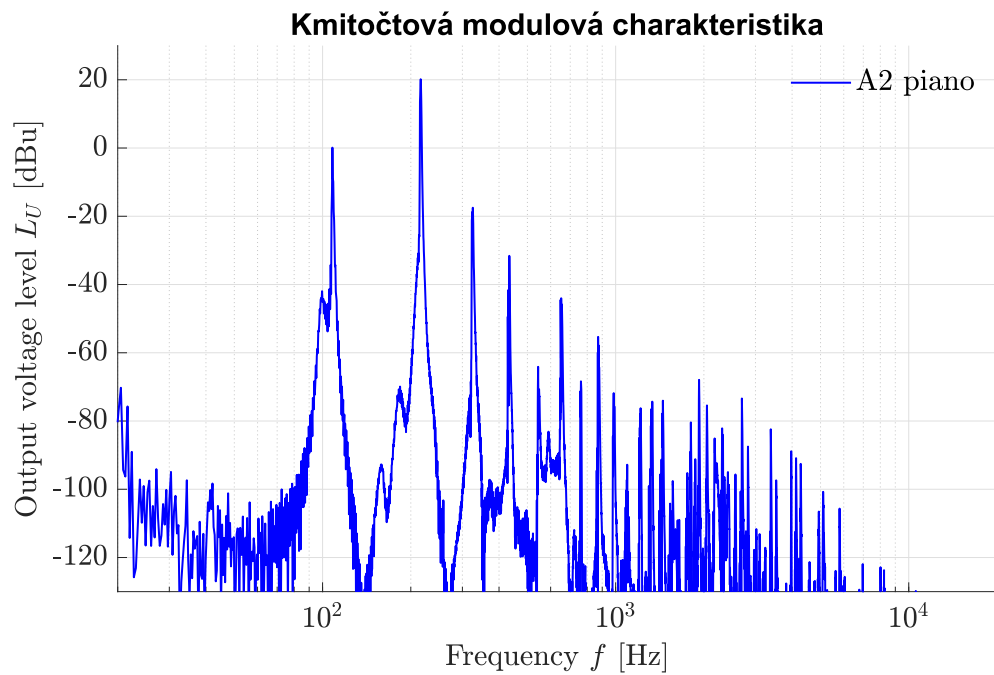
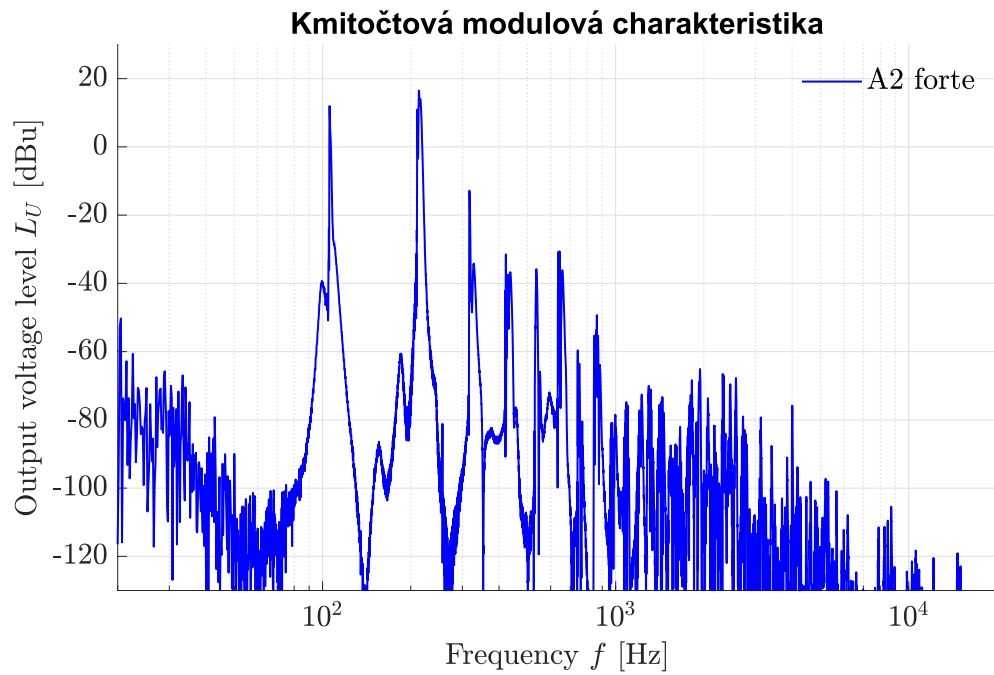


Obr. A.30: Kmitočtová charakteristika, materiál buk, tón c4

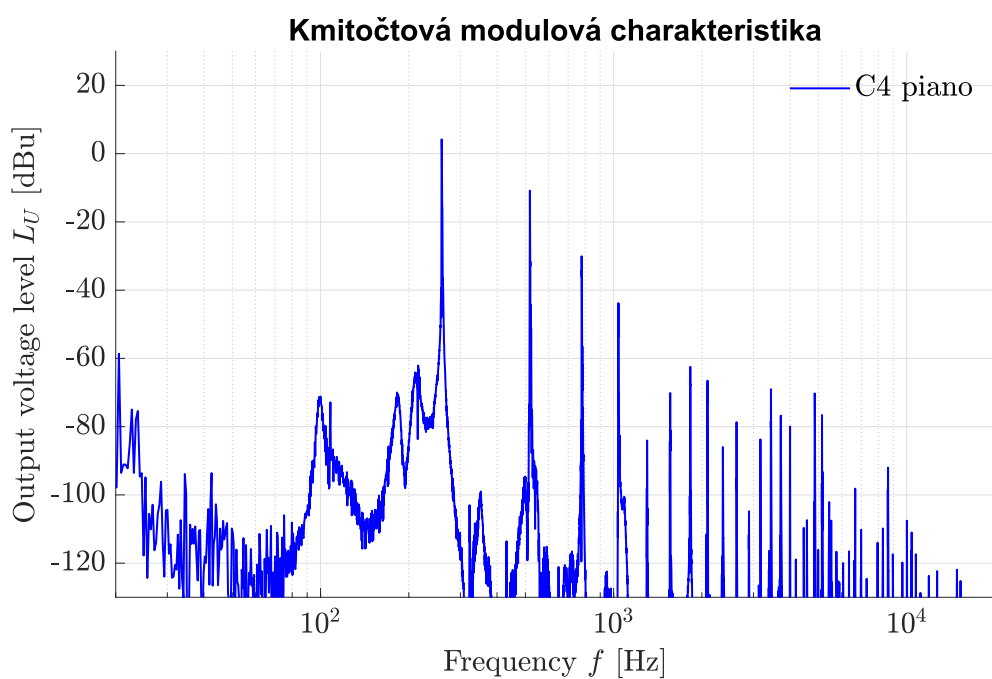
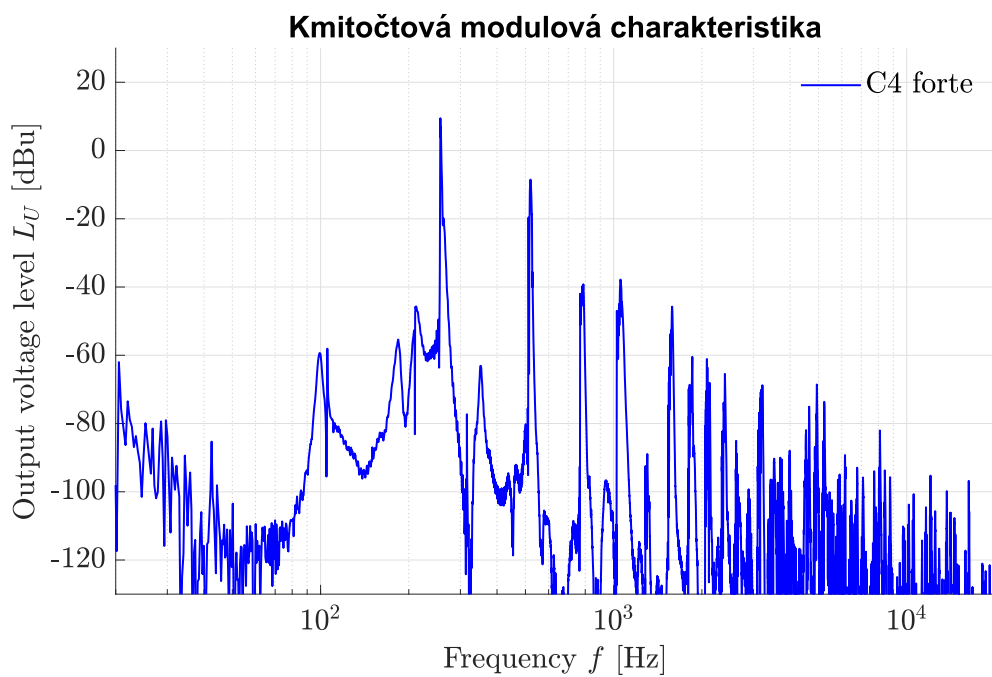


Obr. A.31: Kmitočtová charakteristika, materiál buk, tóny a3 a c5

Cocobolo



Obr. A.32: Kmitočtová charakteristika, materiál cocobolo, tón a2

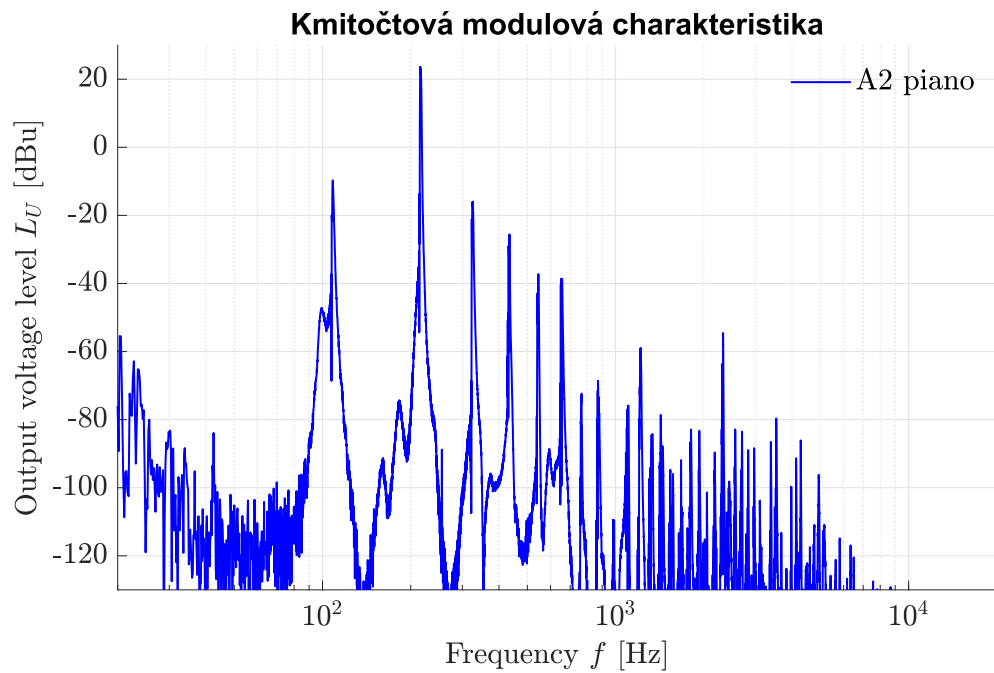
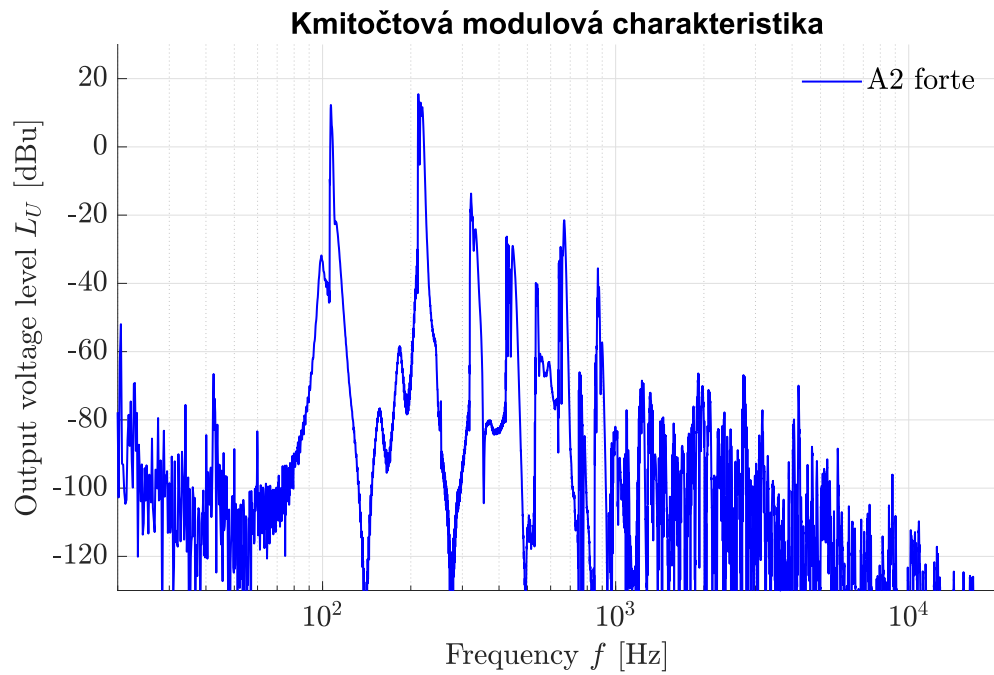


Obr. A.33: Kmitočtová charakteristika, materiál cocobolo, tón c4

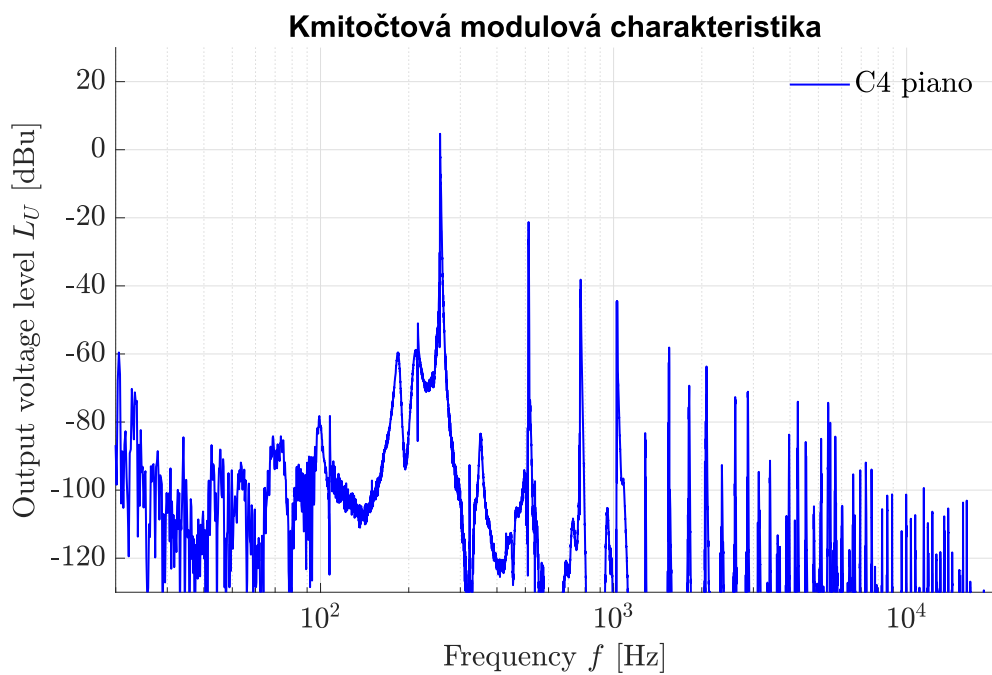
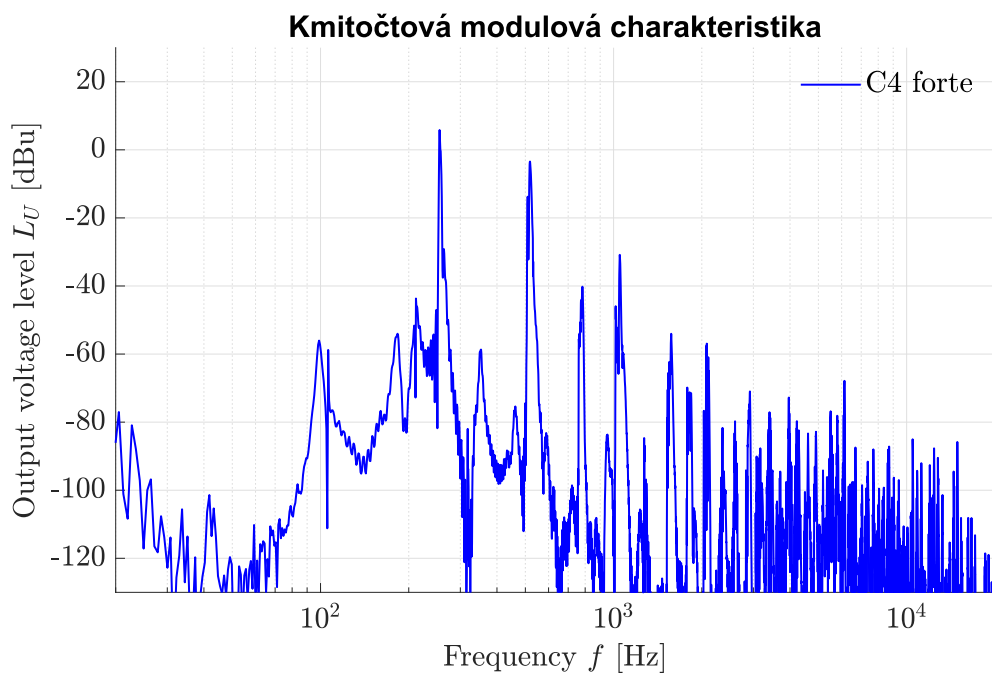


Obr. A.34: Kmitočtová charakteristika, materiál cocobolo, tóny a3 a c5

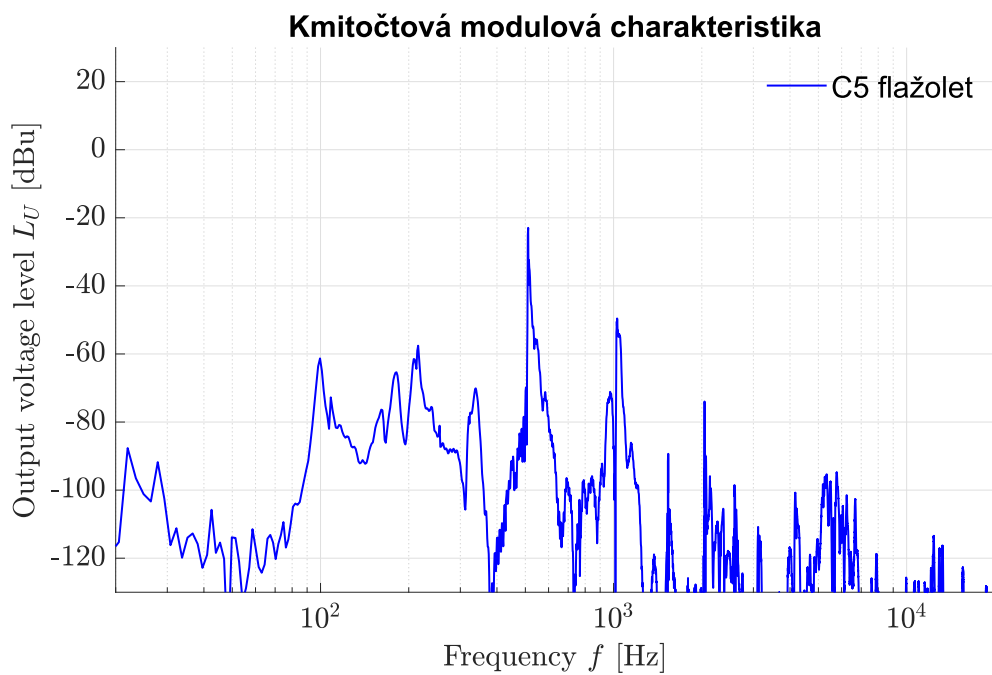
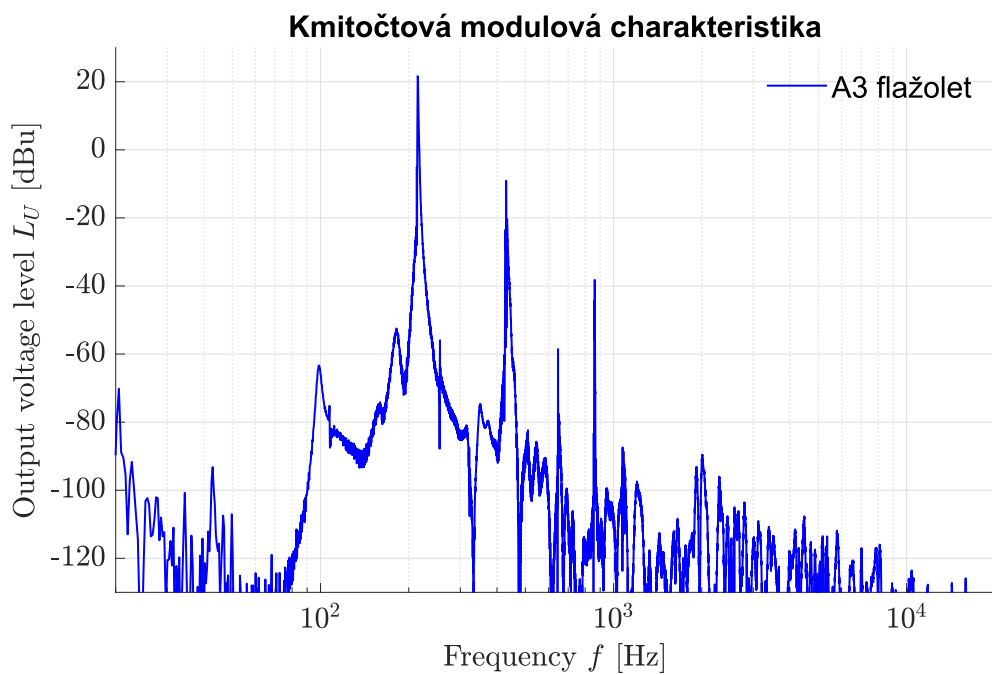
Eben



Obr. A.35: Kmitočtová charakteristika, materiál eben, tón a2

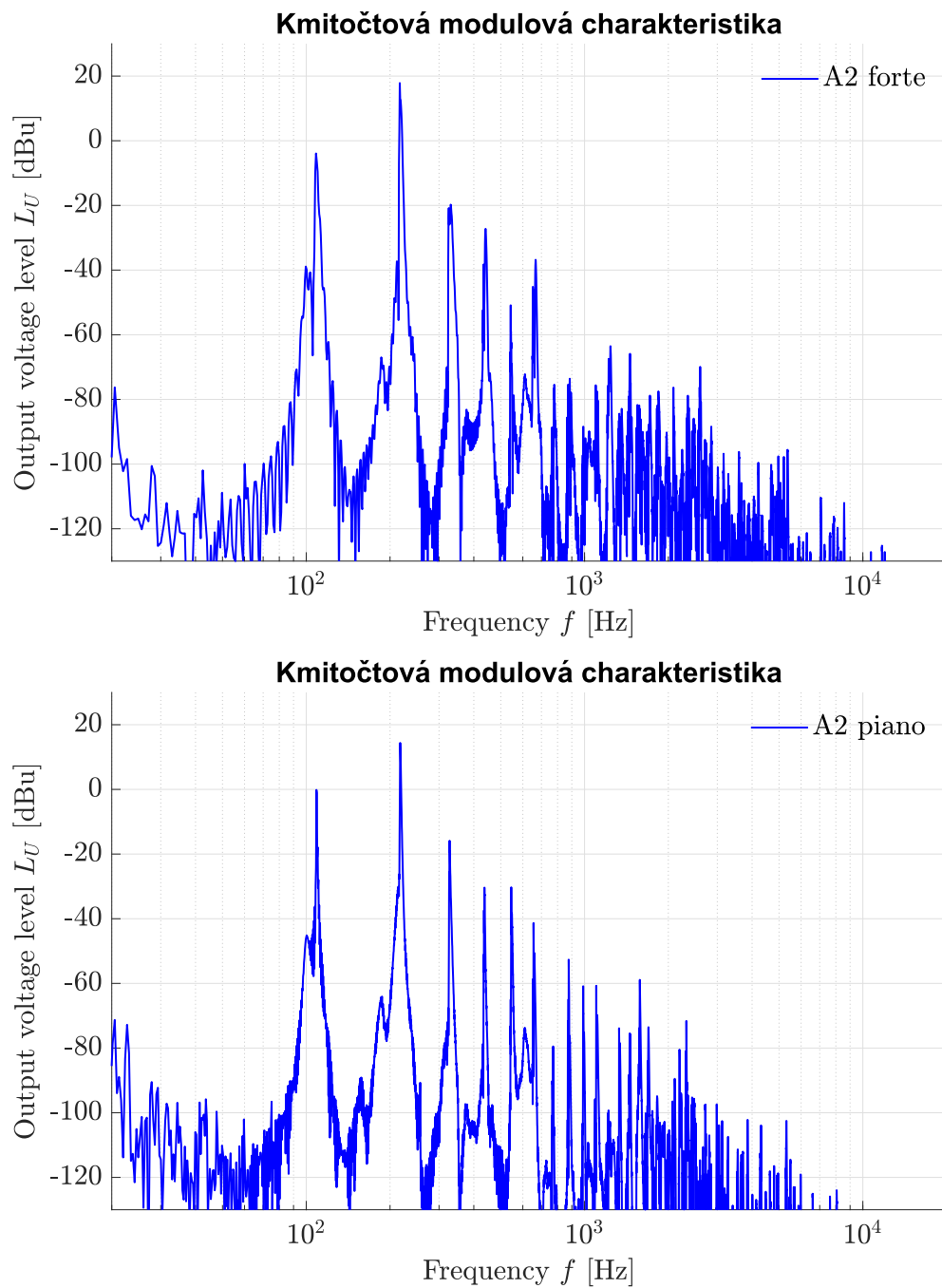


Obr. A.36: Kmitočtová charakteristika, materiál eben, tón c4

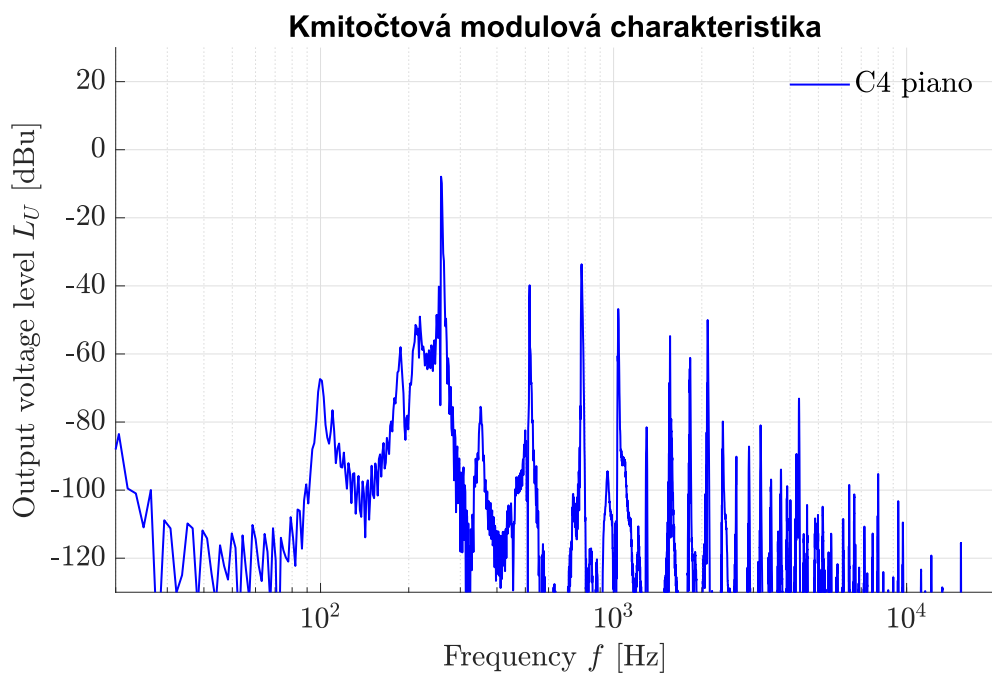
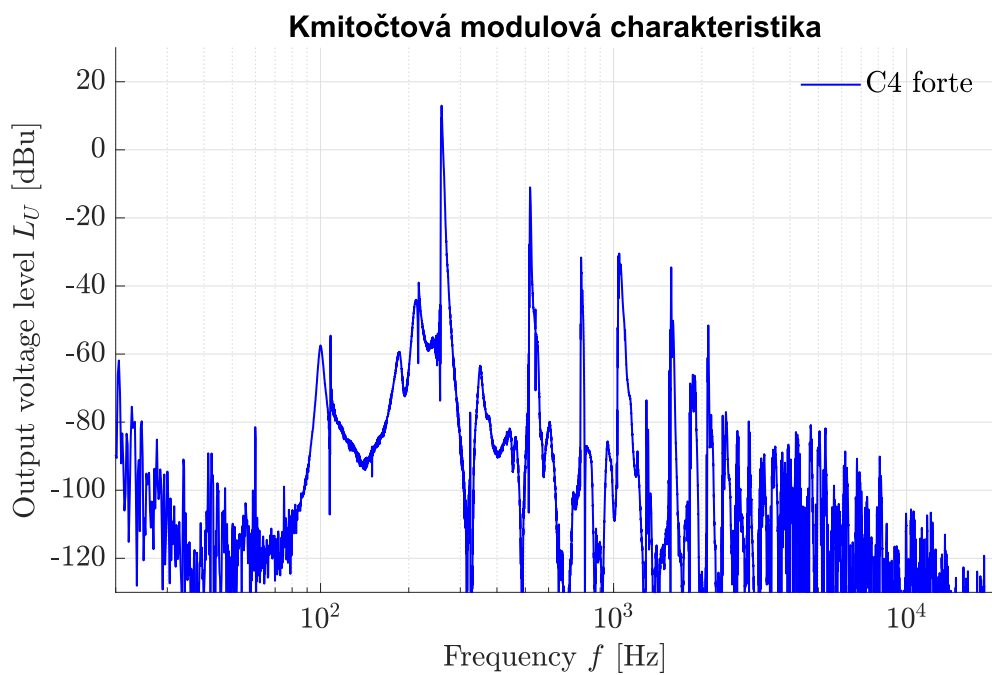


Obr. A.37: Kmitočtová charakteristika, materiál eben, tóny a3 a c5

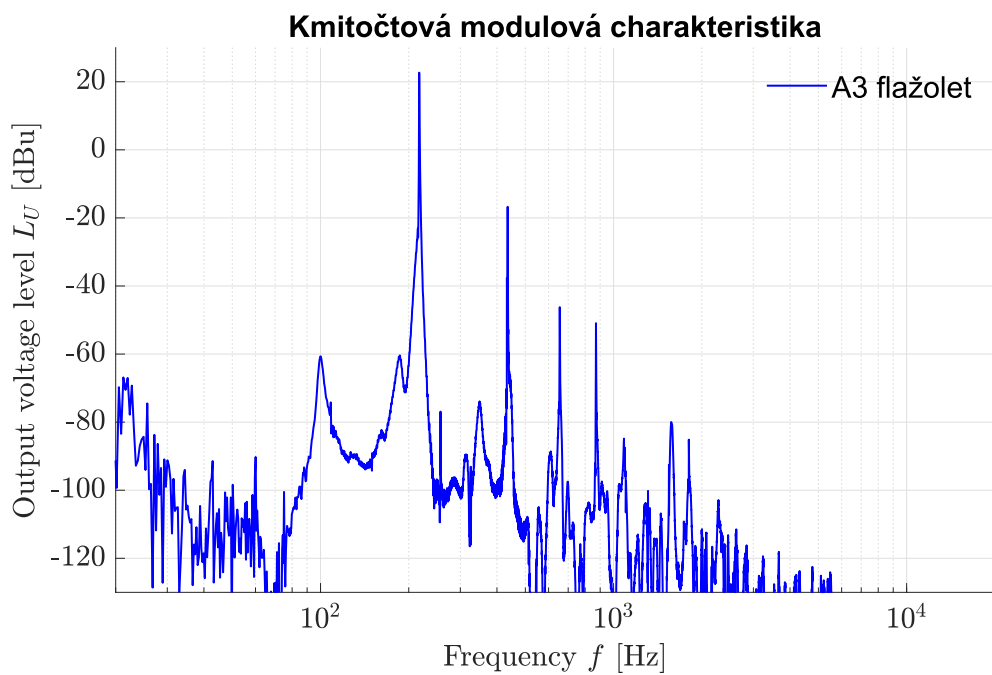
Jasan



Obr. A.38: Kmitočtová charakteristika, materiál jasan, tón a2

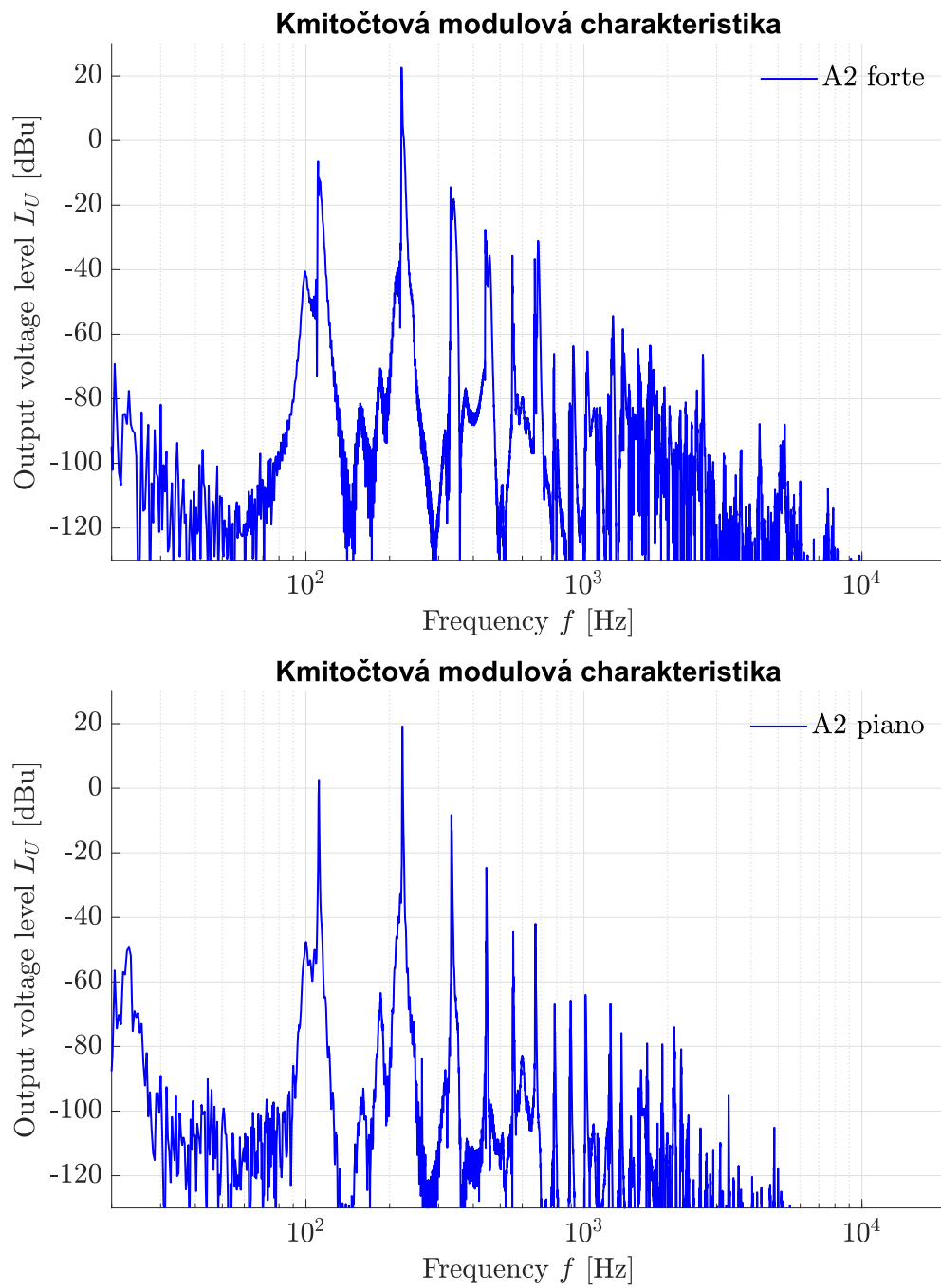


Obr. A.39: Kmitočtová charakteristika, materiál jasan, tón c4

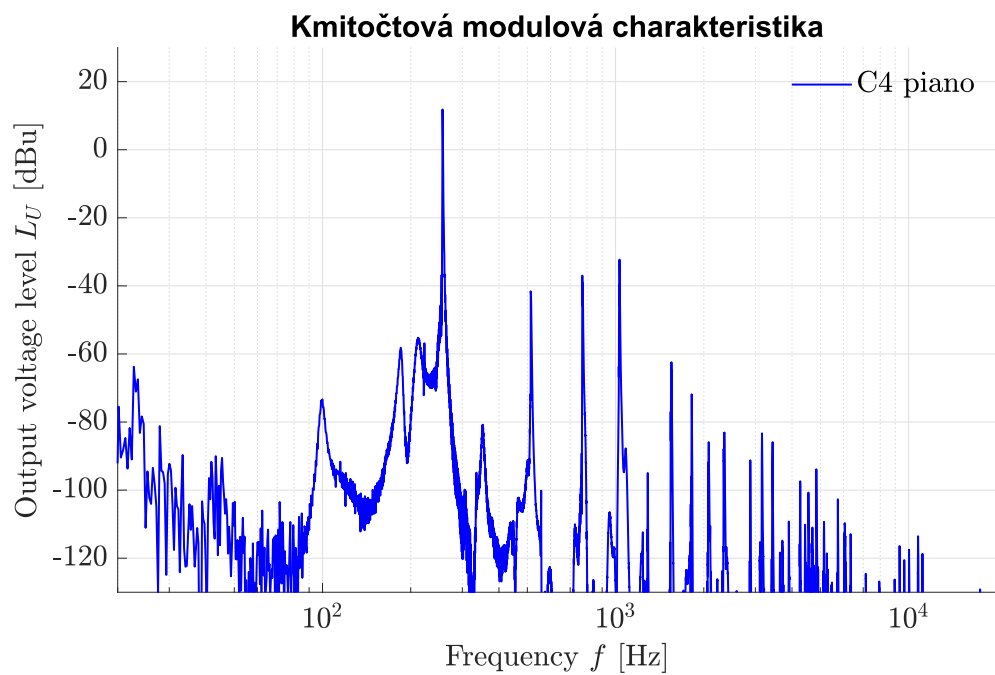
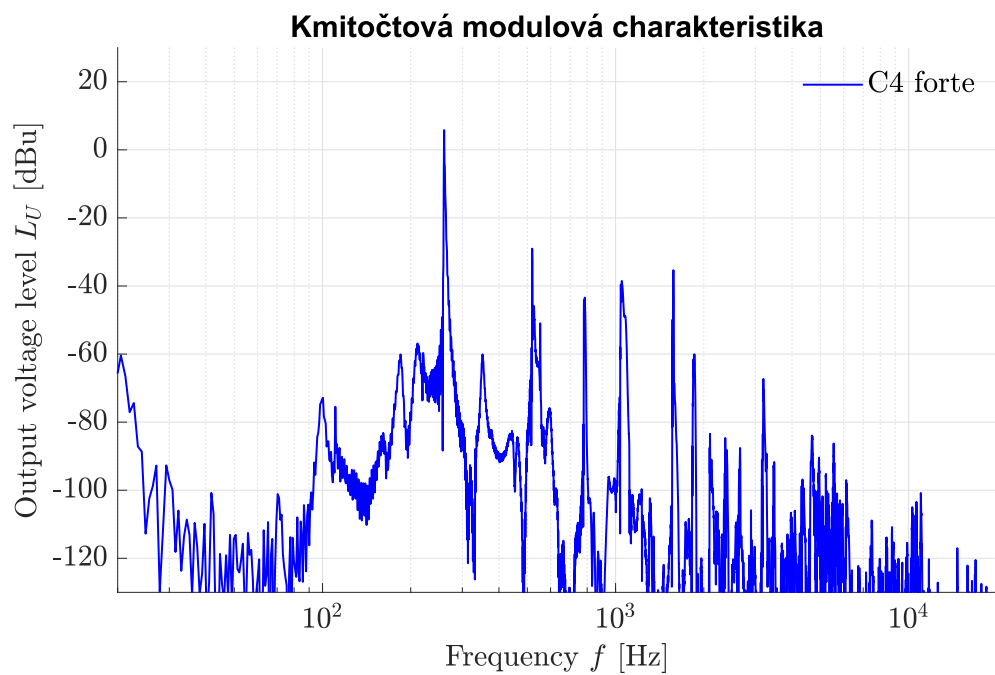


Obr. A.40: Kmitočtová charakteristika, materiál jasan, tóny a3 a c5

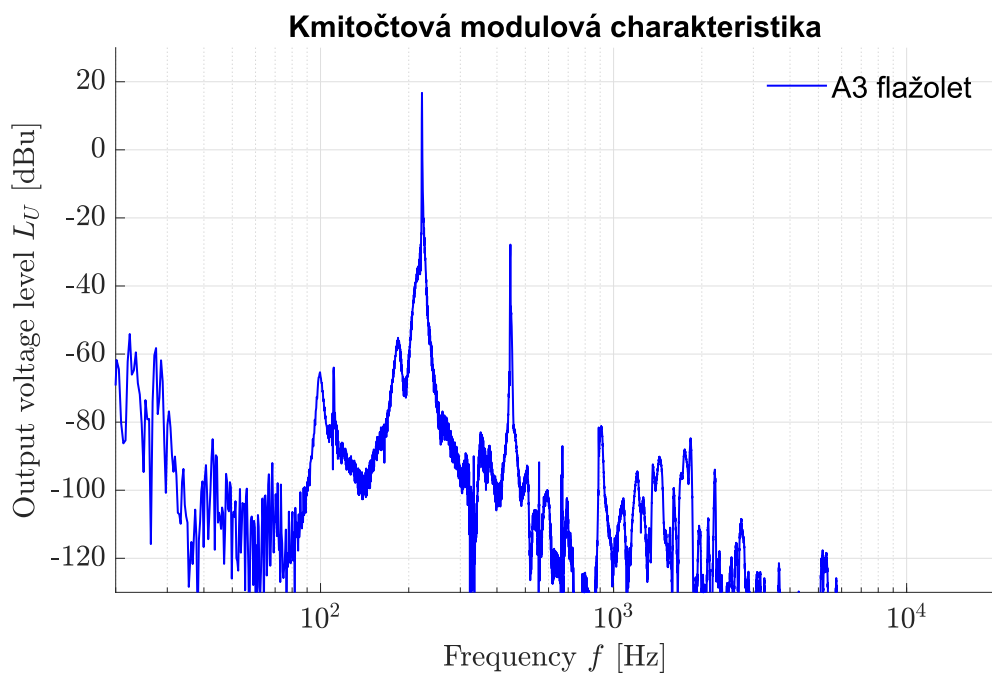
Jatoba



Obr. A.41: Kmitočtová charakteristika, materiál jatoba, tón a2

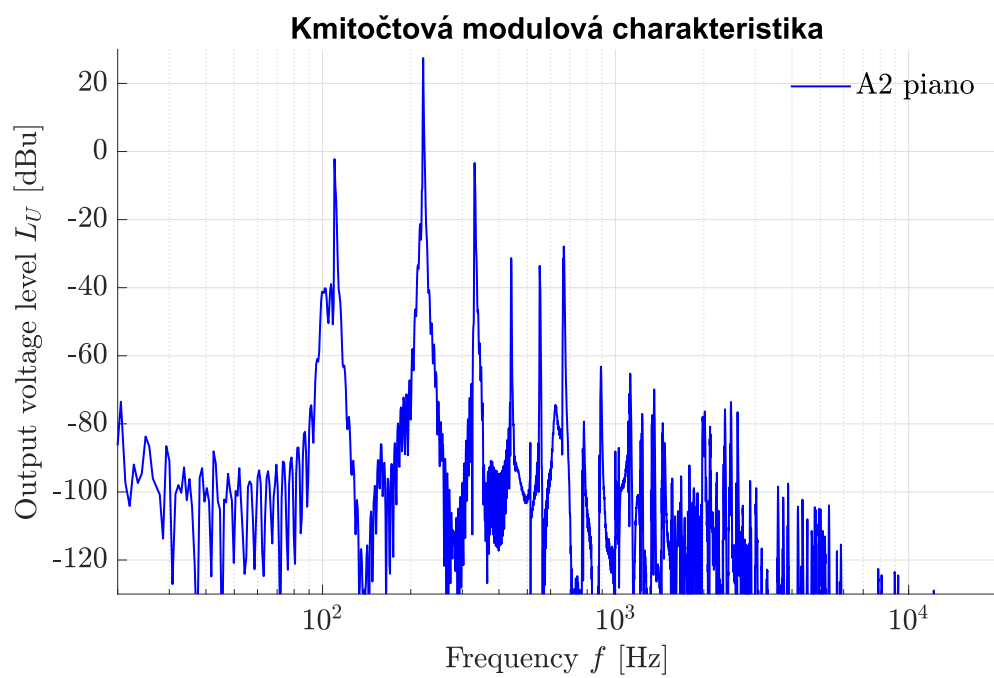
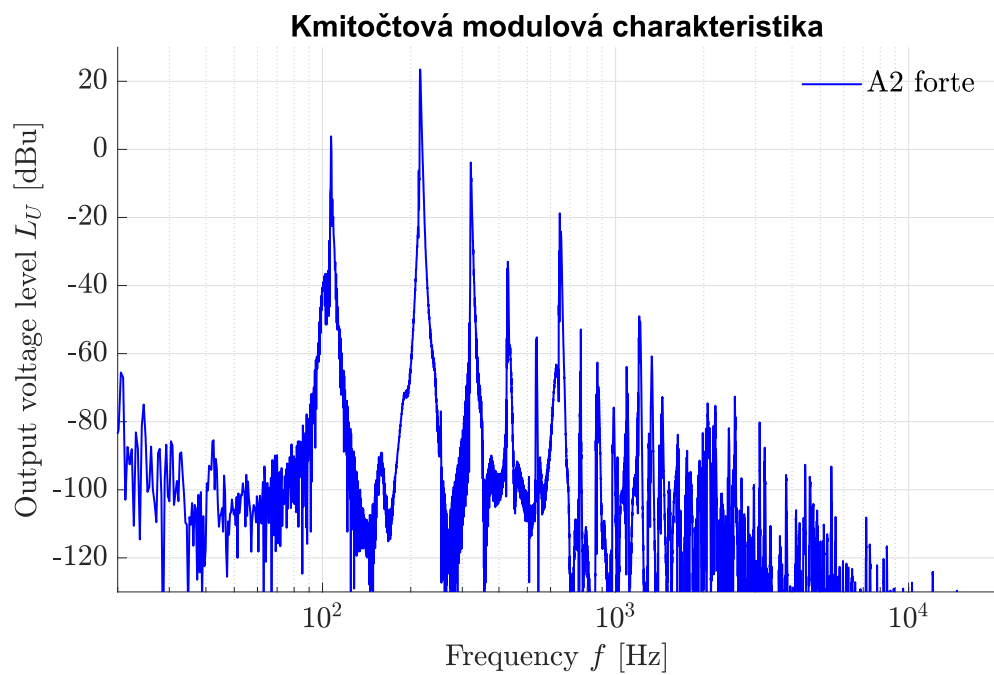


Obr. A.42: Kmitočtová charakteristika, materiál jatoba, tón c4

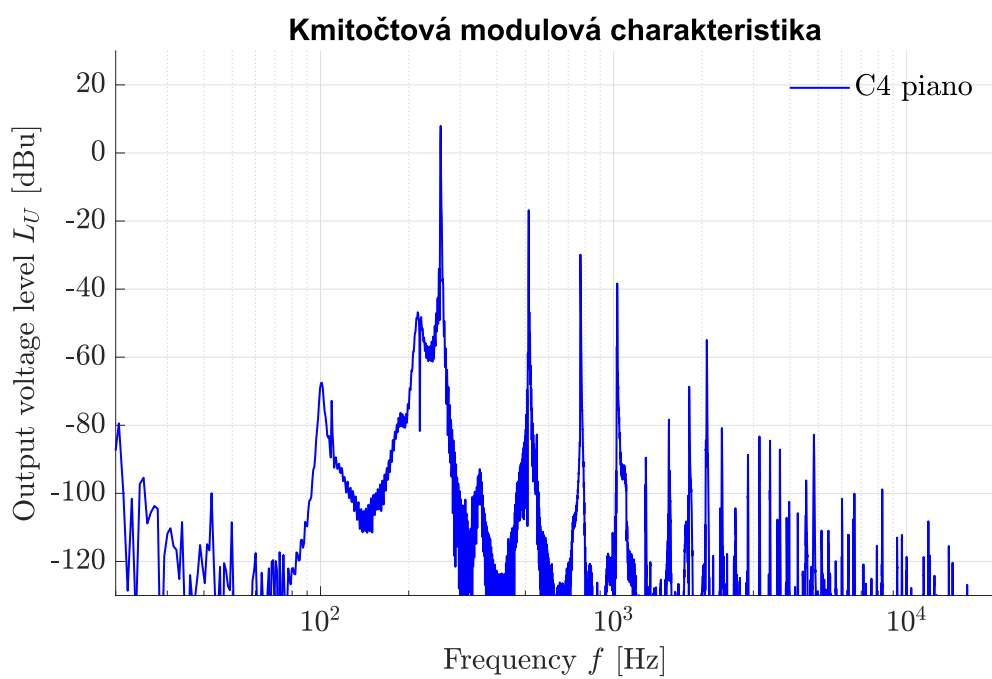
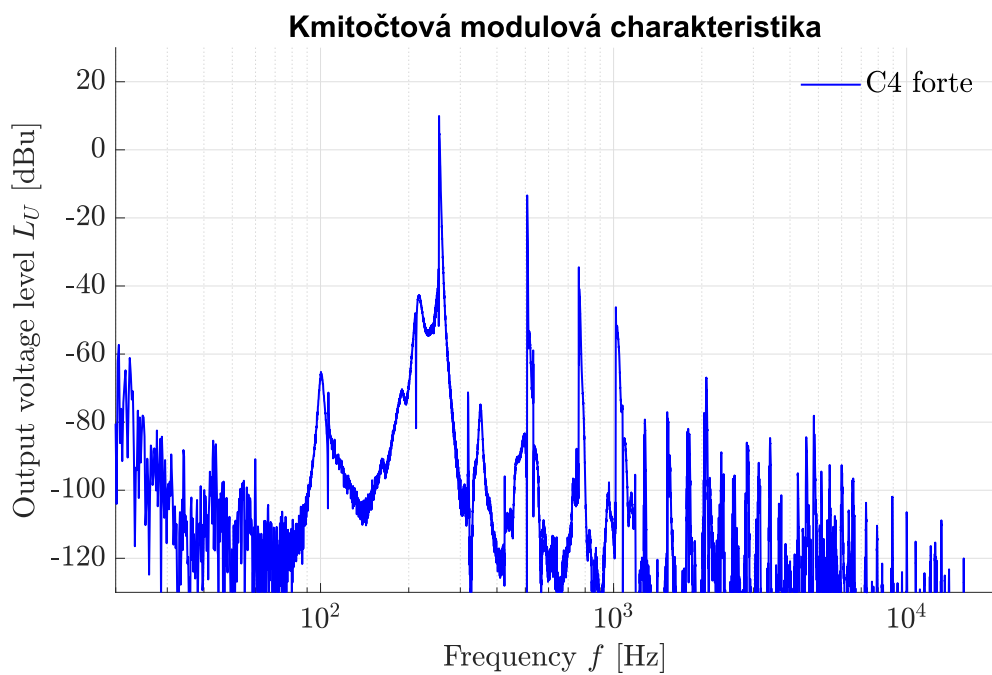


Obr. A.43: Kmitočtová charakteristika, materiál jatoba, tóny a3 a c5

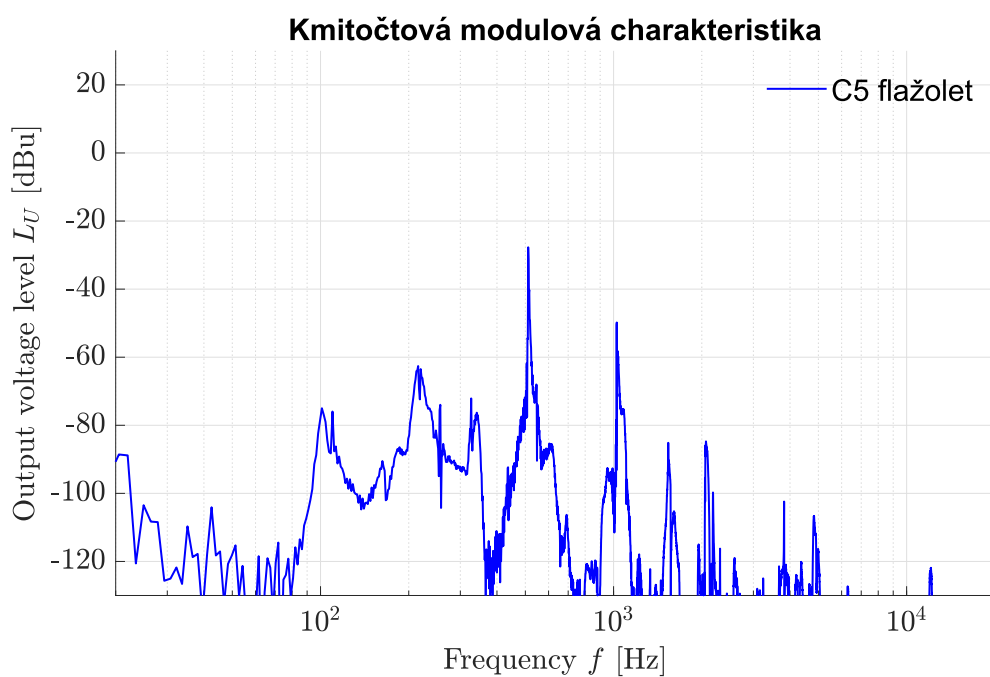
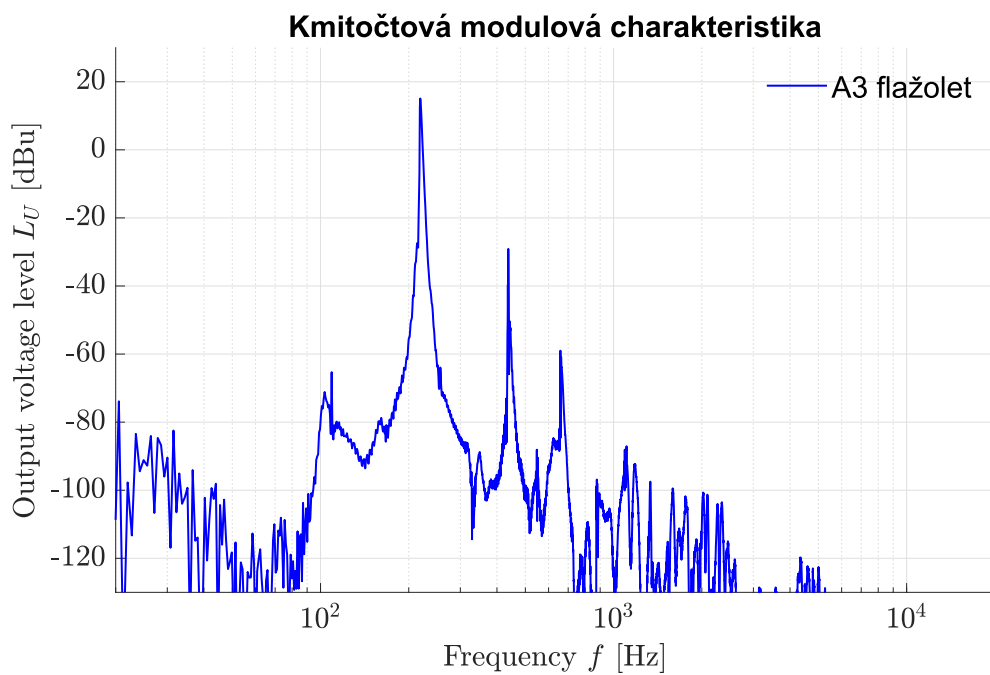
Lípa



Obr. A.44: Kmitočtová charakteristika, materiál lípa, tón a2

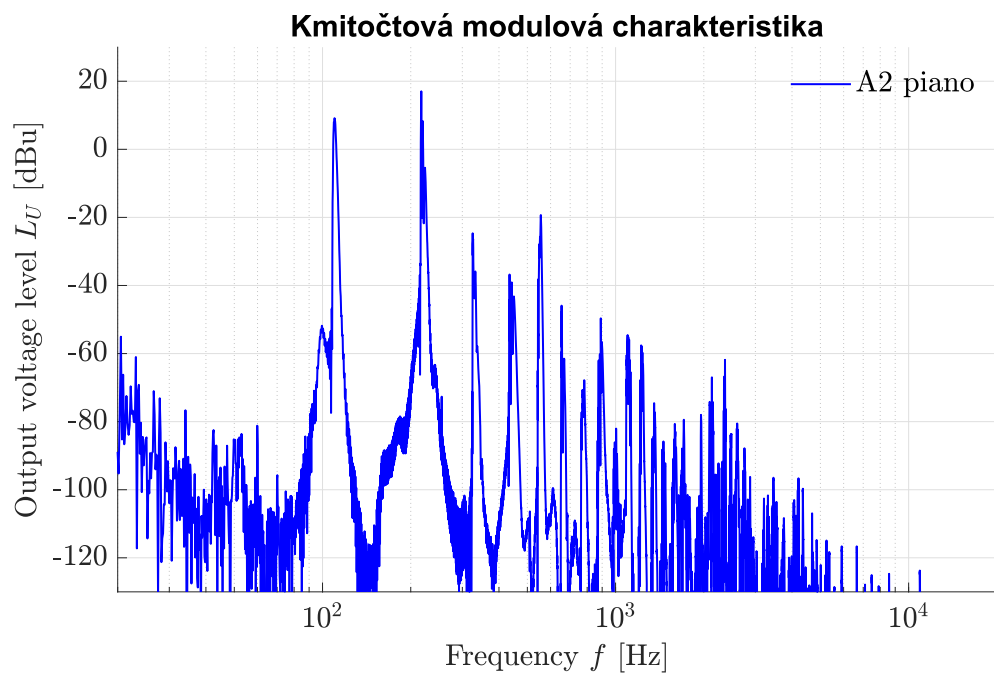
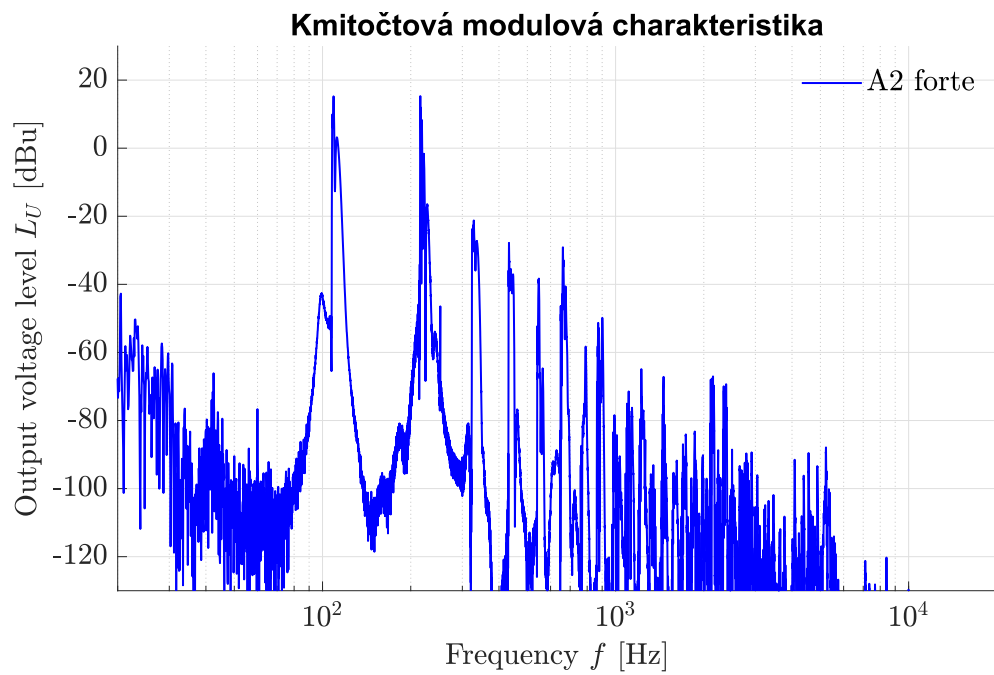


Obr. A.45: Kmitočtová charakteristika, materiál lípa, tón c4

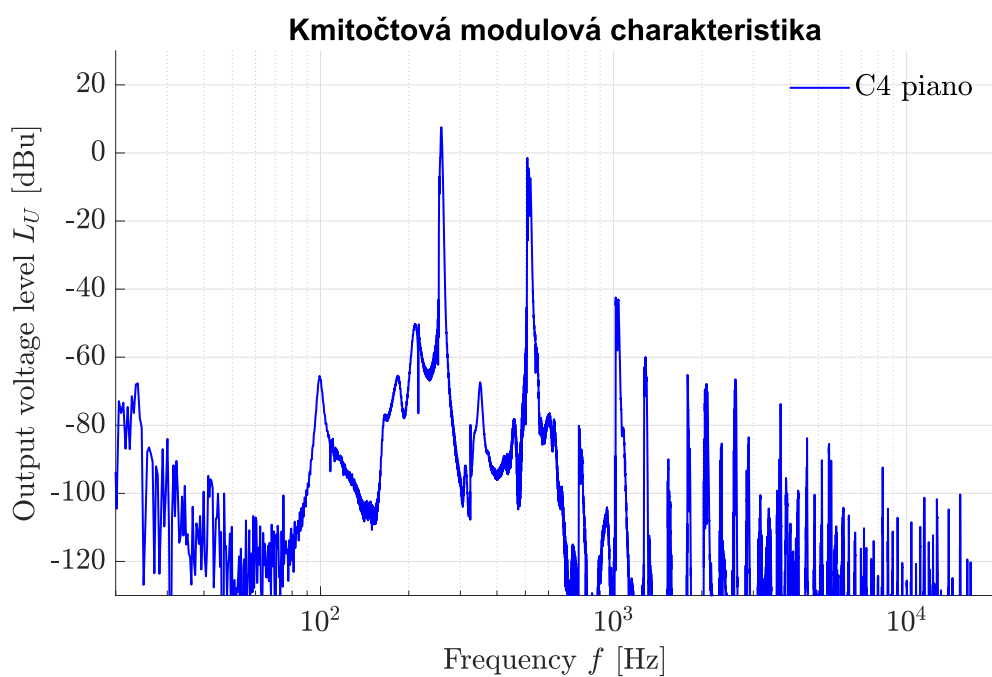
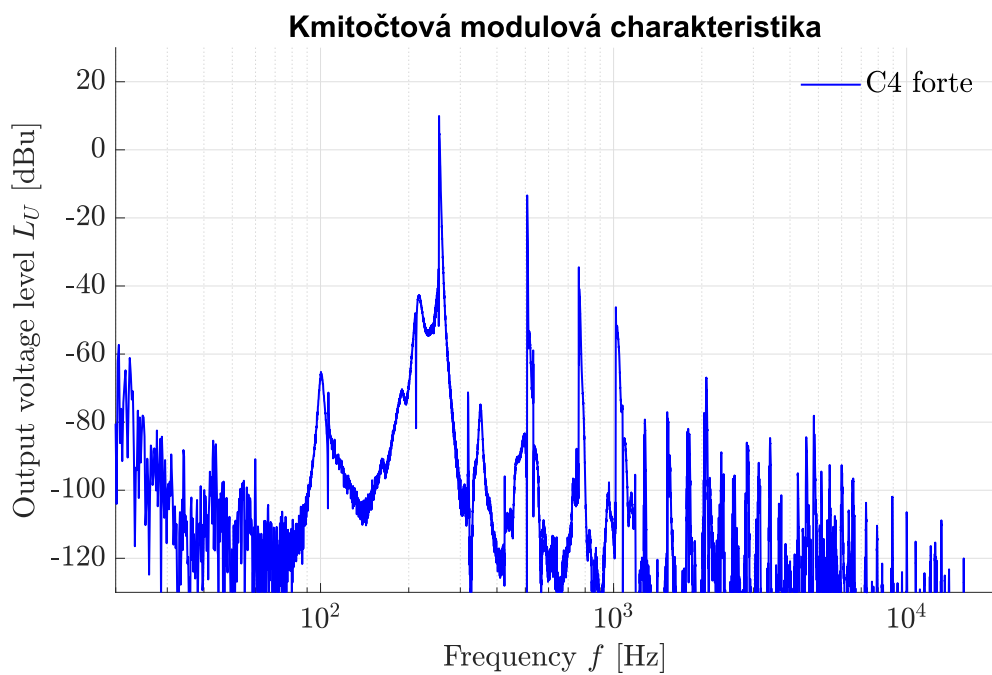


Obr. A.46: Kmitočtová charakteristika, materiál lípa, tóny a3 a c5

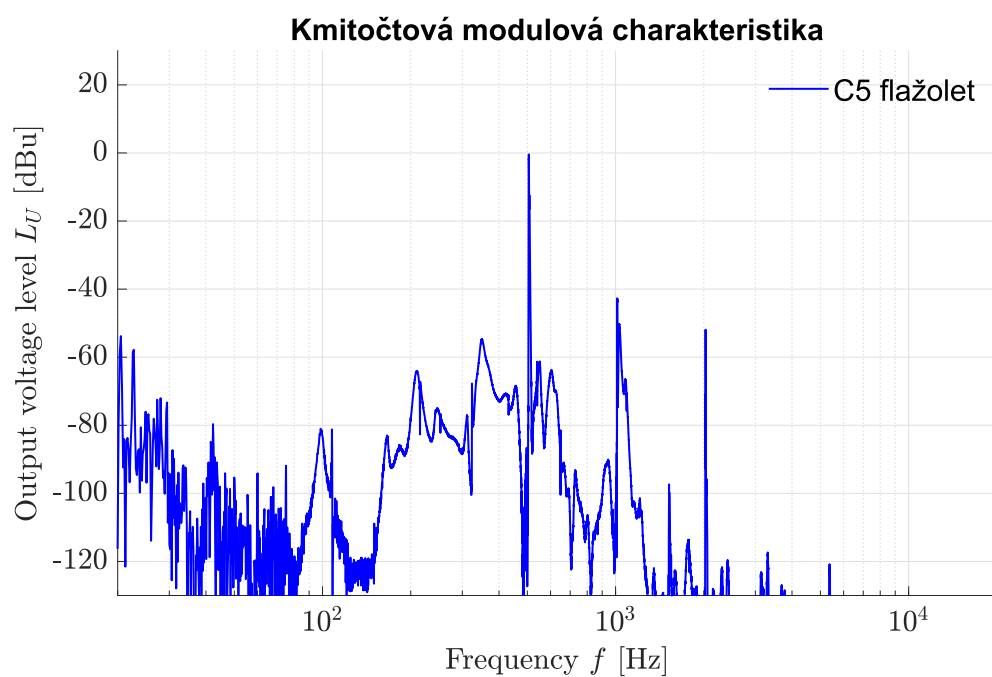
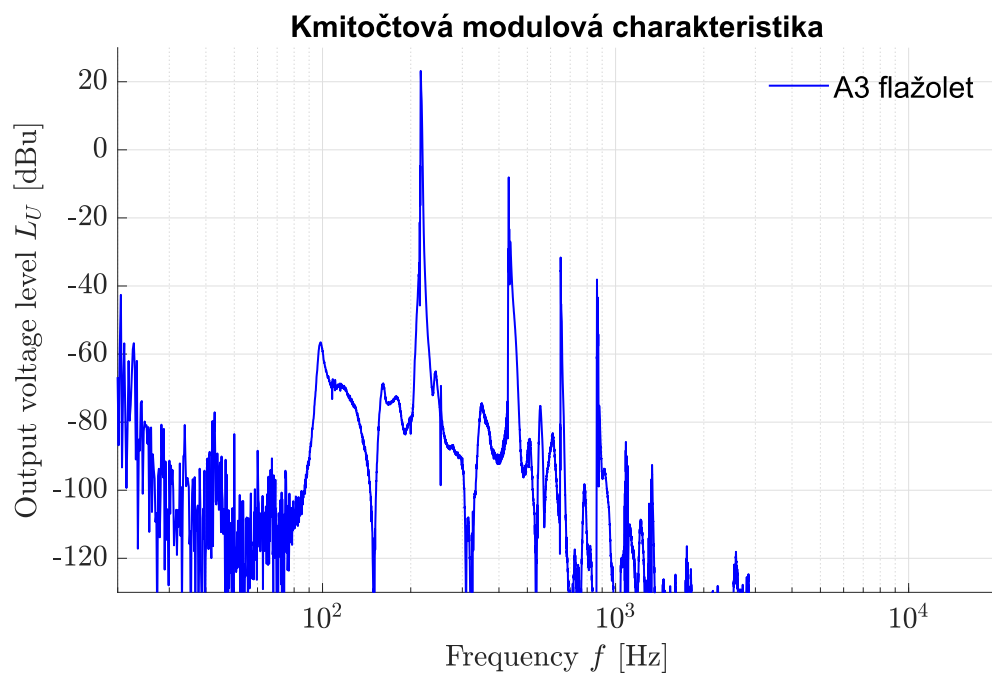
Eben macassar



Obr. A.47: Kmitočtová charakteristika, materiál eben macassar, tón a2

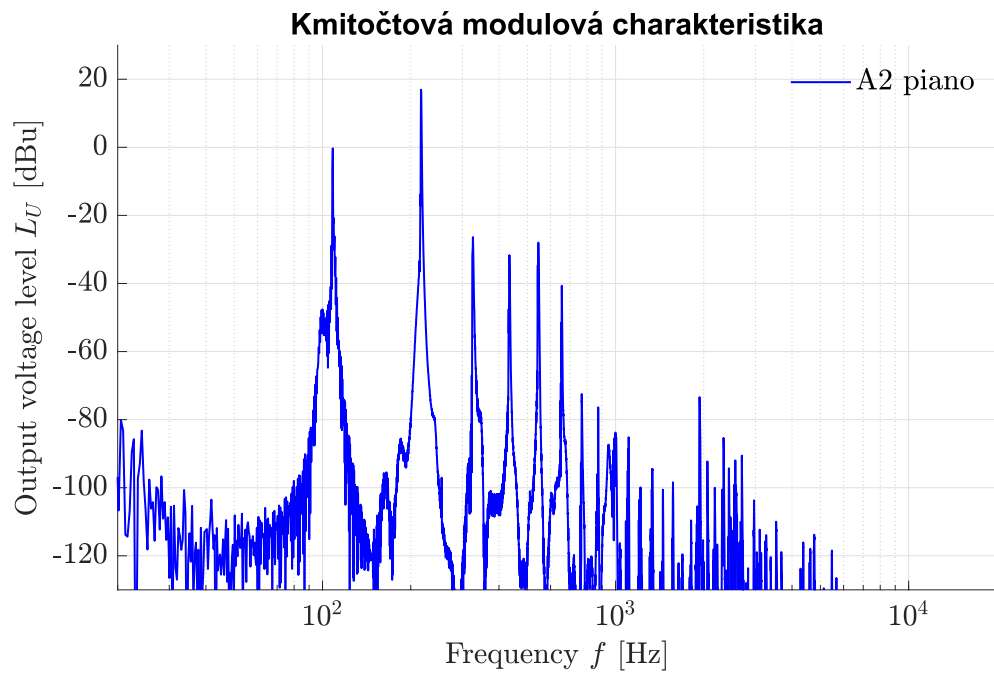
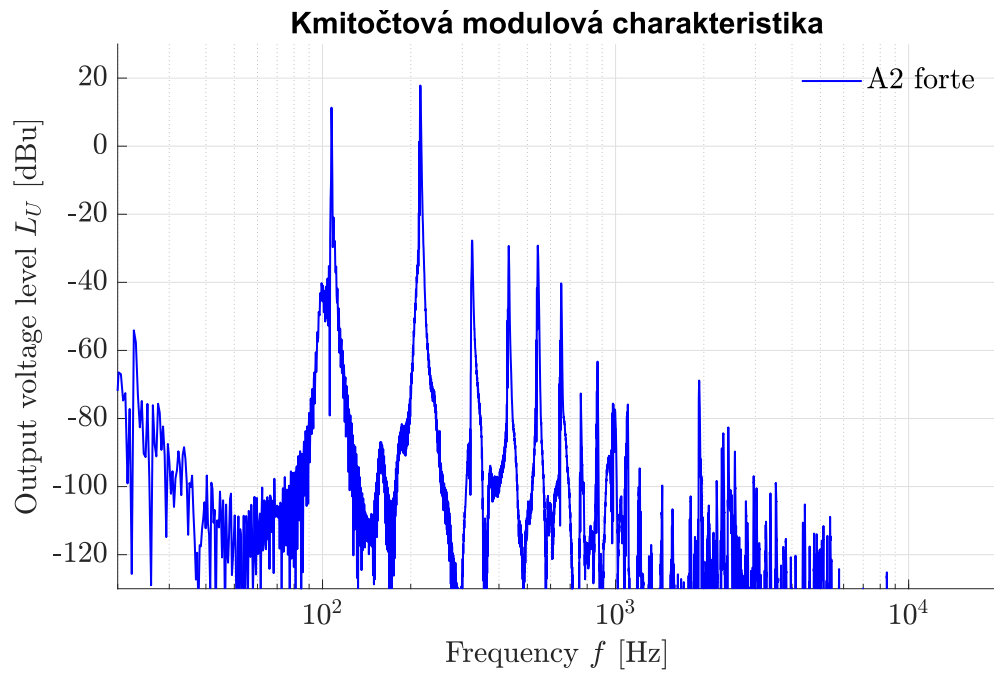


Obr. A.48: Kmitočtová charakteristika, materiál eben macassar, tón c4

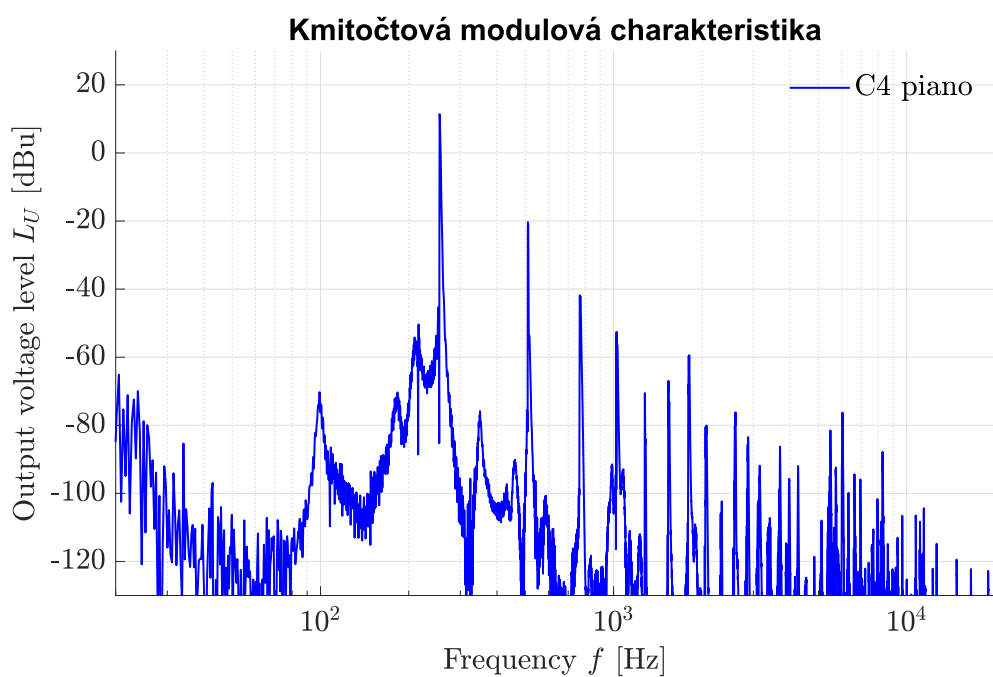
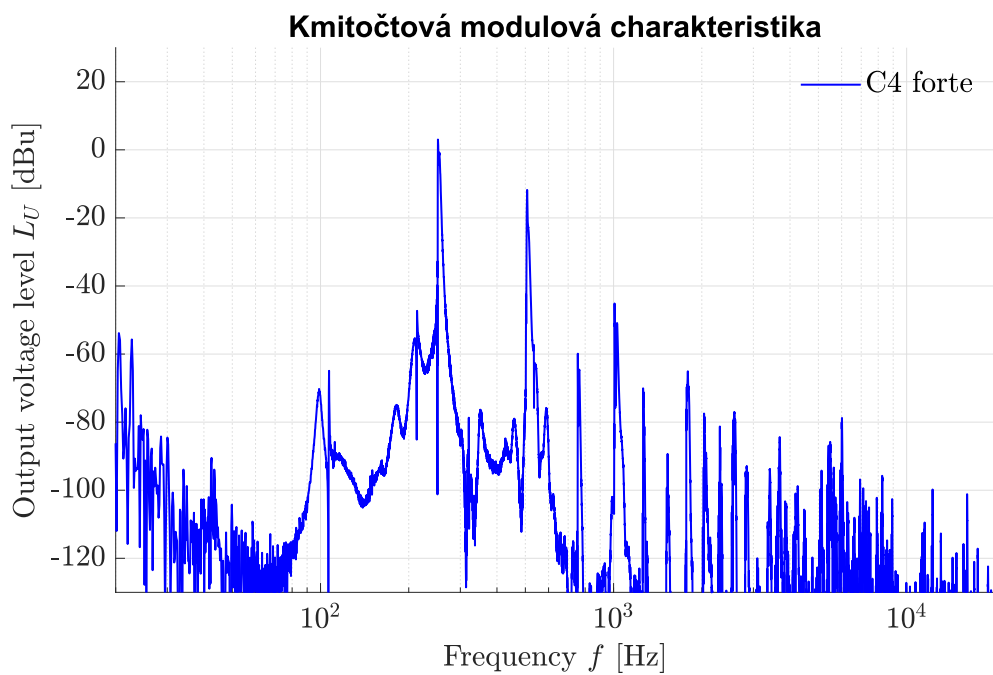


Obr. A.49: Kmitočtová charakteristika, materiál eben macassar, tóny a3 a c5

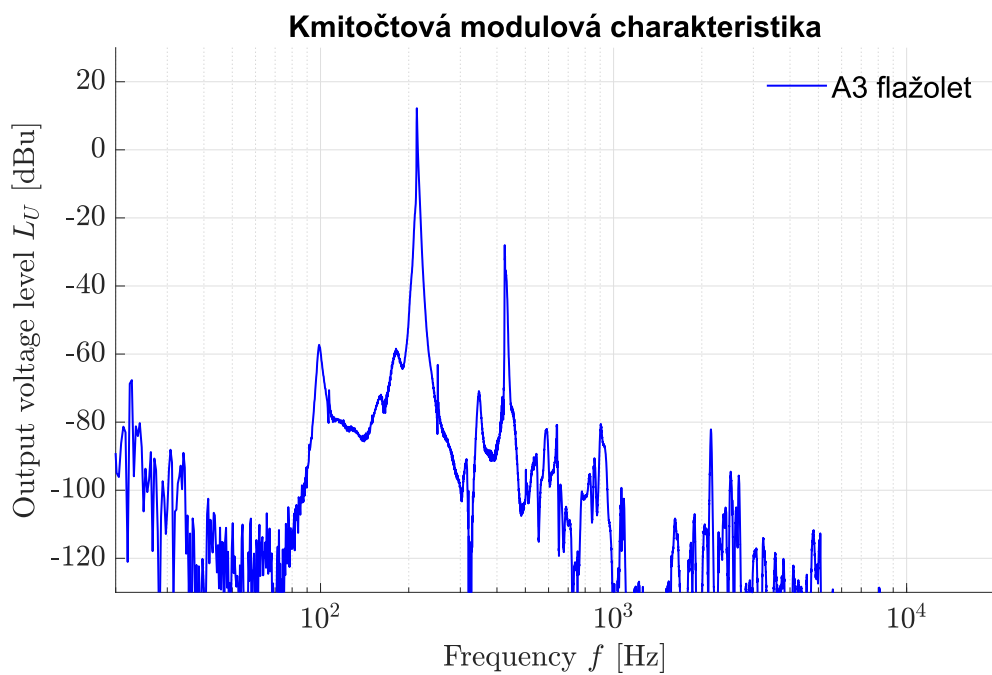
Padouk



Obr. A.50: Kmitočtová charakteristika, materiál padouk, tón a2

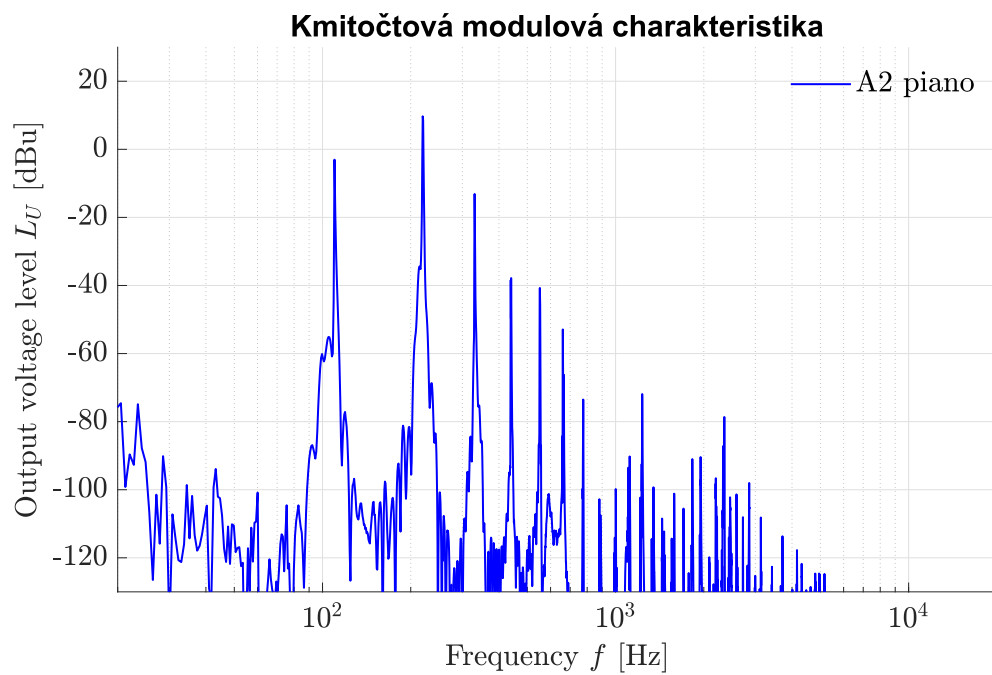
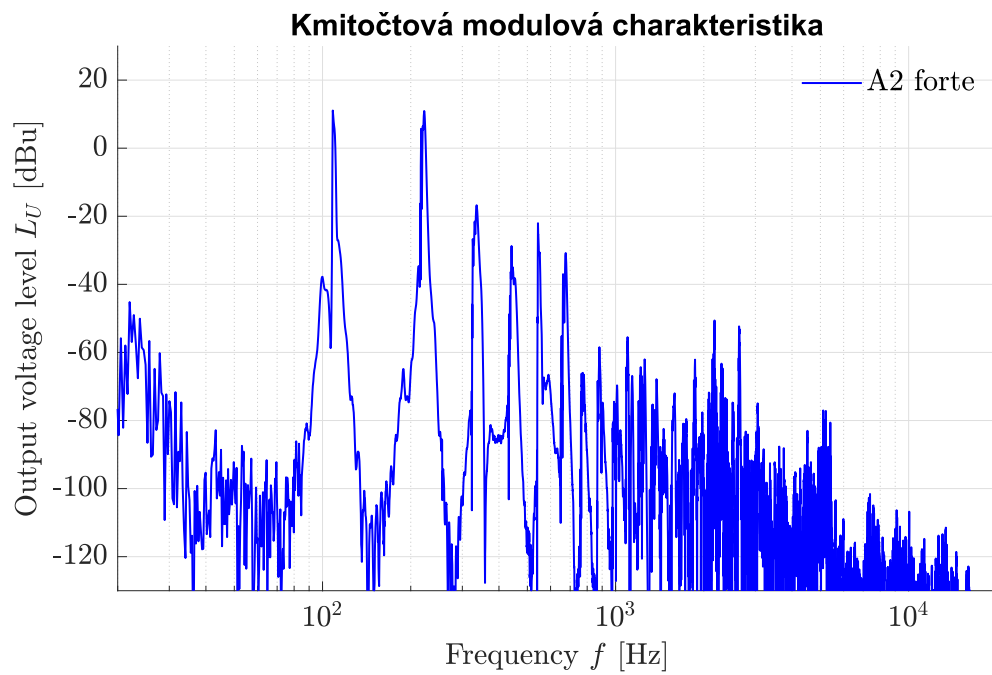


Obr. A.51: Kmitočtová charakteristika, materiál padouk, tón c4

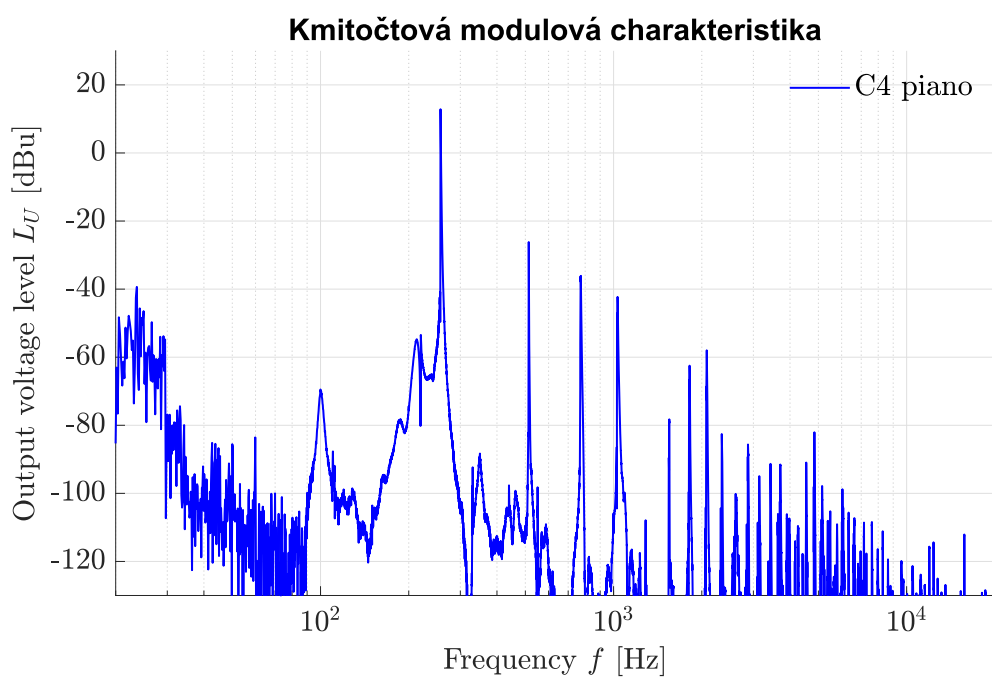
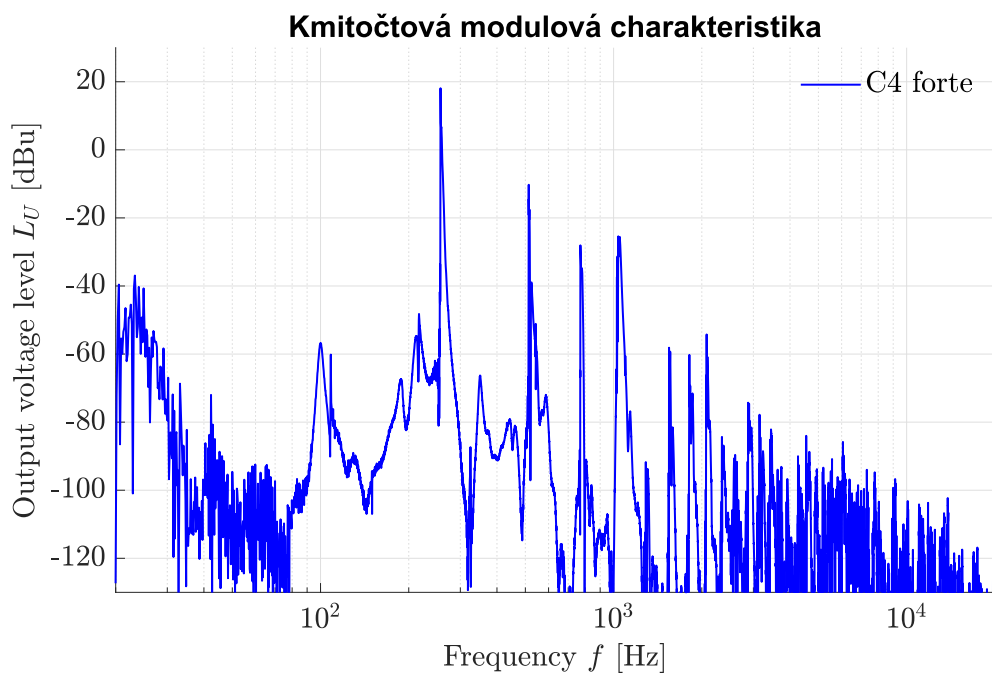


Obr. A.52: Kmitočtová charakteristika, materiál padouk, tóny a3 a c5

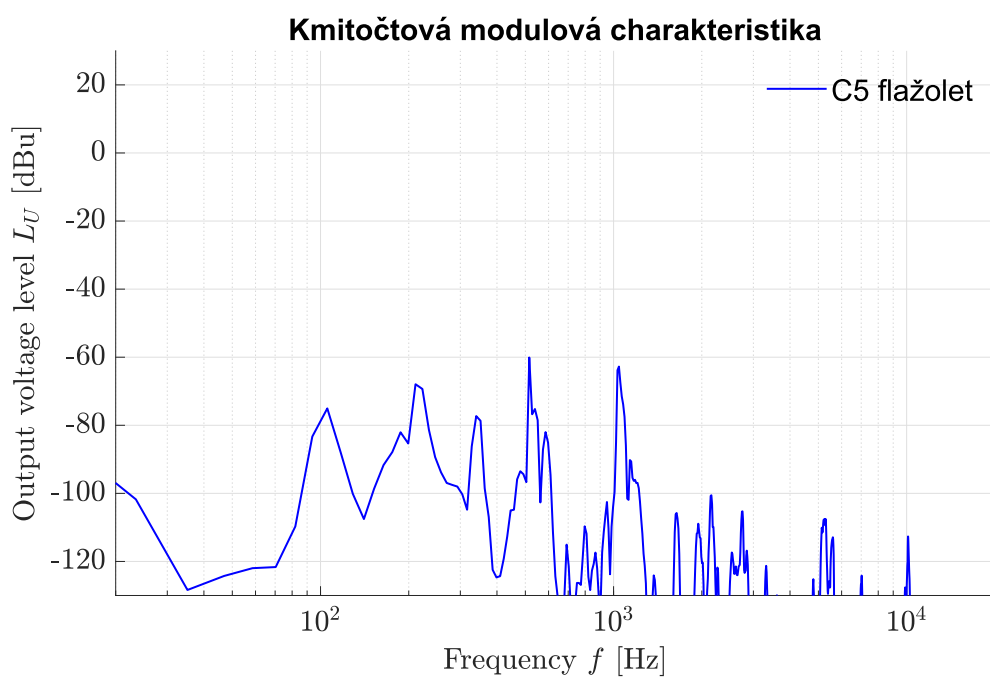
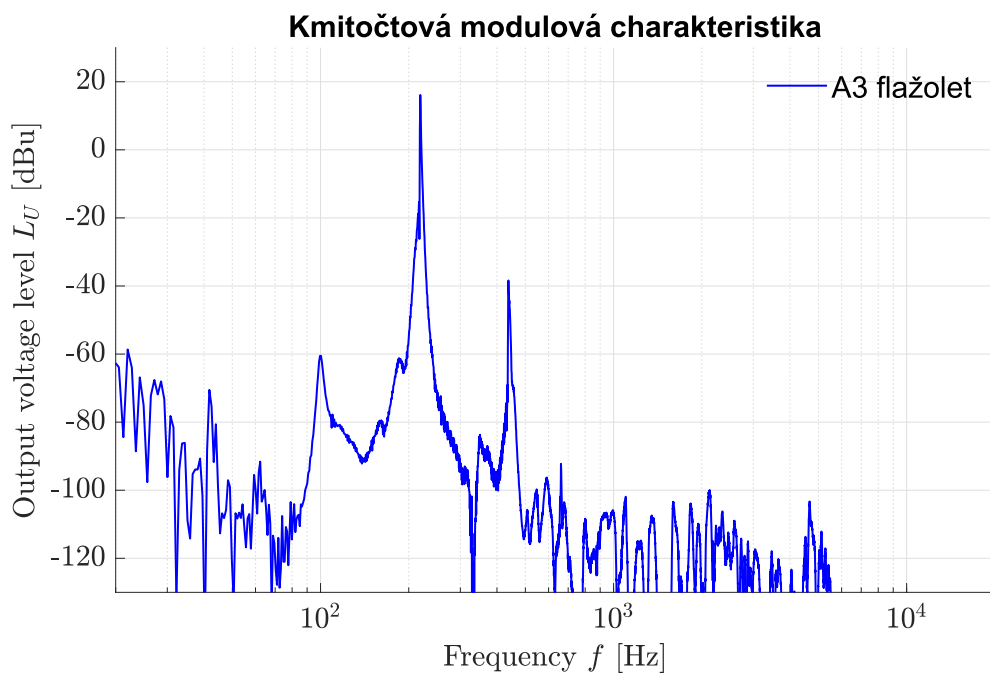
Smrk



Obr. A.53: Kmitočtová charakteristika, materiál smrk, tón a2

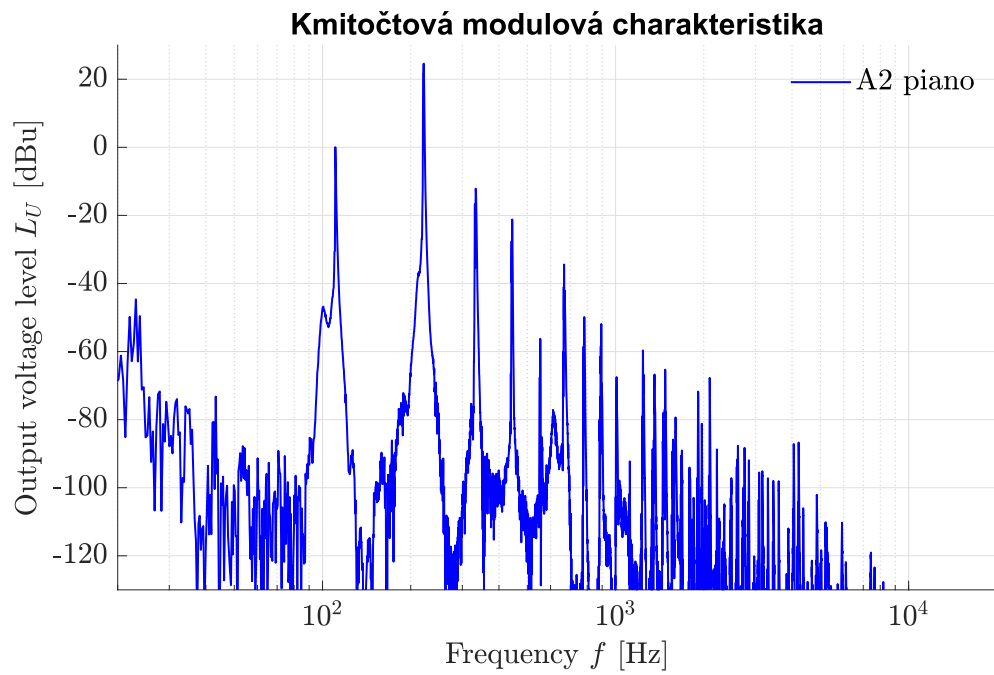
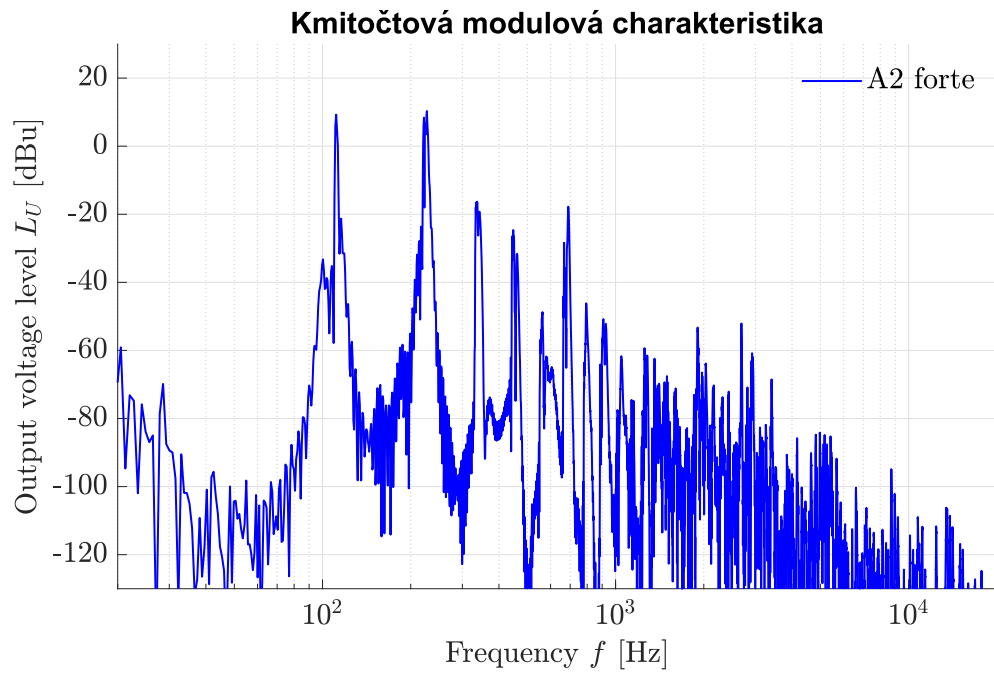


Obr. A.54: Kmitočtová charakteristika, materiál smrk, tón c4

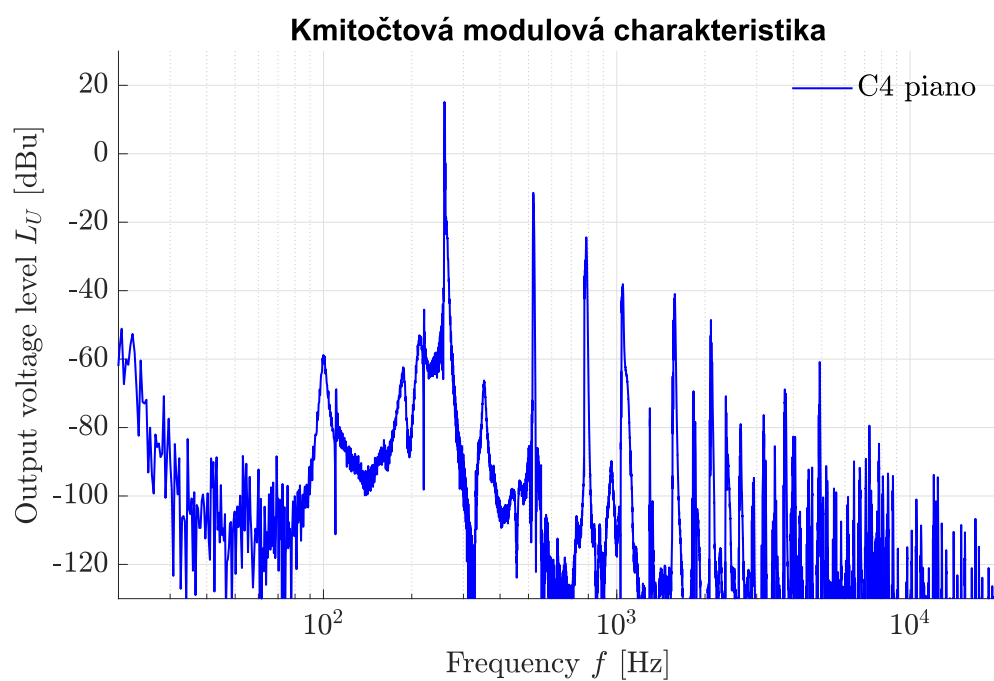
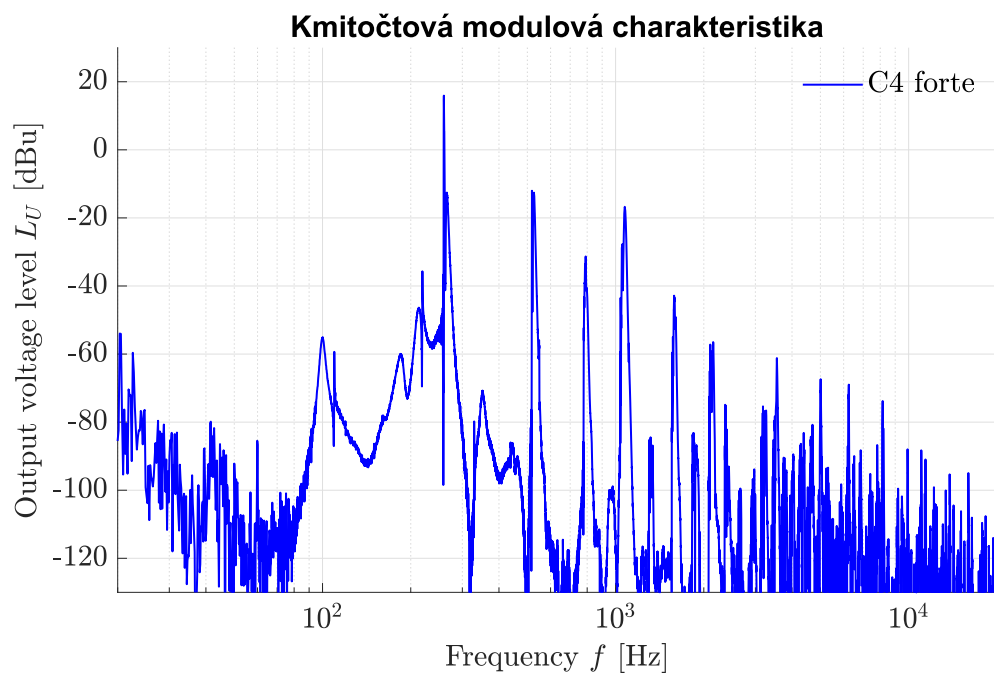


Obr. A.55: Kmitočtová charakteristika, materiál smrk, tóny a3 a c5

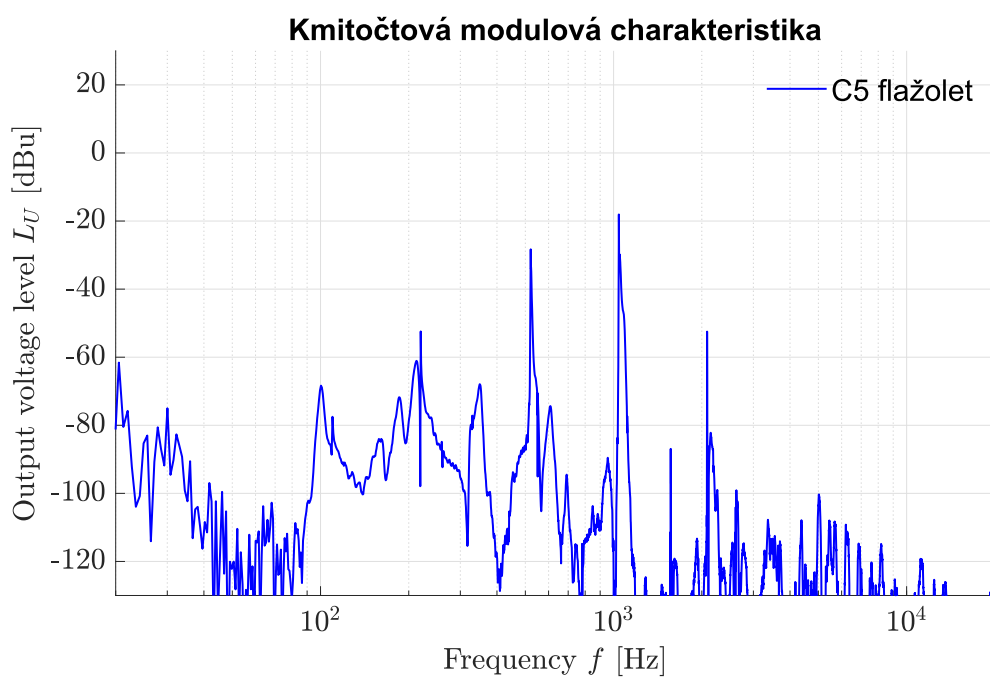
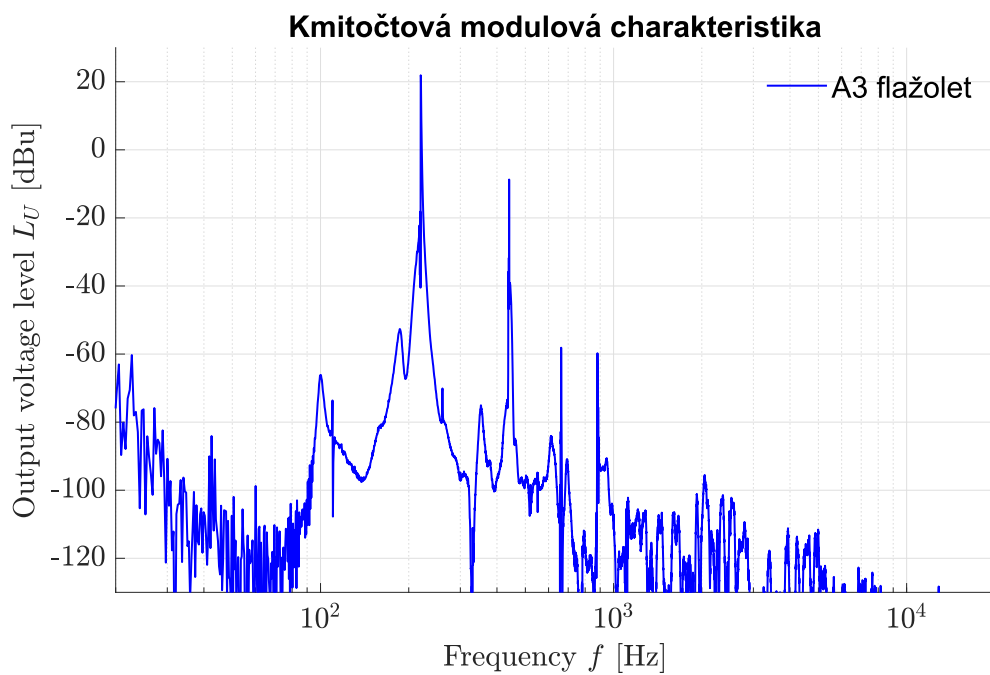
Ziricote



Obr. A.56: Kmitočtová charakteristika, materiál ziricote, tón a2



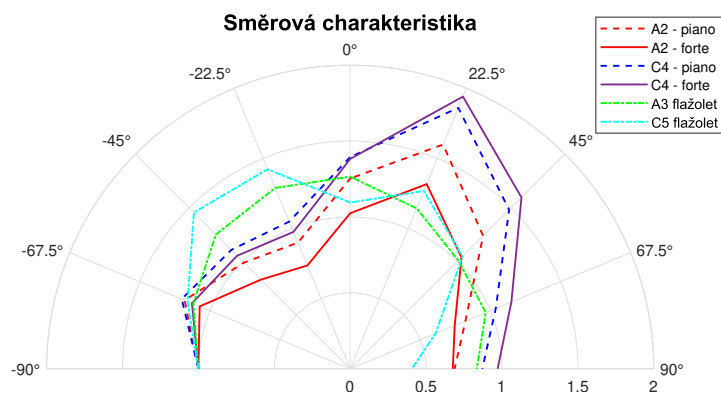
Obr. A.57: Kmitočtová charakteristika, materiál ziricote, tón c4



Obr. A.58: Kmitočtová charakteristika, materiál ziricote, tóny a3 a c5

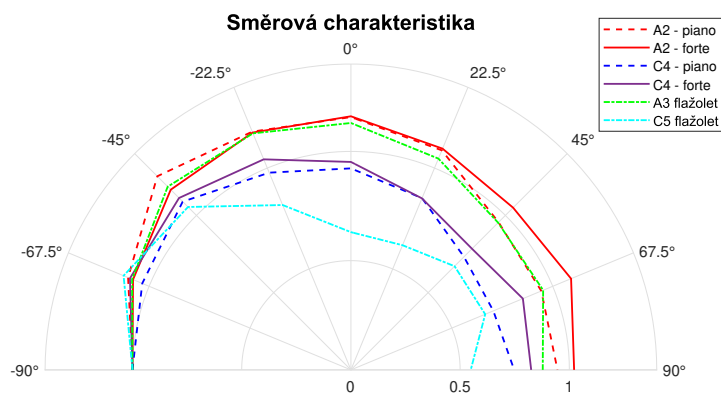
A.2.2 Grafy směrové charakteristiky kytary

Buk



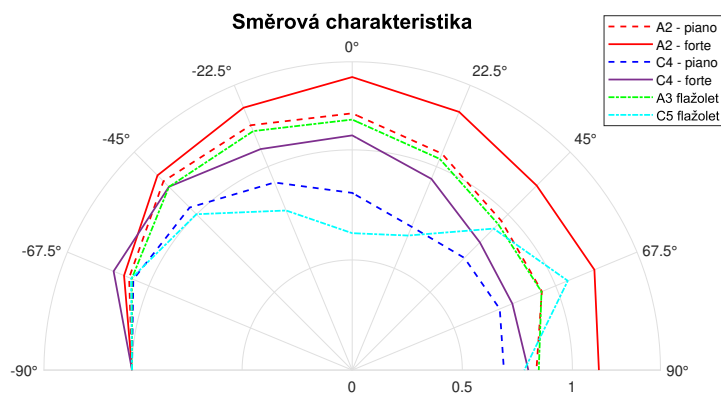
Obr. A.59: Směrová vyzařovací charakteristika kytara, materiál buk

Cocobolo



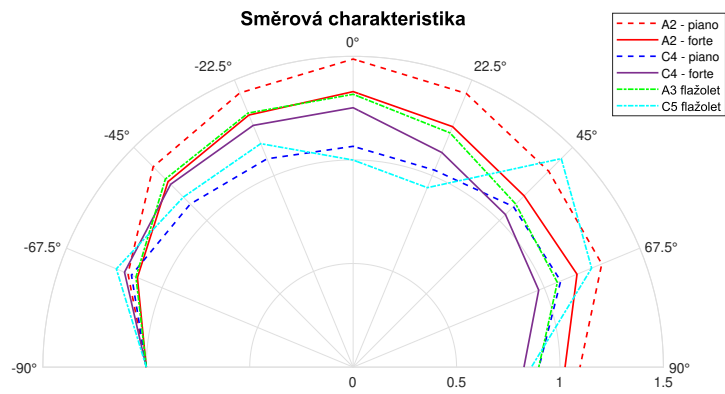
Obr. A.60: Směrová vyzařovací charakteristika kytara, materiál cocobolo

Eben



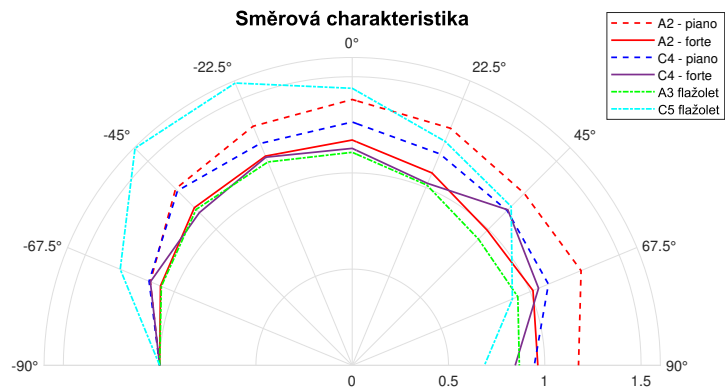
Obr. A.61: Směrová vyzařovací charakteristika kytara, materiál eben

Jasan



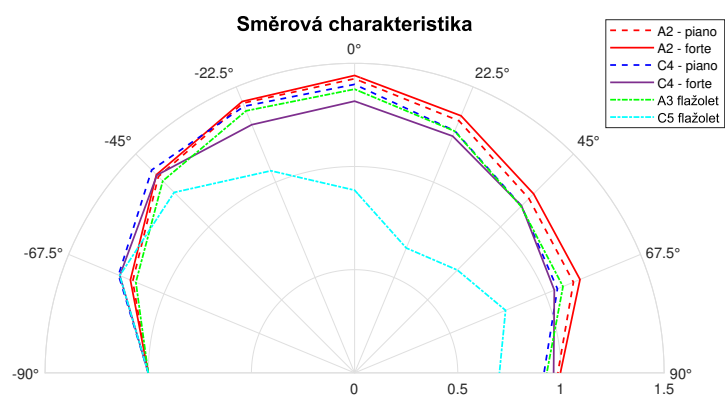
Obr. A.62: Směrová vyzařovací charakteristika kytara, materiál jasan

Jatoba



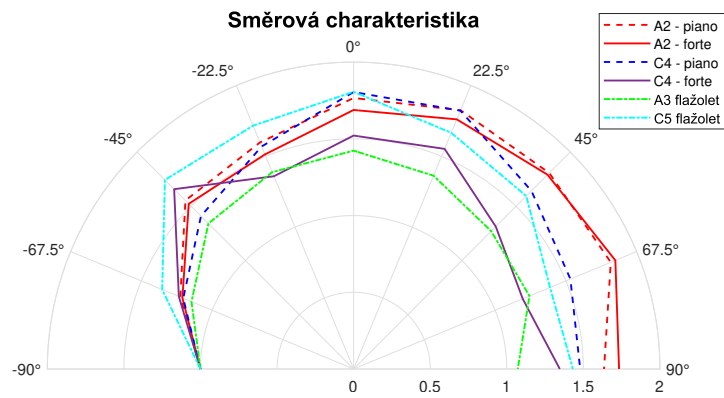
Obr. A.63: Směrová vyzařovací charakteristika kytara, materiál jatoba

Lípa



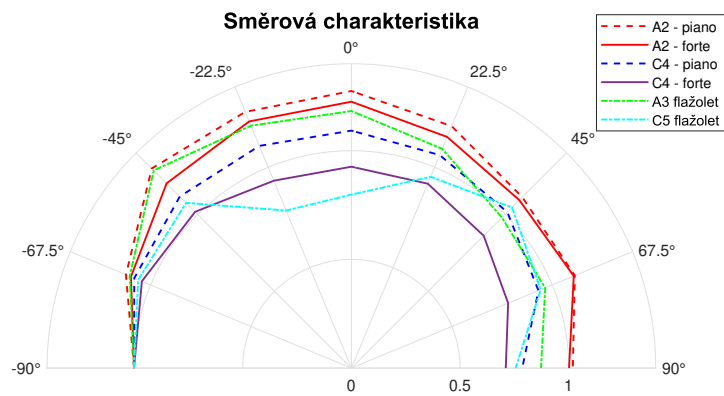
Obr. A.64: Směrová vyzařovací charakteristika kytara, materiál lípa

eben macassar



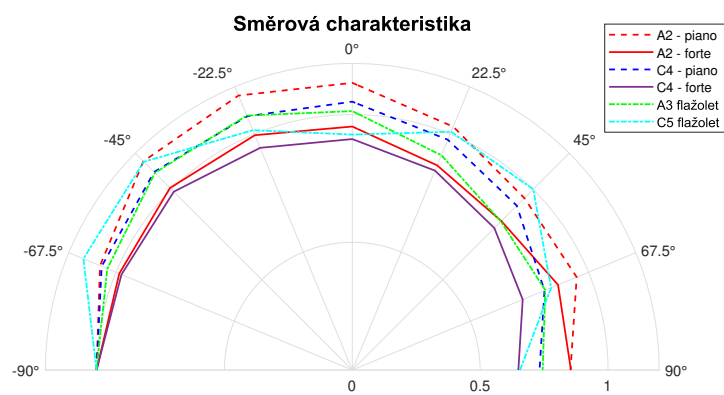
Obr. A.65: Směrová vyzářovací charakteristika kytara, materiál eben macassar

Padouk



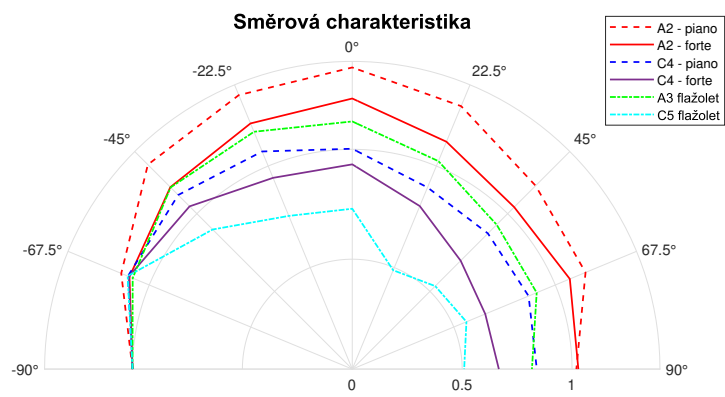
Obr. A.66: Směrová vyzářovací charakteristika kytara, materiál padouk

Smrk



Obr. A.67: Směrová vyzářovací charakteristika kytara, materiál smrk

Ziricote



Obr. A.68: Směrová vyzařovací charakteristika kytara, materiál ziricote

B Zkrácený výpis kódu z Matlabu

B.1 Kód pro vygenerování spektrografů v Matlabu

Deklarace proměnných

```
8 Fs = 48000;      % Sampling frequency
9 T = 1/Fs;       % Sampling period or Time Step
10 L = 0:T:2*T;   % Length of signal or Signal Duration
```

Načtení zvukového vzorku – příklad s plastovou kobylkou houslí tón e

```
17 switch i
18     case 1
19         %Audio file
20         X = audioread('SEMESTRALNI\vzorky\plast\
skola_ot_e.wav');
21         text2='e, plast, nezatlumené tělo, Bruel &
Kraejer';
22     case 0
23         %Audio file
24         X = audioread('SEMESTRALNI\vzorky\plast\
skola_zatl_e.wav');
25         text1='e, plast, zatlumené tělo, Bruel & Kraejer'
;
;
```

Výpočet FFT

```
69 %Length of Time domain signal
70     LoT = length(X);
71 %Length of signal in power of 2
72     Lo2 = 2^nextpow2(LoT);
73 %Fourier transform of signal
74     Y= fft(X, Lo2);
75     fff= abs(Y(1:Lo2/2));
76     f= Y(1:Lo2/2);
77 %Count logarithmic data for better analysis
78     Y=20*log(f/775);          %dBu
79     Y=smoothdata(Y,"gaussian", 19);
80 % Setup x-label to frequency instead of samples
81     X = Fs*(0:Lo2/2-1)/Lo2;
```

Vykreslení grafů

```

89     figure(1);
90     hfig=semilogx(X, Y, 'LineWidth', 2, 'DisplayName', '$
\Omega(t)$');
91     hfig.Color = [hfig.Color 0.7];
92     xlabel('Frequency $f$ [Hz]');
93     ylabel('Output voltage level $L_U$ [dBu]');
94 %Manually setting resolution
95     xlim([150 17500]);
96     ylim([-120 45]);
97     grid;
98     hold on;
99 end
100 title('Kmitočtová modulová charakteristika','fontsize',
14);
101 legend({text1, text2},'Location', 'northeast', '
Interpreter','latex');

```

B.2 Kód pro vygenerování směrové charakteristiky v Matlabu

Nahrání kalibračních souborů pomocí prostředí GUI

```

7 [filename, pathname] = uigetfile( {'*.wav', 'Zvukové
soubory wav';'*.*', 'Všechny soubory'}, 'NAHRAJ
KALIBRAČNÍ SOUBORY', 'MultiSelect', 'on');

27 % Kalibration process must happen
28 for i = 1:multiselect
29     % fs je vzorkovací kmitočet a h je matice, kde
sloupce jsou vzorky jednotlivých kanálů
30     [h, ~ ] = audioread( fullfile( pathname, filename
{i}));
31     % pouze hodnoty jednoho kanálu
32     h = h(:,1);
33     % výpočet efektivní hodnoty kalibračního signálu
34     kalibrace(i) = sqrt(mean(h.^2));
35     % převrácená hodnota efektivní hodnoty
36     opacna(i) = 1 / kalibrace(i);
37 end

```

Výběr a tisk směrové charakteristiky do polárního grafu.

Postupně se šestkrát po sobě vybere pomocí prostředí GUI vícenásobným výběrem 9 vzorků (pojmenovaných číselně tak, aby odpovídaly daným mikrofonom pod daným úhlem). Ty odpovídají požadovaným tónům – a2 v pianu, ve forte, c4 v pianu, forte, atd.

Při posledním výběru dojde k vytištění legendy a k výslednému formátování.

```
278 %% Vzorek číslo 6
279 [filename1, pathname1] = uigetfile( {'*.wav', 'Zvukové
    soubory wav';'*..*',...
280 'Všechny soubory'},...
281 'VÝBĚR ŠESTÉHO VZORKU', pathname, 'MultiSelect', 'on');
282
283 % End function if none was chosen
284 if isequal(filename1,0) isequal(pathname1,0)
285     disp('.... zrušeno');
286     return;
287 end
288
289 % Was selected one or more files?
290 if iscellstr(filename1)
291     multiselect = length(filename1);
292     disp('.... vybráno více souborů');
293 else
294     multiselect = 1;
295     filename1 = {filename1};
296     disp('.... vybrán jeden soubor');
297 end
298
299 for u = 1:multiselect
300     [h, ~ ] = audioread( fullfile( pathname1, filename1{u
        }));
301     h = h(:,1);
302 % normalizace
303     normalizace = opacna(u) * h;
304 % efektivni hodnota normalizace
305     rmsnormalizace(u) = sqrt(mean(normalizace.^2));
306 end
307
```

```

308 % uložení efektivní hodnoty ve směru záření
309     efektivni = rmsnormalizace(9);
310 % relativní hodnoty pro všechny směry
311     rmsnormalizace = rmsnormalizace./efektivni;
312
313 uhly = [0 22.5 45 67.5 90 112.5 135 157.5 180];
314 figure (1);
315 % degrees to rads
316 radian = uhly * pi / 180;
317 % vykreslení polárního grafu
318 p=polarplot(radian, fliplr(rmsnormalizace), '-.c');
319 p(1).LineWidth = 1.2;
320 hold on;
321 legend({'A2 - piano', 'A2 - forte', 'C4 - piano', 'C4 -
        forte', 'A3 flažolet', 'C5 flažolet'});
322 legend('Location','northeastoutside');
323 title('Směrová charakteristika','fontsize', 14);

```

C Obsah elektronické přílohy

Elektronická příloha obsahuje nejprve sekci Matlab, kde se nachází kódy pro generování grafů použitých v této práci a dále jsou zde vybrané ukázky hudebních vzorků nahraných během jednotlivých měření. Jelikož byli zpracovávány audio soubory ve formátu .wav, bylo nutné přílohu značně zkrátit, jinak by její velikost přesahovala 1 GB.

Prvně v sekci výpisu kódů matlabu byl vybrán pro housle pouze jeden reprezentativní tón – a. Pro kytaru byla vybrána pouze jedna kobylka – buk lignamon, a tón a2.

Software byl testován pro Matlab verzi R2022a.

Další sekce obsahuje výpočty vlastností materiálů. Soubor `mereni.xlsx` byl vytvořen verzí softwaru Microsoft Excel 365 (2022).

Nakonec jsou v příloze vybrané obrázky.

```
/.....kořenový adresář příloženého archivu
├─ Matlab...kódy pro generování grafů a vzorky wav souborů, ze kterých se generují
│   └─ experiment_housle.....experiment s houslemi
│       └─ vzorky ..... do přílohy vybrán pouze vzorek tónu a
│           └─ drevena..... vzorky javorové kobylky
│               └─ ot_home_a.wav ..... nezatlumené tělo, tón a, doma
│                   └─ skola_ot_a.wav ..... nezatlumené tělo, tón a, bezodrazová komora
│                       └─ skola_zatl_a.wav ..... zatlumeného tělo, tón a, bezodrazová komora
│                           └─ zatl_home_a.wav ..... zatlumeného tělo, tón a, doma
│                               └─ plast..... vzorky kobylky z PLA
│                                   └─ ot_home_a.wav
│                                       └─ skola_ot_a.wav
│                                           └─ skola_zatl_a.wav
│                                               └─ zatl_home_a.wav
│
│   └─ experiment_kytara.....experiment s kytarou
│       └─ buk..... vzorky pro kobylku z buku
│           └─ A2.zip..... obsahuje vzorky pro analýzu
│               └─ f_01_L_A2.wav
│                   └─ f_02_A2.wav
│                       └─ f_03_A2.wav
│                           └─ f_04_A2.wav
│                               └─ f_05_A2.wav
│                                   └─ f_06_A2.wav
│                                       └─ f_07_A2.wav
│                                           └─ f_08_A2.wav
│                                               └─ f_09_R_A2.wav
│                                                   └─ f_merici_A2.wav ..... vzorek pro analýzu spektra
│
│   └─ smerovost.m ..... analýza směrové charakteristiky
│       └─ FFTanalysis.m ..... analýza frekvenční charakteristiky
```

```

/.....kořenový adresář přiloženého archivu
├── Mereni_drevo_utechov.....měření fyzikálních vlastností kobytek
│   ├── FFT
│   │   ├── vzorky
│   │   │   └── jasan
│   │   │       ├── podelne.wav
│   │   │       └── pricne.wav
│   │   └── FFTanalysis.m
│   ├── mereni.pdf....tabulka s výslednými vlastnostmi materiálů kobytek v .pdf .3
│   └── mereni.xlsx..... tabulka s výslednými vlastnostmi materiálů kobytek
├── Obrazky
│   ├── smer.....obsahuje grafy směrové charakteristiky
│   │   ├── kytara
│   │   └── housle
│   └── spektr.....obsahuje grafy spektrální charakteristiky
│       ├── kytara
│       └── housle

```