

Západočeská univerzita v Plzni
Fakulta pedagogická
Katedra matematiky, fyziky a technické výchovy

Studijní program: *P7507 Specializace v pedagogice*

Studijní obor: *Teorie vzdělávání ve fyzice*

Disertační práce

**MEZIOBOROVÝ VÝUKOVÝ KONCEPT AKUSTIKY
A DIGITÁLNÍHO ZPRACOVÁNÍ ZVUKOVÉHO SIGNÁLU**

An interdisciplinary concept for teaching acoustics and digital audio processing

Mgr. Daniel Aichinger

Školitel: doc. PaedDr. Jarmila Honzíková Ph.D.

Počet stran: 160

Počet stran příloh: 42

Plzeň, 2015

Prohlašuji, že jsem předloženou disertační práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a zdrojů informací.

Prohlašuji, že obsah tištěné verze disertační práce a obsah elektronické verze disertační práce ve formátu PDF umístěné na CD-ROM v příloze tištěné disertační práce jsou shodné.

V Plzni dne

.....

Obsah:

1	ÚVOD	1
1.1	HISTORICKÝ VÝZNAM A VÝVOJ AKUSTIKY	2
1.1.1	<i>Prvopočátky akustiky.....</i>	2
1.1.2	<i>Renesance akustiky.....</i>	3
1.1.3	<i>Rozkvět fyzikální akustiky.....</i>	5
1.1.4	<i>Počátky techniky pro přenos, záznam a měření zvuku</i>	8
1.1.5	<i>Digitální zvuková technika</i>	10
1.2	AKUSTIKA Z POHLEDU SOUČASNÉ DIDAKTIKY FYZIKY	11
1.3	CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE A POUŽITÉ VÝZKUMNÉ METODY	13
2	DIDAKTICKÁ ANALÝZA SOUČASNÉHO STAVU VÝUKY	18
2.1	NORMATIVNÍ POŽADAVKY NA VÝUKU AKUSTIKY.....	18
2.1.1	<i>Požadavky na výuku akustiky a zvukové techniky na středních průmyslových školách.....</i>	19
2.1.2	<i>Požadavky na výuku akustiky na gymnáziu</i>	20
2.1.3	<i>Výuka akustiky na středním stupni vzdělávání v Německu.....</i>	23
2.2	AKUSTIKA V UČEBNICÍCH FYZIKY PRO STŘEDNÍ ŠKOLU.....	24
2.2.1	<i>Fyzikální model mechanického vlnění vzduchu.....</i>	25
2.2.2	<i>Modelování zvuku ve vzduchu pomocí hustotních vln</i>	27
2.2.3	<i>Energetický model zvukového vlnění.....</i>	28
2.2.4	<i>Hladinové vyjádření akustických veličin na střední škole.....</i>	30
2.2.5	<i>Akustika v biologii, hudební výchově A INFORMATICE</i>	31
2.3	ZÁKLADNÍ EXPERIMENTY Z AKUSTIKY NA STŘEDNÍ ŠKOLE	32
2.3.1	<i>Demonstrace kmitání a stojatého vlnění zdrojů zvuku</i>	33
2.3.2	<i>Demonstrace stojatého vlnění vzduchu</i>	34
2.3.3	<i>Demonstrace nutnosti přítomnosti látky pro přenos zvuku</i>	36
2.4	ŠKOLSKÉ MĚŘICÍ PŘÍSTROJE PRO AKUSTICKÁ MĚŘENÍ	38
2.4.1	<i>Školské měřicí systémy pro počítačem řízené a vyhodnocované experimenty v akustice.....</i>	39
2.5	EMPIRICKÝ VÝZKUM VSTUPNÍCH ŽÁKOVSKÝCH PŘEDSTAV O ZVUKU NA STŘEDNÍM STUPNI VZDĚLÁVÁNÍ ...	45
2.5.1	<i>Předvýzkum a návrh empirické studie.....</i>	47
2.5.2	<i>Provedení dotazníkové studie.....</i>	48
2.5.3	<i>Výsledky dotazníkového šetření.....</i>	49
3	VÝUKOVÝ KONCEPT AKUSTIKY A DIGITÁLNÍ ZPRACOVÁNÍ ZVUKOVÉHO SIGNÁLU PRO STŘEDNÍ STUPEŇ VZDĚLÁVÁNÍ.....	59
3.1	ZÁKLADY FYZIKÁLNÍ AKUSTIKY PRO STŘEDNÍ STUPEŇ VZDĚLÁVÁNÍ	64
3.1.1	<i>Zvukové kmitání</i>	64
3.1.2	<i>Zvukové vlnění vzduchu.....</i>	67
3.1.3	<i>Rychlost šíření a vlnová délka zvukového vlnění.....</i>	69
3.1.4	<i>Akustický tlak</i>	71
3.1.5	<i>Mechanický model zvukového vlnění vzduchu</i>	74
3.1.6	<i>Akustická rychlost a akustická impedance</i>	79
3.1.7	<i>Hladinové vyjádření akustických veličin.....</i>	82
3.1.8	<i>Hladina akustického tlaku.....</i>	84
3.1.9	<i>Akustická intenzita a akustický výkon.....</i>	87

3.2	ZÁKLADY ČÍSLICOVÉHO ZPRACOVÁNÍ ZVUKU	89
3.2.1	<i>Vzorkování</i>	90
3.2.2	<i>Binární kódování číselné hodnoty vzorku.....</i>	96
3.2.3	<i>Kvantizace hodnoty vzorku.....</i>	100
3.2.4	<i>Kódování střídavých zvukových signálů.....</i>	103
3.2.5	<i>Kvantizační chyba</i>	107
3.2.6	<i>Datový tok</i>	111
3.3	MĚŘICÍ TECHNIKA PRO REÁLNÉ EXPERIMENTY V AKUSTICE NA STŘEDNÍM STUPNI VZDĚLÁVÁNÍ	112
3.3.1	<i>Princip měření akustických veličin.....</i>	112
3.3.2	<i>Základní parametry akustických senzorů</i>	116
3.3.3	<i>Měřicí systém pro školské experimenty v akustice využívající zvukovou kartu počítače.....</i>	121
3.3.4	<i>Kalibrace senzoru</i>	130
3.4	LABORATORNÍ ÚLOHA MĚŘENÍ RYCHLOSTI ZVUKU VE VZDUCHU	134
3.4.1	<i>Měření rychlosti zvuku ve vzduchu metodou vyhodnocování časového zpoždění na známé dráze</i>	134
3.4.2	<i>Měření rychlosti zvuku ve vzduchu metodou hřebenového filtru.....</i>	140
3.4.3	<i>Měření rychlosti zvuku ve vzduchu metodou analýzy stojatého vlnění vzduchových sloupců v trubicích.....</i>	148
3.4.4	<i>Organizace laboratorní úlohy z akustiky na střední škole</i>	157
4	SHRNUTÍ.....	160

PŘÍLOHY:

Příloha A	Dotazník k výzkumu vstupních představ žáků středních škol o zvuku (verze 2013)
Přílohy B1–B22	Grafy vyhodnocení dotazníkové studie ke vstupním představám žáků středních škol o zvuku
Příloha C1	Termodynamické jevy v akustice
Příloha C2	Odvození velikosti rychlosti zvuku ve vzduchu ze stavové rovnice ideálního plynu
Příloha C3	Totální odraz v akustice
Přílohy D1–D3	Příklady vyhodnocení laboratorní úlohy měření rychlosti zvuku
Příloha E1	Realizovaná projektová výuka akustiky na ESFZ FAU
Příloha E2	Náměty pro projektovou výuku v akustice

1 Úvod

Svět kolem nás vnímáme prostřednictvím pěti smyslů. Sluch je přitom důležitým prostředkem přežití, poznání a vzájemné komunikace. Schopnost člověka zvuk vnímat, ale také schopnost ho vytvářet, jsou výchozími podmínkami vývoje lidské řeči a výrazových prostředků hudby. Jako jeden ze dvou nejdůležitějších lidských smyslů je proto sluch u žáků základních a středních škol třeba rozvíjet a naučit se jej chránit.

Abychom v současném multimediálním světě nebyli nuceni přijmout jen roli pasivního konzumenta, jsou tu rodina a škola, které nás mají na každodenní život teoreticky i prakticky připravit. Ve školách se o zvuku sice učí, ale nelze si nevšimnout zaměření výuky na vizuální „pozorování“ přírody a okolního světa, které má přednost před jeho vnímáním ostatními smysly. Různé aspekty nauky o zvuku a jeho vnímání se tak na středních školách učí v různých předmětech nekoordinovaně a bez souvislostí. Výuka o zvuku přitom vyžaduje ze své podstaty mezioborový přístup. Učitel biologie, který má vysvětlit studentům, jak funguje lidský sluch a jak ho chránit před poškozením, by měl ovládat potřebnou fyziku, učitel fyziky by měl znát technické aplikace akustiky a spolu s učitelem informatiky a hudební výchovy by měl jevy se stejnou podstatou označovat stejnými pojmy. I v případě výuky akustiky navíc vyvstává problém, který postihuje obecně většinu přírodovědných a technických oborů, a to prohlubující se nesoulad mezi akustikou jakožto moderní vědou a tím, jak se akustika na školách učí. Zároveň se čím dál více projevuje i odtažitost výuky od běžného života mladého člověka. Ve výsledku tak výuka na školách zaostává za vědeckým poznáním i každodenními aplikacemi akustiky a zvukové techniky o více než 20 let.

Předložená disertační práce se snaží objasnit příčiny současného stavu a ukázat jednu z možných cest, jak učit o zvuku na střední škole moderně a použitelně pro každodenní život i ten profesní. Disertační práce proto vychází z analýzy vzdělávacích potřeb žáků, které konfrontuje se současným školským přístupem k výuce akustiky a zvukové techniky. Vlastní výukový koncept pak ve čtyřech kapitolách postupuje od základů fyzikální akustiky a digitálního zpracování zvuku přes metody objektivního hodnocení akustických signálů k jejich praktickým aplikacím v měřicí technice a digitálním kódování zvuku, přičemž kombinuje časově a organizačně efektivní frontální výuku s workshopy, ve kterých žáci akustické jevy po zaškolení samostatně objevují a zkoumají. Celý výukový koncept završuje tvůrčí projektová výuka a podpora vědecké činnosti mládeže v oboru akustiky.

1.1 Historický význam a vývoj akustiky

Akustika patří k nejstarším oborům fyziky a přírodních věd vůbec. V různých kulturách lidé experimentovali se zvukem a výrobou hudebních nástrojů pravděpodobně již od pravěku. Na počátku byla fascinace člověka zvukem, poslech a pozorování. Následné pokusy se zdroji zvuku, zkoumání vlastností lidského sluchu a šíření zvuku v prostředí patřily k historicky prvním záměrně prováděným experimentům a spoluvytvářely tak základy vědeckého přístupu k pochopení přírodních jevů. Zkoumání člověkem cíleně vytvářených zdrojů zvuku v podobě strunných a dechových nástrojů vedlo až ke kvantitativnímu popisu zvukových jevů pomocí veličin a čísel. Identifikace a následná systematická variace sledovaných parametrů v experimentech přitom vyústila v matematickou formulaci objevených souvislostí.

Nalezené zákonitosti nauky o zvuku byly zobecňovány, filozoficky interpretovány i nově uplatňovány v teoriích dalších odvětví vědy jako v astronomii a fyziologii. Formulace vlnové teorie a pozdější matematický popis zvuku pomocí vlnových rovnic přinesl také jednu z historicky nejvýznamnějších fyzikálních teorií – undulační neboli vlnovou teorii – zprvu formulovanou právě pro zvuk jakožto mechanické vlnění. Z jejího zobecnění ovšem brzy vyšla vlnová teorie světla a radiového záření, vlnové rovnice elektromagnetického pole i základy teoretického popisu jevů kvantové fyziky. Zkoumání zvukových jevů přitom nebylo nikdy samoúčelné. Jeho výsledky nacházely okamžité uplatnění při výrobě nových hudebních nástrojů, konstrukci staveb i na svou dobu průkopnických zařízení pro zlepšení přenosu zvuku lidského hlasu, z nichž se postupně vyvinuly přístroje pro záznam a reprodukci zvuku.

1.1.1 PRVOPOČÁTKY AKUSTIKY

Vyjdeme-li z písemně dochovaných informací, pak první systematické experimenty v akustice prováděl ve starověkém Řecku v 6. století před naším letopočtem filozof a matematik **Pythagoras ze Samu** (asi 570–500 před n. l.). Pomocí jednoduchého strunného nástroje, jakéhosi předchůdce monochordu, určoval poměry délek strun, které zní lidskému sluchu libozvučně. V souzvuku daném celočíselnými poměry dělení struny spatřoval Pythagoras jeden z důkazů své hypotézy, že „*vše je číslo a harmonie*“. Navázala na něj celá řada jeho žáků takzvané Pythagorejské školy. Podle pythagorejců bylo možné hudbu exaktně popsat pomocí čísel a číselných poměrů. Tím byl poprvé ve známé historii vědy přírodní jev popsán pomocí matematiky a vztahy kvalitativní vysvětleny pomocí vztahů kvantitativních.

Řecký filozof **Aristoteles** (384–322 před n. l.) později aplikoval délkové poměry strun objevené pythagorejci na délky vzduchových sloupců píšťal. Aristoteles si podle toho, jak

postupoval, zřejmě uvědomoval, že zvuk má původ v kmitání a šíří se od zdroje jako zhušťování a zředování vzduchu určitou konečnou rychlostí. Domníval se ovšem chybně, že rychlost zvuku závisí na výšce tónu. Již řecký matematik **Eukleidés** (asi 365–300 před n. l.) v knize *Sectio canonis* popsal, že zvuk vzniká z pohybu a že rychlý pohyb vytváří vysoké tóny, zatímco pomalé pohyby vytváří tóny nízké. Jako první definoval rozdíl mezi objektivním popisem zvuku a jeho subjektivním vnímáním Aristotelův žák **Aristoxenos** (asi 354–300 před n. l.) v dílech *Základy harmonie* a *Základy rytmiky*. Nejúplnější dochovaný popis tehdejší řecké hudební teorie později poskytl řecký hudební autor **Aristides Quintilianus** (2. nebo 3. století n. l.) ve třech knihách *Peri musikes*. Na kmitajících strunách objevil kmitny a uzly výchylky kmitání pomocí zavěšených stébel slámy a popsal jev rezonance při rozechvění struny vyvolaném na dálku prostřednictvím zvuku jiné, stejně naladěné, struny.

V antice se kromě hudební akustiky rozvíjela zejména stavební akustika. Jejím nejvýznamnějším zástupcem ve starověkém Řecku byl **Polykleitos** mladší (435–360 před n. l.), architekt velkého divadla v Epidauru. Souhrnně stavební umění antiky následně popsal římský stavitel a architekt **Marcus Vitruvius Pollio** (1. stol. před n. l.) známý jako Vitruv. Kolem roku 20 před naším letopočtem v rámci svého díla *De architectura libri decem* (*Děsť knih o architektuře*) publikoval rozsáhlá pojednání o akustických vlastnostech divadel, antických amfiteátrů, ve kterém shrnul tehdejší poznatky a popsal svá pozorování ozvěny a dozvuku. Šíření zvuku Vitruv přirovnává k šíření vln na vodní hladině. Na základě toho došel k poznatku, že zvuk se v idealizovaném případě vzduchem šíří jako kulová vlna. Pokoušel se vysvětlit i podstatu funkce dutinového rezonátoru tvořeného hliněnými či bronzovými nádobami, zvanými původně řecky „Echeia“, později po něm též Vitruvovy vázy.

Samotné označení „akustika“ pro vědní obor zabývající se zvukem má původ v řeckém slově ακουστικός („akoustikos“) ve významu „věnující se slyšení“, odvozeném od slovesa ακουω („akouo“), slyšet. Latinským ekvivalentem slovesa „slyšet“ je přitom „audi“. Význam českého slova „zvuk“ má v latině slovo „soni“. Od řeckých a latinských označení pro zvuk a slyšení jsou pak odvozeny názvy fyzikálních jevů, odborné pojmy a názvy fyzikálních veličin, i pojmenování vědních disciplín nebo vědeckých organizací zabývajících se zvukem.

1.1.2 RENESANCE AKUSTIKY

Ve středověku akustika jako věda v Evropě postupně upadala. Dále rozvíjena však byla v Arabském světě, kde vznikaly nové hudební nástroje i nové tónové stupnice a principy ladění. Akustika se zde posunula kupředu spolu s rozvojem matematiky a geometrie, ale též medicíny, fyziologie a fonetiky. K rozvoji akustiky významně přispěli například **al-Farahidi** (718–786),

al-Kindi (801–873), **al-Fárábí** (870–950), jež v díle *Kitab al-musiqa al-kabir* (*Velká kniha hudby*) snad nejlépe shrnul teorii tehdejší perské hudební tvorby, **Ibn Sina** (980–1037) či **al-Urmawi** (1216–1294). Díky nim se později v době osvícenství dostaly myšlenky antické nauky o zvuku zpět do Evropy. Zhruba dva tisíce let po Pythagorejcích tak zkoumali a znovu objevovali zákonitosti kmitajících strun Galileo Galilei a Marin Mersenne.

Italský matematik, fyzik a astronom **Galileo Galilei** (1564–1642) zkoumal systematicky vztah mezi délkou, průřezem, napětím struny a výškou tónu. Výsledky publikoval v pojednání *Discorsi*. Na zvuk Galileo pohlížel jako na vlnění produkované kmitáním zvučícího objektu, které se šíří vzduchem až k uchu a jež vědomí interpretuje jako zvuk. Tím navázal na **Leonarda da Vinciho** (1452–1519), který byl též zastáncem myšlenky, že zvuk se šíří jako kmitání vzduchu. Osvícenství se v mnoha ohledech vrací k antice. V odkazu na myšlenky pythagorejců tak **Johannes Kepler** (1571–1630) v pěti knihách *Harmonices mundi libri* (*Harmonie světa*) znázorňuje souvislost oběžných dob a drah planet opět pomocí hudebních intervalů.

Rozvíjí se i prostorová a stavební akustika. Tou se zabýval zejména německý jezuita **Athanasius Kircher** (1602–1680). V encyklopedii hudby *Musurgia universalis* (1650) popisuje vedle číselných poměrů v hudbě a nauky o hudebních nástrojích také vznik zvuku, prostorovou akustiku, anatomické a fyziologické poznatky týkající se slyšení a produkce zvuku u člověka i u zvířat. V této knize publikoval též slavný experiment se zdrojem zvuku umístěným ve zředěném vzduchu pod recipientem vývěvy, jejíž vynález je přisuzován Otto von Guericckemu (1602–1686). Kircher však v té době nedosáhl dostatečného podtlaku a zdroj zvuku byl i po maximálním možném odčerpání vzduchu stále slyšet. Na základě tohoto experimentu (viz dále kapitola 2.3) se proto Kircher domníval, že vzduch není pro šíření zvuku potřeba. Kircher proto zastával takzvanou emanační teorii zvuku v podobě neviditelných zvukových částic vysílaných zdrojem. V druhém bohatě ilustrovaném díle *Phonurgia Nova* (*Nová nauka o zvuku*, 1673) Kircher tedy v souvislosti se svou teorií znázornil šíření zvuku a vznik zvukových jevů pomocí geometrických konstrukcí paprskové akustiky. Detailně zde popsal vznik jednoduché i vícenásobné ozvěny, vliv tvaru místnosti a stropní klenby na její akustiku, zvukovody, trychtýřovité nátrubky pro zlepšení přenosu řeči a vojenských signálů i na tomto principu fungující naslouchadla.

Francouzský jezuita **Marin Mersenne** (1588–1648) publikoval ve svém díle *L'Harmonie Universelle* (1636), respektive jeho mírně odlišné latinské verzi *Harmonicorum libri*, výsledky experimentů s monochordem, jež potvrzovaly Galileův poznatek, že existuje přímá souvislost mezi slyšenou výškou tónu a počtem kmitů struny za určitý čas. Systematickou variací jednotlivých parametrů experimentu zjistil závislost kmitočtu na délce, průřezu, hmotnosti

a napětí struny. Tehdy dostupnými prostředky nemohl měřit kmitočet strun kmitajících ve slyšitelné oblasti. Prováděl tedy experimenty s několika metry dlouhými těžkými strunami, jejichž kmity mohl počítat s pomocí kyvadla, a své závěry pro slyšitelné tóny formuloval na základě proporcionality parametrů a extrapolace naměřených hodnot. Mersenne objevil, že hudební tón se skládá z několika kmitání a jedna struna tak vytváří zároveň několik tónů, což však považoval za nevysvětlitelný paradox.

Osvícenští učenci již věděli, že zvuk se ve vzduchu šíří určitou konečnou rychlostí. Na experimentálním určení její velikosti se podílelo zejména mezi lety 1630 a 1680 mnoho významných vědeckých osobností té doby. Patřili k nim například již zmíněný **Marin Mersenne** (1588–1648), **Pierre Petrus Gassendi** (1592–1655) či **Giovanni Alfonso Borelli** (1608–1679) a **Vincenzo Viviani** (1622–1703). Později **Sir Isaac Newton** (1643–1727) v rámci matematického modelu šíření zvuku publikovaném v díle *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* (*Matematické principy přírodní filozofie*, 1687) odvodil teoretický vztah pro rychlost šíření mechanického vlnění v libovolném pružném prostředí z jeho hustoty a modulu pružnosti za předpokladu, že se jedná o izotermický proces. **Pierre-Simon Laplace** (1749–1827) tento teoretický vztah upravil pro předpoklad, že šíření zvuku je proces adiabatický, čímž dosáhl lepší shody teorie s experimenty provedenými například roku 1738 pařížskou akademií věd ($332 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ přepočteno na 0°C). Více se experimentům měření rychlosti zvuku ve vzduchu věnuje kapitola 3.4 a teoretickému odvození její velikosti příloha C2.

1.1.3 ROZKVĚT FYZIKÁLNÍ AKUSTIKY

Jakožto samostatný vědní obor akustiku profiloval francouzský matematik **Joseph Sauveur** (1653–1716). Sauveur vědecky popsal vznik vyšších harmonických frekvencí a zavedl pojem základního tónu, zkoumal závislost vnímané výšky tónu na frekvenci základního tónu a vymyslel i metodu určení frekvence neznámého tónu pomocí záznejů s tónem známé frekvence. **Christian Huygens** (1629–1695) při zkoumání šíření zvuku došel k závěru, že každý kmitající element pružného média, jímž se zvuk šíří, je možné chápat jako zdroj nové elementární vlny, což je dodnes známo jako tzv. Huygensův princip. Zřejmě ovlivněn akustikou pak Huygens formuloval myšlenku, že také světlo má vlnový charakter (1678), což později experimentálně potvrdil **Augustin Jean Fresnel** (1788–1827). I v akustice se posléze uplatnily výsledky Fresnelova zkoumání a jím zavedený matematický popis vlnových jevů difrakce a interference.

Postupně se začaly objevovat stále propracovanější matematické modely akustických jevů. Bylo to zejména díky diferenciálnímu a integrálnímu počtu vytvořenému německým

matematikem **Gottfriedem Wilhelmem Leibnizem** (1646–1716). 18. století pak dále přinášelo stále dokonalejší výpočetní postupy vedoucí k vypracování úplné teorie šíření zvukových vln. V roce 1759 publikoval **Leonhardt Euler** (1707–1783) jednorozměrnou vlnovou rovnici šíření zvuku. Počínaje jeho dílem *Tentamen novae theoriae musicae* (*Pokus o novou teorii hudby*, 1739) se navíc namísto délkových poměrů kmitajících strun prosadily kmitočtové poměry vyjadřované pomocí logaritmu ze základu 2. Francouzský matematik **Joseph-Louis Comte de Lagrange** (1736–1813) pak roku 1759 vysvětlil vznik diferenčních tónů objevených houslistou **Giuseppe Tartinim** (1692–1770). Významný přínos pro vysvětlení vlastností hudebního tónu měl francouzský matematik **Jean Baptiste Joseph Baron de Fourier** (1768–1830), který teoreticky odvodil, že za určitých podmínek může být libovolné periodické kmitání popsáno jako součet nekonečného počtu kmitání harmonických, tedy čistých tónů.

Za prvního didaktika akustiky je možné považovat **Ernsta Florense Chladniho** (1756–1827). Chladni zkoumal a ve vysokoškolské učebnici *Lehrbuch der Akustik* (1802) popsal například chvění membrán a desek zviditelněné pomocí jemného písku. Vzniklé obrazce dodnes nesou jeho jméno. Řadu metod pro zkoumání vlastností zvukových vln vyvinul **August Kundt** (1839–1894) známý především svým akustickým interferometrem, po něm nazývaným často Kundtovou trubicí (1866), když stojaté vlnění vzduchu v průhledné trubicí vizualizoval pomocí jemného korkového prášku hromadícího se v uzlech výchylky kmitání vzduchu. K názorným demonstračním experimentům vzniku a šíření zvuku přispěl i **Thomas Young** (1773–1829), který objevil možnost záznamu časového průběhu výchylky kmitání ladičky pomocí hrotu umístěného na jednom z jejích ramen, když jím rychle přejížděl přes sazemi pokryté sklo. Z toho později vyšel **Édouard-Léon Scott de Martinville** (1817–1879) při návrhu *Phonautographu* (patent 1857) zaznamenávajícím časový průběh výchylky zvukem rozkmitané membrány na konstantní rychlosti rotující válec. Francouzský fyzik **Jules-Antoine Lissajous** (1822–1880) zviditelnil složené kmitání dvou navzájem kolmo kmitajících ladiček (1863) pomocí světelného paprsku a systému zrcadel. Charakteristické obrazce vznikající při složeném kmitání dvou na sebe kolmých kmitání různých frekvencí pak dodnes nesou jeho jméno: Lissajousovy obrazce.

Namísto kmitajících strun se od 18. století postupně objevovaly nové referenční zdroje zvuku. Výše zmiňovanou ladičku se dvěma symetrickými rameny údajně vynalezl kolem roku 1711 britský královský dvorní trubač **John Shore** (asi 1662–1752). První sirény s ozubeným rotorem rozechvívajícím tenkou ozvučnou desku zkonstruovali v Anglii **Robert Hooke** (1635–1703) a v Itálii **Vittorio Francesco Stancari** (1678–1709). S pokročilejšími sirénami tvořenými tryskou periodicky otevíranou rotujícím děrovaným kotoučem pak systematicky experimentovali zejména **John Robison** (1739–1805), **Félix Savart** (1791–1841) a **Charles Cagniard de**

La Tour (1777-1859). Takový zdroj zvuku již umožňoval plynulé nastavení frekvence pomocí regulace rychlosti otáčení kotouče a zároveň bylo možné otáčky dostatečně přesně měřit. Pro určení neznámé frekvence kmitání tak bylo možné využít výše zmíněné Saveurovy metody vyhodnocování slyšitelných záznějů vznikajících při současném znění zkoumaného zdroje kmitání s referenčním zdrojem kmitáním známé frekvence.

I díky novým zdrojům zvuku bylo možné realizovat řadu významných akustických experimentů. **Christian Johann Doppler** (1803–1853), rakouský fyzik působící i na českém území, předpověděl jev posunu výšky tónu při relativním pohybu zdroje zvuku vůči posluchači (1842), po něm pojmenovaný jako Dopplerův jev. Tento jev pro zvukové vlnění vzduchu následně experimentálně prokázal (1845) Dán **Christophorus Buys Ballot** (1817-1890) a dále se jím systematicky zabýval Dopplerův přímý následovník **Ernst Mach** (1838–1916). Machovi se též podařilo zviditelnit mechanické kmitání za pomoci dodnes používané metody stroboskopického osvětlení (1872).

V 19. století se rozvíjí fyziologická akustika, která hledá odpověď na zásadní otázku: Jak funguje lidský sluch? Německý fyzik **Georg Simon Ohm** (1789–1854) zjistil, že nejjednodušší možný tonální vjem vyvolává harmonické kmitání a popsal vlastnosti sluchu při rozlišování složených hudebních tónů, známé jako Ohmův akustický zákon (1843). Ve sporu s odpůrcem jeho teorie slyšení **Augustem Seebeckem** (1805-1849) se však neprosadil. Obecně vztahy mezi změnou podnětu a jí vyvolanou změnou vjemu zkoumali v Německu **Gustav Theodor Fechner** (1801–1887) a **Wilhelm Eduard Weber** (1804–1891), po nichž je kvantitativní popis této závislosti pojmenován jako Weberův-Fechnerův psycho-fyzikální zákon. Rozsáhlé systematické testování vlastností lidského sluchu realizoval později ve své antropometrické laboratoři Brit **Sir Francis Galton** (1822-1911), jehož záhy následovali další vědci.

Výjimečný přínos pro akustiku měl zejména německý fyzik a fyziolog **Hermann Ludwig Ferdinand von Helmholtz** (1821–1894). Své výzkumy souhrnně publikoval v knize *Die Lehre von den Tonempfindungen als physiologische Grundlage für die Theorie der Musik* (1863). Helmholtz zkoumal a matematicky popsal kmitání strun, vzduchových sloupců i dutinových rezonátorů, pojmenovaných po něm Helmholtzovy rezonátory, s jejichž pomocí bylo možné slyšet jednotlivé kmitočtové složky složených zvuků. Na základě toho vytvořil akustickou teorii samohlásek a prováděl pokusy se syntézou hlasu. V návaznosti na myšlenky Georga Simona Ohma pak experimentálně potvrdil jeho rezonanční teorii slyšení. Helmholtz formuloval též dodnes používané základní rovnice vlnové akustiky. Mezi Helmholtzovy žáky patřil německý fyzik **Heinrich Rudolph Hertz** (1857–1894), který vlnovou teorii dále zobecnil pro elektromagnetické vlnění. Na jeho počest byla jednotka kmitočtu pojmenována 1 hertz (Hz).

Dalším významným souhrnným dílem té doby je dvoudílné pojednání *The Theory of Sound* britského fyzika **Johna Williama Strutta** alias **Lorda Rayleigho** (1842–1919) vydaná mezi roky 1877 a 1878, kde Rayleigh mimo jiné popsal měření mechanických účinků zvuku pomocí po něm později pojmenované Rayleighovy destičky. První česky psanou vysokoškolskou učebnicí akustiky nazvanou prostě *Akustika* pak vydal v roce 1902 první český profesor fyziky **Vincent Čeněk Strouhal** (1850–1922), který k rozvoji vědecké akustiky významně přispěl již svou habilitační prací *Eine besondere Art von Tonerregung* o vzniku třecích tónů.

1.1.4 POČÁTKY TECHNIKY PRO PŘENOS, ZÁZNAM A MĚŘENÍ ZVUKU

20. století přineslo řadu technických aplikací akustiky. Rozvíjela se zejména akustická komunikace, která navázala na myšlenky mechanického přenosu zvuku na dálku Roberta Hooka (1635-1703) a Charlese Wheatstona (1802-1875), respektive na Wheatstonův elektrický telegraf, a vedla kolem roku 1860 až k prvnímu funkčnímu prototypu telefonu **Johanna Philippa Reise** (1834–1874) a patent principu telefonu (1876) **Alexandera Grahama Bella** (1847–1922). Základem telefonu byly akustické měniče: mikrofon vytvořený na základě studia fyziologie lidského ucha a reproduktor využívající známých silových účinků magnetického pole cívky protékané proudem. Významný posun v kvalitě přenosu řeči oproti původním nezávislým patentům mikrofonu (1877) Alexandera Grahama Bella a (1879) Emile Berlinera znamenal však až technicky zdokonalený uhlíkový mikrofon Davida Edwarda Hughese (1831-1900). Současně se rozvíjela technika mechanického záznamu a reprodukce zvuku patentovaná americkým vynálezcem **Thomasem Alvou Edisonem** (1847–1931) jako *Phonograph* (1877) zaznamenávající zvuk na válcovou cínovou fólii, později vylepšená Bellem s jeho spolupracovníky pro záznam na voskové válečky, a jako *Gramophon* (1887) se záznamem průmyslově lisovaným na kruhové desky patentovaný **Emilem Berlinerem** (1851-1929). Magnetický záznam zvuku realizoval pravděpodobně jako první Dán **Valdemar Poulsen** (1869–1942) a to na tenký železný drát odvíjející se mezi dvěma kotouči (patent 1898). Z tohoto principu později vyšel *Magnetophon* německé firmy AEG (1935) s magnetickým záznamem na tenkou nosnou pásku pokrytou oxidem železa.

Nové vynálezy zásadně ovlivnily jak technický, tak společenský vývoj na celém světě. Bellovy laboratoře ve Spojených státech vzniklé sloučením Americké telefonní a telegrafní společnosti (AT&T) a laboratoří Western Electric se staly centrem výzkumu a vývoje v rychle se rozvíjející oblasti elektroakustiky a zvukové techniky. Zde vyvíjené zesilovače, mikrofony a reproduktory umožnily ve 20. letech rozvoj zvukového filmu, rozhlasového vysílání a hudebního průmyslu. Už roku 1916 patentoval americký fyzik **Edward Christopher Wente** (1889-1972) kondenzátorový mikrofon s frekvenčně vyrovnanou citlivostí v širokém pásmu.

Se spolupracovníkem **Albertem Laurisem Thurasem** (1888-1945) zdokonalili do roku 1931 také dynamický mikrofon založený na tehdy již více než 50 let starém patentu (1877) elektrodynamického měniče **Ernsta Wenera von Siemense** (1816–1892). Princip tohoto měniče se pak zcela prosadil v konstrukci reproduktorů. Jako mikrofonní a výkonové zesilovače se nejprve používaly různé konstrukce založené na vakuové triodě (Lee De Forest, 1906), přičemž tato součástka v elektroakustice dominovala až do přelomového objevu Bellových laboratoří: polovodičového bipolárního tranzistoru (John Bardeen, William Shockley a Walter Brattain, 1948).

Významný pokrok v akustických měřeních přinesl už mechanický *Phonometr* zakladatele americké fyzikální společnosti **Arthura Gordona Webstera** (1863–1923). V souvislosti s rozvojem elektrické měřicí techniky pak rychle vznikaly nové obory akustiky věnující se měření hluku, výzkumu vlivu hluku na člověka a vývoji protihlukových opatření. Průlomem na poli stavební akustiky byla práce amerického fyzika **Wallace Clementa Sabineho** (1868–1919), který na základě rozsáhlých experimentů vytvořil teoretický popis a v zásadě i dodnes používanou metodiku měření akustických vlastností koncertních a přednáškových sálů. Subjektivní vnímání akustiky staveb, které Vitruv a Kircher kdysi zkoumali kvalitativně, bylo nyní možné kvantifikovat a akustiku plánované stavby předpovědět na základě výpočtů. Díky tomu začaly postupně vznikat speciálně navržené koncertní sály, rozhlasová a nahrávací studia a zejména speciální bezodrazové měřicí místnosti.

S postupujícím technickým pokrokem se jako samostatný vědní obor v rámci akustiky profiluje psychoakustika (viz kapitola 3.5). V medicínské audiologii mezitím původně používané ladičky přikládáné k uchu a nejrůznější píšťalky nahradil objektivní přístup v podobě Bellova *Audiometru*, čímž se otevřely i nové možnosti zkoumání zejména subjektivního vnímání hlasitosti zvuku. **Harvey Fletcher** (1884-1981) v Bellových laboratořích audiometr dále zdokonalil a zkoumal pomocí něj vliv spektrálního rozložení zvuku na vnímání hlasitosti, na základě čehož vytvořil teorii kritických pásem slyšení a spolu s **Wildenem Munsonem** (1902–1982) takzvané křivky stejné hlasitosti (1933). Při těchto experimentech Munson objevil též jev současného maskování zvuků. Jednotku subjektivního vjemu hlasitosti *Phon* zavedl na základě psychoakustických experimentů německý fyzik **Heinrich Georg Barkhausen** (1881–1956). **Stanley Smith Stevens** (1906-1973), zakladatel Harvardské psychoakustické laboratoře, pak vytvořil spektrálně závislou subjektivní stupnici hlasitosti v *Sonech* (1936). Americký biofyzik maďarského původu **Georg von Békésy** (1899–1972) zkoumal princip funkce sluchu na vypreparovaných částech vnitřního ucha a pomocí na základě toho vytvořených hydro-mechanických modelů membránového systému cochlely. Porovnáním výsledků těchto

experimentů s přesnými audiometrickými měřeními podložil svou teorií postupného vlnění na bazilární membráně, za niž v roce 1961 získal Nobelovu cenu za fyziologii. Na tyto nové poznatky pak v Evropě navázala zejména kolem **Eberharda Zwickera** (1924-1990) vznikající mnichovská škola psychoakustiky.

1.1.5 HISTORICKÝ VÝVOJ DIGITÁLNÍ ZVUKOVÉ TECHNIKY

V průběhu 20. století byla akustika jedním z vůdčích oborů při přechodu od analogové k digitální technice. Teoretické základy popisu spojité veličiny poslopností diskrétních hodnot položil matematik Augustin-Louis Cauchy (1841). Jeho myšlenku ve dvacátých letech 20. století využil pro vzorkované datové systémy (1928) **Harry Nyquist** (1889-1976), na nějž dále navázal **Claude Shannon** (1916-2001). Vývoj digitální techniky byl přitom silně ovlivněn optickou a radiovou telegrafii využívající ke kódování dvoustavovou logiku. Shannon pro zpracování takových signálů rozvinul logickou algebru (1847) britského matematika George Boolea (1815-1864), kterou aplikoval na elektronické obvody. Díky tomu se začala vyvíjet digitální výpočetní technika od mechanických automatů přes užití elektromechanických relé a vakuových elektronek ve 40. letech 20. století až po nástup tranzistorů v 60. letech a následně boom monolitické technologie výroby integrovaných obvodů v letech osmdesátých.

Dodnes nejrozšířenější metodu digitálního záznamu zvuku, metodu pulsně kódové modulace (PCM), patentoval v roce 1939 **Alex Reeves** (1902-1971). Ke konci druhé světové války začaly Bellovy laboratoře tuto metodu používat při vývoji šifrovací techniky pro telekomunikaci velení spojeneckých armád (1943). Civilní experimenty s digitálním záznamem zvuku na počítači ve Spojených státech probíhaly pak opět zejména v Bellových laboratořích v Murray Hill (Max Mathews, 1957) a na Massachusettském technologickém institutu (Thomas Stockham, 1962). Tou dobou v Japonsku ve výzkumném ústavu národní vysílací společnosti Nippon Hoso Kyokai (Heitaro Nakajima, 1967) experimentovali s digitálním záznamem PCM kódu na magnetické pásky. Následovaly komerčně dostupné profesionální studiové záznamové systémy (1972) a sériově vyráběný adaptér k videorekordéru (Betamax) pro digitální záznam zvuku do obrazové stopy namísto obrazu (1976). K masovému rozšíření digitální zvukové techniky došlo však až s nástupem kompaktního disku (1982) a osobních počítačů. Potřeba snížit objem přenášených zvukových dat pro předpokládané digitální rozhlasové a televizní vysílání i tehdy ještě vysoká cena paměťových médií znamenaly výzvu pro nalezení efektivnějšího digitálního kódování zvuku, než je pulsně kódová modulace. To vedlo vědce k vývoji kompresních algoritmů pro zvuk založených na vlastnostech lidského sluchu, jehož prvním praktickým výsledkem byl mezinárodní standard ISO MPEG (1994), z nějž je dodnes využíváno kódování podle komplexitní vrstvy 2 (DVB-T, DVD) a tehdy náročnější vrstvy 3 (MP3).

1.2 Akustika z pohledu současné didaktiky fyziky

V současnosti je akustika významnou vědní disciplínou s řadou podoborů a z nich vycházejících praktických aplikací v telekomunikaci, rozhlasové a televizní technice, spotřební elektronice, medicíně, konstrukci staveb i dopravních prostředků, bez kterých si svůj běžný život snad už ani nedokážeme představit. Z toho důvodu jsou základy fyzikální akustiky a zvukové techniky také povinnou součástí školního vzdělávání.

Tím, že z akustiky vzešla historicky první vlnová teorie, stala se akustika nejen zdrojem inspirace ale zejména zdrojem analogií pro popis dalších přírodních jevů formalismem zobecněné vlnové teorie. Ta úspěšně slouží pro popis a vysvětlení vzniku a šíření elektromagnetického záření, zejména světla a optických jevů. Nauka o zvuku jakožto mechanickém vlnění ve školském pojetí přírodovědného a technického vzdělávání tím však byla postupně zredukována na pouhý prostředek porozumění zobecněným vlnovým jevům, zdroj analogií a abstraktních matematických modelů pro popis vlnění. Přitom bylo ve výuce fyziky poznání akustických jevů zakonzervováno ve stavu platném před zhruba 100 lety. Akustika jako věda naproti tomu celou tu dobu prochází kontinuálním vývojem. Rozvoj akustické měřicí techniky dal sledovaným veličinám zvukového pole zcela konkrétní význam. To se týká zejména tlakovými snímači měřitelné veličiny akustický tlak. Výpočty podle vzorců odvozených z vlnových rovnic pak umožňují v konkrétních případech určit i velikost dalších základních akustických veličin, jako jsou akustická intenzita a z ní akustický výkon zdroje zvuku. Zatímco ještě na začátku 20. století tedy operovala akustika s pojmem intenzita pouze v kvalitativní rovině, v posledním půlstoletí mají všechny výše uvedené pojmy již ryze kvantitativní charakter fyzikálních veličin pro popis zvukového pole.

Vědecké poznatky fyzikální akustiky konce 19. a začátku 20. století postupně pronikaly i do odborného středního vzdělávání a posléze i vzdělávání základního. Při výuce byly pro znázornění vzniku a vlastností zvukového vlnění nejčastěji užívány mechanické modely – spřažená kyvadla a kyvadlové vlnostroje. Jako referenční zdroje zvuku se ve výuce používaly mechanické ladičky, monochordy, píšťaly a sirény. Pro demonstraci zvukových jevů sloužily zejména trubicové zvukovody, interferometry a dutinové rezonátory. Od 60. let 20. století se pak i ve výuce na středních školách začala vyučovat elektroakustika prakticky podpořená přístroji jako tónové generátory, osciloskopy a elektromechanické zapisovače, reproduktory a mikrofony. Tento vývoj byl přitom ve srovnání s tempem tvorby nových učebnic fyziky velmi rychlý. V 90. letech analogové měřicí přístroje a zvukovou techniku postupně začala nahrazovat výpočetní technika a digitální měřicí přístroje. Zvuková karta

a software pro záznam a přehrávání zvuku se během několika málo let staly součástí běžně dostupných počítačů a umožnily tak provádět do té doby komplikované zpracování zvukových signálů zahrnující i simulace zvukových jevů na základě jejich matematických modelů. Pokročilé grafické rozhraní počítačových programů pro zpracování zvuku zároveň umožnilo snadno vizualizovat časový průběh i frekvenční spektrum zaznamenaných či uměle vytvořených digitálních zvukových signálů.

Jako nový trend ve výuce fyziky se proto v polovině 90. let začalo objevovat využití počítače se zvukovou kartou pro jednoduchá akustická měření a simulace zvukových jevů. Zavedení počítačem řízených a vyhodnocovaných experimentů do výuky akustiky se věnovalo několik oddělení didaktiky fyziky na pedagogických fakultách a fyzikálních institutech zahraničních i českých univerzit. Byla to například výzkumná skupina vedená Prof. Volkhardem Nordmeierem působící na Freie Universität Berlin, kde vedle návrhu demonstračních experimentů z akustiky realizovaných pomocí počítače byl s ohledem na specifické výukové potřeby vytvořen originální počítačový software SOUNDS [89, 90] pro analýzu a syntézu zvukových signálů. Vývojem zvukového softwaru určeného pro demonstraci základních jevů fyzikální i fyziologické akustiky se již před tím zabýval i Dr. Helmut Dittmann na fyzikálním institutu Friederich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, kde pod jeho vedením vznikly počítačové programy DITON DEVELOP a DITON VIEWER [8]. Didakticky orientovanou výzkumnou činností na pomezí hudební a technické akustiky jsou pak i u nás známi Prof. Leopold Mathelitsch [48] z Karl-Franzens-Universität Graz a doc. Dr. Ivo Verovnik z univerzity v Mariboru, kteří s využitím výpočetní techniky a zvukového softwaru modernizovali do podoby počítačem vyhodnocovaných měření řadu tradičních školských experimentů.

Didaktika fyziky na českých vysokých školách se akustikou dosud zabývala pouze okrajově. Soustředila se přitom převážně na formální modernizaci stávajících tištěných učebnic fyziky kmitání a vlnění pro druhý stupeň základní školy, vytvářením jejich elektronických verzí pro interaktivní tabule a multimediálních učebnic pro mobilní zařízení. Po obsahové stránce se výukový koncept akustiky na základní i na střední škole změnil za poledních 30 let jen velmi málo. Za nejvýznamnějšího autora učebnic akustiky pro střední školy a gymnázia v ČR lze považovat doc. RNDr. Oldřicha Lepila, CSc. [32, 33, 35, 36] z katedry experimentální fyziky Přírodovědecké fakulty Univerzity Palackého, jehož koncept výuky fyzikálního popisu kmitání, vlnění a základních jevů z akustiky je na českých středních školách dominantní. Na fakultě pedagogické Západočeské univerzity v Plzni se v návaznosti na prof. RNDr. Antonína Špeldu, DrSc [80] částečně věnoval didaktice akustiky Dr. Ing.

Josef Petřík, spoluautor kapitoly o zvuku v sérii učebnic pro základní školy autorského kolektivu vedeného doc. Dr. Ing. Karlem Raunerem [67]. Další aktuálně používaná učebnice akustiky pro základní školu v nedávné době vznikla na katedře aplikované fyziky a techniky pedagogické fakulty Jihočeské univerzity v Českých Budějovicích pod vedením doc. PaedDr. Jiřího Tesaře, Ph.D. [82]. Popularizátory výuky akustiky na školách a autory inovovaných experimentů jsou mezi českými didaktiky fyziky dlouhodobě doc. RNDr. Josef Hubeňák, CSc. [19] z katedry fyziky Pedagogické fakulty Univerzity Hradec Králové, doc. RNDr. Leoš Dvořák, CSc. [9] z katedry didaktiky fyziky z matematicko-fyzikální fakulty Univerzity Karlovy v Praze, doc. RNDr. Jan Obdržálek, CSc. z Ústavu teoretické fyziky Univerzity Karlovy a několik čínorodých učitelů základních a středních škol.

I přes intenzivní rešerši jsem však v české ani zahraniční literatuře neobjevil ucelený výukový koncept akustiky pro střední stupeň vzdělávání, který by odpovídal současnému stavu poznání v odborné akustice a jejích aplikacích. Stranou zájmu didaktiků přitom zůstávají i zcela základní otázky vhodné volby modelů a veličin pro kvantitativní popis zvuku ve vzduchu. Jak jsem při rozhovorech s učiteli fyziky zjistil, převažuje mezi nimi názor, že současná podoba výuky akustiky na základních a středních školách je obsahově a metodicky vyhovující. S vývojem v oblasti výpočetní techniky a mobilní komunikace se však objevují stále nové odborné poznatky i přístroje, které umožňují žákům pracovat se zvukem formou hry, umělecky ale na úrovni fyziky střední školní už také dostatečně vědecky. Právě na kreativně-badatelské využití zvukového rozhraní počítače a zvukového softwaru ve výuce akustiky na střední škole se proto zaměřuje tato disertační práce.

1.3 Cíle disertační práce a použité výzkumné metody

Globálním cílem předložené disertační práce je vytvoření metodické podpory pro výuku základů fyzikální akustiky a digitální zvukové techniky na středním stupni vzdělávání s důrazem na posílení mezioborových vazeb, vizuální i auditivní názornost a aplikovatelnost učiva v běžném životě žáků. Dílčí cíle disertační práce je přitom možné rozdělit do dvou základních oblastí. První oblast zahrnuje cíle didakticko-empirického charakteru zkoumání potřeb cílové skupiny výukového konceptu spolu se zmapováním současného stavu výuky akustiky na školách. Druhá oblast pak má za cíl tvůrčí návrh vlastního výukového konceptu a jeho praktické ověření ve výuce na střední škole.

Prvním z dílčích cílů didakticko-empirické části disertační práce je zpracovat ucelený přehled aktuálně platných normativních požadavků na výuku o zvuku a zvukové technice pro vybrané obory vzdělávání v České republice. Na základě toho byla následně zvolena primární cílová skupina výukového konceptu. Protože výukové koncepty jsou učiteli středních škol často více či méně kriticky přejímány z učebnic, je v návaznosti na předchozí krok důležité provést též analýzu stávajících výukových konceptů fyzikální akustiky, zvukové techniky a vnímání zvuku člověkem v nejčastěji používaných učebnicích pro střední školy. Druhým dílčím cílem práce je proto analyzovat se zřetelem na zavádění pojmů a modelů fyzikální akustiky středoškolské učebnice fyziky, respektive porovnat pojmy a modely zvuku užívané v různých učebnicích fyziky, informatiky a výpočetní techniky pro střední školy i v učebnicích biologie a hudební výchovy. V případě výuky fyziky k tomu přirozeně patří též revize tradičních školských demonstračních experimentů a laboratorních úloh z akustiky. Posledním z dílčích cílů didakticko-empirické části disertační práce je zjištění vstupních představ o zvuku u zvolené cílové skupiny výukového konceptu pomocí vlastního formativního pedagogického výzkumu.

Tab. 1: Přehled dílčích cílů disertační práce

Cíle didakticko-empirické části:	Cíle tvorby výukového konceptu:
<ul style="list-style-type: none"> • zjištění normativních požadavků na výuku • analýza stávající učebních materiálů • revize typických školských experimentů • zmapování představ žáků o zvuku 	<ul style="list-style-type: none"> • mezioborový učební materiál • metodika použití měřicí techniky • návrh demonstračních experimentů • návrh žákovských experimentů

Tvůrčí část disertační práce si klade za cíl vytvořit ucelený výukový koncept zahrnující učivo probírané na školách doposud odděleně ve fyzice, informatice, biologii, a hudební výchově. Vzhledem k nutnosti propojení přístupů a poznatků vícero vzdělávacích oblastí vztahujících se ke zvuku je podstatným dílčím cílem návrhu výukového konceptu vytvoření jednotného a napříč obory konzistentního modelu pro efektivní popis zvuku jak ve fyzikální a technické akustice, tak při číslicovém zpracování zvukového signálu v počítači. Praktickým výstupem tvorby výukového konceptu je metodický text pro učitele fyziky a modernizované experimenty určené pro výuku akustiky na středním stupni vzdělávání. Ve snaze zapojit žáky aktivně do výuky zaujímá experiment ve výukovém konceptu klíčovou roli. Vedle reálných demonstračních experimentů a simulací zvukových jevů prováděných frontálně vyučujícím se tato práce zaměřuje na samostatné žákovské experimenty a projektovou výuku v akustice. Cílem experimentální části disertační práce je proto vytvoření

sady jednoduchých žákovských experimentů k jednotlivým tématům výukového konceptu. Ty mají žákům umožnit samostatné objevování vlastností zvuku a buď jejich vstupní představy potvrdit a upevnit nebo jim umožnit při provádění experimentu na základě přímé zkušenosti své původní představy o zvuku z vlastní iniciativy přehodnotit.

Výše uvedené cíle vedly k formulaci výzkumných otázek a pracovních hypotéz. Didaktickou podstatu disertační práce charakterizuje hlavní výzkumná otázka: *Jak výukou akustiky na střední škole umožnit žákům efektivně formovat jejich vstupní představy ve znalosti a dovednosti práce se zvukem?* To zahrnuje výzkumnou otázku dotazníkové studie: *Jaké jsou nejčastější vstupní představy cílové skupiny žáků o zvuku?* – konkrétněji – *Jaký model zvuku žáci upřednostňují?* Analýzu současného stavu výuky akustiky na středních školách charakterizuje výzkumná otázka: *Jaké modely, pojmy a veličiny pro popis zvuku používají středoškolské učebnice?* Proces návrhu samotného výukového konceptu doprovází výzkumná otázka: *Jak vytvořit jednotný fyzikální model zvuku použitelný napříč všemi obory akustiky a digitální zvukové techniky?*

Pracovní hypotézy disertační práce vycházejí z úvah konstruktivistické pedagogiky nad formováním intuitivních představ žáků ve znalosti a vědomosti. Na základě učiněného předvýzkumu předpokládám, že při porozumění vstupním představám žáků o zvuku mohou fyzikální podstatu zvukových jevů žákům vysvětlit v souladu s jejich představou o světě srozumitelněji a cíleným návrhem experimentů i vhodným vedením žákovských projektů postupně jejich původní představu korigovat směrem k vědeckému pojetí akustiky. Proces tvorby výukového konceptu samotný pak vychází z předpokladu, že bezprostřední smyslová zkušenost žáků při samostatném provádění akustických experimentu přirozeně vede k utváření trvalých znalostí a dovedností. Za neustálého kritického ověřování dále předpokládám, že projektová výuka včetně jejích psycho-sociálních aspektů je zcela neopominutelnou součástí vzdělávacího procesu. V organizačních podmínkách střední školy však není možné začínat s projektovou výukou bez předchozího zprostředkování znalosti základních konvencí, oborově specifických dovedností práce s měřicími přístroji i zcela obecných dovedností systematické experimentální práce. Navrhuji proto umožnit žákům začít si tyto schopnosti nejprve postupně osvojovat v přípravných workshopech s individuálním, a z počátku intenzivním, odborným vedením.

V souvislosti s vytyčenými dílčími cíli a pracovními hypotézami je disertační práce členěna na dvě vzájemně úzce související části, v nichž se uplatňují různé metody zkoumání. První, převážně didaktická část disertační práce je zpracována metodami kritické rešerše a analýzy stávajících výukových konceptů v učebních dokumentech a učebnicích pro střední

školy ve spojení s metodou empirického výzkumu žákovských představ o zvuku. Aby byla data pro identifikaci nejčastějších žákovských představ o zvuku dostatečně průkazná, byla zjišťována na dvou oddělených skupinách respondentů dvěma různými empirickými metodami. První metodou bylo vedení polostrukturovaných rozhovorů se žáky při projektové výuce, druhou dotazníkové šetření u reprezentativní skupiny žáků stejného věku a studijního zaměření jako budoucí cílová skupina výukového konceptu. Dotazník obsahuje sadu uzavřených otázek vytvořenou ke zjišťování představ o vzniku zvuku, šíření zvuku ve vzduchu a vnímání zvuku člověkem. Dále se zaměřuje na subjektivní chápání základních pojmů a veličin z akustiky vyučovaných již na základní škole, respektive pojmů běžně používaných v hovorovém jazyce, a schopnost řádového odhadu akustických veličin v kontextu každodenních situací.

Druhá část disertační práce je tvůrčí. Věnuje se zpřístupnění vědeckých poznatků a výzkumných metod akustiky cílové skupině. Text a ilustrace výukového materiálu jsou vytvořeny didaktickou transformací vědeckých poznatků publikovaných v odborné literatuře a výsledků vlastních experimentů na úroveň zařaditelnou do odborného středoškolského vzdělávání, respektive na úroveň, která bude nejpravděpodobněji žákům srozumitelná. Kritérii pro výběr obsahu výukového konceptu byla jeho aktuálnost, možnost uplatnění v běžném životě žáků a realizovatelnost žákovských experimentů ve výuce. Důraz kladu zejména na propojení jednotlivých témat jednotným slovním, grafickým i matematickým modelem zvuku vytvořeným s ohledem na zjištěné vstupní představy žáků o zvuku. Nutností při zpracování textu bylo formální přizpůsobení jazyka a matematického aparátu slovnímu vyjadřování a matematice střední školy, ovšem při zachování vědecky uznávaných modelů zvuku, odborných pojmů a veličin. Základní fyzikální veličinou pro popis zvuku v konceptu je proto veličina akustický tlak vycházející z modelování zvuku pomocí tlakového pole.

Výukový koncept se snaží překlenout mezioborové bariery a ukázat, že zvukové jevy probírané ve fyzice fungují i u digitálního záznamu zvuku v počítači popsaného pomocí „nul a jedniček“. Hlavním pojícím prvkem mezi fyzikální akustikou a digitálním zpracováním zvuku na počítači i měřicí technikou přitom je relativní hladinové vyjádření všech sledovaných veličin. Řízení a vyhodnocování demonstračních i žákovských experimentů proto probíhá pomocí programů pro záznam a zpracování zvukového signálu v počítači, takzvaných zvukových editorů *Adobe Audition*, dříve *Syntrillium Cool Edit*, nebo volně dostupného zvukového editoru *Audacity*. Zvukové editory mají ve srovnání s jednoúčelovým didaktickým softwarem, applety a simulacemi tu podstatnou výhodu, že reprezentují v každodenním životě přímo využitelný nástroj pro práci se zvukem počínaje záznamem reálných signálů,

generováním signálů na základě matematických modelů, přes analýzu signálů v časovém i frekvenčním oboru, až po modifikaci signálů a simulace komplexních zvukových jevů.

Pro náročnější digitální zpracování a analýzu zvukového signálu, zejména tam, kde je nutné objasnit princip funkce algoritmů, které uživatelům zvukových editorů zůstávají skryty, používám zvukové editory v kombinaci s matematickým simulačním softwarem *MATLAB*, jež je plně nahraditelný též volně dostupným softwarem *SCILAB*. Předpokládám přitom, že aplikace akustiky v digitální zvukové technice a naopak aplikace digitálního zpracování zvuku v akustice mají pro žáky silný motivační charakter. Praktickým důsledkem řešení propojujícího počítačem řízené a vyhodnocované reálné experimenty s matematickým modelováním pak je existence tvůrčího výukového prostředí s plynulou progresí od nejjednodušších experimentů až po vysoce sofistikované aplikace zvukových jevů při digitálním zpracování zvukového signálu.

Všechny v této disertační práci uváděné experimenty a v nich užívané měřicí senzory i zdroje zvuku byly navrženy tak, aby nehrozilo poškození vstupů zvukových karet počítače ani zvukových rozhraní tabletů nebo mobilních telefonů. Přesto nepřebírám jako autor žádnou zodpovědnost za elektrické nebo mechanické poškození počítačů ani jiných zařízení, která nejsou výrobcem určena k provádění fyzikálních experimentů. Pokud je to možné, měli by žáci ve škole používat výhradně notebooky a stolní PC, které jsou majetkem školy. Použití vlastních laptopů, tabletů a smartphonů žáků přinesených do školy z domova je totiž z právního i pedagogického hlediska krajně problematické. Učitel, který vyzve žáky, aby si přinesly tyto přístroje do školy a používali je ve výuce, může být v případě jejich poškození v době výuky potenciálně činěn spoluodpovědným za škody vzniklé na majetku žáka. Pokud žák sám navrhně, že si na workshop přinese vlastní tablet nebo laptop, je proto vhodné požádat ho současně o písemný souhlas rodičů, a to nejen u nezletilých žáků.

2 Didaktická analýza současného stavu výuky

2.1 Normativní požadavky na výuku akustiky

V systému kurikulárních dokumentů vydaných ministerstvem školství České republiky představují nejvyšší úroveň „národní program vzdělávání“ a „rámcové vzdělávací programy“. Rámcové vzdělávací programy (RVP) pro jednotlivé obory středního stupně vzdělávání normativně vymezují závazné rámce pro vzdělávací oblasti, definují klíčové kompetence, vzdělávací obsah jednotlivých oborů vzdělání a předpokládané aplikace získaných vědomostí a dovedností v běžném i v profesním životě žáků. Rámcový vzdělávací program určitého oboru vzdělání přitom vymezením očekávaných výstupů stanovuje minimální úroveň vzdělání jeho absolventů. Úroveň klíčových kompetencí stanovená rámcovým vzdělávacím programem v sobě narozdíl od dříve používaných učebních plánů a učebních osnov vedle požadavků na osvojené vědomosti akcentuje zejména rozvíjení schopností a dovedností žáků s ohledem na možnosti jejich praktického využití.

Zavedení rámcových vzdělávacích programů otevřelo středním školám možnosti inovativního přístupu k výuce. Rámcový charakter vzdělávací normy usnadňuje propojování vzdělávacích obsahů, zavádění nových výukových konceptů a organizačních forem vyučování, či integraci dříve tradičně odděleně vyučovaných obsahů v jednotlivých předmětech. Rámcový vzdělávací program pro konkrétní typ školy je pak jakousi výchozí modulární strukturou pro tvorbu školního vzdělávacího programu (ŠVP). Učivo vymezené rámcovým vzdělávacím programem je sice pro tvorbu školního vzdělávacího programu závazné, ne však jeho zařazení v konkrétním předmětu, ani hodinová dotace, která má být učivu věnována. Vzdělávací obsah jednoho oboru tak může být rozdělen do několika předmětů nebo naopak mohou být vzdělávací obsahy propojeny v jednom mezioborovém předmětu.

Z důvodu přizpůsobení předloženého výukového konceptu aktuálně platným vzdělávacím normám pro střední stupeň vzdělávání jsem provedl detailní analýzu rámcových vzdělávacích programů pro obory vzdělávání středních průmyslových škol [62, 63, 64] a rámcového vzdělávacího programu pro gymnázia [61]. Na ni navázala rešerše školních vzdělávacích programů vybraných škol sledující rozsah a způsob naplňování požadavků RVP stávajícími výukovými koncepty ve školské praxi.

2.1.1 POŽADAVKY NA VÝUKU AKUSTIKY A ZVUKOVÉ TECHNIKY NA STŘEDNÍCH PRŮMYSLOVÝCH ŠKOLÁCH

Výukový koncept disertační práce se zaměřuje primárně na střední stupeň vzdělávání ve čtyřletých oborech s denní formou studia *Elektrotechnika* (26-41-M/01), *Telekomunikace* (26-45-M/01), *Informační technologie* (18-20-M/01) a *Technické lyceum* 78-42-M/01, vyučovaných na středních průmyslových školách v České republice. Základy akustiky jsou u výše jmenovaných oborů součástí vzdělávací oblasti *Přírodovědné vzdělávání* v části *Fyzikální vzdělávání*. Za předpokladu použití varianty RVP pro studijní obory s vysokými nároky na fyzikální vzdělávání patří na středních průmyslových školách k uvedeným výsledkům vzdělávání v kapitole *Mechanické kmitání a vlnění*, že „žák charakterizuje základní vlastnosti zvukového vlnění a zná jejich význam pro vnímání zvuku; chápe negativní vliv hluku a zná způsoby ochrany sluchu“. Školní vzdělávací program oboru *Technické lyceum* Střední průmyslové školy elektrotechnické (SPŠE) v Plzni [93] učivo z akustiky zařazuje na konci 2. ročníku, v němž je hodinová dotace fyziky 3 vyučovací hodiny týdně, v závěru kapitoly o mechanickém kmitání a vlnění. Obory *Elektrotechnika* a *Informační technologie* [91, 92] toto učivo probírají vzhledem k jinému učebnímu plánu a snížené dotaci hodin fyziky (2 roky fyziky při 2 vyučovacích hodinách týdně) již v prvním pololetí 2. ročníku, což výrazně omezuje i možnosti užití složitější středoškolské matematiky.

Další učivo z oblasti akustiky a zvukové techniky se na středních průmyslových školách v závislosti na oboru vzdělávání probírá z části v rámci vyučovacího předmětu *Informační a komunikační technologie* a dále v odborných vyučovacích předmětech. Pro obor *Technické lyceum* školní vzdělávací program SPŠE Plzeň řadí mezi očekávané výsledky vzdělávání v rámci úvodu do zvukové techniky ve 2. ročníku v předmětu *Informační a komunikační technologie*, že „žák chápe princip digitalizace zvuku; používá různé zvukové formáty“ a „vysvětlí principy komprese“. Výuka v předpokládaném rozsahu 2 vyučovacích hodin se přitom zaměřuje na úvod do učiva „*Hardware pro audio; vzorkování a převod zvuku; formáty wav a midi, komprimace zvuku, [a] její ztrátové kompresní formáty*“.

Na toto učivo navazují jednotlivé odborné předměty, jejichž učivo a klíčové kompetence definují přímo školní vzdělávací programy. V případě ŠVP oboru *Technické lyceum* SPŠE [93] to je povinně volitelný předmět *Grafika a multimédia*. V charakteristice předmětu *Grafika a multimédia* ŠVP SPŠE klade důraz již na praktické dovednosti. Žáci po jeho absolvování podle ŠVP „zvládnou pomocí multimediálních aplikací zpracovat zvuk, obraz a video“, přičemž mezi konkrétní výsledky vzdělávání patří, že „žák [...] zaznamená

zvuk, edituje a uloží jej v základních formátech“. Do učiva tohoto předmětu na konci 3. ročníku v tématu „*Multimédia*“ s rozsahem celkem 20 hodin patří v části *Audio* učivo: „*záznam, komprese, kodek, formáty (audio CD, WAV, MP3, OGG, WMA [...]), datový tok*“ Ve 4. ročníku odborný předmět *Grafika a multimédia* pokračuje tématem *Multimedia* v rozsahu 40 vyučovacích hodin, z nichž část *Audio* zahrnuje učivo „*samostatné zpracování zvuku, střih, stopy, časová osa, synchronizace, míchání [a] prohloubení a rozšíření pojmů: kvantování, kódování, vzorkování*“. K očekávaným výsledkům vzdělávání patří opětovně a nyní s důrazem na samostatnost, že po jeho absolvování „*žák [...] zaznamenává nové a upravuje existující zvukové nahrávky střihem a efekty, exportuje do vhodného formátu*“.

Pro studijní obory *Elektrotechnika* a *Informační technologie* [91, 92] na SPŠE v Plzni vzhledem k vyšší hodinové dotaci podle jejího ŠVP spadá podstatná část výše uváděného učiva části *Audio* tématu *Multimedia* do předmětu *Informační a komunikační technologie* ve 2. a 3. ročníku, na nějž počínaje 3. ročníkem navazují odborné vyučovací předměty. V oboru *Elektrotechnika* [92] to přitom s ohledem na uplatnění vědomostí a dovedností z oblasti akustiky je zejména elektroakustika ve vyučovacích předmětech *Elektronické součástky a obvody, Telekomunikace, Zabezpečovací systémy, Radioelektronická zařízení, Elektronické počítače a Přenosová technika*.

Vedle čistě technických oborů jsem původně počítal s možností uplatnění konceptu i v oboru *Multimediální tvorba* (82-41-M/17) vyučovaném na středních umělecko-průmyslových školách, protože příslušný RVP [65] uvádí jako možné uplatněními absolventů tohoto oboru explicitně i povolání „*zvukař*“ a „*mistr zvuku*“. Výsledkem analýz ŠVP a komunikace se školami však bylo vyřazení tohoto oboru z cílové skupiny výukového konceptu. Ze stejného důvodu byly po prostudování RVR a ŠVP konkrétních škol z potenciální cílové skupiny výukového konceptu vyřazeny hudební obory konzervatoří zaměřené na tvorbu elektronické hudby.

2.1.2 POŽADAVKY NA VÝUKU AKUSTIKY NA GYMNÁZIU

Téma zvuku postupuje třemi z celkově osmi vzdělávacích oblastí rámcového vzdělávacího programu pro gymnázia (RVP G) [61], respektive čtyřmi jeho vzdělávacími obory. Konkrétně to jsou vzdělávací oblasti *Člověk a příroda* (obory *Fyzika* a *Biologie*), *Člověk a zdraví* (obor *Výchova ke zdraví*), *Informatika a informační a komunikační technologie*, *Umění a kultura (Hudební obor)* a nepřímo i *Matematika a její aplikace*.

Vzdělávací oblast *Člověk a příroda* se podle rámcového vzdělávacího programu pro gymnázia obsahově a metodicky profiluje jako interdisciplinární platforma pro úzkou spolupráci jednotlivých přírodovědných vzdělávacích oborů. Důraz má být kladen na pozorování, měření a experiment, interpretaci takto získaných dat, hledání souvislostí mezi nimi a tvorbu matematických modelů přírodních procesů a zákonů. K tomuto účelu mají podle RVP G být využívány prostředky moderních technologií. Vzdělávací obsah *Fyzika* v rámcovém vzdělávacím programu pro gymnázia [61] mezi očekávané výstupy obecně zařazuje schopnost měřit fyzikální veličiny a zpracovat výsledky měření. Do závazného učiva z mechaniky na gymnáziu přitom podle RVP G patří „*mechanické kmitání a vlnění [...], stojaté vlnění, vlnová délka a rychlost vlnění; zvuk, jeho hlasitost a intenzita*“.

Před zavedením rámcových vzdělávacích programů byly závaznou normou pro vzdělávání na středních školách učební plány a učební osnovy. V osnovách pro gymnázia [48] bylo povinné učivo týkající se zvuku v tématickém celku mechanika v podkapitole *Mechanické vlnění a zvuk* vymezeno následovně: „*Zvuk jako mechanické vlnění, zdroje zvuku. Rychlost zvuku a její souvislost s prostředím, v němž se zvuk šíří; závislost rychlosti zvuku na teplotě prostředí. Frekvence (kmitočet) zvuku. Akustická intenzita. Hlasitost zvuku. Pohlcování zvuku různými prostředími. Infrazvuk a ultrazvuk.*“ Jako doporučené rozšiřující učivo pak je zde uveden „*vznik zvuku v hudebních nástrojích*“. Mezi náměty laboratorních prací byla v osnovách gymnázia jako jedna z celkem 28 úloh ze všech oborů fyziky zvukovým jevům věnována úloha s názvem „*Měření rychlosti zvuku otevřeným rezonátorem*“ (více v kapitolách 2.4 a 3.4).

S kvantitativním uchopením a modelováním přírodních procesů úzce souvisí vzdělávací oblast rámcového vzdělávacího programu *Matematika a její aplikace*. Mezi výstupy definované rámcovým vzdělávacím programem pro gymnázia mimo jiné patří rozvíjení zkušeností s matematickým modelováním reálných dějů pomocí známých funkcí a využívání moderních technologií k efektivnímu řešení úloh a k prezentaci výsledků, jakož i používání statistických metody k analýze a zpracování dat s využitím výpočetní techniky. Z pohledu modelování zvukových jevů sem tak mimo jiné patří aplikace goniometrických, exponenciálních a logaritmických funkcí, zpracování zvukových dat v číslíkové podobě pomocí matematického softwaru, jejich hodnocení statistickými metodami a vizualizace zvukových dat pomocí různých typů grafů.

Ve vzdělávacím obsahu *Biologie člověka* a vzdělávacím obsahu *Člověk jako jedinec* vzdělávací oblasti *Člověk a společnost*, kde se vyučují základy psychologie, nejsou rámcovým vzdělávacím programem pro gymnázia explicitně formulovány požadavky na výuku

o lidském sluchu ani obecných zákonitostech smyslového vnímání. Přesto fyziologická akustika a základy psychoakustiky do těchto vzdělávacích oborů zcela jistě patří. Podobně ani ve vzdělávací oblasti *Člověk a zdraví* v oboru *Výchova ke zdraví* není explicitně uveden požadavek na klíčové kompetence ani učivo týkající se vlivu hluku na lidský organismus, měření hluku, ochrany sluchu a hlukových norem. I zde je však předpokladem, že tyto vzdělávací obsahy do vzdělávací oblasti člověk a zdraví na středním stupni vzdělávání patří nebo by alespoň patřit měly.

Vzdělávací oblast *Umění a kultura* se v rámcovém vzdělávacím programu pro gymnázia dělí na *Hudební obor* a *Výtvarný obor* nebo může být vyučován v rámci integrujícího tématu *Umělecká tvorba a komunikace*. Ve vzdělávacím obsahu hudebního oboru nazvaném *Produkce* podle rámcového vzdělávacího programu pro gymnázia [61] patří mezi závazné učivo „moderní hudební nástroje a počítač“, ve vzdělávacím obsahu *Recepce a reflexe* pak učivo „hudební nástroje, nové technologie v hudbě, záznam hudby“.

S tím úzce souvisí výuka ve vzdělávací oblasti *Informatika a informační a komunikační technologie* rámcového vzdělávacího programu pro gymnázia zaměřené na osvojování znalostí a dovedností pro využívání digitálních technologií. I zde se podobně jako ve vzdělávací oblasti matematika a její aplikace objevuje požadavek na využívání prostředků výpočetní techniky k modelování a simulacím přírodních jevů a technických procesů i jejich využití při tvůrčích činnostech. Vzdělávací obsah *Digitální technologie* rámcového vzdělávacího programu pro gymnázia [61] zahrnuje závazné učivo „[...] digitalizace a reprezentace dat, [...] digitální technologie a možnosti jejich využití v praxi, [...] komprese, [...]“. Do tohoto učiva patří i digitalizace zvukového signálu a redukce datového toku digitální zvukové informace. Vzdělávací obsah *Zpracování a reprezentace informací* mezi závazné učivo řadí „aplikační software pro práci s informacemi“, kam kromě textových a grafických editorů patří i „multimedia, modelování a simulace“, tedy i zvukové editory jako jsou například Audacity, Adobe Audition či Steinberg Wavelab a matematický simulační software MATLAB, respektive SCILAB.

Využití výpočetní techniky při práci se zvukem je v rámcovém vzdělávacím programu pro gymnázia [61] také součástí průřezového tématu *Mediální výchova* v tematickém okruhu *Média a mediální produkce*, kam patří „příprava vlastních materiálů psaných i nahrávaných (tvorba textu, zvukového a obrazového záznamu s využitím pokročilých funkcí aplikačního softwaru a multimediálních technologií)“.

2.1.3 VÝUKA AKUSTIKY NA STŘEDNÍM STUPNI VZDĚLÁVÁNÍ V NĚMECKU

Učební předpisy ve Spolkové republice Německo jsou narozdíl od českých rámcových vzdělávacích programů poměrně striktní. Každá ze spolkových zemí za tímto účelem vydává příslušné předpisy a doporučení pro konkrétní typ vzdělávání od vzdělávání učňovského typu až po střední odborné školy a gymnázia. Pro srovnání požadavků na výuku akustiky v rámci předmětu fyzika zde stručně uvedu požadavky na výuku akustiky v učebních plánech pro všeobecně vzdělávací gymnázia spolkových zemí Bavorsko [75] a Sasko [30, 31].

O zvuku se v Bavorsku žáci učí ve fyzice podobně jako u nás již na nižším stupni gymnázia v 8. ročníku a to ve srovnatelném rozsahu učiva jako žáci českého nižšího stupně víceletého gymnázia respektive české základní školy. V 10. ročníku v rámci učiva z mechaniky pak má být na bavorských gymnáziích zařazeno téma harmonické kmitání v rozsahu 32 vyučovacích hodin a téma mechanické vlnění v rozsahu dalších 16 vyučovacích hodin. Na přírodovědně-technologických gymnáziích však může v desátém ročníku být akustika navíc jedním z takzvaných profilových oborů, ve kterých žáci dále prohlubují základní znalosti a dovednosti. K tomu slouží doporučená rozšiřující témata a jejich obsahy uvedené v seznamu vydaném bavorským ministerstvem školství a kultury. V akustice mezi tato témata patří „*hladinové vyjádření akustických veličin*“. Není zde však závazně uvedeno pro kterou fyzikální veličinu má být hladinové vyjádření zavedeno. Dále sem patří „*zkoumání hudebních nástrojů, Fourierova analýza a fyzika slyšení*“. Žáci v rozšiřujících tématech používají též náročnější experimentální a matematické postupy, čímž výuka dosahuje celkově vyšší úrovně abstrakce. Na příkladech moderních technologických aplikací se pak mají uplatnit problémově orientované myšlení a postupy.

Desátý ročník vzdělávání na víceletém gymnáziu v Bavorsku (osmileté G8) odpovídá s ohledem na věk žáků našemu prvnímu ročníku střední školy, učivem pak spíše 2. ročníku českých středních škol. To souvisí s tím, že základní a střední stupeň vzdělávání po zkrácení devítiletého (G9) na osmileté gymnázium (G8) trvají v současné době celkem pouze 12 let. Bavorským zemským ministerstvem stanovený učební plán pro (předposlední) 11. ročník gymnázia umožňuje ve výuce fyziky dvě tematické alternativy. Buď je to zaměření „*elektromagnetické pole a teorie relativity*“ nebo „*biofyzika*“. V rámci biofyziky [76] se velmi podrobně vyučuje vzdělávací téma „*Zrak a sluch*“ v rozsahu celkem 21 vyučovacích hodin. Z hlediska akustiky sem patří učivo „*základy akustiky, vlnový charakter zvuku, akustický tlak a hladina akustického tlaku, Frekvence a výška zvuku*“. Učivo týkající se slyšení zahrnuje „*vnější a střední ucho, impedanční přizpůsobení, šíření zvuku ve vnitřním uchu, teorii postupných vln na bazilární membráně, Cortiho orgán a vytváření nervových impulsů*“.

Na gymnáziích v Sasku probíhá výuka akustiky v 10. ročníku v rámci povinné výuky mechaniky a dále v povinně volitelném semináři z fyziky ve 12. ročníku. Podle zemského učebního plánu určeného Saským ministerstvem školství [31] je do povinné výuky fyziky zařazen vzdělávací obsah: „*Zvukové vlnění; souvislost frekvence – výška zvuku, souvislost amplituda [výchylky kmitání zdroje zvuku] - hlasitost*“ i „*závislost vnímání [hlasitosti zvuku] na frekvenci a amplitudě [akustického tlaku]*“. Žáci mají ve výuce získat též základní přehled o jevech šíření zvuku, jako jsou odraz, interference a ohyb zvukového vlnění. Doporučená doplňující látka pak zahrnuje také výukové téma „*rychlost zvuku v různých látkách*“. Ve fyzikálním praktiku pak má být jako jedna z 8 úloh z mechaniky zařazena stejně jako na českých gymnáziích úloha měření rychlosti zvuku ve vzduchu. V rámci fyzikálního semináře mělo být dříve na gymnáziu v 11. ročníku povinně probíráno také učivo „*zázněje*“ a „*stojaté vlny*“, přičemž zde dříve učební plán [30] doporučoval „*experimentální prokázání [jevu stojatého vlnění] u vln na provazech a u zvukových vln*“ a pro projektovou výuku v semináři byl učebním plánem doporučován projekt „*Princip funkce hudebních nástrojů*“. Podle aktuálně platného učebního plánu je namísto toho ve 12. ročníku běžné výuky fyziky zařazen povinně volitelný blok „*Akustika*“ v rozsahu 4 vyučovací hodiny zaměřený na aplikaci učiva o kmitání a vlnění na zvukové jevy. Sem patří konkrétně například učivo „*veličiny zvukového pole*“, dále fyzikální popis hudebního tónu, záznějů a zvukového stojatého vlnění či akustický Dopplerův jev. Aplikace akustiky jsou pak v rozsahu 10 vyučovací hodiny zařazeny do semináře z fyziky ve 12. ročníku. Seminář má za úkol další prohloubení výše uvedených znalostí zejména o průmyslové a medicínské aplikace ultrazvukové akustiky.

2.2 Akustika v učebnicích fyziky pro střední školu

Ve výuce fyziky v České republice se žáci s naukou o zvuku setkávají poprvé už na druhém stupni základní školy, většinou v 8. třídě, podruhé pak na konci kapitoly o mechanickém kmitání a vlnění nejčastěji ve druhém ročníku střední školy. Mechanické vlnění a zvukové vlnění jako jeho speciální případ jsou ve výuce tradičně vnímány zejména jako příprava na později vyučovanou nauku o vlnění elektromagnetickém. V učivu věnovanému mechanickému kmitání, vlnění a zvuku si podle tohoto přístupu mají žáci osvojit základní pojmy a veličiny obecného popisu kmitání a vlnění. Zvukové jevy jsou přitom lidské zkušenosti nejbližším „názorným“, respektive slyšitelným, příkladem kmitání a vlnění, z čehož vycházejí i ve výuce fyziky později používané analogie elektrického kmitání a elektromagnetického vlnění se zvukovými jevy.

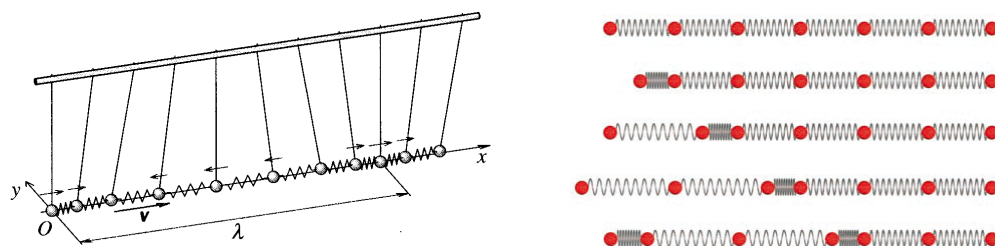
Jako exemplární středoškolský koncept výuky fyzikální akustiky jsem zvolil koncept použitý v kapitole *Zvukové vlnění* učebnice doc. Oldřicha Lepila *Mechanické kmitání a vlnění* z ucelené řady učebnic *Fyzika pro gymnázia* vydavatelství Prometheus [35, 36], respektive učebnice *Fyzika pro střední školy I* [32, 33] kolektivu autorů Lepil, Bednařík, Hýblová. Pro lepší porozumění představám a vědomostem o zvuku, jež si žáci přinášejí na střední školu ze základního vzdělání, zde odkazuji i na výukové koncepty akustiky učebnice *Fyzika 6 pro základní školu: Zvukové jevy, vesmír* autorů Jiřího Tesaře a Františka Jáchyma [82] a kapitolu *Zvukové jevy* učebnice *Fyzika 8: učebnice pro základní školy a víceletá gymnázia* [67] autorského kolektivu Karel Rauner, Josef Petřík, Jitka Prokšová a Miroslav Randa. Kromě učebnic fyziky jsem zkoumal i užití modelů zvuku, pojmů z akustiky a veličin pro objektivní popis zvukového kmitání a zvukového vlnění vzduchu ve vybraných středoškolských učebnicích biologie [50], hudební výchovy [21] i informatiky a výpočetní techniky [70, 71].

2.2.1 FYZIKÁLNÍ MODEL MECHANICKÉHO VLNĚNÍ VZDUCHU

Zkoumané učebnice fyziky pro střední školu [32, 33, 35, 36] i pro školu základní [67, 82] postupují ve výkladu cíleně od harmonického kmitání jednoho mechanického oscilátoru přes popis dvou vázaných oscilátorů až k vlnění v řadě oscilátorů spojených vazbou a přenášejí tak model harmonického kmitání na postupné harmonické vlnění. To se týká i používaných pojmů a veličin. Základními prvky abstrahovaného modelu mechanického vlnění, jak je ve zkoumaných učebnicích prezentován, jsou mechanické oscilátory. Základní fyzikální veličinou pro jejich popis je výchylka mechanického oscilátoru s rozměrem délky. Mechanické vlnění je na základě toho modelováno jako přenos výchylky mechanického kmitání oscilátorů prostřednictvím pružné vazby mezi jednotlivými oscilátory.

Při bližším pohledu lze zjistit, že středoškolské učebnice [32, 33, 35, 36] pracují na 2 úrovních abstrakce modelu mechanického vlnění. Blíže realitě je nižší používaná úroveň abstrakce v podobě modelu tělesa složeného z „*částic látkového prostředí*“. Harmonickými oscilátory jsou na této nižší úrovni modelování reality podle textu učebnic „*atomy*“ a „*molekuly*“. Tato úroveň modelování je ve výuce na střední škole přitom běžně chápána tak, jakoby to byl přímý obraz reality. Už pojem těleso je však pouze abstrahovaným modelem reality, což začne být o něco jasnější v okamžiku, kdy text učebnice [33] rozšiřuje platnost tohoto modelu na vznik vlnění v „*tělesech všech skupenství, tedy i v kapalinách a plynech*“. Jak ukáží dále, právě v plynech je výše zmíněný model vzniku a šíření mechanického vlnění krajně problematický.

Na vyšší úrovni zobecnění fyzikálního modelu vlnění jsou v učebnicích pro střední školy částice prostředí popisovány a zobrazovány jako „*hmotné body*“ nebo bez jakéhokoli přívlastku jako „*body*“, přičemž užití pojmu i grafická reprezentace odpovídá modelu hmotného bodu jak je užíván ve středoškolské výuce mechaniky. Vysvětlení zniku a šíření mechanického vlnění je založeno na modelu nekonečné „*bodové řady*“, kterou tvoří hmotné body umístěné na přímce a vzájemně spojené pružnou vazbou. Tento model je ve všech zkoumaných učebnicích vytvořen redukcí idealizovaného prostorového modelu tělesa pevného látkového skupenství s pravidelnou kubickou krystalovou mřížkou na jednu dimenzi. Model šíření zvuku je zaveden na základě analogie částic látkového prostředí pro tento speciální případ (v jednodimenzionálním pohledu) s řadou kyvadel spojených pružinami [33]. Mechanické vlnění v bodové řadě se podle užití analogie šíří podobně jako se přesouvá výchylka kmitání v nekonečné řadě kyvadel. Učebnice pro základní školu [67] používá v textu smíšený slovní model „*řetězu molekul spojených pružinkami*“ a jako argument platnosti tohoto modelu uvádí demonstrační experiment šíření mechanického vlnění pomocí Machova vlnostroje.



Obr. 1: Grafické modely postupného podélného vlnění použité v učebnici pro gymnázium (vlevo) [36] a pro základní školu [67] vytvořené na základě analogie s kmitáním vázaných kyvadel vlnostroje

Základní veličinou používanou ve středoškolských učebnicích [33, 36] pro popis jak příčného tak podélného vlnění je „*výchylka*“, respektive „*výchylka bodu*“. Pojmem „*výchylka*“ se v abstraktním modelu rozumí okamžitá výchylka harmonického mechanického kmitání hmotného bodu z rovnovážné polohy, pojmem „*amplituda*“ pak amplituda výchylky časově ustálených mechanických kmitů. Učebnice pro základní školu pro popis mechanického vlnění explicitně pojem výchylka nepoužívají. Pro objektivní popis vlnění zde ještě není zavedena žádná fyzikální veličina a slovní popis zůstává na kvalitativní úrovni. V textu však i tyto učebnice opakovaně používají formulace jako „*vychýlení molekuly*“, „*amplituda kmitů molekul*“ [67] nebo „*vychylování bodů*“ [82]. I vysokoškolské učebnice a skripta pro inženýrské studium akustiky [25, 37] používají model „*částice*“ prostředí (anglické učebnice „*particle*“, německé „*Teilchen*“). Zde se však na rozdíl od přístupu výuky na základní a střední škole nejedná o elementární částice hmoty, ale o mnohařádově větší makroskopické elementy hmoty.

Je nutné položit si otázku, nakolik modely vlnění z nauky o mechanickém vlnění zaváděné na střední škole - model kmitajících částic látkového prostředí a jeho abstraktnější verze v podobě modelu kmitajících hmotných bodů spojených vazbou - dokáží popsat vznik a šíření zvuku ve vzduchu. Pomocí obou školských modelů lze ve shodě s naukou o struktuře a vlastnostech pevných látek jistě úspěšně modelovat šíření příčného i podélného mechanického vlnění v krystalové mřížce pevných látek. V případě popisu šíření vlnění v kapalinách a plynech však modely středoškolské akustiky již jednoznačně selhávají. Model tělesa složeného z atomů a molekul kmitajících kolem rovnovážných poloh je v případě kapalin i plynů totiž v rozporu s tím, jak jsou na střední škole modelovány. V případě modelu mechanického vlnění založeném na popisu výchylky kmitání molekul a středoškolského modelu plyných látek – tedy modelu ideálního plynu (IP) – se jedná přímo o extrémní rozpor. Jak tedy zvuk ve vzduchu modelovat, když podle modelu ideálního plynu se částice plynu pohybují chaotickým tepelným pohybem a vyjma srážek na sebe žádnou silovou vazbou nepůsobí? Jak popsat výchylky částic ideálního plynu z rovnovážné polohy?

2.2.2 MODELOVÁNÍ ZVUKU VE VZDUCHU POMOCÍ HUSTOTNÍCH VLN

Mohlo by se zdát, že ve vzduchu se podle modelu ideálního plynu mechanické vlnění šířit nemůže. To je dokonce z části pravda: Šíření příčného mechanického vlnění v plynech právě v důsledku chybějící vazby mezi molekulami plynu skutečně možné není. Učebnice pro střední [33, 36] i základní školu [67, 82] řeší vzniklý rozpor obecného modelu mechanického vlnění a modelu ideálního plynu zavedením separátního modelu pro podélné vlnění v mnoha ohledech odlišného od obecného modelu mechanického vlnění, jak byl v učebnicích zaveden předtím.

V případě modelu podélného mechanického vlnění v bodové řadě vycházejícího opět z analogie s šířením fáze a výchylky kmitání v řadě kyvadel spojených vazbou, kdy na rozdíl od modelu příčného vlnění kyvadla kmitají ve směru šíření vlnění, se všechny zkoumané učebnice fyziky shodují ve slovním popisu důsledků výchylky kmitání ve směru rovnoběžném se směrem šíření vlny. Na základě toho podélné vlnění přímo definují tak, že „*podélné vlnění charakterizuje zhušťování a zředování kmitajících bodů*“ [36]. Zatímco základním pojmem pro popis příčného vlnění je v učebnicích výchylka, pro popis podélného vlnění jsou zde analogicky užívány blíže nedefinované pojmy „*zhuštění*“ a „*zředění*“ ve formulacích jako „*zhuštění, popř. zředění postupuje opět rychlostí v*“ a „*jednotlivá zhuštění nebo zředění jsou navzájem vzdálená o vlnovou délku λ* “. Jako synonymum je dále užíváno

těž pojmů „stlačování“ a „rozpínání“. K tomuto popisu vlnění se učebnice [36] vrací v kapitole *Zvuk*, kde uvádí spolu s definicí šíření zvuku ve vzduchu, že „*chvění membrány reproduktoru se přenáší do vzduchu, kde dochází k periodickému stlačování a rozpínání vzduchu*“ a dále, že „*to se projevuje periodickými změnami tlaku vzduchu*“.

Modelování zvuku pomocí zhušťování a zředování vzduchu vychází z analogie se vzájemným přibližováním a vzdalováním kyvadel vlnstroje. K dosažení kompatibility modelu kmitání kyvadel a modelu stlačování vzduchu však zde schází explicitní definice kmituschopných elementů reprezentujících skutečné látkové prostředí, jehož vlnění zkoumáme. V případě šíření zvuku ve vzduchu je nutná řádová změna měřítko pohledu na prostředí vyjádřená jiným obsahem pojmu „částice“. Kyvadla v případě šíření zvukového vlnění ve vzduchu nemohou zastupovat jednotlivé molekuly vzduchu, ale pouze makroskopické elementy hmoty dostatečně velké ve srovnání s elementární strukturou látkového prostředí a zároveň dostatečně malé ve srovnání se strukturou vlnění prostředí popsanou vlnovou délkou mechanického vlnění. Právě makroskopický pohled na látkové prostředí a oproštění se od pojmu částice ve smyslu atomů a molekul je přitom klíčem k pochopení principu šíření zvuku v plynech.

Zvuk je tak v učebnicích sice opakovaně uváděn jako nejdůležitější příklad podélného mechanického vlnění a mechanického vlnění vůbec, v jeho kvantitativním popisu však učebnice jak pro základní, tak pro střední školu zcela rezignují na vytvoření plnohodnotného modelu zvuku pomocí fyzikální veličiny tlak a zůstávají u sice formálně platného, ale v praxi obtížně použitelného modelu založeného na „výchylce“ kmitání „částic“. Důsledkem setrvávání u tohoto modelu zvukového vlnění tak mimo jiné je i to, že fyzika na úrovni střední školy nedokáže vznik a šíření zvuku ve vzduchu, běžné zvukové jevy, ani vnímání zvuku člověkem kvantitativně popsat pomocí prakticky měřitelné fyzikální veličiny.

2.2.3 ENERGETICKÝ MODEL ZVUKOVÉHO VLNĚNÍ

Koncept přenosu energie je obecně považován za jeden z nejúspěšnějších mezioborových konceptů přírodních věd a to díky tomu, že pomocí přeměn různých forem energie dokáže kvantitativně popsat intuitivně tušené vztahy mezi veličinami popisujícími určitý jev z různých hledisek. Energetické koncepty tak přinášejí globální pohled, jakýsi nadhled, na zkoumaný systém a jeho interakci s jinými systémy. Současně se ale ve vysoké abstrakci energetického modelu ztrácí vlastní podstata sledovaných jevů.

V kapitole „*Hlasitost a intenzita zvuku*“ zkoumaná učebnice pro gymnázia [36] nejprve upevňuje model zvukové vlny, která „*představuje periodické stlačování a rozpínání pružného prostředí*“ v důsledku čehož „*ve vzduchu dochází k periodickým změnám atmosférického tlaku, které uchem vnímáme jako zvuk určité hlasitosti*“. Veličina akustický tlak však pro kvantitativní popis zvuku zavedena není. Učebnice [36] argumentuje tak, že „*objektivní hodnocení zvuků vychází ze skutečnosti, že šíření zvukového vlnění je spojeno s přenosem energie*“. Následně je zavedena pro popis zdroje zvuku veličina akustický výkon a pro popis zvuku šířícího se v prostředí veličina intenzita zvuku, která, jak je zde uvedeno, „*nás názorněji o hlasitosti zvuku informuje*“. Hlasitost je označena v souladu s konvencí jako veličina subjektivní. Jak nás o hlasitosti intenzita zvuku informuje, však není v učebnici vyjádřeno kvantitativně ani kvalitativně.

Z odborného hlediska sporná jsou tvrzení učebnic pro základní školu [67, 82] o měření intenzity zvuku pomocí ručního zvukoměru. Zde je nutné zmínit, že intenzita zvuku není v běžných podmínkách měřitelná přímou metodou. Velikost intenzity je možné určit z měření akustického tlaku na základě výpočtu za předpokladu přiblížení se idealizovaným podmínkám, tedy například pro dokonale rovinnou vlnu a dokonale volné pole bez odrazů. Až pomocí mnohem složitějšího měření je možné následně výpočty určit intenzitu jako vektor včetně jejího směru. Jedná se ale i tak pouze o nepřímé určení intenzity na základě měření jiných veličin, nejčastěji na základě velmi přesného měření dvojice hodnot akustického tlaku. Výpočet intenzity pouze z jedné měřené hodnoty akustického tlaku pomocí jednoduchých aproximativních vztahů přináší pro objektivní hodnocení zvuku potenciálně řadu problémů plynoucích právě z učiněných zjednodušujících předpokladů. Veličina intenzita zvuku se přitom vyskytuje i v klíčovém učivu definovaném v rámcových vzdělávacích programech, odkud ji střední školy přejímají do svých školních vzdělávacích programů. Navíc se pojem intenzita zvuku často objevuje jako rádooby odborný pojem v médiích a v obecném smyslu hovorového jazyka „*jak silný*“ a v případě zvuku mylně ve smyslu jak hlasitý je zvuk.

Rozhovory s žáky v projektové výuce ukázaly, že koncept šíření energie kmitavého pohybu u nich do značné míry substituuje představu o přenosu látky. Učebnice už od počátku výkladu potlačují tento přirozený žákovský koncept šíření zvuku [95] jednoduchou definicí, že šíření vlnění „*není spojeno s přenosem látky*“ a namísto toho, že „*vlněním se přenáší energie*.“ Je nutné si uvědomit, že energie zvukového vlnění vyjadřuje v podstatě hypotetickou možnost konání mechanické práce kmitajícím zdrojem vlnění na dálku prostřednictvím jím rozvlněného prostředí. V tomto smyslu pak akustický výkon zdroje udává, jakou práci by takto zdroj mohl na celé své okolí vykonat za čas jedné sekundy.

Intenzita vlnění udává, jakou část z celkové hypotetické práce by prostřednictvím vlnění prostředí kmitající zdroj mohl vykonat za čas jedné sekundy na objektu ve zvukovém poli s účinnou plochou 1 m^2 .

2.2.4 HLADINOVÉ VYJÁDŘENÍ AKUSTICKÝCH VELIČIN NA STŘEDNÍ ŠKOLE

Učebnice fyziky pro základní školu [67, 82] ani učebnice pro střední odborné vzdělávání [32, 33] neuvádějí vzorec pro výpočet hladinového vyjádření žádné z používaných akustických veličin. Shodně však uvádějí tabulky hladin akustické intenzity vybraných zvuků. Novější učebnice [33] přitom uvádí: *„Hlasitost zvuku odpovídá při vnímání zvukového kmitání o různé amplitudě. Poněvadž zvuk se šíří periodickým stlačováním vzduchu, je pro stanovení hlasitosti důležitá velikost změn tlaku vzduchu, které zvukové vlnění vyvolá.“* Poté však definuje vnímání hlasitosti formulací: *„Úroveň hlasitosti zvuku se objektivně vyjadřuje veličinou hladina intenzity zvuku“*. Zkoumané učebnice fyziky přitom nerozlišují jednoznačně kvantifikovatelné objektivní vlastnosti zvukového podnětu a vlastnosti subjektivního zvukového vjemu. V textu je sice ve všech případech explicitně definováno, že hlasitost zvuku je subjektivní vjem posluchače, text však hladinové vyjádření prezentuje tak, jakoby hladina intenzity byla objektivní veličinou popisující člověkem vnímanou hlasitost zvuku. Zkoumané učebnice navíc s bezrozměrným hladinovým vyjádřením v decibelech (dB) zacházejí jako s fyzikální jednotkou. V souvislosti s výše uvedeným tak žák může snadno nabýt dojmu, že decibel (dB) je jednotkou hlasitosti zvuku.

Učebnice fyziky pro gymnázia [36] zavádí hladinové vyjádření akustického výkonu včetně vzorce pro jeho výpočet a referenčního výkonu pro hladinu 0 dB se zdůvodněním, že se jedná o hodnotu výkonu reprezentující práh slyšení. Učebnice však používá pojem akustický výkon nejednoznačně jak ve smyslu výkonu zdroje zvuku, tak i ve smyslu přijatého výkonu v určité vzdálenosti od zdroje. V případě tabulky zdrojů zvuku seřazených od *„prahu slyšení 0 dB, až po „[...] startující letadlo 110 dB a práh bolesti 120 dB“* spolu s údaji o vzdálenosti zdroje, tak není zcela jasné, zda se skutečně jedná o hladiny výkonu zdroje zvuku, který je z definice na vzdálenosti posluchače nezávislý. Starší verze učebnice fyziky pro gymnázia [35] přitom zaváděla hladinové vyjádření pro intenzitu zvuku v určité vzdálenosti. Může se tak zde jednat o chybu vzniklou při úpravě učebního textu. Je zajímavé, že *„Matematické, fyzikální a chemické tabulky“* [43, 44, 45] určené pro střední školy používají hladinové vyjádření, pro veličinu akustický tlak. Pro tuto veličinu uvádějí jak vzorec, tak tabulky zdrojů zvuku.

Závěrem si dovoluji citovat reakci hlavního autora učebnic pro gymnázium [35, 36] a odborné střední školy [32, 33] doc. RNDr. Oldřicha Lepila, CSc. z Přírodovědecké fakulty Univerzity Palackého v Olomouci, která do jisté míry volbu pojmů a veličin v těchto učebnicích objasňuje. Doc. RNDr. Oldřich Lepil, CSc. mi 6. 3. 2013 e-mailem napsal:

„Vážený kolego, při omezených možnostech, jaké současná výuka fyziky má, není možné příliš rozšiřovat vyjadřovací aparát středoškolské fyziky a je třeba uvážlivě volit rozsah nově zaváděných fyzikálních pojmů a veličin. Srovnání různých našich i zahraničních učebnic středoškolských, ale i vysokoškolských (namátkou uvedu nejvýznamnější českou učebnici Horákovu, nebo populární učebnici Halliday, Resnick, Walker) ukazuje, že ve většině těchto učebnic je výchozím pojmem intenzita zvuku a teprve v návaznosti na ni je uveden akustický tlak. Samozřejmě je možné zavést obě veličiny, ale osobně se domnívám, že pro všeobecně zaměřené fyzikální vzdělání je dostačující intuitivně lépe přijímaný pojem intenzita zvuku. Je také třeba uvážit, že se dlouhodobým vývojem vytváří určitý standard zpracování středoškolského učiva a jeho počátek je možné hledat již v učebnicích mých předchůdců (např. Vanovič a kol.: Fyzika pro II. ročník SVVŠ, 1965), ale i dříve. Pokud se domníváte, že z did. hlediska by bylo nutné buď vyjít z pojmu akustický tlak, nebo jej případně zavést jako jedinou kvantitativní veličinu v této souvislosti, je samozřejmě možné o tom diskutovat.“

2.2.5 AKUSTIKA V BIOLOGII, HUDEBNÍ VÝCHOVĚ A INFORMATICE

Učebnice fyziky pro střední stupeň vzdělávání se na rozdíl od učebnic pro základní vzdělávání nezabývají podrobněji fyzikálními principy funkce lidského sluchu. To je kompenzováno zařazením tohoto učiva do středoškolských učebnic biologie a hudební výchovy. Také v nich se objevují některé z výše diskutovaných modelů zvuku, přičemž jejich kombinace se často děje na úkor srozumitelnosti. Učebnice biologie pro střední školy se zaměřují na popis fyziologie sluchového orgánu. Objasnění principu funkce slyšení zde však naráží na hranice metod zkoumání středoškolské biologie. Ve zkoumané učebnici *Biologie člověka pro gymnázia* nakladatelství Fortuna [50], se ve formulacích mísí energetický a tlakový model zvuku. Učebnice kupříkladu uvádí: „*Sluchem zaznamenáváme energii zvuku, který se šíří jako vlna zhušťování a zředování molekul (a atomů) plynů, z nichž se skládá vzduch (podélné kmitání částic). Zvuková vlna se projevuje podélným kolísáním tlaku vzduchu, které může být vnímáno uchem. [...] Sluchový orgán reaguje na tlak vykonávaný molekulami a patří proto mezi mechanoreceptory. Je ze všech mechanoreceptorů nejcitlivější, zaznamenává energii již o hodnotě asi $5 \cdot 10^{-23}$ J.*“

Ve zkoumané učebnici *Hudební výchova 2 pro gymnázia* [21] se objevují hudební pojmy „*síla tónu*“ a „*síla zdroje zvuku*“. Tato síla v hudební terminologii je definována tak, že „*[...] síla tónu závisí na intenzitě zvuku*“. Zároveň je pojem síla používán i ve významu blízkému tomu fyzikálnímu jako například ve formulacích typu: „*čím silněji do struny*

udeříme [...], tím silněji [tón] zní“. Model zvuku použitý v této učebnici vychází ze zkušenosti hudebníků, že na počátku každého zvuku musí působit vnější síla. Tuto příčinnou souvislost rozeznávají, jak potvrzují ve své studii Wulf a Euler [95], už děti na základní škole. Pojem *síla* v učebnici hudební výchovy [21] ovšem označuje jednak vlastnost zdroje zvuku, tak i vlastnost způsobeného vjemu, zatímco pojem *intenzita* v textu učebnice zastupuje objektivní vlastnost zvukového podnětu. Tabulka hladinového vyjádření intenzity zvuku v učebnici hudební výchovy má nadpis: „*Síla některých zvukových zdrojů*“. V textu učebnice pak přímo uvádí tvrzení, že „*jednotkou intenzity v hudbě je 1 decibel (dB)*“. Vnímání zvuku je popsáno tak, že: „*[...] stačí malá intenzita [zvuku], aby byl zvuk slyšet*“. Učebnice se dále věnuje základům fyziologické akustiky a psychoakustiky. Komentář ke grafu frekvenční závislosti citlivosti sluchu, jehož svislá osa je označena v dB, uvádí, že zde „*jsou zaznamenány stupně síly zvuku*“. Při popisu fyziologie sluchu se však vedle *síly* a *intenzity* objevuje i modelování zvuku pomocí veličiny tlak ve formulacích jako „*rozdíl mezi prahem a maximálním tlakem zvuku*“ ve smyslu rozdílu mezi akustickým tlakem podnětu odpovídajícímu počitkovému prahu slyšení a akustickým tlakem podnětu odpovídajícímu počitkovému prahu bolesti.

Základními principy digitálního zpracování zvuku na uživatelské úrovni se zabývají učebnice informatiky a výpočetní techniky [70, 71, 79], které na zvuk nahlíží jako zvukovou informaci, jako na zvuková data. Středoškolská informatika přitom užívá základní pojmy teorie signálů a systémů a informační teorie. Princip digitalizace informace je velmi zjednodušeným způsobem vysvětlen na obecném případě proměnného signálu a je dále platný jak pro zpracování zvuku, tak obrazu. Digitální zvuk v počítači reprezentují v textu učebnice data bez detailnějšího vysvětlení principů binární reprezentace. Dále učebnice informatiky uvádí základní popis zvukového hardwaru a softwaru, výčet nejčastěji používaných formátů a médií pro digitální záznam zvuku a velmi stručně popisuje i základní princip komprimace zvukových dat. Fyzikální podstatě principu funkce zvukového hardwaru a matematických algoritmů použitých u zvukového softwaru se zkoumané učebnice informatiky blíže nevěnují.

2.3 Základní experimenty z akustiky na střední škole

Vzhledem k důrazu výukového konceptu na praktickou zkušenost žáků se zvukem a zvukovou technikou, je logickým krokem prozkoumat a kriticky zhodnotit nejčastěji používané školské experimenty z akustiky na středním stupni vzdělávání. Za tímto účelem byla provedena rešerše v literatuře, rozhovory s učiteli a praktické vyzkoušení dostupného přístrojového vybavení pro školské experimenty v akustice.

2.3.1 DEMONSTRACE KMITÁNÍ A STOJATÉHO VLNĚNÍ ZDROJŮ ZVUKU

V kapitolách učiva *mechanické kmitání a vlnění* a *zvukové vlnění* patří k tradičním demonstračním experimentům na školách ukázka a poslech chvění ladičky se symetrickými rameny a chvění struny monochordu. Pro lepší slyšitelnost zvuku těchto zdrojů se užívá ladičky respektive struny připevněné na ozvučné skříňce, u které dochází ke zlepšení vyzařování zvuku rozechvěním dřevěného korpusu a též následným chvěním vzduchu v dutině korpusu. Ladičky umožňují pouze malou změnu frekvence pomocí posuvných závaží umístěných na ramenech ladičky. Pomocí takto provedeného rozladění jedné ze dvou současně znějících ladiček se demonstrují na školách akustické zázneje. Často se ve výuce pro vizualizaci harmonického kmitání používá ladička s hrotem na jednom z ramen, kdy je časový průběh kmitání zaznamenán plynulým tažením hrotu po sazemi začerněné skleněné desce. Za předpokladu plynulého pohybu je možno dobře vidět přibližný tvar periodického časového průběhu téměř čistě harmonického kmitání, z nějž je možno snadno určit rozkmit, respektive amplitudu kmitů špičky hrotu. Je však obtížné z takto zaznamenaného průběhu kmitání získat přesnější údaje o periodě kmitání hrotu.

Monochordem, což je jakýsi primitivní předchůdce všech současných strunných nástrojů, je pomocí volně posuvné kobylky možné demonstrovat závislost vlastních frekvencí stojatého vlnění struny, respektive subjektivně vnímané výšky tónu, na délce a napětí struny. Výsledný tón vyvolaný chvěním struny však nikdy není čistě harmonický. Pro vysvětlení podstaty vzniku a vlastností stojatého vlnění bývá z důvodu řádově větší výchylky a nižší frekvence kmitů vhodnější použít spíše napjatou gumu než strunu. Velmi efektní je pak pozorování časového průběhu stojatého vlnění napjaté gumy pomocí stroboskopického osvětlení s kmitočtem záblesků blízkým kmitočtu základního modu chvění struny, čímž vzniká u pozorovatele dojem zpomalení časového průběhu stojatého vlnění. Postupné příčné vlnění a také příčné stojaté vlnění pro odraz na pevném i na volném konci je možné jednoduše ukázat i pomocí pomalu rozvlňovaného svislého lana.

Příčné stojaté vlnění desek a membrán se na školách vizuálně demonstruje pomocí Chladniho obrazců vytvořených jemným pískem. Dříve se desky rozechvívaly přejížděním jejich hrany smyčcem. To vyžaduje určitou zkušenost a zručnost vyučujícího a ne vždy vede ke kýženému výsledku. Konzistentních výsledků lze přitom snadno dosáhnout vybuzením stojatého vlnění desek zvukem reproduktoru umístěného pod deskou. K buzení reproduktoru se používá signál laboratorního tónového generátoru s proměnnou frekvencí připojený na vstup výkonového zesilovače. Díky propojení auditivního a vizuálního zážitku je takto

modernizovaný tradiční experiment stále jedním z emocionálně nejsilnějších motivačních experimentů ve výuce mechanického vlnění.

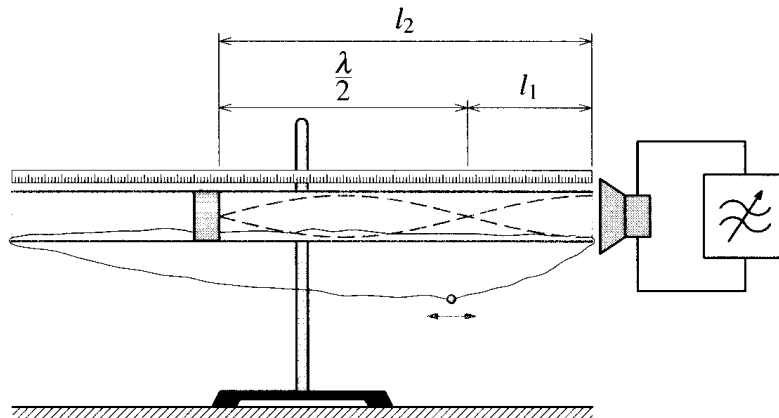
Pro demonstraci podstaty vzniku a vlastností mechanického vlnění se dodnes na školách používají mechanické vlnostroje složené z řady kyvadel spojených pružinami konstrukčně vycházející z Weinholdova vlnstroje (podle Adolfa Ferdinanda Weinholda, 1841–1917). Je však třeba v použité analogii vhodně zvolit s kyvadly korespondující elementy plynného prostředí. V učebnicích [33, 36] často použitá analogie kuliček zavěšených na kyvadlech vlnstroje s atomy prostředí je pro plynné prostředí značně zavádějící. Nejjednodušším vlnstrojem použitelným i na základní škole je dětská hračka zvaná „Slinky“, což je vinutá pružina velkého průměru s mnoha těsně navinutými závitů a malou tuhostí. Pomocí této pružiny lehce natažené mezi prsty obou rukou na hladké desce stolu, je při buzení jednou rukou možné snadno demonstrovat postupné podélné vlnění pružiny. Výchylky jednotlivých závitů pružiny je sice obtížné sledovat, zhušťování a zředění závitů je naopak pozorovatelné velmi dobře. Vylepšení je možné dosáhnout zavěšením lehce roztažené pružiny pomocí závěsů z rybářského vlasce například na ramínko na šaty. Pak je dokonce možné ukázat i vznik stojatého vlnění pružiny s oběma volnými konci.

2.3.2 DEMOSTRACE STOJATÉHO VLNĚNÍ VZDUCHU

K žáky oblíbeným experimentům pro svou efektnost patří demonstrace podélného stojatého vlnění vzduchového sloupce v oboustranně nebo jednostranně otevřené průhledné trubici, kde je možné kmitny a uzly akustického tlaku zviditelnit pomocí jemného korkového prášku. Z tohoto demonstračního experimentu vychází dále metody měření rychlosti šíření zvuku ve vzduchu známé jako „*Měření rychlosti zvuku Kundtovou trubicí*“ (podle Augusta Kundta, 1839–1894) [29, 55] a tradiční školská laboratorní úloha nazvaná „*Měření rychlosti zvuku otevřeným rezonátorem*“ [36]. Označení „rezonátor“ je ovšem poněkud nepřesné a také interpretace sledovaného a poslouchaného jevu, která je uvedena v učebnicích pro střední školu [33, 36], není zcela správná. Detailněji se technické modernizaci a zpřesnění interpretace experimentů se stojatým vlněním vzduchu v trubicových akustických interferometrech věnuje kapitola 3.4.

Ve výuce akustiky na střední i vysoké škole [11, 68] se často využívá analogie podélného stojatého vlnění vzduchového sloupce s příčným stojatým vlněním napjaté struny, u níž je možné tvar stojaté vlny přímo pozorovat jako obálku amplitudy mechanické výchylky příčných kmitů jednotlivých úseků struny. Okrajová podmínka příčného stojatého vlnění

napjaté struny vychází z toho, že závěs struny je pevný a struna se v tomto místě nemůže pohybovat. Na střední škole se podle toho žáci učí [33, 36], že na pevném konci bodové řady se výchylka kmitajících bodů vždy odráží s opačnou fází a vzniká zde proto uzel, myšleno uzel výchylky příčného kmitání. Na volném konci se naopak kmitání v bodové řadě odráží se stejnou fází, díky čemuž zde vznikne kmitna, myšleno kmitna výchylky příčného kmitání. Na pevných koncích napjaté struny proto vždy vznikají uzly výchylky příčného mechanického kmitání struny.



Obr. 2: Podélné stojaté vlnění vzduchového sloupce v jednostranně uzavřené trubici znázorněné pomocí analogie s příčným stojatým vlněním struny. Zdroj: [36]

Grafické zobrazení analogie chvění vzduchového sloupce s chvěním struny však v případě neuvážené aplikace okrajových podmínek na stojaté zvukové vlnění může vést k mylným závěrům. To je způsobeno zejména tím, že se ve výuce používají pojmy uzel a kmitna bez označení příslušné fyzikální veličiny. Například v dutině oboustranně otevřené trubice se vzduch chová, jakoby byly oba její konce volné a vzniká zde tedy kmitna výchylky kmitání elementů vzduchu. Na uzavřeném konci trubice naopak vzniká uzel kmitání elementů vzduchu. To, co v akustice snímáme, respektive měříme, však není výchylka translačního kmitání, ale okamžité nebo efektivní hodnoty akustického tlaku. Tam, kde ve stojaté zvukové vlně vzniká uzel výchylky kmitání, je přitom kmitna akustického tlaku a naopak tam, kde vzniká kmitna výchylky kmitání elementů vzduchu, vzniká uzel akustického tlaku. Důsledkem přímého užití analogie podélného stojatého vlnění vzduchového sloupce, u něž snímáme a vizuálně sledujeme průběh akustického tlaku s příčným stojatým vlněním napjaté struny, tak snadno může být záměna uzlů výchylky kmitání s uzly akustického tlaku.

V učebnicích fyziky se stojaté vlnění strun, tyčí a vzduchových sloupců často označuje pojmem chvění. Pojem chvění tedy není synonymem pojmu kmitání. Kmitání totiž vždy označuje pohyb tělesa jako celku, při němž se všechny části tělesa pohybují se stejnou fází a výchylkou, zatímco při chvění se různé části tělesa pohybují s různou fází a výchylkou.

Je tak vlastně formálně nesprávné hovořit o „kmitání“ struny nebo „kmitání“ vzduchového sloupce. Kmitá pouze určitá malá část struny nebo vzduchového sloupce. Struna nebo vzduchový sloupec jako celek se „vlní“ stojatým vlněním – struna příčným a vzduchový sloupec podélným stojatým vlněním.

K určení rychlosti šíření zvuku ve vzduchu je kromě vyhodnocování vlnové délky stojatého vlnění v trubicích možné použít také přímou metodu měření pomocí vyhodnocování časového zpoždění záznamu ze dvou mikrofonů umístěných v různé vzdálenosti od zdroje impulsního zvuku [9, 19, 55]. Je to jednoduchá, názorná a pro žáky snadno pochopitelná metoda měření rychlosti šíření zvuku. Její podstatou je předpoklad přímočarého šíření sledované části vlnoplochy po určité dráze v analogii s rovnoměrným přímočarým pohybem hmotného tělesa. Považuji za vhodné k určení rychlosti šíření zvuku ve vzduchu použít a žákům důkladně vysvětlit obě metody. To současně dává učiteli vhodnou příležitost porovnat oba významné modely šíření zvuku. Z toho důvodu jsem zařadil do experimentální části disertační práce podrobnější rozbor obou metod měření rychlosti zvuku.

Experimenty pro demonstraci vlnového charakteru zvuku jako je interference, difrakce a Dopplerův jev prodávají výrobci demonstračních experimentů [39, 55] jako celé experimentální sady. Vysílače a přijímače zvuku pracují v ultrazvukové oblasti, kde tedy již chybí přímá sluchová zkušenost a je možné pouze měření a zobrazení časového průběhu nebo frekvenčního spektra signálu v grafu. Demontrace Dopplerova jevu ve slyšitelném pásmu frekvencí je ve školských podmínkách obtížně realizovatelná. Pro slyšitelnou změnu výšky tónu je totiž nutné dosáhnout dostatečně vysoké rychlosti pohybu zdroje zvuku vůči posluchači. U pohybu zdroje po kruhové dráze, například malého piezoreproduktoru roztočeného na provázku, majícím vést ke kolísání slyšené výšky tónu je problém s periodickou změnou výšky tónu svázaná změna posluchačem vnímané hlasitosti tónu. Názornost tohoto experimentu pro demonstraci Dopplerova jevu je tedy sporná.

2.3.3 DEMONSTRACE NUTNOSTI PŘÍTOMNOSTI LÁTKY PRO PŘENOS ZVUKU

K jednomu z historického hlediska kontroverzních experimentů v akustice patří pokus se zdrojem zvuku umístěným v prostoru pod průhledným recipientem vývěvy, z něhož je postupně odčerpáván vzduch. Jako zdroj zvuku se používá elektromechanický zvoněk či mechanický budík, u nichž je možné pozorovat pohyb paličky a chvění zvonku. Pozorovatel má možnost slyšet klesající hlasitost zvuku se snižujícím se tlakem pod recipientem vývěvy zatímco podle vizuálního vjemu pohybu paličky a zvonků by stále očekával hlasité zvonění.

Jako první realizoval tento experiment již před rokem 1650 Athanasius Kircher (viz kapitola 1.1). Nepodařilo se mu však dostatečně snížit tlak vzduchu pod vývěvou a zvon byl stále slyšet. Kircher se však domníval, že z prostoru pod vývěvou odčerpá veškerou plynnou látku, jejímž vlněním by se mohl zvuk šířit. Jeho experiment proto na nějakou dobu posílil emanační, respektive korpuskulární, teorii zvuku v podobě neviditelných nehmotných zvukových částic vysílaných ze zdroje. Již zhruba o deset let později se Robertu Boyleovi (1627–1691) podařilo snížit tlak pod vývěvou natolik, že po poklesu hlasitosti už zvuk nebyl slyšet vůbec, tedy že akustický tlak vyvolaný zdrojem zvuku v místě poslechu klesl pod práh slyšení. Výsledek experimentu tehdy vedl ke konečnému potvrzení hypotézy, že pro přenos zvuku je hmotné látkové prostředí potřeba.

Interpretace experimentu je však dodnes sporná. I s nejlepšími dostupnými vývěvami totiž zůstává pod zvonem dostatečné množství plynu pro přenos mechanického vlnění. To, že zdroj zvuku umístěný ve zředěném vzduchu pod zvonem vývěvy neslyšíme, je způsobeno tím, že zdroj zvuku navržený pro vyzařování zvuku při atmosférickém tlaku není schopen dostatečně efektivně přenést mechanické chvění pevné látky na rozvlnění zředěného vzduchu a že pak zvukové vlnění zředěného vzduchu není schopno dostatečně rozechvít masivní skleněný zvon recipientu vývěvy. Jde tedy o demonstraci špatného impedančního přizpůsobení pro dané médium a tlak na straně vysílače i přijímače vzduchu. Zjednodušenou školní interpretaci experimentu založenou na předpokladu, že zvuk zvonku není slyšet, protože pod vývěvou není přítomna látka potřebná pro jeho šíření, nelze z dnešního pohledu považovat za správnou. Rotační vývěvy používané pro tento experiment dosahují podtlaku řádově 10^{-2} Pa. S vhodně navrženým zdrojem a přijímačem zvuku je ovšem teoreticky možný přenos zvuku vlněním zředěného vzduchu dokonce i při hodnotách tlaku vzduchu, které označujeme za vysoké vakuum (řádově 10^{-5} Pa). Přesto má tento experiment v historickém vývoji vědy i ve výuce své místo a pro žáky je přesvědčivým důkazem nutnosti látkového prostředí pro vznik a šíření zvuku, i když nebývá vždy správně interpretován.

2.4 Školské měřicí přístroje pro akustická měření

K zobrazení časového průběhu zvukového kmitání se na střední škole tradičně používá buď analogový, nebo digitální osciloskop. Zvuk se přitom snímá nejčastěji pomocí dynamického mikrofону zapojeného bez předzesilovače přímo na napěťový vstup jednoho z kanálů osciloskopu. Je to velmi názorný a pro žáky většinou dobře srozumitelný způsob vizualizace časového průběhu zvukového kmitání, při kterém je možné z obrazovky osciloskopu snadno odečíst frekvenci zvukového kmitání a amplitudu výstupního napětí použitého zvukového senzoru. Tvořivý učitelé fyziky již od poloviny 90. let začali používat k záznamu akustických experimentů zvukovou kartu PC a zvuk snímali buď mikrofonom dodávaným k počítači, nebo opět dynamickým mikrofonom. Z nedostatku potřebného vybavení vznikaly ve fyzikálních kabinetech i nejrůznější svépomocně vyrobené měřicí mikrofóny s elektretovou mikrofonní vložkou vestavěnou například do pouzdra vypsaného fixu. Snímačům zvuku založených na principu elektretových kapacitních měničů a možnostem jejich využití ve výuce se proto budu detailně věnovat v kapitolách 3.3 a 3.4.

K záznamu a zobrazení časového průběhu zvukového kmitání na počítači se v současnosti na školách používají různé volně dostupné programy pro záznam a zpracování zvuku, nejčastěji program Audacity (GNU licence), pomocí nichž je možné názorně zobrazit časové průběhy různých druhů zvukového kmitání, u periodických kmitů z grafu určit periodu kmitů a u kmitů čistě harmonických i relativní velikost amplitudy. Pro určování frekvence zaznamenávaného zvuku je u digitálních osciloskopů a na počítači možné použít také funkci spektrální analýzy. Zde však je nutné hlouběji se zamyslet nad principem digitálního zpracování zvuku a použitého algoritmu pro převod signálu z časového do frekvenčního oboru a vykreslování spektra.

Pomocí zvukoměru nebo příslušného kalibrovaného modulu pro školský měřicí systém je možné ve výuce demonstrovat nebo nechat žáky samostatně provádět orientační určování hladiny akustického tlaku různých zvuků a ověřit tak experimentálně hodnoty uváděné v učebnicích [33, 36, 67, 82] a fyzikálních tabulkách [43, 44]. Mezi učiteli i v učebnicích fyziky je však stále rozšířena nesprávná interpretace přístrojem zobrazené číselné hodnoty. Jak dále v kapitolách 3.1 a 3.3 podrobněji vysvětlím, nejedná se o měření intenzity zvuku, jak učebnice shodně uvádějí, ani její velikosti, ale o efektivní hodnotu akustického tlaku v místě měření. Bohužel pro účely výuky na základních a středních školách neexistuje jednoduchá a přitom fyzikálně správná metodika měření zvuku. Je tak obtížné zajistit správnost provedení a spolehlivost výsledku takového školního „měření“.

2.4.1 ŠKOLSKÉ MĚŘICÍ SYSTÉMY PRO POČÍTAČEM ŘÍZENÉ A VYHODNOCOVANÉ EXPERIMENTY V AKUSTICE

V dnešní době je většina měření ve vědě i technické praxi uskutečňována automatizovaně pomocí počítačem řízené digitální měřicí techniky zaznamenávající do paměti obrovské množství naměřených dat. Specializovaný software pak má nestarosti vše od nastavení parametrů měřicí aparatury, přes výpočty až po grafické zobrazení výsledků měření a generování měřicích protokolů. Profesionální akustická měřicí technika a software pro zpracování zvukových měření od výrobců jako Brüel&Kjær, G.R.A.S. nebo Rohde&Schwarz samozřejmě není pro školy není finančně dostupná. Zaměřil jsem se proto na školskou měřicí techniku nabízenou dodavateli školních laboratorních přístrojů a experimentálních sestav LEYBOLD, PHYWE, PASCO a VERNIER, které ke svým univerzálním školským měřicím systémům pro počítačem řízené a vyhodnocované experimenty také nabízejí měřicí mikrofony nebo moduly zvukoměrů. LEYBOLD a PHYWE dodávají školám i kompletní sady experimentů z akustiky včetně veškerého příslušenství a podrobných návodů. Jednou z otázek zkoumání měřicích přístrojů těchto firem bylo kromě technických parametrů také ekonomické hledisko – tedy zda se takové přístroje pro akustická měření na úrovni středního stupně vzdělávání vůbec vyplatí zakoupit. V závorkách jsou proto uvedeny i orientační ceny přístrojového vybavení pro ČR aktualizované k 5. 6. 2015.

S měřicím systémem LEYBOLD Didactic CASSY jsem dlouhodobě testoval na fyzikálním institutu Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg. Systémy PHYWE *Cobra3* a *Cobra4* jsem opakovaně vyzkoušel při prezentacích firmy PHYWE na konferencích Německé fyzikální společnosti (DPG). PASCO datalogger *Xplorer GLX* s modulem zvukoměru mi zapůjčil na testování Mgr. Jan Krotký z oddělení technické výchovy katedry matematiky, fyziky a technické výchovy (KMT) ZČU. Systémy VERNIER *LabQuest* jsem měl možnost vyzkoušet na oddělení fyziky KMT ZČU a v rámci doktorandského soustředění na katedře fyziky Ostravské univerzity v Ostravě. Pracoval jsem i s cenově dostupnými měřicími přístroji jiných výrobců, zejména s ručními zvukoměry nejnižší cenové kategorie do deseti tisíc korun českých (cca. 400 EUR). Výsledky rešerše technických parametrů a návodů k použití těchto měřicích přístrojů spojené s jejich testováním následně vyústily v návrh a sestavení vlastního jednoduchého měřicího systému pro žákovské experimenty.

Typickým příkladem školního měřicího systému pro počítačově řízené a vyhodnocované experimenty je systém CASSY od německého výrobce školské měřicí techniky, firmy LEYBOLD Didactic. Jeho základem je aktuálně měřicí modul *Sensor-*

CASSY 2 (cca. 25 tis. Kč), který se připojuje k PC přes rozhraní USB 2.0 a obsahuje v sobě dva 12-bitové A/D převodníky pracující na vzorkovací frekvenci do 1 MHz. Počet vstupů je možné zvýšit spojováním modulů přes speciální z boku vyvedenou sběrnici. Každý modul je vybaven vstupními obvody (elektronicky spínanými předřadnými odpory a bočníky) pro měření stejnosměrného i střídavého napětí s amplitudou do 250 V a proudu do 3 A. Pro měření neelektrických veličin je možné připojit celou řadu senzorů přes 15-pinové konektory typu sub-D. Pro řízení a vyhodnocování měření na počítači primárně slouží software *LD CASSY Lab 2* s grafickým uživatelským rozhráním (multi-licence cca. 14 000 Kč), v němž jsou předprogramovány matematické funkce pro zpracování měření jako je efektivní hodnota (RMS), rychlá Fourierova transformace (FFT) a libovolné další funkce je možné nadefinovat vzorcem v editoru funkcí. Metodická podpora a návody k úlohám jsou dostupné na webových stránkách [29] v němčině a angličtině. Používají pojmy akustický tlak a hladina akustického tlaku v souladu s konvencí a spolu s funkcemi softwaru *LD CASSY Lab* představují pro učitele i samostatně experimentující žáky výraznou přidanou hodnotu. Česká jazyková verze softwaru ani metodická podpora bohužel dostupné nejsou.

Pro měření akustických veličin jsou určeny systémové senzory LEYBOLD *microphone S* typ 524 059 a víceúčelový měřicí mikrofon typ 586 26. LEYBOLD *microphone S* (cca. 4 tis.Kč) je sub-D adaptér s předzesilovačem, jednou vestavěnou elektretovou mikrofonní vložkou a jedním vstupním konektorem pro externí mikrofon se stejným typem měniče. *Microphone S* je možné připojit také k ručnímu měřicímu rozhraní s displejem *Mobile CASSY* (cca. 10 tis Kč) a jednovstupým kompaktním rozhráním *Pocket CASSY*, resp. *Pocket CASSY 2 Bluetooth* (cca. 5 tis. Kč). Senzorový modul je hrubě kalibrován a umožňuje tak orientační určování hladin akustického tlaku v rozsahu udávaném od 20 do 120 dB. Reálně je kvůli vysokému šumu předzesilovače možné použít modul pro měření hladin akustického tlaku až zhruba od 35 dB výše. Víceúčelový měřicí mikrofon LEYBOLD *Typ 586 26* (cca. 8 tis Kč) je 9 V baterií napájený externí modul předzesilovače se senzorem umístěným na konci 25 cm dlouhého tenkého trubicového pouzdra, který se k hlavnímu modulu připojuje pevně vyvedeným měřicím kabelem se standardními 4 mm banánky. K mobilním rozhráním CASSY tak lze měřicí mikrofon připojit jen přes modul pro měření napětí a proudu (*UIP sensor S*, cca. 4 tis Kč). Vstup je možné přepínat mezi výstupem zesíleného střídavého signálu a stejnosměrnou efektivní hodnotou (RMS) pro připojení ke stejnosměrnému voltmetru. Zesílení předzesilovače je nastavitelné potenciometrem v širokém rozsahu, kvůli čemuž však modul měřicího mikrofonu není od výrobce kalibrován.

Obdobné řešení nabízí také německá firma PHYWE v rámci stacionárního systému *Cobra3* (cca. 14 tis Kč), který opět umožňuje na 2 ze 3 analogových vstupů vybavených 12-bitovým A/D převodníkem s vzorkováním až 500 kHz připojovat senzory přes univerzální 4 mm zdířky pro banánky nebo systémové konektory (zde 9 pinové Sub-D). PHYWE k systému nabízí měřicí mikrofony s předzesilovačem *typ 03542* a *typ 03543* v obou případech napájené 9 V baterií. PHYWE *typ 03542* (cca. 11 tis Kč) se senzorem vestavěným na konci trubicového pouzdra a konektorem BNC nabízí obdobně jako LEYBOLD *typ 586 26* přepínatelný výstup předzesilovače mezi okamžitou hodnotou střídavého napětí a efektivní hodnotou. PHYWE *typ 03543* (5 000 Kč) se senzorem na flexibilním 1,5 metrovém kabelu a bez funkce efektivní hodnoty má zdířky pro 4 mm banánky. Kvůli nastavitelnému zesílení opět nejsou oba tyto měřicí mikrofony z výroby kalibrované. Pouze mobilní rozhraní *Cobra4 Mobile-Link* (6 500 Kč), resp. *USB-Link* (6 000 Kč) a *Wireless-Link* (10 500 Kč) umožňují připojení hrubě kalibrového modulu zvukoměru *Cobra4 sound level (typ 12669)* (cca. 8 tis Kč) určeného pro orientační určování hladin akustického tlaku. K záznamu měřených hodnot z mobilního rozhraní a dalšímu zpracování měření je určen software PHYWE „*Cobra4 measure*“ (multi-licence 16 000 Kč). Metodická podpora na webových stránkách [55], návody k úlohám a tištěný katalog produktů jsou opět dostupné pouze v němčině a angličtině. Díky obsahové kvalitě a konvenčnímu užití pojmů texty mohou být tyto texty nápomocny při základní orientaci v tématu jak učitelé, tak přímo žákům.

Americká firma PASCO pro měření zvuku nabízí v rámci svého školského měřicího systému hrubě kalibrováný modul pro měření environmentálních parametrů - napětí, teploty, tlaku, osvětlení a hladin akustického tlaku - *PS-2168* (8 600 Kč), zjednodušený *PS-2140* (5 400 Kč) bez vstupu pro měření napětí a jednoúčelový přesněji kalibrováný modul zvukoměru s přepínatelnými rozsahy *PASPORT PS-2109* (7 000 Kč). Je možné připojit je ke 12-bitovými dataloggerům PASCO od miniaturních jednovstupových rozhraní *PASPORT USB Link / AirLink* (3 200 Kč / 8 600 Kč) a dvouvstupovým *SPARKlink / SPARKlink Air* (7 500 Kč / 10 800 Kč), přes ruční datalogery s grafickým displejem PASCO *Xplorer GLX* (dříve cca. 14 tis. Kč) a novější *SPARK* (cca. 14 až 15 tis. Kč) až po čtyřvstupové stolní měřicí rozhraní PASCO *850* (54 000 Kč). Pro řízení a vyhodnocování měření slouží software PASCO *Capstone* (5 400 Kč, školní licence 34 000 Kč). Metodická podpora dostupná na české jazykové verzi webových stránek [52] je vzhledem ke střídavému užívání řady nestandardních pojmů jako například „úroveň hluku“, „hladina zvuku“ nebo „intenzita hluku“ značně zavádějící. Podobně i návody k úlohám a navrhovaná metodika měření v češtině, na něž je odkazováno, se z pohledu odborné akustiky jeví být diskutabilní. Uživatelské rozhraní přístrojů i návody v angličtině [51] přitom užívají standardní značení měřených veličin.

Další americká firma, VERNIER, dodává ke svým 12-bitových měřicím rozhraním *LabQuest* (dříve cca. 13 tis. Kč), *LabQuest 2* (cca. 17 tis. Kč), *LabQuest Mini* (cca. 8 tis. Kč) a *Go!Link* (3 tis. Kč) nekalibrovaný externí mikrofon *MCA-BTA* (2 300 Kč) s elektretovou mikrofonní vložkou v plastovém tubicovém pouzdře. Ruční dataloggery *LabQuest* a *LabQuest2* mají senzor zvuku vestavěný také přímo v modulu měřicího rozhraní. V obou případech se jedná o standardní elektretovou vložku bez kalibrace. Měřená veličina se v české verzi firmwaru *LabQuest2* nazývá fyzikálně zcela nesmyslně „vektor akustického tlaku“. Při měření vestavěným senzorem i po připojení externího senzoru zvuku VERNIER MCA-BTA tyto měřicí přístroje s barevným grafickým displejem zobrazují číselné hodnoty a vykreslují grafy bez jakékoli jednotky měřené veličiny. Zobrazená čísla (např. 2,543) přitom neodpovídají velikosti akustického tlaku ani hodnotově. Jedná se zjevně o hodnotu napětí na senzoru a to včetně stejnosměrné složky napájecího napětí pro elektretovou vložku (viz kapitola 3.3). Obrátil jsem se proto s dotazem a probou o nápravu na české zastoupení firmy. Bylo mi sděleno, že senzor zvuku MCA-BTA slouží pouze pro nahrávání zvuku a zobrazení (cituji) „průběhu zvuku“. Pro měření akustického tlaku je tedy nutné použít kalibrovaný zvukoměr VERNIER SLM-BTA (9 000 Kč), což je přeznačený digitální zvukoměr OMEGA HHSL-1 s adaptérovým kabelem VERNIER CB-SLM pro připojení napěťového výstupu mikrofonního předzesilovače zvukoměru k analogovému vstupu měřicích rozhraní firmy VERNIER.

Řízení a vyhodnocování měření na počítači probíhá v softwaru VERNIER *LoggerPro 3* (14 700 Kč) nebo pomocí profesionálního softwaru pro řízení a zpracování měření *LabVIEW* od firmy National Instruments. Technická data a návody k sensorům jsou dostupné jak v angličtině [86], tak v češtině [87]. Zatímco originální anglické texty používají pro popis zvuku veličinu akustický tlak a jsou celkově v souladu s konvencemi oboru, český překlad a česky psané návody k úlohám mezi sebou libovolně zaměňují pojmy akustický tlak, intenzita a hladina intenzity s dalšími nestandardními pojmy jako „*hladina hlasitosti*“ nebo „*hladina hluku*“. Česky psané návody k úlohám a doplňující učební texty dostupné přes webovou stránku českého zastoupení firmy [87] navíc obsahují řadu hrubých chyb v metodice měření senzorem zvuku a zvukoměrem a tak ani po správném pojmenování měřených veličin nepovedou ke spolehlivým výsledkům měření.

Alternativou připojení senzoru zvuku ke školskému měřicímu systému je použít pro měření samostatný ruční zvukoměr. Na rozdíl od školské měřicí techniky jsou zvukoměry z podstaty vždy kalibrované a s výjimkou nejlevnějších typů splňují alespoň třídu přesnosti 2 normy ČSN EN ISO 61672. Provedl jsem rešerši více než 30 měřicích přístrojů značek Testo,

Volcraft, CEM, OMEGA a řady dalších v cenové kategorii do 10 tisíc korun (400 EUR). Zatímco nejlevnější zvukoměry pouze zobrazují hodnotu naměřené hladiny akustického tlaku na displeji, lze vyšší modely digitálních zvukoměrů připojit k počítači přes USB rozhraní pro kontinuální záznam měření nebo následný přenos naměřených dat z vestavěné paměti zvukoměru. Při záznamu do paměti i přímém připojení k počítači se jedná o časové střední hodnoty hladiny akustického tlaku za delší časové bloky (např. 0,1 s nebo 1 s). Zaznamenávat zvukoměrem přímo časový průběh akustického tlaku bohužel není možné.

Určité typy i velmi levných zvukoměrů - například zvukoměr Digital Sound typ 8922 (cca. 2 tis. Kč) nebo CEM DT-8852 (3 400 Kč) prodávány v ČR také pod značkou Volcraft jako typ SL-451 (8 700 Kč) - však lze, podobně jako VERNIER SLM-BTA připojit přes napěťový výstup předzesilovače zvukoměru k osciloskopu, voltmetru, existujícímu školnímu měřicímu systému, či vstupu zvukové karty. Bez originálního adaptéru (např. VERNIER CB-SLM) měřicí systém připojený napěťový zdroj nerozpozná a nenakonfiguruje automatiky software pro záznam měření. Je proto potřeba zobrazení hodnot časového průběhu akustického tlaku a hladin akustického tlaku v příslušném softwaru nastavit ručně. Výstup zesíleného signálu z měřicího mikrofону zvukoměru je však standardizovaný. Horní hranici zvoleného měřicího rozsahu odpovídá efektivní hodnota výstupního napětí 1 V, poměr hladiny akustického tlaku a napětí stejnosměrného výstupu odpovídá 10 mV/dB.

Z výše uvedeného vyplývá, že pro experimenty a měření v akustice na střední i vysoké škole nepředstavují školské měřicí systémy a k nim dodávané senzory funkčně, kvalitativně ani ekonomicky nejvhodnější řešení. Jediný přínos všech čtyř zmíněných školských měřicích systémů je bezesporu v jejich univerzálnosti. Toho lze využít při současném synchronním měření více senzorů různých veličin v jednom experimentu, například při snímání akustického tlaku měřicím mikrofónem a současném snímání jeho polohy ve zvukovém poli pomocí senzorů úhlu a vzdálenosti pro následné vykreslení frekvenční a směrové charakteristiky reproduktoru, či současném měření napětí a proudu pro určení impedance měniče. Je však třeba zvážit, že každý jednotlivý senzor ke školskému měřicímu systému stojí jednotky tisíc korun, tedy zhruba tolik, co celý profesionální měřicí přístroj pro měření konkrétní veličiny. Cena školských měřicích přístrojů a senzorů odráží výrobu nízkého počtu kusů a malou konkurenci na trhu se školskou měřicí technikou. Obdobná je situace u softwaru pro řízení měřicích systémů a zpracování naměřených dat. Vybavit školu těmito měřicími systémy v dostatečném počtu pro žákovské experimenty tak je bez státních a evropských dotací finančně nad možnosti většiny českých středních škol. Významnější didaktické přínosy ani metodickou podporu oproti běžně komerčně dostupné měřicí technice jsem přitom

u školských měřicích systémů bohužel nenalezl.

V dodávaných senzorech zvuku od různých firem jsou navíc velké kvalitativní rozdíly. Měřicí mikrofony LEYBOLD *typ 58626* a PHYWE *typ 03542* jsou profesionálně zkonstruované. Umožňují tak pro výuku na střední škole dostatečně přesná relativní měření a po kalibraci externím kalibrátorem (viz kapitola 3.3) i orientační určování okamžitých hodnot akustického tlaku a hladin akustického tlaku. Díky standardizovaným konektorům je lze připojit k běžným školským měřicím přístrojům jako k osciloskopu, voltmetru nebo jako spínač k čítači pulsů. Cena těchto modulů je však neopodstatněně vysoká. Jak ukáží v kapitole 3.3, může si učitel fyziky pro použití se zvukovou kartou počítače vyrobit měřicí mikrofony srovnatelných parametrů s náklady do 100 Kč za kus, samozřejmě bez započtení svého pracovního času.

Moduly mikrofónů se systémovými konektory jsou mezi výrobci měřicích systémů zcela nekompatibilní a nelze je přímo připojit ani k žádnému univerzálnímu měřicímu přístroji jako osciloskopu nebo voltmetru. Jsou sice od výrobce údajně kalibrované, ale jedná se pouze o velmi hrubou kalibraci zřejmě jen pro střední hodnotu přenosového faktoru daného typu použité mikrofonní vložky a ne pro každý konkrétní kus jednotlivě. Kvůli umístění senzoru v rozměrném pouzdře je nelze v průběhu jejich životnosti přesněji kalibrovat běžnými akustickými kalibrátory s tlakovou komorou, a protože podle dostupné dokumentace nesplňují platné normy pro zvuková měření, jsou veškerá „měření“ s nimi pouze přibližná a potenciálně zatížená značnou systematickou chybou.

Výrazným omezením školských měřicích systémů u řady experimentálních úloh v akustice pak je to, že přes udávané vysoké hodnoty mezního kmitočtu až 1 Mnedokáží kontinuálně zaznamenávat časový průběhu měřené veličiny s potřebnou vzorkovací frekvencí. Pro vysoké vzorkovací frekvence v řádu stovek kilohertzů totiž fungují jako digitální osciloskop s omezenou vyrovnávací pamětí. Dlouhodobý kontinuální záznam je možný pouze s vzorkovací frekvencí typicky v řádu jednotek až tisíc hodnot za sekundu, což je vhodné spíše pro záznam časových středních hodnot měřených veličin. Jak se tedy ukázalo i ta nejobyčejnější vestavěná zvuková karta počítače je pro záznam zvukových měření vhodnější než moduly školských měřicích systémů. Jednak zvuková karta umožňuje kontinuální záznam s potřebnou vzorkovací frekvencí pro pokrytí akustického pásma, za druhé používá 16-bitové převodníky s řádově vyšším rozlišením než nabízejí 12-bitové školní měřicí systémy i nižším šumem analogových vstupních obvodů mikrofonníhopředzesilovače. Díky tomu je možné pokrýt celý požadovaný dynamický rozsah zvuku najednou bez přepínání měřicích rozsahů.

2.5 Empirický výzkum vstupních žákovských představ o zvuku na středním stupni vzdělávání

Jako výchozí bod návrhu výukového konceptu jsem se rozhodl zmapovat vstupní představy a též vstupní požadavky jeho budoucí cílové skupiny. Ambicí výzkumu není provést výzkum znalostí žáků v akustice ani pretest pro následné zjišťování efektivity použitých výukových metod, či srovnání výuky podle různých metod v paralelní výuce. Jedná se čistě o formativní pedagogický výzkum určený pro optimalizaci návrhu výukového konceptu. Následně by po realizaci výuky podle předloženého konceptu samozřejmě bylo možné provést na tomtéž vzorku i výzkum sumativní. To však není cílem této práce. Obsahově se výzkum zaměřuje na slovní a grafické modely zvuku, pojmy a fyzikální veličiny pro popis zvuku, případně řádový odhad jejich velikosti. V této kapitole pouze stručně shrnu nejpodstatnější závěry výzkumu následně použité pro tvorbu výukového konceptu.

V češtině jsou pojmy *intuitivní představy*, *žákovské představy*, *prekoncepty* a *prekoncepce* nejčastěji chápány jako synonyma [39, 40, 41, 42] ve významu intuitivních představ žáka o určitém jevu před tím, než se o něm začne učit ve škole. Je to dáno převážným zaměřením výzkumů žákovských představ na základní stupeň vzdělávání, někdy dokonce na žáky prvního stupně základní školy [95] nebo děti předškolního věku. Existují však i studie zkoumající přetrvávání takovýchto intuitivních představ o fyzikálních jevech až do dospělosti navzdory výuce fyziky na základním i středním stupni vzdělávání [17, 18]. Tématicky převažují studie zaměřené na výzkum představ žáků v mechanice a výzkumy chápání elektrických jevů. Zmiňované studie ovšem vyjma jednoduchých experimentů v mechanice, u nichž skutečně existuje přímá zkušenost žáků, zkoumají do značné míry spíše porozumění žáků slovním a grafickým modelům pro popis fyzikálních jevů. Například v případě elektrických jevů se tak většinou dotazování zaměřuje na porozumění modelům elektrického napětí a proudu než přímo na intuitivní představy žáků o jejich podstatě.

Vyhodnocuje se přitom vždy shoda nebo rozpor žákovských představ o určitých jevech s modelovými a pojmovými konvencemi běžné školní výuky, přičemž se implicitně předpokládá, že školní učivo je v souladu s vědeckými poznatky. Na střední škole však již žákovské představy dávno nemají charakter dětských intuitivních představ. Jedná se spíše o žákův subjektivní pohled na svět, který byl utvářen mnoha vlivy, mimo jiné právě výukou na nižších stupních vzdělávání. V tom smyslu zde vstupní žákovské představy cílové skupiny výukového konceptu chápu jako složitější komplex, v němž stejně důležitou roli jako intuitivní představy o probíraných jevech hrají i subjektivní interpretace již dříve probíraných

jevů a pojmů. Mnou užívanému pojmu *žakovské představy* by u žáků střední školy tak podle názvosloví obecné didaktiky blíže odpovídal pojem *žakovské koncepce učiva* jakožto nadřazený pojem pro žakovské prekoncepce a žakovo pojetí předcházejícího učiva.

Z pohledu tvorby výukového konceptu rozlišuji tři roviny vstupních představ žáků o zvuku: 1) zapamatované školní učivo; 2) osobní zkušeností samostatně osvojené vědomosti; 3) hluboce zakořeněné představy o světě. Žakovské představy na úrovni znovuvybavení si zapamatovaných informací jsou nejméně zvnitřnělé. Jedná se o pouhou znalost slovních pojmenování jevů, o vybavení si zapamatovaných pojmů a veličin bez uvědomění si hlubší souvislostí. V případě zjištění zjevných rozporů mezi pojmenováním jevů žáky a vědeckou konvencí by teoreticky stačilo žákům tyto rozpory slovně vysvětlit a zavést standardní pojmenování. Navržený výukový koncept však nemá za cíl jen pasivní substituci původních představ žáků jejich přejímáním představ na povrchní úrovni pojmového učení. Je tudíž nutné nesoustředit se jen na pojmenování samotné, ale na podstatu toho, co pojmy označují, na jejich fyzikální význam.

Hlubší úroveň žakovských představ je dlouhodobě utvářena praktickými zkušenostmi a prožitky. Formování žakovských představ na této úrovni ve fyzice vyžaduje možnost si zkoumaný jev v klidu důkladně vyzkoušet. Průběžné přehodnocování takto získávaných žakovských představ a zkušeností je pak nejčastěji založené na produktivním poznatkovém konfliktu. Při něm by mělo v ideálním případě dojít u žáka k samostatné revizi dosavadních znalostí a zkušeností. Je však třeba zároveň vytvořit žákům ve škole vhodné podmínky pro samostatnou práci a samostatné uvažování. Pak může žák sám objevovat vlastnosti fyzikálních jevů, souvislosti mezi nimi a vytvářet si své individuální modely fyzikálních jevů. Na této úrovni je možné cíleným vystavením žáků určitým situacím a z nich plynoucímu poznatkovému konfliktu doplněným sokratovským rozhovorem o zkoumaných jevech přivést žáky k revizi jejich vstupních představ o vyučovaném tématu.

Teprve dlouhodobým opakovaným samostatným potvrzováním zkušeností v praxi vznikají hluboce zvnitřněné představy žáka o sledovaném fyzikálním jevu. Taková představa se pak stává součástí jeho základního pojetí světa a vnímání jeho role v něm. Zde žakovské představy předcházejí v sebepojetí žáka jako experimentátora. Na základě výše uvedených předpokladů volím učivo a výukové metody konceptu. Demonstrační experimenty mají převážně motivační charakter, zatímco žakovské experimenty cíleně vytváří situace pro získání vlastních zkušeností žáků a vytvoření hlubších znalostí. Projektová výuka pak vytváří podmínky pro tvůrčí aplikaci a dlouhodobé zvnitřnění všech takto získaných vědomostí.

2.5.1 PŘEDVÝZKUM A NÁVRH EMPIRICKÉ STUDIE

Při výzkumu vstupních představ žáků jsem použil tři vzájemně se doplňující metody empirického výzkumu. Metodu participačního pozorování činnosti a metodu vedení strukturovaných rozhovorů se žáky jsem zvolil pro předvýzkum vedoucí následně k návrhu rozsáhlejšího dotazníkového šetření, abych výsledky kvalitativně vyhodnocovaných metod podložil alespoň řadovými údaji o četnosti zastoupení žákovských představ u reprezentativního vzorku žáků.

Předvýzkum žákovských představ o zvuku probíhal metodou přímého dotazování žáků v průběhu projektové výuky realizované na žákovském výzkumném centru ESFZ Erlangen [3] a to celkem u 15 žáků zabývajících se projekty z akustiky (viz příloha E1). Rozhovory byly vedeny jako neformální polostrukturované heuristicko-sokratovské rozhovory. Písemný záznam pozorování a odpovědí z rozhovoru byl učiněn až posléze, aby nenarušoval přirozený běh komunikace s žáky a nevedl ke ztrátě jejich důvěry. Kromě slovní odpovědi žáci během rozhovorů na požádání též kreslili, jak si představují vznik, šíření zvuku od jeho zdroje k posluchači a jimi zkoumané zvukové jevy. Nejčastější slovní formulace žáků a jimi použitá grafická zobrazení zvuku jsem následně použil v návrhu dotazníku (viz příloha A1). Základními otázkami pokládanými v rozhovoru všem žákům, byly otázky: „*Co je to podle tebe zvuk?*“, „*Jak bys objektivně popsal šíření zvuku ve vzduchu?*“, „*Jakou fyzikální veličinou bys popsal zvuk?*“, „*Co cítíš, když dáš dlaň před reproduktor?*“. Dále to byly otázky cíleně zaměřené na konkrétní experiment jako například „*Jak se pohybuje kmitající struna v čase?*“ nebo „*Jak se pohybuje vzduch v jednotlivých fázích podélného kmitání?*“.

Již během předvýzkumu jsem zjistil, že žáci užívají pro objektivní hodnocení zvuku nejčastěji veličiny *intenzita* („*Intensität*“) a nepřesný pojem „*hladina zvuku*“ („*Schallpegel*“), zatímco pro hodnocení slyšitelných vlastností zvuku nejčastěji volí veličinu *hlasitost zvuku* („*Lautstärke*“, v překladu doslova „síla zvuku“). Pojem „*intenzita*“ přitom však žáci užívají v obecnějším smyslu ve významu „jak mnoho“, ne ve smyslu jak je intenzita zvuku ve fyzice definována (viz kapitola 3.1).

Doplňující zúčastněné pozorování činnosti žáků bylo po obsahové stránce zaměřeno zejména na spontánně vznikající návrhy projektů, sledování jejich průběhu, na verbální komunikaci mezi žáky a jimi vytvořené nákresy experimentů a další grafické projevy. Při zúčastněním pozorování ani při rozhovorech žáci nevěděli, že jsou sledováni a dotazováni nejen za účelem metodického vedení projektů, ale též za účelem pedagogického výzkumu.

Například na otázku „Jak reproduktor vytváří zvuk?“ položenou žákům před jejich zkušeností z experimentu byly nejčtenější odpovědi: „reproduktor vyzařuje zvuk“ či „reproduktor vyzařuje zvukovou energii“. Tomu odpovídaly i obrázky znázorňující vlnoplochy a paprsky. Odpovědi na přímý dotaz k experimentu: „Co cítíš, když dáš dlaň před reproduktor“ obsahovaly však častěji formulace: „zvuk tlačí na ruku“, „cítím foukání“, „cítím, jak se hýbe vzduch“. Při vzájemné komunikaci žáci používali pro hodnocení zvuku nejčastěji přídavná jména a příslovce ve významu síly a množství a jejich zpodstatnělé verze jako neformální označení fyzikálních veličin. Pojmy tlak nebo hustota vzduchu však spontánně žádný z žáků nepoužil. Když jsem je následně návodními otázkami dovedl až k uvědomění si, že vlivem kmitání vzduchu současně dochází také k lokálnímu stlačování a rozpínání vzduchu, bylo to pro většinu z nich překvapením. Po různě dlouhé fázi začlenění tohoto poznatku do jejich pohledu na sledované jevy však žáci tento koncept vždy přijali. Významný vliv na to měla zejména samostatná realizace vlastního experimentu, měření pomocí senzorů tlaku a zamyšlení se nad principem jejich funkce.

2.5.2 PROVEDENÍ DOTAZNÍKOVÉ STUDIE

Na základě rozhovorů s žáky byl navržen jednoduchý dotazník obsahující 15 hlavních otázek a 2 otázky doplňující. Dotazník je uzavřeného typu, přičemž respondent musí označit vždy pouze jednu ze 4 až 8 nabízených možností. Obsahově se dotazník zaměřuje zejména na žákovské intuitivní modely zvuku, přisuzování významu fyzikálním veličinám pro popis zvuku a na žákovské představy o vlastnostech lidského sluchu. Dotazník nezjišťuje znalosti žáků, ale snaží se už formulací otázek zaměřit spíše na jejich zažité představy, aniž by posuzoval jejich „správnost“ z pohledu školské výuky. Žádná odpověď tak není správná či špatná. Část otázek je motivovaná reálnými situacemi a nutí žáky zapojit intuici, odhad, to čemu říkáme zdravý rozum. Volba odpovědi žáků tak odráží vliv jejich dosavadní zkušenosti a chápání okolního světa a ne pouze povinné školní výuky.

Dotazníkové šetření bylo realizováno v květnu 2013 na Střední průmyslové škole elektrotechnické v Plzni. Účastnilo se ho 212 respondentů ve věku 15 až 19 let. Skupina, na níž bylo dotazníkové šetření provedeno, zahrnovala žáky celkem 9 tříd z prvních třech ročníků střední školy. V 1. ročníku se jí účastnilo 61 žáků (29% vzorku) ze tříd 1.A, 1.B, 1.G; 2. ročník reprezentovalo 76 žáků (36% vzorku) ze tříd 2.H, 2.I, 2.L a 3. ročník 75 žáků (35% vzorku) ze tříd 3.A, 3.I, 3.K.

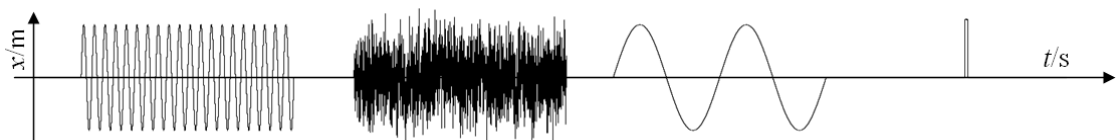
Volba a způsob formulace otázek v dotazníku se snaží kompenzovat potenciálně nízkou homogenitu skupiny. Ta je způsobena zejména rozdílným studijním zaměřením

jednotlivých tříd a školním ročníkem. Je nutné si uvědomit, že i při omezení se na jediný ročník jediného studijního oboru žáci na střední školu přicházejí z různých základních škol, z různě vzdělaných a profesně zaměřených rodin a mají různé zájmy. Studovaný ročník z pohledu homogenity skupiny zde hraje významnou roli proto, že fyzikální akustika je zařazena do výuky fyziky ve druhém ročníku střední školy a žáci touto výukou budou zřejmě silněji ovlivněni než žáci třetího ročníku, zatímco žáci prvních ročníků nejsou středoškolskou výukou akustiky zatím ovlivněni vůbec. Naopak žáci prvních ročníků by měli být nejvíce ovlivněni výukou akustiky ještě ze základní školy.

Vyhodnocení nejčtenějších odpovědí na jednotlivé otázky se snaží před započatím výuky podle připravovaného konceptu podchytit hlavní trend žakovských představ kvůli optimalizaci konceptu s ohledem na cílovou skupinu. Použitý dotazník k výzkumu představ studentů středních škol o zvuku verze 2013 se nachází v příloze A1 na konci disertační práce, grafy vyhodnocení v přílohách B1 až B22. Tabulky zdrojových dat a tabulky vyhodnocení se z důvodu velkého rozsahu nacházejí na přiloženém CD-ROM v adresáři „Dotazníkové šetření SPŠE“. Vícenásobné odpovědi a vzájemně si odporující odpovědi u podotázek jedné otázky byly vyřazeny z důvodu pravděpodobného nepochopení otázky dotazníkového šetření, respektive zjevné nepozornosti. Vzhledem k absenci odpovědí na některé otázky nebo právě vyřazení vícenásobných odpovědí proto nemusí vždy dát součet odpovědí na všechny možnosti celkový počet respondentů, tedy 212, respektive 100% žáků v relativním vyjádření.

2.5.3 VÝSLEDKY DOTAZNÍKOVÉHO ŠETŘENÍ

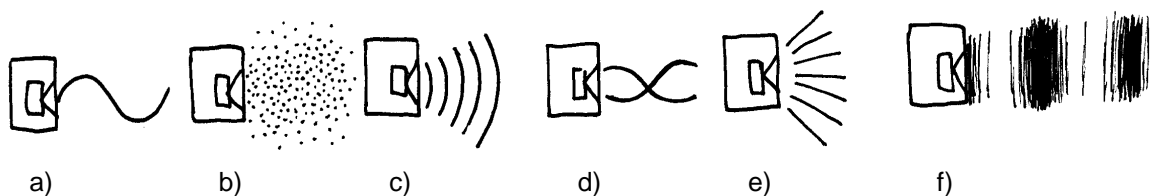
Otázka 1 tvořená podotázkami **1.1** až **1.4** zkoumá porozumění žáků grafickému znázornění časového průběhu kmitání. Žáci mají za úkol přiřadit názvy zvuků ke čtyřem grafům časového průběhu výchylky kmitání, zobrazených podobně jako na obrazovce osciloskopu. Časové měřítko je přitom pro všechny časové průběhy stejné. Jedná se o harmonické průběhy čistého tónu 100 Hz, čistého tónu 1 kHz, časový průběh ideálního jednotkového impulsu a širokopásmového šumu. Otázka se zaměřuje na rozpoznání zvuků jak na úrovni pojmového učení, tak svou grafickou podobou i na předchozí praktickou zkušenost žáků a hlubší chápání vlastností zvuků tří uvedených kategorií: Tón, šum, impuls.



Obr. 3: Umějí žáci pojmenovat časové průběhy základních typů zvuků? Zdroj: Vlastní

Celkem 43% žáků, přiřadilo grafickému zobrazení názvy zvuků ve shodě s pojmovou konvencí. Přitom nejvíce z nich rozpoznalo alespoň u jednoho z grafů harmonický časový průběh čistého tónu. Tón 1 kHz identifikovalo téměř 88%, tón 100 Hz 72% žáků, oba harmonické průběhy současně však rozpoznalo a jako tóny označilo už pouze 64% žáků. 83% žáků rozpoznalo časový průběh šumu a pouze 15% ho označilo jako tón. Časový průběh impulsu v grafu identifikovalo 71% žáků. Ukazuje se, že rozpoznání vztahu mezi periodou a frekvencí dělá problémy žákům všech zúčastněných ročníků. Z koincidence odpovědí vyplynulo, že 21% dotazovaných žáků sice identifikovalo oba časové průběhy tónů, ale zaměnilo mezi sebou jejich frekvenci. 43% žáků identifikovalo časové průběhy obou tónů a současně jim přiřadilo frekvenci v souladu se zavedenou konvencí. Je ovšem oprávněné předpokládat, že řádově až polovina z těchto 43% všech žáků jen uspěla při náhodné volbě jedné ze dvou možností. Zhruba dvě třetiny ze 64% všech žáků, kteří identifikovali harmonický průběh tónu, si tak vztah mezi periodou a frekvencí zřejmě neuvědomuje, a pouze zhruba třetina z oněch 64%, tedy zhruba jen něco přes 20% všech žáků, ho skutečně zná a umí použít. Z výsledků odpovědí žáků vyplývá, že je ve výuce nutné věnovat dostatečný prostor grafickému zobrazení časových průběhů kmitání různých zvuků při jejich současném poslechu, dříve než budou pro vizualizaci vlastností zvuku zavedeny další složitější grafy.

Otázka 2 zjišťuje porozumění žáků běžně užívaným grafickým zobrazením pro šíření zvuku ve vzduchu pomocí jednoduchých obrázků, jaké může snadno nakreslit vyučující na tabuli a žák do sešitu. Jedná se o zobrazení reproduktoru a jím vyvolaného zvukového vlnění vzduchu. Obrázky přitom snáze než slovní dotazování zpřístupňují intuitivní představy žáků o vzniku a šíření zvuku a je možné z nich získat informace o tom, jaký model zvuku je pro žáky nejsnáze představitelný.



Obr. 4: Obrázky k určení žáky preferovaného grafického modelu zvuku. Zdroj: Vlastní

Při slovním popisu mechanického vlnění se žákům mnohdy pletou pojmy příčné a podélné vlnění. Na obrázcích a) a d) je proto zobrazen zvuk symbolicky jako vlnění příčné, na obrázku d) navíc pomocí symbolu užívaného ve výuce pro příčné stojaté vlnění. Tato zobrazení zvuku zvolili v obou dvou případech jen dva žáci. Obrázek b) zastupuje korpuskulární model zvuku v podobě chrlení zvukových částic. Tento model zvolili 4 žáci

(2%). Na obrázku c) má zvuk podobu vlnoploch užívaných běžně jako symbolický piktogram pro zvuk. Obrázek f) představuje jednoduše načrtnutý tlakový model zvuku. Podle očekávání volilo zobrazení zvuku pomocí zjednodušených vlnoploch na obrázku c) 76% všech žáků. Je ovšem problematické interpretovat vlnoplochy jako vizualizaci tlakových vln. V náčrtku k odpovědi f) naznačené zhuštění a zředění lépe ilustrující model tlakové vlny zvolilo 14% dotazovaných žáků. Paprskový model ukrývající se v možnosti e) zvolilo jako podle nich nejvhodnější zobrazení zvuku ve vzduchu 6% žáků.

Otázka 3 zkoumá pochopení významu veličiny rychlost zvuku. Hodnotu velikosti rychlosti zvuku ve vzduchu zhruba 340 metrů za sekundu znají žáci nazpaměť již ze základní školy. Jde o to, zda ví, co vlastně veličina označovaná jako rychlost zvuku v konkrétním případě znamená. Podle odpovědí dotázaní žáci obtížně rozlišují mezi pojmy rychlost kmitání (např. zvucícího objektu nebo sledovaného elementu látkového prostředí), které reprezentují odpovědi a), b), c) a rychlostí šíření zvukového vlnění prostředím ve smyslu translačního pohybu zastoupenou odpověďmi d), e), f). Celkově zvolilo některou z odpovědí d), e) nebo f), skoro 77% dotázaných žáků. Nejvíce, konkrétně 36% žáků, volilo možnost e), tedy že „zvukové částice se pohybují od reproduktoru k posluchači vzduchem rychlostí 340 m/s“. Dalších 11% žáků volilo možnost d), že „molekuly vzduchu se pohybují od reproduktoru k posluchači rychlostí 340 m/s“. Odpověď f) zastupující zde tlakový model zvuku formulací „tlakové změny ve vzduchu se pohybují od reproduktoru k posluchači rychlostí 340 m/s“ si vybralo 29% žáků. Zhruba čtvrtina žáků (23%) však podle volby odpovědi a), b) nebo c) chápe pojem rychlost zvuku ne jako rychlost šíření, ale jako rychlost kmitání. 13% žáků tak zvolilo odpověď b), že „molekuly vzduchu kmitají kolem rovnovážné polohy rychlostí 340 m/s“, 7% žáků odpověď a), že „membrána reproduktoru kmitá ve vzduchu rychlostí 340 m/s“ a 3% žáků c), tedy že „oblasti lokálního přetlaku ve vzduchu kmitají kolem rovnovážné polohy rychlostí 340 m/s“.

Zároveň je v odpovědích b), d) a e) obsažena informace o preferovaném modelu zvuku. Celkem v otázce číslo 3 volilo 60% žáků odpověď obsahující pojmy *částice*, *atomy* nebo *molekuly*, 36% žáků dokonce formulaci „fiktivní zvukové částice“. Ve vědě historickým vývojem překonaný a ve výuce aktivně potlačovaný korpuskulární model zvuku tedy evidentně patří k významným přirozeným představám žáků. Představu o šíření zvuku analogicky k pohybu hmotného objektu nahrazuje v nauce o mechanickém vlnění model šíření určité vlastnosti látky, v případě podélného vlnění vzduchu konkrétně šíření *stlačení* látky. S oběma modely zvuku je proto nutné žáky podrobněji seznámit a ve výkladu od sebe oba modely odlišovat podobně jako se to běžně děje ve výuce optiky. Dále se jeví jako nutné

jasně pojmenovat a jednoznačně tak odlišit tři různé veličiny: *rychlost kmitání zdroje zvuku*, *rychlost kmitání elementů látkového prostředí* a *rychlost šíření tlakových vln* v látce.

Otázka 4 se vrací k popisu zvuku jako kmitání vzduchu a zaměřuje se na představu žáků o tom, co můžeme při popisu spojitého prostředí k nespojitému modelu v případě vzduchu považovat za kmituschopné elementy látkového prostředí. 58% žáků za kmitající elementy, jejichž oscilačním pohybem se přenáší zvuk, považuje přímo elementární částice hmoty, tedy ve shodě s texty učebnic *atomy* a *molekuly*. 44% žáků se domnívá, že se jedná o jednotlivé molekuly vzduchu, 14% volilo jednotlivé atomy, 18% si myslí, že elementy prostředí jsou *fiktivní zvukové částice*, 5% zvolilo možnost *prachové částice*. Možnost c) abstraktní *objemové výseče vzduchu* je mezi odpověďmi zastoupena 9% odpovědí, možnost f) *myšlené výseče prostoru* bez vazby na hmotu 8% odpovědí. Jak jsem byl posléze upozorněn, jsou však v této otázce pro žáky pravděpodobně obtížně srozumitelné pojmy *objemová výseč vzduchu* a *výseč prostoru*, čímž došlo i ke zkreslení výsledku. Přesto se nedomnívám, že celkem 17% žáků by tyto dvě odpovědi volilo pouze zcela náhodně bez snahy o porozumění použité formulaci. Na základě toho jsem přesvědčen o tom, že mohu v konceptu používat pojem elementu látkového prostředí jako určitou objemovou výsečí vymezené množství látky v klidovém stavu. Je ovšem nutné takovýto pružně-hmotný element co do jeho fyzikálních vlastností dále velmi obezřetně definovat.

Otázka 5 se zaměřuje na odhad vlnové délky zvukového vlnění ve vzduchu pro čistý tón o frekvenci 1 kHz. Zde pouze 18% žáků zvolilo ve shodě s konvencí vlnovou délku zhruba 30 cm. 25% žáků zvolilo možnost 1 m, 22% 1 mm, 11% 10 cm a 8% 1 cm. Více než polovina žáků si tedy podle tohoto výsledku neuvědomuje vztah mezi frekvencí a vlnovou délkou. Volba odpovědí a), c), e), a g) poukazuje na to, že žáci předpokládají závislost vlnové délky pouze na frekvenci a neuvědomují si, že v něm hraje roli také rychlost zvuku. Jen 32% dotázaných žáků tak pravděpodobně tuší, že ve vztahu mezi frekvencí a vlnovou délkou vystupuje další parametr. Pro zvýšení výpovědní hodnoty odpovědí u této otázky by však zřejmě bylo vhodné doplnit i jiné číselné hodnoty odpovědí. Podstatným závěrem pro návrh výukového konceptu však je, že bez podrobnějšího vysvětlení nelze argumentaci s vlnovou délkou používat a že pro lepší pochopení obsahu tohoto pojmu je nezbytně nutné žákům názorně demonstrovat závislost vlnové délky zvuku ve vzduchu pro různé frekvence.

Otázka 6 se zaměřuje na porozumění vztahu mezi amplitudou výchylky zvukového kmitání a veličinami popisujícími výsledný zvuk v jednoduchém případě zdvojnásobení výchylky kmitů. Podle vyhodnocení dotazníku se 30% žáků domnívá, že při zdvojnásobení amplitudy výchylky kmitání dojde ke *zdvojnásobení hlasitosti zvuku* a že tudíž mezi

výchylkou kmitání zdroje zvuku a vnímanou hlasitostí zvuku existuje přímá úměrnost. 25% žáků se domnívá, že se *zdvojnásobí výška zvuku*, což ukazuje na nepochopení významu veličiny výška tónu. 19% žáků zvolilo možnost intenzita zvuku, 14% *rychlost kmitání elementů prostředí*, 6% *výkon zdroje zvuku* a předpokládají tedy v případě uvedených veličin lineární závislost na amplitudě výchylky kmitání. Tu je však v přiblížení (viz příloha C2) možné předpokládat pouze pro *tlakové změny v místě měření*, které zvolila jako odpověď pouze 3% žáků. Je tedy nutné závislost mezi výchylkou kmitání, akustickým tlakem a člověkem vnímanou hlasitostí zvuku žákům názorně demonstrovat a důkladně jim vysvětlit vztahy mezi všemi zmíněnými akustickými veličinami.

Otázky 7 a 8 se zaměřují na porozumění parametrům a vztahům určujícím akustické vlastnosti uzavřených prostorů. 55% žáků se ve shodě s konvencí domnívá, že nejdéle bude doznívat zvuk v tělocvičně, což vychází převážně z praktické zkušenosti žáků. 22% žáků má zkušenost s dlouhým dozníváním zvuku na schodišti domu. Zhruba čtvrtina žáků si však tento jev neuvědomuje a volila místnosti se silným ale krátkým dozvukem jako koupelnu (10% žáků) nebo prostory s krátkým slabým dozvukem či místa bez slyšitelného dozvuku. Zkušenosti většiny žáků je tak možné dobře využít a na jejím základě formulovat závislost doby dozvuku na velikosti místnosti a akustické pohltivosti stěn. Znalost vlivu pohltivých materiálů na dobu dozvuku a subjektivně vnímanou hlasitost zvuku v místnosti pak detailněji následně zjišťovala **otázka 8**. Podle výsledků se ve shodě s konvencí 44% žáků se domnívá, že při stejné ploše a tloušťce pohlí nejvíce zvuku porézní materiály s otevřenou buněčnou strukturou jako je pěnový polyuretan a dalších 19% zvolilo vláknité materiály s vysokou objemovou hustotou vláken jako polyesterové rouno. 15% žáků označilo za podle nich nejvíce zvukově pohltivý materiál pěnový polystyren. Celkem 21% žáků zaměřuje význam pojmů pohltivost a neprůzvučnost a jako odpověď tak vybralo beton (8% žáků), ocel (7%) nebo masivní dřevo (6%).

Dvojice otázek 10 a 11 se zaměřuje na představu žáků o základních vlastnostech lidského sluchu. **Otázka 10** zjišťuje, s jakým nejmenším časovým odstupem podle žáků lidský sluch ještě rozliší dva po sobě následující zvuky. V učebnicích pro základní i střední školu je žákům na základě experimentu se slyšitelností pauzy mezi přímým zvukem a ozvěnou bez experimentálního prokázání vysvětlováno, že to je řádově 0,1 sekundy, tedy 100 milisekund. Tuto odpověď zvolilo 25% žáků. Tři čtvrtiny žáků se však domnívá, že časové rozlišení sluchu je ve skutečnosti mnohem lepší. Že to jsou alespoň setiny sekundy, se přitom domnívá 35% žáků. 22% žáků zvolilo ve shodě s konvencí jako nejmenší slyšitelný odstup dvou zvuků řádově tisíce sekundy. 8% bylo pro desetitisíciny sekundy, 6% pro

stotisíciny sekundy, 2% naopak pro jednotky sekund. Je ovšem sporné, zda si žáci skutečně uvědomují časové rozlišení svého sluchu a zda mají vůbec představu o dějích v časovém měřítku menším, než jsou desetiny sekundy.

Následující **otázka 11** zjišťovala, v jaké frekvenční oblasti je sluch zdravého člověka nejcitlivější. 24% žáků se domnívá, že to jsou nejvyšší slyšitelné frekvence v intervalu 10 až 20 kHz, 19% žáků volilo interval 5 až 10 kHz. 17% žáků volilo možnost 250 Hz až 1 kHz a pouze 14% žáků si uvědomuje, že to je frekvenční oblast 3 až 5 kHz. Méně žáků (9%) pak zvolilo už jen pásmo 1 až 3 kHz. 14% žáků přitom považuje frekvenční závislost citlivosti sluchu za silně individuální. Většina žáků (83%) se podle toho domnívá, že vlastnosti sluchu zdravého člověka je možné kvantifikovat pomocí objektivních parametrů. Experimenty spojené s otázkami 10 a 11 proto jsou dále součástí workshopů, aby si tak žáci mohli jak časové rozlišení, tak závislost citlivosti sluchu na frekvenci podnětu prakticky ověřit.

Další skupina otázek se zaměřuje na porozumění významu fyzikálních veličin pro popis zvuku. Patří do ní už **otázka 9**, která zkoumá, jakou veličinu podle dotazovaných žáků snímá a zobrazuje na stupnici nebo displeji přístroj pro měření zvuku zvaný zvukoměr. 49% žáků si přitom myslí, že zvukoměr měří hlasitost zvuku. Hlasitost zvuku je tedy podle představy téměř poloviny žáků možné měřením určit jako objektivní veličinu. 30% žáků se domnívá, že zvukoměr měří intenzitu zvuku, což je výsledek daný z velké části i vlivem výuky podle stávajících učebnic fyziky (viz kapitola 2.2). Pouze 8% žáků si uvědomuje, že zvukoměr snímá a měří v podstatě jen kolísání tlaku v místě měření. 4% žáků se domnívá, že zvukoměr měří přímo akustický výkon zdroje zvuku, 4% rychlost kmitání elementů prostředí a 3% výchylku kmitání elementů prostředí.

Otázka 12 se zaměřuje na přisuzování fyzikálního významu číselným hodnotám udávaným v decibelech. Polovina nabízených odpovědí, konkrétně možnosti a), c) a f), obsahuje explicitně označení jednotka, druhá polovina odpovědí je formulována jako poměrné vyjádření. Podle výsledků vyhodnocení dotazníku se 54% žáků domnívá, že decibel je *jednotkou hlasitosti zvuku*. 19% žáků považuje decibel za *jednotku intenzity zvuku*. Celkem 74% dotázaných žáků chápe decibel jako fyzikální jednotku, což sice shodně žákům sugerují v současnosti užívané učebnice pro základní a střední školy, je to však jednoznačně v rozporu se samotnou podstatou tohoto vyjádření. Pouze zhruba čtvrtina žáků (23%) zvolilo odpovědi obsahující poměrné vyjádření, (konkrétně 17% *míru síly zvuku*, 5% *relativní vyjádřením nějaké veličiny* a 1% *stupeň škodlivosti hluku*). Důsledky výukou opakovaně potvrzované představy žáků, že decibel je běžná fyzikální jednotka, je nutné si dobře uvědomit a pomoci žákům cílenými experimenty a vysvětlením významu poměrného vyjádření jejich mylnou

vstupní představu překonat. Právě pochopení významu logaritmického poměrného vyjádření akustických veličin je totiž klíčem k jednoduchému udávání výsledků měření v akustice.

Otázka 13 se váže k zobrazení grafu spektrální analýzy, známého žákům z displejů hudebních přehrávačů. Jedná se o sloupcový graf, neboli histogram, používaný ke znázornění poměrů zastoupení jednotlivých kategorií velkého souboru dat vyjádřených výškou jednotlivých sloupců. V **podotázce 13.1** se žáci mají rozhodnout, která z uváděných veličin je v případě spektrální analýzy zvuku na vodorovné a která na svislé ose grafu. 42% žáků se domnívá, že na vodorovné ose grafu spektrální analýzy je *čas* a že tedy graf zobrazuje nespojitý časový průběh nějaké veličiny. To ve shodě se závěry vyhodnocení výsledků odpovědí z prvního úkolu dotazníku naznačuje, že významná část žáků si dostatečně neuvědomuje fyzikální význam a vlastnosti časového průběhu veličin popisujících kmitání. 37% žáků uvedlo v souladu s konvencí, že na vodorovnou osu je vynášena *frekvence*. Jelikož dalších 11% nepřímo vyjádřilo shodné chápání závislosti zobrazené v grafu volbou odpovědi e) *barva zvuku*, zdá se z výsledků, že celkově zhruba polovina cílové skupiny žáků (48%) intuitivně chápe význam pojmu spektrální analýza. **Podotázka 13.2** zkoumá, jaký fyzikální význam má výška sloupců v grafu spektrální analýzy. Z výsledků dotazování vyplývá, že podle poloviny žáků (51%) to je intenzita, podle 41% hlasitost. 4% žáků se domnívá, že to je mechanická výchylka, 2% zvolila tlak. Zbývajících 2% žáků se přiklonilo k možnosti, že v uvedeném sloupcovém grafu je uvedena jen relativní četnost bez fyzikálního významu.

Otázka 14 zjišťuje žákovské představy o principu fungování algoritmů pro redukci zvukových dat. Polovina nabízených odpovědí, konkrétně a), e) a f) přitom obsahuje subjektivní parametr pro zpracování zvuku kódérem. Někteří z těchto tří odpovědí zvolilo 61% žáků. 37% žáků se naopak rozhodlo pro odpověď b), c) nebo d) v níž figuruje objektivní parametr zvuku. Nejvíce, téměř 47% žáků, se domnívá, že kódér MP3 sníží objem dat tak, že z nahrávky *odstraní neslyšitelné zvuky*, 19% žáků si myslí, že snížení objemu dat je způsobeno tím, že kódér MP3 *uloží jen frekvence, na kterých je nějaký zvuk*, což jsou vysvětlení často uváděná v populárně naučných textech. 13% žáků se přiklonilo k výpovědi, že kódér MP3 *popisuje zvuk méně přesně tam, kde to není slyšet*, což nejvíce odpovídá konvenci. 10% žáků zvolilo odpověď, že kódér MP3 *odebere vysoké frekvence*, což v extrémním případě nejnižších povolených datových toků může skutečně nastat, ale není to v principu typické. Necelých 9% žáků si myslí, že kódér MP3 *využívá opakování periodických zvuků*.

Otázka 15 vychází ze způsobu, jakým informují média o protihlukových opatřeních. Žáci se mají rozhodnout, jak se podle nich sníží subjektivně vnímaná hlasitost, pokud se hluk způsobený dopravou sníží o 2 decibely z 85 dB na 83 dB. 40% žáků se v souladu s výsledky experimentů domnívá, že *slyšitelný rozdíl bude jen nepatrný*. 20% žáků si myslí, že *každý člověk bude změnu hlasitosti vnímat jinak*; 19% že subjektivně vnímaná *hlasitost hluku se sníží asi na polovinu*; 10% že poté subjektivně *hluk bude asi desetkrát méně hlasitý*. 10% žáků zvolilo odpověď „*nebude to vůbec slyšitelný rozdíl*“ a pouze jediný žák se přiklonil k možnosti, že *nebude slyšet už žádný hluk*.

Aby bylo jasnější, na základě čeho převážně žáci v dotazníku volili odpovědi, doplnil jsem dotazník **otázkou 16** nabízející 6 možností pro identifikaci dominantních vlivů na vstupních žakovské představy o zvuku. Zde žáci ve většině případů zakroužkovali více než jednu odpověď a proto byly vícenásobné odpovědi u každého žáka vyhodnocovány s váhou odpovídající počtu konkrétním žákem zvolených možností u této otázky, například 1/2, 1/3 až 1/6 tak, aby byly odpovědi každého žáka celkově normované na hodnotu 1 a nedošlo tak ke zkreslení statistiky. Přes 7% podíl na volbě odpovědi měla výuka na základní škole. Tato odpověď se objevovala podle očekávání zejména u prvních ročníků a poté u třetích ročníků. Celkově 23% podíl měla podle toho výuka na střední škole, podle očekávání nejvíce u druhých ročníků, kam je výuka akustiky zařazena. Ve třídě 2.L to bylo dokonce 50% žáků. 12% podíl mají podle odpovědi informační média, jen necelá 4% četba odborné literatury.

Více než 44% podíl na volbě odpovědi by měl mít převážně odhad. Předpokládám, že se nejednalo o čistě náhodnou volbu, ale právě spíše o intuitivní volbu odpovědi. V tomto smyslu je však obtížné interpretovat odpovědi čistě jako intuitivní představy. Zcela vyloučit náhodné odpovědi, nepochopitelné otázkám nebo objektivně určit podíl těchto jevů na celkové rozložení odpovědí není ze získaných dat možné. Poměr odhadu vůči znalostem z výuky na základní a střední škole se jeví být největší pro první ročník (15% ku 5%), ve druhých ročnících klesl zejména ve prospěch aktuálně absolvované výuky tématu tak, že jsou si zhruba rovny (14% a 13%). Ve třetím ročníku opět lehce převažuje vliv odhadu při volbě odpovědi nad vlivem školní výuky (16% a 13%).

Poslední část dotazníku zjišťuje preference cílové skupiny a využívá k tomu šestistupňovou škálu od 0 do 5, kde 0 znamená žádný a 5 nejvyšší možný zájem o nabízené téma výuky. Maximální zájem u všech žáků o konkrétní téma by tak znamenal 1060 bodů. V popředí zájmu žáků podle celkového počtu přidělených bodů jsou témata digitální zpracování zvuku (734 bodů), snímání a nahrávání zvuku (696 bodů) a datová komprese MP3 (672 bodů). U těchto tří témat bylo zároveň nejčastější hodnocení 5 body, kdy o témata ve

výše uvedeném pořadí projevilo maximální zájem (5 bodů) 77, 60 a 67 žáků. Následují téma využití ultrazvuku (557 bodů), lidský hlas a řeč (468 bodů), hluk a jeho měření (454 bodů) byla nejčastěji hodnocena 3 body. Téma lidský sluch získalo 446 bodů s vyrovnaným zastoupením zájmu od 0 do 3 bodů a klesajícím podílem vyššího zájmu, hudební nástroje 406 bodů s výrazným zastoupením nulového zájmu (79 žáků).

Dále byla sledována **významová shoda odpovědí** u různých vzájemně souvisejících otázek, respektive shoda ve volbě konkrétních veličin a pojmů. Konzistentnost odpovědí podle určitého modelu zvuku byla ze získaných dat zjišťována sledováním shody ve dvojicích a trojicích obsahově korespondujících odpovědí na určité nepřímo související otázky. Z hlediska fyzikálního obsahu je nejpodstatnější shoda významu dvojic a trojic odpovědí u **otázek 3, 4, 6, 9, 12 a 13.2**. Za tím účelem byly odpovědi rozděleny do 5 kategorií reprezentujících základní možnosti pohledu na zvuk. Jsou to kategorie 1) *zvuk jako kmitání*; 2) *zvuk jako částice*; 3) *zvuk jako energie*, 4) *zvuk jako tlak* a 5) *zvuk jako vjem hlasitosti*. K vyhodnocení shody byly použity kontingenční tabulky koincidencí dvojic konkrétních odpovědí a na jejich základě vytvořená tabulka shody trojic. Všechny tabulky jsou k nahlédnutí na příloženém CD-ROM v adresáři „Dotazníkové šetření SPŠE“.

V pořadí podle četnosti volby odpovědi obsahující určitý pojem se jeví jako nejsilněji zakořeněná představa zvuku v podobě částicového modelu zvuku. Ta je reprezentovaná odpověďmi **2 b**); **3 b**), **d**), **e**) a **4 a**), **d**), **e**). Nejvýznamnější je shoda odpovědi podle korpuskulárního modelu na otázky **3** a **4** zaznamenaná u 47% žáků. Převládá přitom shoda volby odpovědi ve smyslu elementárních částic hmoty, tedy molekul nebo atomů (18%). Zajímavostí je, že v obou otázkách **3** a **4** současně označilo volbu **e**) *zvukové částice* přes 9% žáků. Korpuskulární teorie však provázejí snahu o pochopení podstaty zvuku už od starověku, kdy atomisté jako Démokritos nebo Epikur předpovídali existenci neviditelných částic, které v jejich pojetí zvuku vycházely ze zvučícího tělesa a měly být zachycovány uchem. Svým způsobem je to představa člověku přirozená. Je třeba ji respektovat a konstruktivně s ní pracovat při modelování zvuku pomocí kmitání makroskopických elementů látky a šíření stlačení látkou.

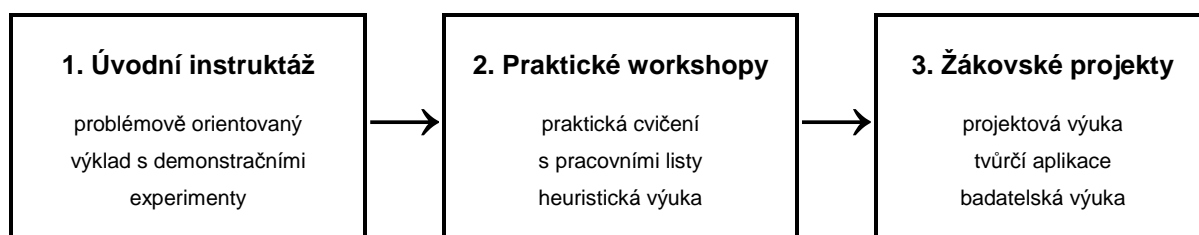
Významná shoda se objevuje při volbě odpovědí na otázky týkající se měřené veličiny **6 b**) **9 a**) **12 c**) **31.2 b**) obsahujících pro hodnocení zvuku pojem *hlasitost*. 7% žáků přitom zvolilo jako odpověď *hlasitost* shodně ve všech 4 otázkách, 15% ve trojici otázek **9**^**12**^**13.2**; 10% ve trojicích **6**^**9**^**12** a **6**^**12**^**13.2**; 8% u trojice **6**^**9**^**13.2**. Odpovídající shody se přirozeně objevují u dvojic **9**^**12** (32%), **12**^**13** (25%), **9**^**13** (20%) i dvojic zahrnujících odpověď na otázku číslo **6 b**) (16% u dvojice **6**^**9**; 16% u **6**^**12**; 14% u **6**^**13**).

Konzistentnímu užití pojmu *intenzita* odpovídá shoda dvojic a trojic odpovědí **6 e**); **9 b**); **12 f**); **13.2 a**). Podle očekávání se nejčastěji objevuje shoda u trojice otázek **9[^]12[^]13** (7%) a příslušných dvojic **9[^]12** (9%), **9[^]13.2** (14%) a **12[^]13.2** (16%). Shoda s užitím pojmu *intenzita* u otázky číslo **6** ve trojicích **6[^]9[^]13.2** (4%), **6[^]12[^]13.2** (3%), **6[^]9[^]12** (1%) a dvojicích **6[^]13** (11%), **6[^]9** (6%), **6[^]12** (3%) je už méně významná. Ještě nižší shoda se objevuje v případě volby formulací popisujících zvuk jako *kmitání* v odpovědích na otázky **6 c**); **9 d**), **e**); **12 a**); **13.2 c**), která dosahuje jen jednotek procent (např. 2% u **6[^]9**, 1% u **6[^]13.2**).

Přes relativně významné četnosti odpovědí zahrnujících tlakový model zvuku u jednotlivých otázek **3 c**), **f**); **6 d**); **9 f**), **13.2 e**) se konzistentní užití tlakového modelu ve více odpovědích, jaké by z části odpovídalo běžné konvenci užití pojmů, objevuje jen výjimečně u dvojice otázek **3[^]9** (7%), zatímco u dalších dvojic je vícenásobný výskyt odpovědí podle tlakového modelu zcela zanedbatelný (2 žáci u **3[^]13**, 1 žák u **9[^]13.2** a trojice **3[^]9[^]13**). Častější než konzistentní odpovědi podle jednoho modelu jsou u jedné osoby zcela rozdílné volby odpovědi na otázky mající velmi podobný nebo dokonce shodný význam. To značí, že žáci nemají jednoznačně vyhraněnou představu o tom, jakou má zvuk fyzikální podstatu a jak ho objektivně popsat. Jednotlivé naučené znalosti o zvuku bez souvislostí jsou pak často dokonce vzájemně protichůdné a nezapadají ani do ostatních základních představ žáků o světě.

3 Výukový koncept akustiky a digitální zpracování zvukového signálu pro střední stupeň vzdělávání

Výukový koncept disertační práce zahrnuje celkem tři vzdělávací úrovně. Základní úroveň výuky podle předloženého konceptu vzhledem k požadavkům na časovou efektivitu a faktickou realizovatelnost v organizačních podmínkách střední školy tvoří problémově orientovaný výklad podpořený počítačem řízenými a vyhodnocovanými demonstračními experimenty, zvukovými ukázkami a simulacemi zvukových jevů. Další objevování a poznávání vlastností zkoumaných jevů podle předloženého výukového konceptu probíhá v instruovaných žákovských experimentech realizovaných jako workshopy. V závěrečné fázi výuky podle předloženého konceptu se na nejvyšší třetí úrovni uplatňují metody a organizační formy projektové výuky.



Obr. 5: Schéma rozdělení jednotlivých úrovní výukového konceptu

Výukový koncept se skládá ze čtyřech tématicky ucelených vzájemně úzce souvisejících kapitol. Předpokládané trvání výuky podle předloženého konceptu včetně realizace žákovských experimentů ve formě workshopů je tak minimálně 8 vyučovacích hodin, z toho 2 hodiny fyzikálního praktika. V dalších vyučovacích hodinách by měli žáci mít možnost realizovat ve skupinách pod dohledem učitele v roli tutora vlastní tvůrčí projekty, které po dokončení prezentují před třídou. V případě zájmu mohou žáci v projektech pokračovat například jako v seminární práci k maturitě a přihlásit svůj projekt do soutěže středoškolské odborné činnosti (SOČ).

Jednotlivá témata konceptu jsou motivována cíleně prezentovanými jevy z každodenního běžného života žáků. Tyto demonstrační experimenty jsou nejprve vyhodnocovány pouze kvalitativně. Následně přechází fenomenologický přístup k přírodním jevům ve formulaci problému a úvahy o jeho řešení spojené s tvorbou modelů vedoucí ke kvantitativnímu popisu zkoumaných jevů. Přitom se žáci učí rozeznat a správně pojmenovat zkoumané jevy, používat základní pojmy pro jejich popis, poznají měřitelné veličiny a při

jednoduchých odvozeních porozumět fyzikálnímu významu nejčastěji užívaných vzorců. Demonstrační experimenty a ukázky současně obsahují instruktáž k používání přístrojového vybavení a softwaru pro pozdější samostatnou práci žáků. Tam, kde není možné provedení reálného experimentu, je text doplněn softwarovými simulacemi, jejichž podstatnou součástí je přímá auralizace a vizualizace matematických modelů zkoumaných zvukových jevů.

Druhá úroveň výuky podle konceptu má organizačně formu workshopů tvořených sadou odzkoušených žákovských experimentů bezprostředně navazujících na výklad. Motem těchto workshopů je: „*Činností k porozumění.*“ V této fázi se uplatňuje zejména heuristická výuková metoda postupně i s prvky badatelské výukové metody. Experimenty žáci provádějí samostatně na základě úvodní instruktáže a návodů k jednotlivým úlohám v pracovních listech (viz ukázka v příloze D). Hlavním úkolem pracovních listů je vytvořit strukturu dílčích cílů samostatného objevování zvukových jevů, vytvořit časový harmonogram workshopu a naučit žáky díky tomu postupovat v experimentech systematicky. Tím lze z velké části předejít situacím, kdy by žák nevěděl, co má dělat. Experimenty žáci provádějí jednotlivě nebo ve dvojici, kdy si navzájem pomáhají a poskytují vzájemnou zpětnou vazbu. Při realizaci laboratorní úlohy mohou žáci pracovat výjimečně i ve větší skupině. Vyučující při workshopu a laboratorní úloze zastává roli tutora, který zadává úkol, určuje výukové cíle, poskytuje technickou podporu a v případě potřeby žákům asistuje a radí.

Workshopy postupují od typizovaných experimentů reproduktivního charakteru, až po produktivní aplikaci učiva konkrétní kapitoly konceptu v otevřených úlohách vedoucí k hlubšímu porozumění vlastnostem a souvislostem zkoumaných jevů. Úvodní experimenty každého workshopu jsou vždy doplněny podrobným návodem. Jedná se zejména o jednoduché úlohy založené na variaci parametrů, při nichž si žáci upevňují základní znalosti o zvuku a současně samostatně osvojují dovedností potřebné pro práci se zvukem. Poté žáci experimenty modifikují podle instrukcí v pracovním listu, až dosáhnou při práci se zvukovou technikou a zvukovým softwarem plné jistoty. S tím jak rozsah instrukcí v návodech klesá, postupně narůstá míra vlastní odpovědnosti žáků za jejich učení. Otevřené divergentní úlohy na konci workshopů tak žáci řeší již zcela autonomně.

Etapa žákovských experimentů by měla vždy být vždy zakončena krátkou skupinovou diskusí výsledků experimentů. Společné zhodnocení žákovských experimentů samotnými žáky, které je učitelem pouze moderováno, vede k utřídění a sumarizaci poznatků obou propojených výukových fází. Předpokládám zde, že právě bezprostřední zkušenost a prožitek z experimentu v interakci a případné konfrontaci s intuitivními představami u žáků vede k hlubšímu pochopení zvukových jevů a principů jejich technických aplikací. Skupinové

sdílení těchto praktických zkušeností může přitom na procesy skupinového učení mít ještě dodatečný pozitivní vliv.

Při provádění laboratorní úlohy ve čtvrté kapitole výukového konceptu má u žáků dojít k propojení znalostí a dovedností osvojených v předchozích třech lekcích. Zde použité metody měření jsou blízké praktickým aplikacím fyzikální akustiky ve zvukové technice, u kterých rychlost zvuku jako parametr prostředí hraje významnou roli. Modifikace stávající laboratorní úlohy umožňuje v širokém rozsahu měnit parametry zkoumaného reálného fyzikálního systému, bezprostředně kontrolovat jeho chování sluchem a zároveň měřit příslušné fyzikální veličiny zvukového pole, přehledně graficky zobrazit naměřené hodnoty a dále je výpočetně zpracovávat na počítači. Žáci tak mohou ve výuce na základě přímé zkušenosti rozvíjet své dovednosti práce se zvukovou technikou i schopnosti problémového myšlení a kvalifikovaného fyzikálního odhadu.

Při samostatné realizaci vlastního experimentálního projektu v závěrečné fázi výuky podle předloženého konceptu má u žáků dojít k nespécifickému transferu vědomostí a dovedností osvojených v jednotlivých tématech konceptu a k jejich praktickému tvůrčímu uplatnění. Zatímco ve workshopech je zadání úloh pro všechny žáky stejné, sleduje třetí úroveň výuky tématickou diferenciaci projektů zahrnující celou šíři akustiky sahající od přírodní vědy až k umění. Projektová výuka podle předloženého konceptu tak má již čistě badatelský charakter a zahrnuje v plné míře jak kognitivní, tak i psychomotorické a afektivní aspekty učení. Uplatní se při ní metody zkoumání experimentální fyziky, aplikované matematiky, informatiky, experimentální psychologie až po metody hudební teorie či fonetiky. Diferenciace projektů podle zájmů, schopností a dovedností žáků navíc vytváří přiměřené a rovné podmínky pro všechny žáky a umožňuje všem zažít pocit úspěchu.

V ideálním případě jsou v projektové výuce realizována vlastní témata projektů pocházející od samotných žáků. Náměty uvedené v příloze E2 slouží pouze pro inspiraci. Tato témata byla žákům nabízena v rámci projektů Západočeské univerzity v Plzni *SPPVaV – Systematická podpora popularizace výzkumu a vývoje ZČU* a *PVBV – Popularizace vědy a badatelsky orientované výuky* jako témata seminárních prací k maturitě na webových stránkách *Bav se vědou* [96]. Dvě z těchto témat byla realizována ve školním roce 2014/15 jako seminární práce k maturitě na Gymnáziu v Rokycanech.

Organizační formou třetí fáze výuky podle představovaného konceptu je skupinová projektová výuka (2 až 4 žáci ve skupině). Jedná se o kooperativní vyučování zahrnující týmovou práci, vzájemnou podporu žáků, sdílení zodpovědnosti, komunikaci, organizaci.

Žáci se učí v malém týmu samostatně plánovat experiment a společně hledají řešení. Dochází zde nejen k autonomnímu sebeučení a seberealizaci ale i vzájemnému učení. Motivaci badatelské výuky navíc doplňuje sociální motivace vztahy ve skupině. Výkonová motivace pak obsahuje zdravý podíl kompetitivní složky soutěžení mezi týmy a zaměření na úspěch.

Úkol a cíle si volí sami žáci. Vyučující pouze určuje rámcové organizační podmínky, podle potřeby radí, asistuje, usměrňuje průběh projektů a poskytuje žákům zpětnou vazbu. Projektová výuka je zakončena prezentací výsledků projektu ve formě protokolu nebo seminární práce a současně ve formě stručného ústního shrnutí základních poznatků každé skupiny před ostatními skupinami. Zde se uplatní vzájemná zpětná vazba mezi žáky. Důležitou roli hraje vyučující při spolehodnocení závěrečné prezentace a hodnocení protokolu projektu. Z pedagogického hlediska je však vhodnější, aby se jednalo o podrobné slovní hodnocení než tradiční známkování projektů.

Jak ukázala analýza rámcových vzdělávacích programů a komunikace s učiteli škol různých typů, vyhovuje svým tématickým zaměřením výukový koncept studijních oborů *Elektrotechnika* (26-41-M/01), *Telekomunikace* (26-45-M/01) a *Informační technologie* (18-20-M/01) středních průmyslových škol elektrotechnických [62, 63, 64]. Výukový koncept však v plném rozsahu naplňuje i požadavky na výuku na čtyřletých gymnáziích a na vyšším stupni víceletých gymnázií (viz RVPG [61]), kde propojuje povinné učivo vzdělávacích oblastí zabývajících se zvukem. Výuka podle konceptu disertační práce může probíhat počínaje 2. ročníkem ve fyzice a informatice nebo ve formě integrovaného obsahu v jednom z předmětů. Sekundární cílovou skupinou výukového konceptu jsou vedle samotných žáků středních škol též studenti učitelství a stávající středoškolské učitelé obou jmenovaných typů středních škol. Jako nejefektivnější cesta modernizace výuky akustiky se jeví školení učitelů z praxe a přímý kontakt se školami.

Navržený výukový koncept byl v letech 2013 – 2015 v obsahově zestručněné verzi jako výukový experiment opakovaně ověřován na Střední odborné škole elektrotechnické v Plzni (2013–2015), dále na Gymnáziu v Rokycanech (2014–2015) a Střední zdravotnické škole v Plzni (2013). Výuka podle konceptu byla realizována formou odborných přednášek s demonstračními experimenty a praktických workshopů s žákovskými experimenty v rámci projektů *SPPVaV – Systematická podpora popularizace výzkumu a vývoje ZČU* (1. 7. 2012 – 30. 6. 2014) a *PVBV – Popularizace vědy a badatelsky orientované výuky* (1. 7. 2014 – 30. 6. 2015). Pro lepší sebereflexi jsem zaznamenával svá zjištění z průběhu výukového experimentu do pedagogického deníku a následně výukový koncept opakovaně upravil.

Ověřit výukový koncept jako celek v plném rozsahu s žákovskými experimenty i projektovou výukou se mi přes více než dvouletou snahu a opakované jednání s různými středními školami v regionu z organizačních a časových důvodů nepodařilo. Podle dosavadní zkušenosti školám nejvíce vyhovuje zestručněná verze konceptu ve formě jednotlivých zvaných odborných přednášek s demonstračními experimenty a zvukovými ukázkami doplněných jedním delším workshopem s žákovskými experimenty. Takto byly s přihlédnutím ke vzdělávacím potřebám žáků realizovány přednášky s workshopy na Střední průmyslové škole elektrotechnické a Střední zdravotnické škole v Plzni i na Gymnáziu v Rokycanech. Přednášky a workshopy podle předloženého výukového konceptu byly veřejně nabízeny středním školám v Plzeňském kraji v rámci projektů Západočeské univerzity v Plzni na webových stránkách *Systematická podpora popularizace výzkumu a vývoje ZČU: Přednášky pro základní a střední školy* [97] a *Bav se vědou* [96].

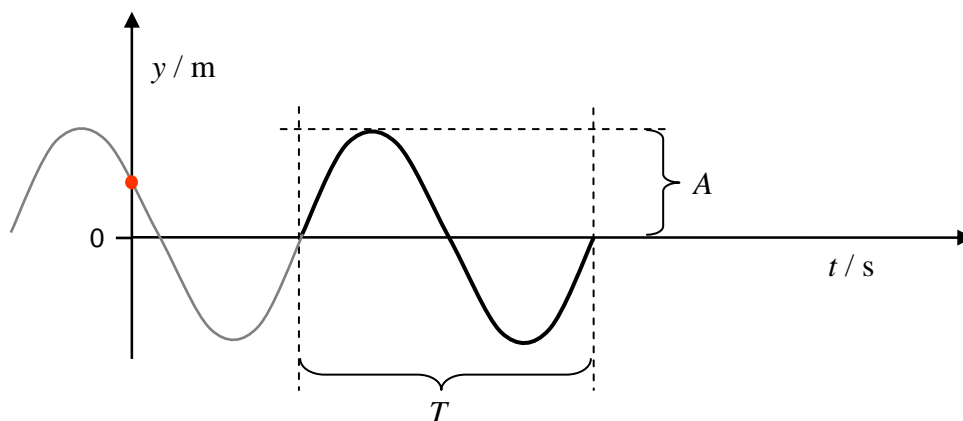
Případová studie projektové výuky v akustice probíhala odděleně v rámci výzkumných kempů Erlanger SchülerForschungsZentrum für Bayern (ESFZ) na Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg v letech 2009 až 2015. Zaměřoval jsem se v ní zejména na zhodnocení přínosů projektové výuky při práci s talentovanými žáky a podpoře samostatné vědecké a tvůrčí činnosti žáků v oboru akustiky. Svou hypotézu nutnosti cílené přípravy na projektovou výuku jsem po dobu šesti let ověřoval sledováním průběhu projektů vedených podle zásad postupně vznikajícího výukového konceptu, ve kterém plně samostatné kreativní projektové výuce předchází experimentálně motivovaná teoretická příprava a jednoduché instruované žákovské experimenty s postupným nárůstem samostatnosti. Zpětná vazba a kritické připomínky přicházely jak od samotných žáků, tak ostatních spolupracovníků a vedení výzkumného centra ESFZ.

3.1 Základy fyzikální akustiky pro střední stupeň vzdělávání

Akustika je oborem fyziky zabývajícím se slyšitelným mechanickým kmitáním a vlněním látek. Zde prezentovaný výukový koncept navazuje na obecnou nauku o mechanickém kmitání a vlnění, jak se učí tradičně ve 2. ročníku střední školy [33, 36]. Výuku zmíněných témat tento koncept nenahrazuje, spíše se snaží jej doplnit a rozšířit. Vychází proto z učiva a pojmů střední školy, současně však zdůrazňuje specifika zvukového vlnění vzduchu s tím, že pro jeho objektivní popis zavádí na střední škole doposud nepoužívané odborné pojmy a veličiny.

3.1.1 ZVUKOVÉ KMITÁNÍ

Zdrojem zvuku je v nejjednodušším případě kmitavý pohyb hmotného objektu v látkovém prostředí. Jako kmitání se obecně označuje libovolný fyzikální jev, který v průběhu času nastává opakovaně. Opakuje-li se pravidelně, hovoříme o kmitání periodickém. Mechanické kmitání přitom vždy popisuje jeden objekt, který se pohybuje jako celek. Opakování kmitavého děje charakterizuje nejmenší časový interval, za který nastane stejný stav kmitání – takzvaná perioda kmitání T s rozměrem času a jednotkou sekunda ($[T] = s$). V případě rychlých dějů je výhodnější popsat periodický kmitavý děj pomocí počtu opakování jeho průběhu za jednotku času, z čehož vychází český pojem kmitočet neboli frekvence f jako počet kmitů za jednu sekundu. Jednotkou frekvence je hertz ($[f] = \text{Hz}$) s fyzikálním rozměrem s^{-1} . Zvukovým kmitáním pak v tomto smyslu je mechanické kmitání s frekvencí v rozsahu od 20 do 20 000 kmitů za sekundu, tedy 20 Hz až 20 kHz, a periodou kmitů 50 ms až 50 μs . Pod pojmem zvuk bude dále chápáno mechanické vlnění látkového prostředí vyvolané kmitáním právě v tomto rozsahu frekvencí.



Obr. 6: Časový průběh výchylky ustáleného harmonického kmitání. Zdroj: vlastní

Z hlediska popisu nejjednodušším a nutno říci, že značně idealizovaným případem kmitání je časově ustálené harmonické kmitání s jedinou konstantní frekvencí, takzvaný čistý tón. Časový průběh harmonického kmitání je matematicky popsán jednou z goniometrických funkcí sinus nebo cosinus. Pro okamžitou mechanickou výchylku harmonických kmitů se na střední škole nejčastěji používá zápis

$$y = A \cdot \sin(\omega t + \varphi) \quad , \quad (1.1)$$

kde y je okamžitá mechanická výchylka kmitání a A amplituda mechanické výchylky kmitání z rovnovážné polohy, přičemž rozměr veličin y a A je délka a jednotkou metr ($[y] = \text{m}$). Argument goniometrické funkce vyjadřuje fázi kmitu v úhlové míře a nabývá v závislosti na čase hodnot od 0 do 2π radiánů, respektive celočíselných násobků hodnot z tohoto intervalu. Úhlová frekvence ω je s kmitočtem svázána vztahem

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f = \frac{2 \cdot \pi}{T} \quad (1.2)$$

a její jednotkou je radián za sekundu ($[\omega] = \text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$). Počáteční fáze φ představuje fázový posuv kmitání neboli počáteční fázi kmitu v čase $t = 0$ s. Má proto rozměr úhlové míry v radiánech ($[\varphi] = \text{rad}$). Často se však udává jako úhel ve stupních z intervalu 0° až 360° .

V odborné literatuře je pro popis kmitání běžnější užití zápisu ve formě komplexních čísel. Výchylku harmonického kmitání pak popisuje rovnice

$$y(t) = A \cdot e^{j\omega t} \quad , \quad (1.3)$$

kde e je základ přirozeného logaritmu a j je komplexní jednotka definovaná jako

$$j = \sqrt{-1} \quad . \quad (1.4)$$

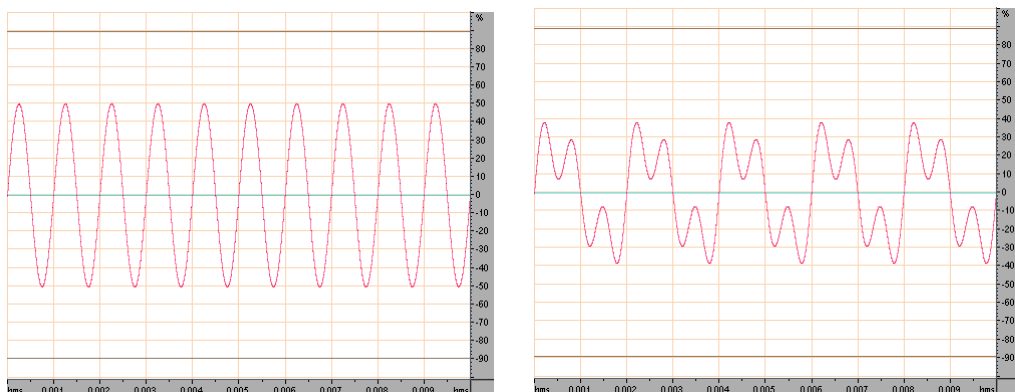
Vztah mezi uvedenou komplexní exponenciální funkcí a goniometrickými funkcemi pak vyjadřuje Eulerův vzorec

$$e^{j\omega t} = \cos \omega t + j \sin \omega t \quad . \quad (1.5)$$

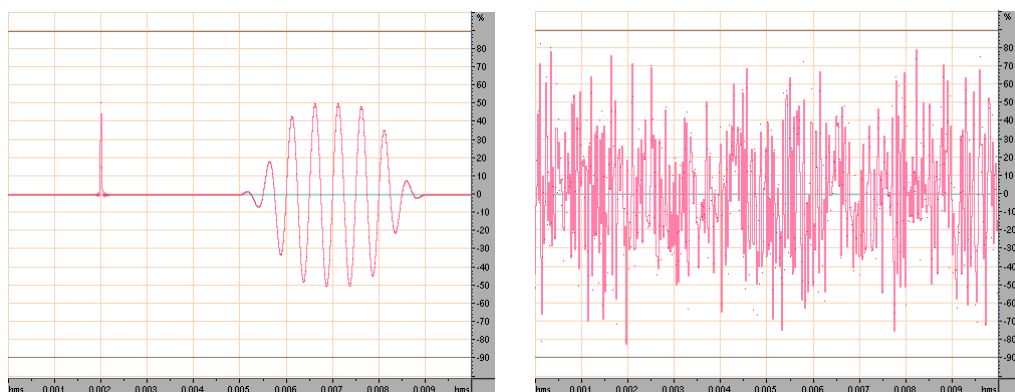
Popis kmitání pomocí komplexních čísel přináší zjednodušení při výpočtech na úrovni vysoké školy, zejména při diferenciaci a integraci. Na střední škole se ovšem tento zápis z důvodu výrazně menší názornosti a vyšší matematické náročnosti běžně nepoužívá.

Harmonické kmitání je možné s dobrým přiblížením se jeho teoretickému modelu realizovat pomocí ladičky nebo reproduktoru buzeného laboratorním tónovým generátorem. V praxi je však častějším případem kmitavého děje neharmonické periodické kmitání. Tón zahráný na strunný nebo dechový hudební nástroj a také samohlásky lidské řeči nejsou čisté tóny s dokonale harmonickým průběhem výchylky kmitání v čase. V hudební teorii se takové kmitání označuje jako složený tón. Matematicky lze odvodit, že každé periodické kmitání se

skládá z řady harmonických kmitání, jejichž frekvence jsou v celočíselném poměru. Za předpokladu linearit probíhajícího jevu můžeme zkoumat jednotlivé harmonické složky odděleně a učiněné závěry poté vztáhnout na výsledné periodické kmitání vzniklé součtem jednotlivých harmonických složek. Je však třeba rozlišit ještě případ směsi tónů vzniklé nezávislými kmitáními, jejichž jednotlivé harmonické složky obecně v celočíselném poměru nejsou. Vzniklé kmitání má pak složitý časový průběh. I zde je však za určitých okolností možné činit výše zmíněný předpoklad o složení výsledného časového průběhu kmitání z jednotlivých harmonických složek.



Obr. 7: Časový průběh kmitání čistého tónu (vlevo) a složeného tónu (vpravo). Zdroj: vlastní



Obr. 8: Časový průběh kmitání pro jednotkový a tónový puls (vlevo) a bílý šum (vpravo). Zdroj: vlastní

Zvláštní kategorií zdrojů zvuku jsou kmitání neperiodická. Jsou to jednak impulsní zvuky jako například výstřel, bouchnutí, praskání a souhlásky lidské řeči, typicky závěrové souhlásky (b, p, d, t, k). Prototypickým příkladem impulsního zvuku je takzvaný jednotkový puls (zvaný též dirakovský puls). Jako tónové pulsy se označují krátké úseky harmonických nebo periodických signálů (pípnutí) trvající pouze několik period. Druhou skupinu neperiodických zvuků tvoří časově ustálený šum generovaný náhodným procesem. V přírodě jsou to zvuky proudící vody nebo větru, šustění zapříčiněné třením nebo neznělé souhlásky lidské řeči vzniklé rychlým prouděním vydechovaného vzduchu úžinou artikulačních orgánů (s, š, f, ch). Prototypem šumu je bílý šum, který podobně jako bílé světlo (odtud jeho název)

postrádá jakékoli tonální zbarvení. Řeč a hudba jsou přitom směsí zvuků periodických, impulsních i zvuků s charakterem šumu.

Na zvukové kmitání je možné pohlížet jako na zdroj informace, která se dále přenáší vlněním vzduchu k přijímači, typicky k uchu posluchače. Pak o časovém průběhu fyzikálních veličin popisujících kmitání ve slyšitelném pásmu frekvencí podle teorie signálů a systémů lze hovořit jako o zvukovém signálu, akustickém signálu nebo audiosignálu. Zvukový signál je vázán na proměnné veličiny, a to jak veličiny mechanické jako výchylku kmitání, tak to mohou být, a v technické praxi nejčastěji jsou, veličiny elektrické – typicky proměnné elektrické napětí. Převodění elektrického zvukového signálu na mechanický zvukový signál zajišťují elektro-mechanické převodníky (např. napětí na výchylku), obrácený převod převodníky mechano-elektrické (výchylka na napětí). Pojem harmonický signál je tak synonymem harmonického kmitání, a to jak kmitání mechanického, tak kmitání elektrického.

3.1.2 ZVUKOVÉ VLNĚNÍ VZDUCHU

Podstatou vzniku a šíření zvuku je mechanické rozvlnění pružného prostředí v okolí kmitajícího zvukového zdroje. Zvukové vlnění jakožto vlnění mechanické je přitom přímo vázáno na existenci hmotného prostředí. To je zásadní rozdíl oproti vlnění elektromagnetickému. Zatímco šíření světla nebo radiových vln je tak přesnější popisovat jako šíření vlnění „v“ prostředí, jedná se u zvuku o rozvlnění samotného látkového prostředí šířící se postupně do prostoru kolem kmitajícího zdroje zvuku. Je to sice poněkud nezvyklé vyjadřování, vystihuje však podstatu šíření zvuku a v každé formulaci tento základní fakt připomíná. Vlastnosti charakterizující mechanické vlnění látkového prostředí tak mají původ přímo ve fyzikálních vlastnostech látky. Fyzikální akustika proto zkoumá zvuk metodami mechaniky, ale v případě plynů také metodami termodynamiky (viz přílohy C1 a C2).

Pro vysvětlení podstaty termodynamických jevů v akustice je přitom vhodné využít metod statistické fyziky, která plynné látkové prostředí modeluje jako statistický soubor částic. Pozor, nezkoumá však jednotlivé částice. Při popisu zvukového vlnění vzduchu zde vycházím ze statistického modelu ideálního plynu (IP), respektive z jeho středoškolské formulace, kdy jsou molekuly skutečného plynu modelovány jako soubor neustále se pohybujících částic s rozměry zanedbatelnými vůči jejich vzdálenostem, které na sebe silově působí pouze v okamžiku srážek. 1 m³ vzduchu podle stavové rovnice ideálního plynu (C1.2) při atmosférickém tlaku za běžných teplot obsahuje řádově 10²⁵ molekul. Při uvažované velikosti molekul v řádu 10⁻¹⁰ m tak urazí střední volnou dráhu řádově 10⁻⁷ m než dojde ke vzájemné srážce.

Částice ideálního plynu se pohybují volně chaotickým tepelným pohybem se střední kvadratickou rychlostí v řádu $10^3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a vyjma vzájemných srážek na sebe na dálku nijak silově nepůsobí. Srážky částic IP mezi sebou a nárazy na rozhraní, např. na stěny nádoby, jsou dokonale pružné. Důsledkem nárazů částic ideálního plynu na rozhraní, například stěny nádoby nebo objekty uvnitř nádoby, je z makroskopického pohledu tlak plynu. Nádoba může být těsně uzavřená posuvným pístem, jež umožňuje změnu objemu nádoby. Při zmenšení objemu uzavřené nádoby jsou vzájemné srážky i nárazy částic ideálního plynu na stěnu nádoby pravděpodobnější a celkový impuls síly předaný nárazy je větší. Z makroskopického pohledu se tak při zmenšování objemu nádoby zvyšuje tlak uvnitř uzavřeného plynu, při zvětšování objemu nádoby se tlak plynu v nádobě naopak zmenšuje. Proti vnější síle způsobující změnu objemu přitom stlačovaný či rozpínaný objem plynu působí silou opačného směru podobně, jako reaguje na stlačování a roztahování pružina s určitou tuhostí. To lze prakticky demonstrovat například na stlačované cyklistické pumpičce nebo injekční stříkačce s uzavřeným vývodem vzduchu. Uzavřený objem plynu se tedy chová jako pružný element, který může vykonávat objemové kmity. Velikost síly pružnosti při změně uzavřeného objemu je za určitých podmínek přímo úměrná vnější síle (viz příloha C1) a uzavřený objem plynu je tak možné matematicky popsat jako lineární oscilátor.

Mezi částicemi plynu neexistuje na dálku žádná vazba a při jejich vzájemných srážkách nemůže docházet k přenosu složky impulsu síly způsobeného zvukovým kmitáním v jiném směru než ve směru šíření vlnění. Zvuk se proto v plynech může šířit jedině jako podélné mechanické vlnění plynu. Příčné mechanické vlnění v plynech nikdy nenastává. Rozvlnění plynné látky zdrojem zvuku vyvolává nerovnoměrné rozložení chaoticky se pohybujících elementárních částic v prostoru, které se v makroskopickém pohledu jeví jako sled lokálních zhuštění a zředění plynu šířících se s ubíhajícím časem plynem vyplněným prostorem. Důsledkem šíření těchto hustotních vln jsou změny jinak konstantního rozložení tlaku plynu: Přetlak v postupujícím zhuštění, podtlak v postupujícím zředění.

K popisu zvukového vlnění vzduchu tak můžeme použít dvě fyzikální veličiny známé již ze základní školy: hustotu a tlak. Prostor vyplněný látkou, ve kterém se zvuk šíří, se v akustice označuje jako zvukové pole. Z makroskopického pohledu je zvukové pole v plynech utvářeno časově proměnným prostorovým rozložením hustoty plynu. Praktičtější je ovšem popsat ho pomocí časového průběhu prostorového rozložení tlaku plynu. V reálných situacích je prostorové rozložení tlaku v prostoru velmi složité. Pro zjednodušení se proto zavádí modely zvukového pole.

Nejčastěji předpokládáme takzvaně volné pole, u kterého uvažujeme v okolí zdroje zvuku nekonečně rozlehlý prostor stejnoměrně vyplněný látkou bez jakýchkoli překážek, na nichž by docházelo k odrazu, ale třeba i ohybu nebo lomu vlnění. V nejjednodušším případě je vlnění látky ve volném poli vybuzeo jediným zdrojem, který kolem sebe v homogenním izotropním látkovém prostředí vytváří kulově symetrické tlakové vlny. Rozměry takového idealizovaného zvukového zdroje musí být nekonečně malé, což vede k formulaci modelu bodového zdroje neboli takzvaného akustického monopólu. V nekonečné velké vzdálenosti od bodového zdroje by ve volném poli výseč z kulové vlny přešla v rovinnou vlnu. Opět se jedná o idealizaci, když u rovinné vlny předpokládáme, že v rovině kolmé ke směru šíření vlnění od zdroje se tlak mění všude se stejnou fází. Přiblížit se tomuto modelu je možné pro dostatečně malou výseč z kulové vlny ve vzdálenosti mnohařadově větší (například tisíckrát) než je uvažovaná výseč. V technické praxi je pak běžné části skutečného zvukového pole aproximovat právě jednoduchým modelem rovinné vlny.

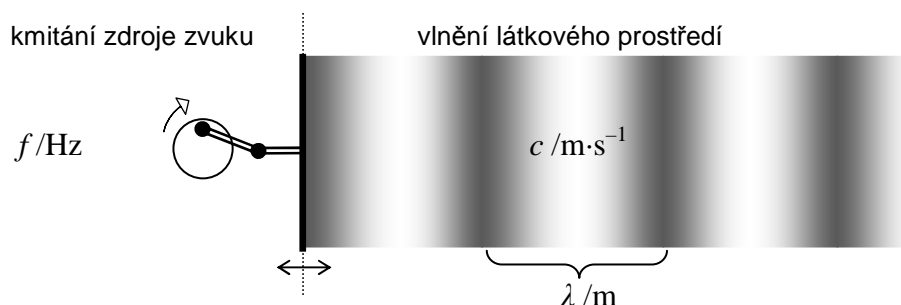
3.1.3 RYCHLOST ŠÍŘENÍ A VLNOVÁ DÉLKA ZVUKOVÉHO VLNĚNÍ

Pro názornost budu dále uvažovat zdroj zvuku kmitající harmonicky s konstantní frekvencí f . V pevně zvoleném bodě volného zvukového pole se potom zvukové vlnění projevuje jako kolísání tlaku s frekvencí f , která zde udává počet změn tlaku za sekundu. Nejmenší vzdálenost dvou bodů prostoru ve směru šíření vlny, ve kterých se tlak mění se stejnou fází, se nazývá vlnová délka zvuku λ . Situaci je možné popsat i z pohledu pozorovatele v soustavě pohybující se spolu s postupným vlněním. V harmonické tlakové vlně postupující od zdroje rychlostí šíření vlnění c pak odpovídá vlnová délka λ vzdálenosti dvou oblastí stejné fáze změny tlaku, například nejbližších dvou postupujících oblastí maximálního přetlaku. Vlnová délka λ má, jak už je z názvu patrné, rozměr délky. Její jednotkou je metr ($[\lambda] = \text{m}$). Podle výše uvedeného pro ni platí vztah

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad , \quad (1.6)$$

kde c je rychlost šíření vlnění látky prostorem v metrech za sekundu ($[c] = \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$). Rychlost šíření zvukového vlnění je nejvyšší pro podélné vlnění pevných látek jako důsledek těsných vazeb v jejich stavební struktuře a dosahuje řádově jednotek tisíc metrů za sekundu (sklo $5\,200 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, ocel $5\,000 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, cihla $3\,600 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, beton $1\,700 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$). Rychlost šíření zvuku vlněním kapalin je o něco nižší (voda $1\,500 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$). Nejpomaleji se šíří zvuk podélným vlněním plynů. Vzhledem k zaměření konceptu na šíření zvuku vlněním vzduchu, zde budu jako rychlost zvuku c (bez indexu) označovat rychlost zvuku ve vzduchu s přibližnou

hodnotou $340 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Experimentálnímu ověření velikosti rychlosti zvuku ve vzduchu se věnuje kapitola 3.4, jejímu teoretickému odvození příloha C2.



Obr. 9: Schématické znázornění vzniku podélného mechanického vlnění vzduchu. Zdroj: vlastní

Pro představu o míře uplatnění vlnových jevů je užitečné natrénovat si fyzikální odhad velikosti vlnových délek zvukového vlnění vzduchu. Protože to dělá problémy i studentům vysoké školy, používám jednoduchý výpočet vlnové délky podle vzorce (1.6) pro vhodně zvolené snadno zapamatovatelné frekvence uvedené v tabulce 2 a srovnání velikosti vlnové délky s tělesnými rozměry člověka a rozměry v jeho životním prostředí.

Tab. 2: Pomůcka pro rychlý odhad velikosti vlnové délky λ ve vzduchu z frekvence kmitání f a naopak.

f/Hz		λ/m	
10		34 m	
↓	17	↓	20 m
20	↑	17 m	↑
	34		10 m
50	↓	6,8 m	↓
↑	68	↑	5 m
100		3,4 m	
↓	170	↓	2 m
200	↑	1,7 m	↑
	340		1 m
500	↓	68 cm	↓
↑	680	↑	50 cm
1 000		34 cm	
↓	1 700	↓	20 cm
2 000	↑	17 cm	↑
	3 400		10 cm
5 000	↓	6,8 cm	↓
↑	6 800	↑	5 cm
10 000		3,4 cm	
↓	17 000	↓	2 cm
20 000	↑	1,7 cm	↑
	34 000		1 cm

veřejné prostory
↑
vzdálenost mezi stěnami místnosti
↓
obytné prostory

výška postavy nebo šířka rozpažení

délka předloktí při zatnuté pěsti

šířka 4 prstů (ukazováček až malíček)

šířka ukazováčku

Velký rozsah vlnových délek zvukového vlnění vzduchu v poměru k rozměrům objektů ve zvukovém poli i řádový rozdíl velikostí rychlosti šíření mechanického vlnění vzduchem a pevnými látkami způsobují, že se vlnové vlastnosti zvuku v akustice projevují odlišně než stejné vlnové jevy v optice. Na rozhraních s objekty většími než je vlnová délka

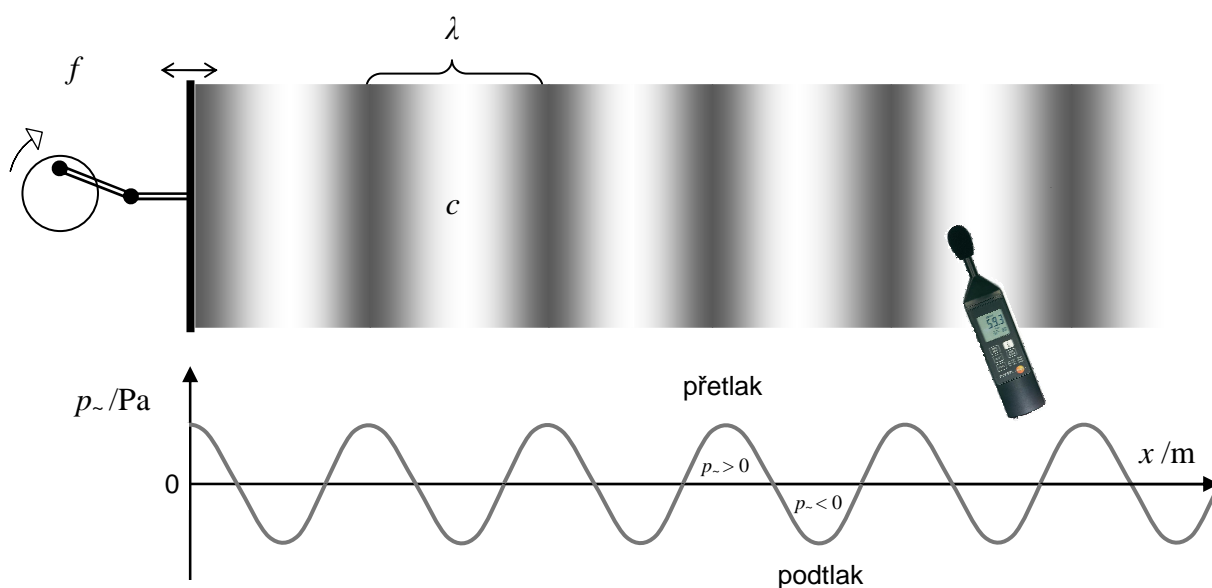
zvuku λ v akustice převážně nastává odraz nebo dokonce totální odraz (viz příloha C3). U objektů velikostí srovnatelných či menších než λ se silně projevuje ohyb zvukového vlnění.

3.1.4 AKUSTICKÝ TLAK

Pro objektivní popis mechanického vlnění vzduchu je vzhledem k uvedenému slovnímu modelu zcela logickým krokem použít skalární fyzikální veličinu tlak. Budeme sledovat tlak vzduchu v určitém místě prostoru. Bez přítomnosti zvuku má tlak v tomto místě hodnotu atmosférického tlaku o velikosti řádově 100 000 Pa (10^5 Pa). Vlivem zvukového vlnění vzduchu ovšem tlak na pevně zvolené pozici v prostoru rychle kolísá v řádu desetitisícin až desítek pascalu (10^{-5} až 10 Pa). Změny počasí přitom atmosférický tlak ovlivňují natolik pomalu, že ho ve srovnání s periodou zvukového kmitání můžeme považovat za stejnosměrnou složku celkového tlaku vzduchu. Výsledná okamžitá hodnota tlaku vzduchu $p(t)$ v určitém místě se tedy skládá ze stejnosměrné složky atmosférického tlaku p_+ a okamžité hodnoty střídavé složky $p_-(t)$ způsobené mechanickým vlněním vzduchu. Platí, že

$$p(t) = p_+ + p_-(t) \quad . \quad (1.7)$$

Dále budeme zkoumat samostatně střídavou složku tlaku vzduchu způsobenou jeho mechanickým vlněním. Protože reprezentuje zvuk, označuje se jako akustický tlak. $p_-(t)$ je tedy okamžitá hodnota akustického tlaku v čase t . Jednotkou akustického tlaku je pascal ($[p_-] = \text{Pa}$). Tlak je vždy skalární veličina. Velikost akustického tlaku v určitém místě volného pole tudíž nezávisí na směru šíření zvukových vln.



Obr. 10: Prostorové rozložení akustického tlaku v rovinné postupné podélné vlně. Zdroj: vlastní

Podobně jako stejnosměrnou složku atmosférického tlaku lze i střídavou složku tlaku měřit přímou metodou. Potřebujeme k tomu zařízení fungující v podstatě na stejném principu jako barometr, které však musí být citlivé na velmi malé změny tlaku a současně reagovat dostatečně rychle. Senzor akustického tlaku se v hovorovém jazyce většinou říká jednoduše mikrofon. Ne každý mikrofon je však spolehlivým senzorem pro snímání velikosti akustického tlaku v místě měření. Více se měření akustického tlaku a konstrukci zvukových senzorů věnuje kapitola 3.3.

Okamžitá hodnota akustického tlaku $p_{\sim}(t)$ se mění řádově deset až desettisíckrát za sekundu. Pro objektivní hodnocení ustáleného zvuku však nepotřebujeme znát okamžitou hodnotu akustického tlaku v každém časovém okamžiku, ale potřebujeme popsat velikost akustického tlaku za určitý delší čas tak, jak ho vnímáme sluchem. Časový interval τ pro určení amplitudy harmonických signálů je proto standardně alespoň jedna perioda (T sekund) až jednotky sekund. Vzhledem k tomu, že se v případě akustického tlaku jedná o střídavou veličinu, je časová střední hodnota akustického tlaku nulová. Větší výpovědní hodnotu má takzvaná efektivní hodnota akustického tlaku $p_{\sim\text{ef}}$. Pro časově ustálené harmonické signály (čisté tóny) lze efektivní hodnotu vypočítat podle vztahu

$$p_{\sim\text{ef}} = \frac{p_{\sim A}}{\sqrt{2}}, \quad (1.8)$$

kde $p_{\sim A}$ je amplituda akustického tlaku. Tento vzorec ovšem platí pouze pro harmonické signály. Někdy se v odborné literatuře efektivní hodnota značí zkratkou RMS z anglického názvu „Root Mean Square“, což napovídá, že z matematického hlediska se jedná o druhou odmocninu (Root) střední hodnoty (Mean) kvadrátů (Square).

Pro hodnoty akustického tlaku je běžné užívat index „a“, tedy značit velikost akustického tlaku p_a . Potenciálně však vzniká nejasnost, zda se v konkrétním případě jedná o velikost okamžité hodnoty, efektivní hodnoty nebo amplitudy střídavé složky tlaku. Proto používám explicitní značení střídavé složky tlaku indexy „ \sim “ pro okamžitou hodnotu akustického tlaku $p_{\sim}(t)$, „ $\sim A$ “ pro amplitudu akustického tlaku $p_{\sim A}$ a „ $\sim\text{ef}$ “ pro efektivní hodnotu akustického tlaku $p_{\sim\text{ef}}$ za určitý časový interval τ . Plný rozkmit signálu na osciloskopu označovaný často indexem „pp“ (z anglického „peak to peak“, česky špička-špička) pak odpovídá dvojnásobku amplitudy, tedy $2 p_{\sim A}$. Protože nejčastěji bude řeč o efektivní hodnotě akustického tlaku, budu pro ni tam, kde nehrozí záměna, pro zjednodušení užívat index „a“ s tím, že vždy platí

$$p_a = p_{\sim\text{ef}} \cdot \quad (1.9)$$

Postupné mechanické vlnění je otiskem, jakousi tlakovou stopou, mechanického kmitání zdroje zvuku do okolní látky, který se ve volném poli šíří prostorem rychlostí c . V ideálním případě mají časová závislost výchylky kmitání $y_-(t)$ a prostorové rozložení tlaku $p_-(x)$ shodný průběh. Mechanickým vlněním prostředí je tak možné přenášet na dálku informaci o časovém průběhu kmitání zdroje zvuku. Podle informační teorie se akustická informace přenáší zvukovým vlněním z akustického vysílače (reproduktoru, řečového orgánu) k akustickému přijímači (uchu, mikrofonu). Akustické pole, respektive látkové prostředí, kterým se zvuk šíří, v tomto smyslu představuje akustický přenosový kanál. Sledujeme-li tlak v určité pevné pozici ve zvukovém poli, můžeme z časového průběhu akustického tlaku $p_-(t)$ tuto informaci získat tak, že kolísání tlaku převedeme na mechanické kmity. Takovému přijímači se pak říká akusticko-mechanický převodník a při snímání zvukového vlnění vzduchu ho nejčastěji tvoří pružná membrána, která se vlivem změn tlaku střídavě prohýbá sem a tam. Příkladem akusticko-mechanického převodníku je bubínek ucha nebo membrána mikrofonu. K membráně mikrofonu je pak připojen mechanicko-elektrický převodník, který dále převádí výchylku kmitání na změny napětí. Více v kapitole 3.3.

Mechanickým vlněním vzduchu se může šířit zvuková informace teoreticky od spodního prahu daného fluktuacemi tlaku vzduchu způsobenými statistickou povahou tlaku plynu jakožto důsledku tepelného pohybu molekul až po zvuky tak silné, že člověku způsobují bolest, či dokonce poškození sluchového orgánu. Je zřejmé, že vlnění s amplitudou akustického tlaku větší než je hodnota atmosférického tlaku (10^5 Pa) již není možné popsat pomocí harmonického vlnění kvůli jednostrannému omezení tlaku hodnotou 0 Pa. Méně zřejmé už je, že od hodnot akustického tlaku o velikosti řádově stovek Pa nelze vycházet z předpokladů lineární akustiky. Linearizace obecně nelineárních akustických jevů je totiž podmíněna zanedbatelnou velikostí akustického tlaku vůči stejnosměrné složce tlaku plynu (viz příloha C1). Ve výsledku to znamená rozsah efektivních hodnot akustického tlaku pro přenos zvukové informace řádově od 10^{-5} do 10^2 Pa. Tomu se lidský sluch dokonale přizpůsobil. Nejslabší slyšitelné zvuky reprezentují právě tlakové změny s efektivní hodnotou řádově 10^{-5} Pa, běžně hlasitým zvukům jako je hovor ve vzdálenosti 1 metru odpovídají hodnoty řádově desetin Pa. Nejhlasitější slyšitelné zvuky dosahují akustického tlaku řádově až 100 Pa. Už při akustickém tlaku v řádu jednotek pascalu však začíná být zvuk člověku nepříjemný, přechází ve vjem hmatový až bolest. Dlouhodobé vystavení zvuku s vysokou hladinou akustického tlaku má u člověka negativní vliv na psychické i fyzické zdraví a vede k poškození sluchu.

3.1.5 MECHANICKÝ MODEL ZVUKOVÉHO VLNĚNÍ VZDUCHU

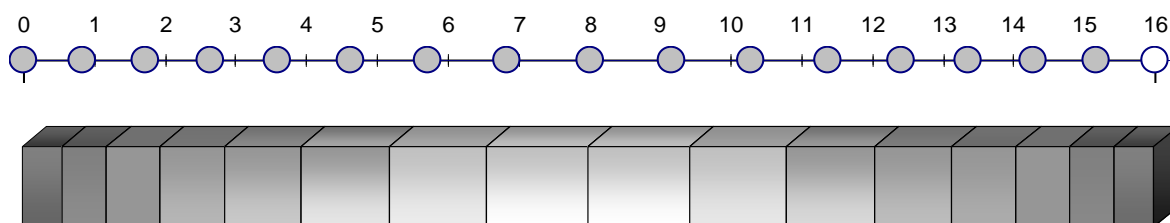
Vzhledem k předpokladu chování vzduchu za normálního tlaku podle modelu ideálního plynu není zvukové vlnění vzduchu možné popsat pomocí výchylky a rychlosti kmitání molekul. Matematický model zvuku na úrovni jednotlivých molekul by totiž musel parametrizovat zvukem způsobenou výchylku, která je superponována na neuspořádaný pohyb molekul a to za normálního tlaku řádově pro 10^{25} částic na metr krychlový vzduchu. Popis zvuku jako mechanického vlnění vzduchu se proto z praktických důvodů odehrává vždy v měřítku mnohařádově větším, než jsou rozměry a vzdálenosti mezi molekulami tvořícími látkové prostředí.

Namísto sledování pohybu jednotlivých molekul budu dále zvukové kmitání modelovat pomocí kmitání makroskopických elementů, jakýchsi myšlených „balíčků“ vzduchu řádově větších než je mikroskopická struktura látky a zároveň menších než je měřítko prostorového rozložení akustického tlaku ve zvukovém poli. V případě popisu šíření zvuku ve vzduchu to znamená, že myšlené makroskopické elementy vždy musí mít rozměry mnohařádově větší než jsou rozměry molekul (řádově 10^{-10} m) a vzdálenosti mezi molekulami vzduchu (řádově 10^{-7} m) a současně musejí být alespoň o řád menší než vlnová délka zkoumaného zvukového vlnění vzduchu. Takovýto kmituschopný element obsahuje při klidovém objemu V určité makroskopické množství dané látky. Při splnění obou rozměrových podmínek je pak možné spojitě látkové prostředí v přiblížení nahradit modelem složeným z jednotlivých vzduchových elementů. Skutečné spojitě rozložené hustoty a tlaku za přítomnosti zvukového vlnění přitom v jednoduchém nespojitě nahradíme homogenním rozložením látky a tím i tlaku plynu v každém z vytyčených elementů.

Představme si pro jednoduchost malý objemový element vzduchu v kartézských souřadnicích jako krychličku vymezenou ze všech stran myšlenou pružnou blánou. Prostor vyplněný plynem si pak můžeme zjednodušeně představit jako by byl plyn pomyslně „rozkrájený na kostičky“. Provedli jsme tak nahrazení spojitěho prostředí nespojitěm modelem v podobě pravidelného prostorového rastru vytvořeného z těsně sousedících krychlových elementů plynu. Jedná se samozřejmě pouze o myšlené elementy, ale pro představu lze jako nejhrubší aproximaci uvažovat hmotnostní elementy vzduchu vymezené v souladu s druhým požadavkem pro frekvenci 1 kHz bez přítomnosti zvukového vlnění pomyslnými krychličkami s hranou 1 cm. V každém takovém elementu plynného vzduchu by za normálního atmosférického tlaku (100 kPa) stále bylo řádově 10^{19} molekul.

Z hlediska modelu ideálního plynu je takto možné uvažovat, jen pokud vymezení elementů pomyslnou neprostupnou blánou nebude mít vliv na rozložení částic v prostoru. Předpokládám přitom, že by odraz částic na myšlené hranici elementu probíhal obdobně, jako kdyby částice element opouštěla a místo ní jiná do elementu vstoupila. Jak v pomyslně uzavřeném, tak v otevřeném elementu pak celkový počet elementárních částic zůstává zachován, neboť vlivem neuspořádaného tepelného pohybu jich statisticky vzato do sledovaného objemu vstupuje tolik, tolik ho opouští.

Sledovaný miniaturní pružně-hmotný element plynné látky se vlivem podélného vlnění plynu může pohybovat sem a tam a zároveň měnit svůj objem. Popišme si, co se vlastně vlivem vlnění s vytyčeným elementem látky děje ve zpomaleném pohledu. Využijí zde analogie modelu krychlových elementů vzduchu redukovaného na jednu dimenzi s podélným vlněním řady spřažených kyvadel na Machově kyvadlovém vlnostroji.



Obr. 11: Na základě analogie podélného kmitání nekonečné řady spřažených kyvadel (nahore) vytvořený jednodimenzionální nespojitý model látkového prostředí (dole) v rozvlněném stavu.
Zdroj: vlastní

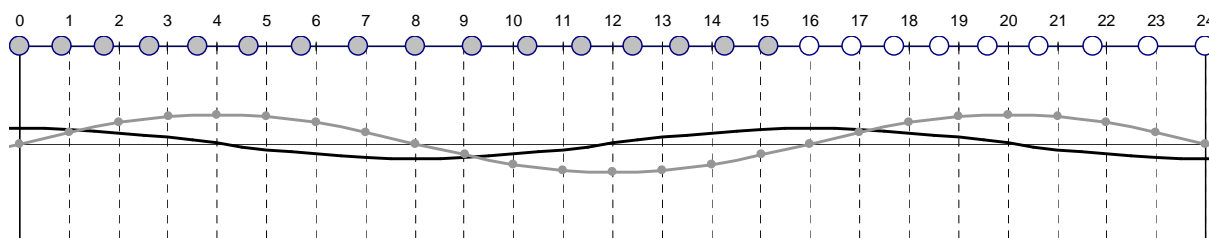
Model podélného harmonického vlnění na obrázku 11 s vlnovou délkou rozloženou na 16 kyvadel z nekonečné řady následně přenesený na 16 krychlových elementů vzduchu byl vytvořen v MS Excel. Pro přehlednost jsem zvolil nejmenší možný počet prvků, který sice jen velmi hrubě aproximuje skutečné spojité prostředí, zato však umožňuje dále přehledně popsat všechny význačné fáze kmitání. Měřítka pro výchylku kmitání hranic elementu, tedy i jeho těžiště, je kvůli názornosti obrázků oproti skutečnosti mnohařádkově zvětšeno. Ve vzdálenosti jedné vlnové délky λ se prostorové rozložení fází kmitání dále periodicky opakuje. Každé kyvadlo proto kmitá vůči předcházejícímu kyvadlu v řadě se zpožděním daným počtem kyvadel připadajícím na vlnovou délku. V 16 prvkovém modelu to znamená časové zpoždění mezi kyvadly ve směru šíření vlny o velikosti $1/16$ periody kmitání T každého z kyvadel, respektive rozdíl fáze kmitu o velikosti $1/8 \pi$ radiánů.

Kyvadlový model v hrubém přiblížení znázorňuje situaci, kdy se látkou šíří harmonická rovinná zvuková vlna. Důležitá je zde vzájemná korespondence prvků obou analogických modelů. Kmitání kyvadel zastupuje v modelu složeném z pružně-hmotných

elementů kmity hranic elementu v jednom ze tří rozměrů. Vzájemná vzdálenost kyvadel v rozvlněném stavu tak zastupuje objem pomyslného pružně-hmotného elementu plynného prostředí. Těžiště systému každé dvojice přímo sousedících kyvadel zastupuje za předpokladu homogenního rozložení látky v elementu těžiště myšleného hmotnostního elementu látky. Pokud by pomyslné pružně-hmotné elementy byly krychličky vzduchu s hranou 1 cm, odpovídala by vlnové délce 16 cm, tedy frekvenci kmitání 2125 Hz.

Vodorovná osa ve schématu na obrázcích 11 a 12 udává relativní vzdálenost kyvadla od počátku řady. Šedá křivka ve schématickém grafu na obrázku 12 dole znázorňuje výchylku kyvadel z klidové polohy. Černá křivka znázorňuje velikost vzájemných vzdáleností mezi kyvadly danou rozdílem jejich výchylek. Svislá osa grafu na obrázku 12 odpovídá okamžité výchylce kyvadel z rovnovážné polohy, respektive relativní změně vzdálenosti kyvadel vztažené na klidovou vzdálenost mezi dvěma kyvadly. Vertikální čáry v řadě spřažených kyvadel na obrázku 12 znázorňují klidové pozice kyvadel. Zmenšení relativní vzdálenosti dvou kyvadel v kyvadlovém modelu je analogické stlačení pružného plynného elementu v jednom rozměru vedoucí ke zmenšení objemu a zvýšení tlaku v elementu. Tlak v elementu je na obrázku 11 zjednodušeně zobrazen ve stupních šedi tak, že přetlak je znázorňen tmavě šedou a podtlak světlejší šedou.

Důležité je uvědomit si souvislost mezi výchylkou kyvadla a relativní vzdáleností mezi nejbližšími kyvadly. Z obrázku 12 zobrazujícího tvar podélné vlny v řadě kyvadel v jednom časovém okamžiku, jakoby zastavený v čase, je dobře patrné, že k maximálnímu přiblížování kyvadel v modelu postupné vlny dochází jinde než k maximální výchylce kyvadel. K maximálnímu vzájemnému přiblížení nebo oddálení kyvadel dochází vždy okolo kyvadla, které právě prochází rovnovážnou polohou. Tam, kde je výchylka kyvadla maximální, odpovídá jeho vzdálenost se sousedními kyvadly zhruba klidové vzdálenosti bez přítomnosti vlnění. Výchylka a stlačení jsou tedy v postupné podélné vlně delokalizované. V tomto případě má prostorové posunutí mezi výchylkou kmitání a stlačením velikost $1/4$ vlnové délky λ . Přiblížování kyvadel v analogii mezi modely symbolizuje stlačování látky. Pak lze usuzovat, že i ve skutečné zvukové vlně postupující spojitým látkovým prostředím jsou výchylka kmitání a střídavá složka tlaku prostorově posunuté. Jak dále ukáží v kapitole 4, nelze tak při popisu zvukového pole prostorové rozložení tlaku v určitém časovém okamžiku zaměňovat s prostorovým rozložením výchylky kmitání.



Obr. 12: Interpolovaný průběh výchylky podélného kmitání nekonečné řady kyvadel (šedá křivka) a jejich vzájemné vzdálenosti (černá křivka) v závislosti na pozici v bodové řadě. Svislá osa relativní výchylka, resp. vzájemná relativní vzdálenost kyvadel vztažená na klidovou vzdálenost kyvadel. Zdroj: vlastní

Sledujeme teď vývoj kmitání jedné libovolné dvojice sprzęžených kyvadel z nekonečné řady, jak se děje postupně v čase. Dvojice kyvadel dále v jednodimenzionálním pohledu reprezentuje kmitající hranice pružně-hmotného elementu vzduchu kolmé na směr šíření vlnění, zatímco hranice elementu rovnoběžné se směrem vlnění zůstávají nehybné. Předpokládejme, že řadou kyvadel se šíří vlnění s vlnovou délkou 16-tinásobně větší než je klidová vzdálenost mezi kyvadly zleva doprava. To odpovídá případu, jako by na krychlový element vzduchu o rozměru $1 \times 1 \times 1$ cm rovnoběžně s jeho stěnou dopadala zleva rovinná vlna s vlnovou délkou 16 cm.

Tab. 3: Schématické znázornění časového průběhu výchylky kmitání hranic a těžiště pružně-hmotného elementu (vpravo) v analogii s kmitáním dvojice sprzęžených kyvadel (vlevo). Zdroj: vlastní

t / s	Kyvadlo č.1		časový průběh kmitání dvojice kyvadel a těžiště $y_1, y_T, y_2 / 2A$	Kyvadlo č.2		časový průběh vzdálenosti kyvadel $(y_1 - y_2) / A$	t / s	časový průběh kmitů pružně-hmotného elementu látky
	fáze kmitu φ_1 / rad	relativní výchylka y_1 / A		fáze kmitu φ_2 / rad	relativní výchylka y_2 / A			
0	0	0		$14/8\pi$	$\sqrt{2}/2$		0	
$1/16 T$	$1/8\pi$			$15/8\pi$	0		$1/16 T$	
$2/16 T$	$2/8\pi$	$\sqrt{2}/2$		0	0		$2/16 T$	
$3/16 T$	$3/8\pi$			$1/8\pi$			$3/16 T$	
$4/16 T$	$1/2\pi$	1		$2/8\pi$	$\sqrt{2}/2$		$4/16 T$	
$5/16 T$	$5/8\pi$			$3/8\pi$			$5/16 T$	
$6/16 T$	$6/8\pi$	$\sqrt{2}/2$		$1/2\pi$	1		$6/16 T$	
$7/16 T$	$7/8\pi$			$5/8\pi$			$7/16 T$	
$8/16 T$	π	0		$6/8\pi$	$\sqrt{2}/2$		$8/16 T$	
$9/16 T$	$9/8\pi$			$7/8\pi$			$9/16 T$	
$10/16 T$	$10/8\pi$	$-\sqrt{2}/2$		π	0		$10/16 T$	
$11/16 T$	$11/8\pi$			$9/8\pi$			$11/16 T$	
$12/16 T$	$12/8\pi$	-1		$10/8\pi$	$-\sqrt{2}/2$		$12/16 T$	
$13/16 T$	$13/8\pi$			$11/8\pi$			$13/16 T$	
$14/16 T$	$14/8\pi$	$-\sqrt{2}/2$		$12/8\pi$	-1		$14/16 T$	
$15/16 T$	$15/8\pi$			$13/8\pi$			$15/16 T$	
T	2π	0		$14/8\pi$	$-\sqrt{2}/2$		T	

Na obrázku v tabulce 3 vlevo je v řádcích pod sebou zobrazeno 16 časových okamžiků zachycujících všechny význačné fáze kmitání dvojice spřažených kyvadel a jejich těžiště reprezentujících dále fáze kmitání hranic a těžiště myšleného pružného hmotnostního elementu vzduchu (obrázek vpravo) od časového okamžiku $t = 0$ do $t = 15/16 T$. Od okamžiku $t = T$ se kmitání dále periodicky opakuje. Směr postupu vlnění na obrázcích v tabulce 3 je zleva doprava. Sledujeme výchylky obou hranic i těžiště elementu a vzájemnou vzdálenost hranic elementu pro ustálený stav již trvajících jednodimenzionálního harmonického vlnění jdoucího z nekonečna do nekonečna. V prostředním grafu je znázorněno vzájemné přiblížení kyvadel vztažené na amplitudu výchylky jako analogie stlačení pružně-hmotného elementu.

Důležité je vhodně zvolit časový okamžik, od kterého budeme dále počítat čas. Jako výchozí časový okamžik $t = 0$ s zvolím časový okamžik, kdy první kyvadlo prochází rovnovážnou polohou směrem od zdroje vlnění, což odpovídá situaci, kdy ustálené harmonické zvukové vlnění právě vstupuje do sledovaného elementu fází přetlaku, v jehož důsledku levá hranice sledovaného elementu právě prochází rovnovážnou polohou ve směru šíření vlnění, zde směrem doprava. Při pohybu levé hranice elementu doprava dochází postupně k jeho stlačování, které je maximální v časovém okamžiku $t = 1/16 T$ sekund, kdy rovnovážnou polohou právě prokmitává těžiště elementu. To dále vykonává část kmitu z rovnovážné polohy směrem od zdroje vlnění (doprava), až v čase $t = 5/16 T$ sekund dosáhne maximální výchylky kmitu. V okamžiku maximální výchylky těžiště elementu směrem od zdroje je rychlost kmitání elementu nulová a tlak v elementu je roven atmosférickému tlaku.

Poté element začne vykonávat část kmitu orientovanou směrem zpět do rovnovážné polohy (doleva). Rychlost pohybu elementu narůstá, tlak v elementu klesá, až v okamžiku $t = 9/16 T$ sekund těžiště elementu prokmitne maximální rychlostí rovnovážnou polohou. V tom okamžiku je objem elementu maximální a tlak v elementu minimální. Element pokračuje v kmitu směrem ke zdroji (doleva), přičemž postupně zpomaluje, až se v čase $t = 13/16 T$ sekund jeho těžiště zastaví na maximu své výchylky směrem blíže ke zdroji vlnění. Mezi rovnovážnou polohou a maximem výchylky těžiště bližší zdroji vlnění se objem elementu postupně zmenšuje a tlak v elementu přitom narůstá až na hodnotu atmosférického tlaku plynu v okamžiku dosažení maximální výchylky těžiště elementu. Následuje část kmitu směrem od zdroje vlnění (doprava), během které rychlost elementu opět postupně narůstá, až v okamžiku průchodu těžiště rovnovážnou polohou v čase $t = T$ sekund dosáhne maxima, a dále postupně klesá. Tlak v elementu narůstá do okamžiku průchodu rovnovážnou polohou $t = T$ sekund a poté klesá na atmosférický tlak až do chvíle, kdy těžiště elementu dosáhne maxima výchylky ve směru od zdroje vlnění. Dále se kmitání elementu periodicky opakuje.

Z pozorování kmitů dvojice vázaných kyvadel vyplývají důležité obecné závěry pro model kmitání pružně-hmotného elementu vzduchu. Výchylka kmitání směrem od zdroje je vždy spojena se stlačováním elementu, zatímco výchylka směrem zpět ke zdroji s jeho rozpínáním. Když je výchylka těžiště nulová, je tlak v elementu (podle směru průchodu) buď maximální, nebo minimální. V okamžiku maximální výchylky těžiště elementu je střídavá složka tlaku rovna nule. Při průchodu těžiště elementu rovnovážnou polohou, kdy je element maximálně stlačený, nabývá rychlost kmitání ve směru od zdroje maximální kladné hodnoty. Při průchodu rovnovážnou polohou v opačném směru, tedy směrem zpět ke zdroji vlnění, kdy je tlak v elementu minimální, dosahuje rychlost kmitání své maximální záporné hodnoty. Jak je zřejmé, mechanická výchylka kmitání těžiště elementu je tedy za tlakem plynu v elementu zpožděná o čtvrtinu periody kmitání ($T/4$), respektive fázově posunutá o $\pi/2$ radiánů, zatímco tlak v elementu a rychlost podélného kmitání těžiště elementu jsou spolu ve fázi. To je velmi důležité zjištění. I když jsou tedy výchylka kmitání a akustický tlak za určitých podmínek (viz příloha C2) veličiny lineárně závislé, neplatí kvůli fázovému posunu lineární závislost mezi okamžitou výchylkou $y_{\sim}(t)$ a okamžitou hodnotou akustického tlaku $p_{\sim}(t)$. Ta platí pouze pro vztah mezi okamžitými složkami tlaku $p_{\sim}(t)$ a rychlosti kmitání $v_{\sim}(t)$. Při popisu zvukového kmitání tak nelze vztahy platné pro výchylku kmitání přímo použít i pro akustický tlak.

3.1.6 AKUSTICKÁ RYCHLOST A AKUSTICKÁ IMPEDANCE

Při pohledu na grafické znázornění časového průběhu kmitání pružně-hmotného elementu v tabulce 3 vpravo, je zřejmé, že vykonává současně dva druhy kmitů. Dosud jsme při popisu zvuku uvažovali jen objemové kmity elementu konstantní hmotnosti, což vede k již zmíněným změnám hustoty plynu a změnám tlaku plynu ve zvoleném elementu. Dále se nyní zaměřím na formalizaci popisu translačních kmitů hmotnostního elementu. Za předpokladu homogenního rozložení látky v objemu vytyčeného elementu představuje jeho geometrický střed současně jeho těžiště. V nejjednodušším případě kmitá těžiště sledovaného hmotnostního elementu kolem své rovnovážné polohy translačními kmity harmonicky s okamžitou výchylkou $y_{\sim}(t)$ popsanou rovnicí

$$y_{\sim}(t) = y_{\sim A} \cdot \sin(\omega t), \quad (1.10)$$

v níž $y_{\sim}(t)$ označuje okamžitou hodnotu výchylky kmitání ve směru šíření vlnění v čase t a $y_{\sim A}$ označuje amplitudu výchylky. Okamžitá rychlostí kmitání těžiště elementu $v_{\sim}(t)$ pak podle výsledků pozorování experimentu s kmitáním dvojice kyvadel vzhledem ke zjištěnému fázovému posunu $\pi/2$ radiánů vůči průběhu okamžité výchylky kmitání odpovídá rovnici

$$v_{\sim}(t) = v_{\sim A} \cdot \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) = v_{\sim A} \cdot \cos(\omega t), \quad (1.11)$$

kde $v_{\sim}(t)$ je velikost okamžité rychlosti kmitavého pohybu a $v_{\sim A}$ její amplituda. V případě zvukem vyvolaných kmitů elementů vzduchu se této střídavé složce rychlosti často říká akustická rychlost. $v_{\sim}(t)$ je pak okamžitá hodnota a $v_{\sim\text{ef}}$ efektivní hodnota akustické rychlosti.

Okamžitou hodnotu proměnné složky tlaku plynu v pulsujícím pružném elementu $p_{\sim}(t)$ jakožto výsledek změn vzájemné vzdálenosti jeho kmitajících hranic lze na základě analogie se stlačováním kyvadel vlnostroje s ohledem na zjištěný fázový posun vůči výchylce kmitání popsat rovnicí

$$p_{\sim}(t) = p_{\sim A} \cdot \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) = p_{\sim A} \cdot \cos(\omega t), \quad (1.12)$$

kde $p_{\sim}(t)$ je velikost okamžité hodnoty střídavé složky tlaku v elementu a $p_{\sim A}$ její amplituda. Z pozorování časového průběhu kmitání dvojice spřažených kyvadel vlnostroje popsaných rovnicemi 1.11 a 1.12 tak po přenesení zjištěných vlastností na model plynného látkového prostředí tvořeného pružně-hmotnými elementy vyplývá, že okamžitá rychlost kmitání sledovaného elementu (bráno ve směru šíření vlnění) a okamžitá hodnota střídavé složky tlaku plynu v elementu vzduchu jsou spolu ve fázi.

Pro značení efektivní hodnoty akustické rychlosti $v_{\sim\text{ef}}$ určené za dobu τ se pro zjednodušení zápisu používá podobně jako v případě tlaku index „a“, tedy značka v_a . Bude-li dále řeč o akustické rychlosti bez dalšího doplnění, zda se jedná o okamžitou hodnotu, efektivní hodnotu nebo amplitudu, bude tím myšlena vždy efektivní hodnota akustické rychlosti $v_{\sim\text{ef}}$. Pro speciální případ harmonického kmitání přitom opět platí jednoduchý vztah

$$v_a = v_{\sim\text{ef}} = \frac{v_{\sim A}}{\sqrt{2}}. \quad (1.13)$$

Je nutné mít stále na paměti, že kmitajícími elementy látky nejsou přímo jednotlivé elementární částice. Pozor také na záměnu různých veličin označovaných pojmem „rychlost“, zejména na záměnu rychlosti translačních kmitů těžiště sledovaného elementu látky v a rychlosti šíření vlnění látkou c (nemluvě o potenciální záměně se střední kvadratickou rychlostí neuspořádaného pohybu molekul v dosud používaném středoškolském modelu zvuku). V anglické literatuře jsou proto obě akustické veličiny jednoznačně odlišeny pojmy „velocity“ pro akustickou rychlost a „speed of sound“ pro rychlost šíření zvukového vlnění. V němčině se pro akustickou rychlost užívá pojem „Schallschnelle“, pro rychlost šíření zvuku „Schallgeschwindigkeit“ [37]. V češtině bohužel takto jednoznačné rozlišení obou veličin neexistuje a je proto nutné používat přesná víceslovná označení zmíněných veličin.

Čím vyšší je akustický tlak zvuku, tím větší to znamená výchylku translačních kmitů elementů i jejich rychlost. Nejslabším slyšitelným zvukům tak odpovídá efektivní hodnota výchylky kmitání elementů vzduchu v řádu 10^{-12} m a akustická rychlost v řádu 10^{-8} m·s⁻¹, běžným zvukům jako řeči člověka ve vzdálenosti 1 metru odpovídá efektivní výchylka kmitání v řádu desítek nanometrů (10^{-8} m) a akustická rychlost řádově desetiny milimetru za sekundu (10^{-4} m·s⁻¹). Nejhlasitější slyšitelné zvuky pak reprezentují hodnoty výchylky kmitání elementů vzduchu v řádu desítek mikrometrů (10^{-5} m) a rychlost kmitání v řádu desetiny metru za sekundu (10^{-1} m·s⁻¹). V měřítku menším než je vlnová délka, je akustickou rychlost možné si představit jako oscilační proudění plynu a při vysokých hodnotách ho tak lze skutečně i měřit pomocí extrémně citlivého anemometru nebo takzvané Rayleighovy destičky. V běžné praxi je však měření akustické rychlosti značně obtížné. Z toho důvodu je pro objektivní popis zvuku primárně používána snáze měřitelná veličina akustický tlak.

V případě modelu rovinné vlny je v každém časovém okamžiku poměr okamžitých hodnot akustického tlaku a akustické rychlosti konstantní. Tento poměr se označuje jako vlnový odpor prostředí neboli jmenovitá akustická impedance Z_0 , pro niž platí

$$Z_0 = \frac{p_{\sim}(t)}{v_{\sim}(t)} = \frac{p_{\sim\text{ef}}}{v_{\sim\text{ef}}} = \rho_{\sim} \cdot c, \quad (1.14)$$

kde ρ_{\sim} je střední hustota látky v klidovém stavu a c rychlost šíření zvuku vlněním látky. Týká se to jak poměru efektivních hodnot $p_{\sim\text{ef}}$ a $v_{\sim\text{ef}}$, tak, vzhledem ke shodné fázi změny tlaku a rychlosti kmitání v postupné podélné vlně, skutečně i poměru okamžitých hodnot střídavých složek $p_{\sim}(t)$ a $v_{\sim}(t)$. Pro pevné látky nabývá jmenovitá akustická impedance velikosti v řádu 10^6 až 10^8 N·s·m⁻³ a pro kapaliny řádově 10^6 N·s·m⁻³ (voda $Z_0 = 1,5 \cdot 10^6$ N·s·m⁻³). Plyny mají jmenovitou akustickou impedanci v řádu 10^2 N·s·m⁻³ (vzduch $Z_0 = 408$ N·s·m⁻³).

Pro model rovinné vlny je pak možné vypočítat velikost akustické rychlosti pomocí výše uvedeného vztahu na základě znalosti impedance prostředí a měření akustického tlaku. Pro jiný tvar vlny než je rovinná vlna, a to například i pro idealizovanou kulovou vlnu, však není poměr akustického tlaku a akustické rychlosti konstantní a nabývá komplexního tvaru. Výpočet akustické rychlosti podle výše uvedeného vzorce na základě měření akustického tlaku v malé vzdálenosti od zdroje s sebou tudíž vždy nese jistou systematickou chybu. Navíc se v reálných podmínkách uplatňují odrazy vlnění a další vlnové jevy. Výsledný tvar vlny, respektive časového průběhu rozložení akustického tlaku ve zvukovém poli, je pak velmi složitý. Jedná se pak tedy spíše jen o aproximativní odhad velikosti akustické rychlosti.

3.1.7 HLADINOVÉ VYJÁDŘENÍ AKUSTICKÝCH VELIČIN

Chceme-li kvantitativně vyjádřit velikost fyzikální veličiny, máme několik možností. Nejjednodušší je udávat veličinu x s jednotkou $[x]$ vůči vztažné hodnotě jako rozdíl aktuální hodnoty $\{x_1\}$ a vztažné hodnoty $\{x_0\}$ pomocí takzvané absolutního vyjádření veličiny

$$x = \{x_1 - x_0\} \cdot [x]. \quad (1.15)$$

Nejčastěji je jako vztažná neboli referenční hodnota volena nulová hodnota veličiny $\{x_0\} = 0$. Takto se udává například délka v metrech, teplota ve stupních Celsia nebo tlak v pascálech. Druhou možností popisu velikosti fyzikálních veličin je poměrné vyjádření aktuální hodnoty veličiny $\{x_1\}$ vůči vztažné hodnotě $\{x_0\}$ dané jejich podílem

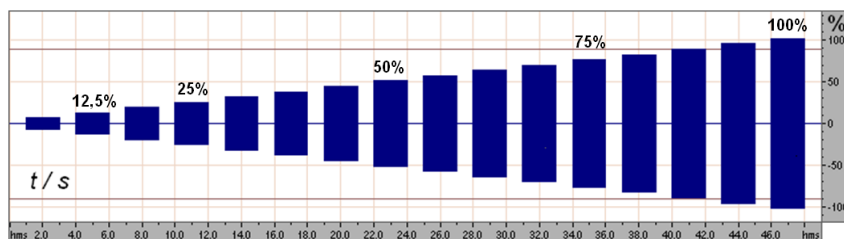
$$X = \frac{\{x_1\}}{\{x_0\}}. \quad (1.16)$$

Takovéto vyjádření veličiny je vždy bezrozměrné. Nemá tedy žádnou jednotku. Poměrné vyjádření přitom lépe popisuje fyzikální veličiny nabývající velkého rozsahu hodnot nebo případy, kdy nás zajímá spíše změna hodnoty veličiny než přímo její hodnota samotná.

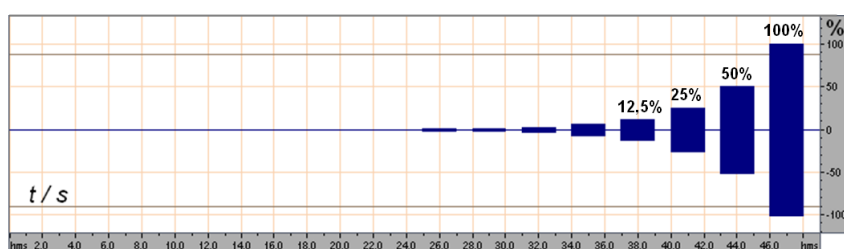
Pomocí jednoduchého experimentu je možné ukázat, jak člověk subjektivně vnímá změnu akustického tlaku zvukového podnětu. Předpokladem je, že veličiny popisující zvukové kmitání a vlnění jsou vzájemně přímo úměrné, tedy že akustický tlak je při malých výchylkách přímo úměrný výchylce kmitání zdroje zvuku. Pro ideální elektricko-akustický měnič platí, že jeho mechanická výchylka závisí lineárně na napětí. Pro harmonický průběh je tudíž i změna amplitudy akustického tlaku přímo úměrná změně amplitudy výchylky mechanických kmitů zdroje zvuku respektive změně amplitudy elektrických kmitů generátoru harmonické funkce použitého jako zdroj napětí pro rozkmitání elektro-akustického měniče.

Poslechněte si dvě sekvence krátkých čistých tónů o frekvenci 1 kHz lišících se postupně narůstající amplitudou kmitání a porovnejte, jak se subjektivně mění vjem hlasitosti jednotlivých tónů v každé z obou sekvencí. Ukázky jsou uloženy na CD-ROM v adresáři „Kapitola 1“. Na základě toho lze rozhodnout, které ze dvou výše jmenovaných vyjádření veličiny lépe popisuje vnímání změn velikosti akustického tlaku člověkem. V první sekvenci (obrázek 13) se amplituda kmitání zvyšuje s konstantním krokem. Je dobře slyšitelné, že při konstantních krocích nárůstu amplitudy kmitání podnětu ovšem subjektivní vjem hlasitosti tónů nenarůstá s konstantním krokem. Vnímaný nárůst hlasitosti je nejprve velmi prudký a postupně je stále menší, až u posledních tónů sekvence mezi nimi není slyšitelný téměř žádný rozdíl. Je proto zřejmé, že aby subjektivní nárůst vjemu hlasitosti mezi jednotlivými tóny v sekvenci byl vnímán jako pokaždé stejný, musela by se zvyšovat amplituda kmitání

tonálních podnětů v sekvenci ne s konstantním, ale se stále větším a větším krokem. Platí tedy, že čím větší je amplituda, tím větší musí být i její změna, aby tato změna byla slyšet. Na základě přímé smyslové zkušenosti jsme tak odvodili jeden ze základních principů psychofyziky a psychologie vnímání formulovaný Weberovým-Fechnerovým zákonem.



Obr. 13: Časový průběh sekvence tónů s konstantním krokem zvyšování amplitudy. Zdroj: vlastní



Obr. 14: Časový průběh sekvence tónů s postupným zdvojnásobováním amplitudy. Zdroj: vlastní

Postupné zvětšování kroku při nárůstu amplitudy lze s dobrým přiblížením k subjektivně plynulému nárůstu hlasitosti nejnázve realizovat postupným zdvojnásobováním amplitudy s každým dalším přehraným tónem v sekvenci (obrázek 14). Opakované zdvojnásobování amplitudy vede k funkci typu $z = 2^n$. Pro poměr amplitudy A_n n -tého tónu v sekvenci vůči výchozímu prvnímu tónu v sekvenci platí

$$\frac{A_n}{A_0} = 2^n, \quad (1.17)$$

kde pořadí v sekvenci $n \in \{0, 1, 2, 3, \dots\}$ udává, kolikráté zdvojnásobení amplitudy A_n oproti výchozí amplitudě A_0 nastalo. Důsledkem zdvojnásobování je exponenciální růst amplitudy. Kolikrát byla amplituda A_n vůči A_0 zdvojnásobena lze zjistit pomocí dvojkového logaritmu poměru amplitudy n -tého podnětu v sekvenci A_n vůči výchozí amplitudě A_0 podle vzorce

$$n = \log_2 \frac{A_n}{A_0}. \quad (1.18)$$

Pokud sledovaná veličina nabývá hodnot v rozsahu několika desetinných řádů, je výhodnější popsat její změnu pomocí zdesetinásobování sledované veličiny podle obdobného vztahu jako

$$\frac{A_k}{A_0} = 10^k, \quad (1.19)$$

kde k udává počet zdesetinásobení A_k v poměru k A_0 . Obecně však exponenty násobných změn k a n nemusí být jen celá čísla. Kolikrát se libovolná hodnota veličiny $A=A_k=A_n$ zdesetinásobila vůči A_0 pak udává desítkový logaritmus poměru

$$k = \log_{10} \frac{A_k}{A_0} \cong 0,3 \cdot \log_2 \frac{A_n}{A_0} \cong 0,3 \cdot n. \quad (1.20)$$

Zdvojnásobování pak s využitím výše uvedeného přibližného vztahu mezi dvojkovým a desítkovým logaritmem můžeme snadno popsat i pomocí desítkového logaritmu.

3.1.8 HLADINA AKUSTICKÉHO TLAKU

Velikost efektivní hodnoty akustického tlaku může u běžných zvuků nabývat hodnot řádově mezi 10^{-5} do 10^2 Pa. Jak ukazuje experiment se změnou amplitudy zvukového kmitání, vnímá člověk sluchem spíše relativní změny velikosti akustického tlaku zvuku než přímo jeho velikost. Logaritmizované relativní vyjádření akustického tlaku tak lépe, i když ne zcela dokonale, odpovídá vlastnostem lidského sluchu v centrální oblasti rozsahu vnímání velikosti akustického tlaku podnětů. Pro objektivní popis zvuku se proto zavádí bezrozměrná veličina *hladina akustického tlaku* L_p definovaná jako logaritmizovaný poměr akustického tlaku vůči jeho referenční hodnotě vzorcem

$$L_p = 20 \cdot \log \frac{p_{\sim\text{ef}}}{p_0} \quad \text{dB}. \quad (1.21).$$

Označení hladiny akustického tlaku písmenem „ L “ vychází z anglického slova „Level“. Pro přehlednost a tam, kde není možné psát dolní index se používá k označení hladiny akustického tlaku často také zkratka „SPL“ anglického názvu této veličiny „Sound Pressure Level“. Výpočet velikosti akustického tlaku z hladinového vyjádření je možný po úpravě vzorce 1.21 na vztah

$$p_{\sim\text{ef}} = p_0 \cdot 10^{0,05 \cdot L_p} \quad \text{Pa}. \quad (1.22)$$

Referenční hodnotou pro hladinové vyjádření akustického tlaku je hodnota $p_0 = 20 \cdot 10^{-6}$ Pa. Nebyla zvolena nikterak náhodně. Z měření na velkém vzorku pokusných osob bylo zjištěno, že hodnota $20 \mu\text{Pa}$ odpovídá nejnižšímu akustickému tlaku pro tón s kmitočtem 1 kHz, jakou většina lidí ještě slyší. Této hodnotě akustického tlaku byla definicí přiřazena nulová hladina $L_{p0} = 0$ dB. Jak je možné si ve workshopu samostatně ověřit, odpovídá rozdíl hladin akustického tlaku o $\Delta L_p = 1$ dB zhruba rozlišení změny akustického

tlaku lidským sluchem. Hladinové vyjádření akustického tlaku tak představuje jednoduchou objektivní pomocnou míru přizpůsobenou vlastnostem vnímání akustického tlaku člověkem.

Použití hladin akustického tlaku namísto efektivních hodnot akustického tlaku navíc usnadňuje zápis výsledků měření a umožňuje jednoduché výpočty tím, že v podstatě převádí násobení na sčítání. Relativní změnu efektivní hodnoty akustického tlaku z p_{a1} na p_{a2} lze tedy vyjádřit jako rozdíl hladin akustického tlaku ΔL_p podle vzorce

$$\Delta L_p = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{p_{a2}}{p_{a1}} \right) = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{p_{a2}}{p_0} \right) - 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{p_{a1}}{p_0} \right) = L_{p2} - L_{p1}. \quad (1.23)$$

Tab.4: Hodnoty hladin akustického tlaku pro zdvojnásobování velikosti akustického tlaku

ΔL_p	-12 dB	-6 dB	0 dB	+6 dB	+12 dB	+18 dB	+24 dB	+30 dB	+36 dB	+42 dB	+48 dB	+54 dB	+60 dB
p_{a2}/p_{a1}	1/4	1/2	1	2	4	8	16	32	64	128	256	512	1024

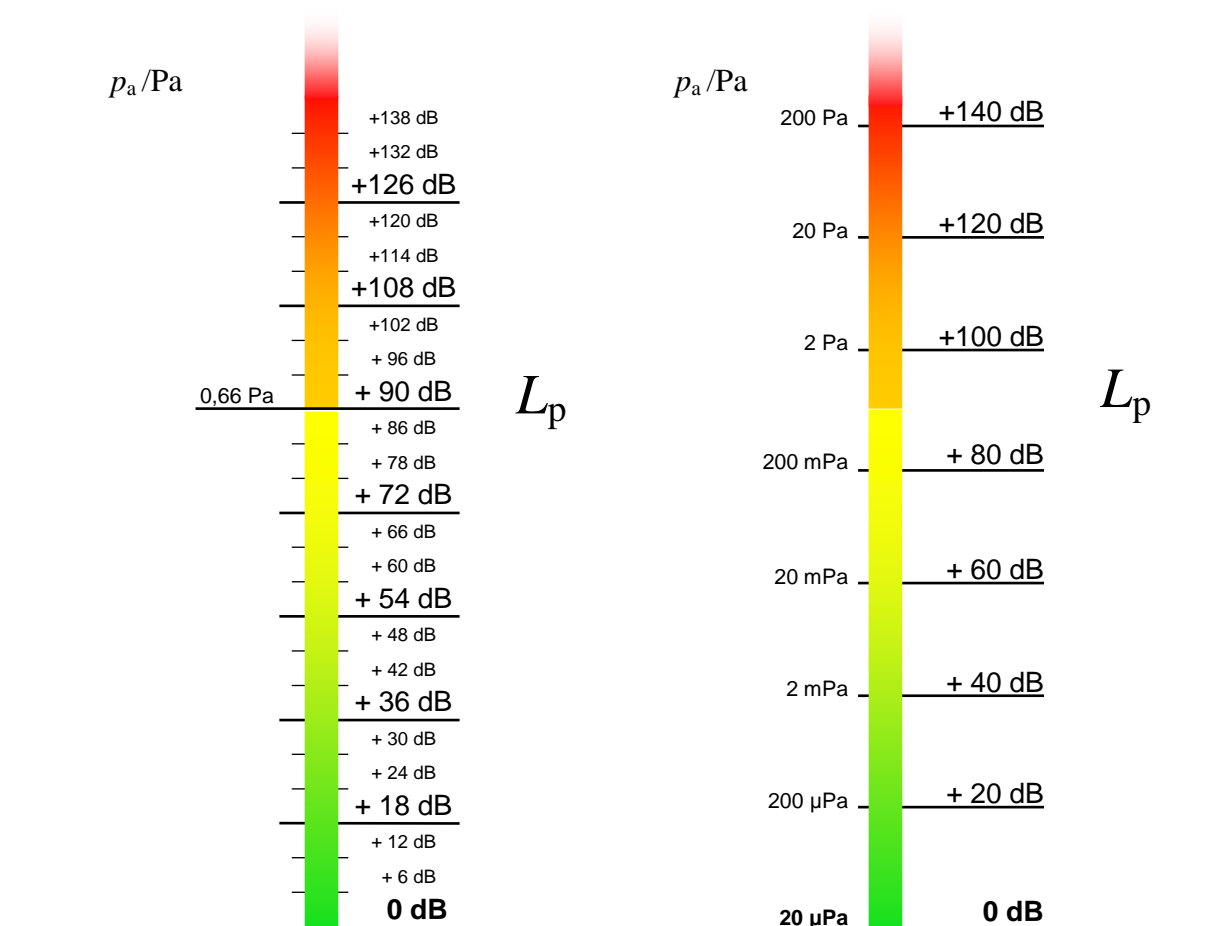
Tab.5: Hodnoty hladin akustického tlaku pro zdesetinásobování velikosti akustického tlaku

ΔL_p	-60 dB	-40 dB	-20 dB	0 dB	+20 dB	+40 dB	+60 dB	+80 dB	+100 dB	+120 dB
p_{a2}/p_{a1}	1/1000	1/100	1/10	1	10	100	1 000	10 000	100 000	1 000 000

Každé zdvojnásobení akustického tlaku tedy odpovídá zvýšení hladiny akustického tlaku L_p přibližně o +6 dB, každé zdesetinásobení L_p zvýšení přesně o +20 dB. Převrácená hodnota argumentu znamená záporné znaménko hladiny akustického tlaku, takže poloviční akustický tlak znamená změnu L_p o -6 dB, respektive hladinu akustického tlaku nižší o 6 dB.

Hladinové vyjádření veličin je z principu vždy bezrozměrné. Na výše uvedený způsob výpočtu hladin veličiny zavedený v Bellových laboratořích v USA odkazuje pojmenování „decibel“ se značkou dB, která po téměř 100 letech používání získala status jakési „pseudojednotky“. Decibel (dB) však podobně jako procenta (%) není fyzikální jednotkou a rozhodně není „jednotkou zvuku“. Decibel je univerzální logaritmická míra hladinového vyjádření a svým formálním užitím pouze jistým způsobem jednotky, jak je ve fyzice chápeme, připomíná.

Pro znázornění hladinového vyjádření akustického tlaku v decibelech se mi ve výuce osvědčilo zobrazit ji pomocí analogie stupnice hladin akustického tlaku s Celsiovou teplotní stupnicí. Za analogické je možno považovat postup při definici „nuly“ i při volbě velikosti dílku obou stupnic. Pro co největší názornost jsem zvolil zobrazení pro zdvojnásobování a zdesetinásobování akustického tlaku. Stupnice na obrázku 15 navíc žákům poslouží pro rychlý odhad velikosti akustického tlaku z hladinového vyjádření a naopak.



Obr. 15: Grafické znázornění stupnice hladin akustického tlaku v decibelech pro zdvojnásobování akustického tlaku (vlevo) a zdesetinásobování akustického tlaku (vpravo). Zdroj: vlastní

Faktor 10 ve vzorci 1.21 slouží pro „zjemnění“ původní velmi hrubé stupnice v belech (značka „B“). Hodnoty „desetinových“ hladin jsou proto označovány předponou „deci“ jako decibel se značkou dB. Faktor 2 ve vzorci 1.21 vychází z původní definice hladinového vyjádření v telegrafní technice pro poměry výkonů, později přejaté a upravené pro další veličiny. Výkon přitom, jak dále ukáží, závisí na akustickém tlaku druhou mocninou, takže se v případě tlaku jedná v podstatě o logaritmizovaný poměr druhých mocnin hodnot akustického tlaku. Pro zjednodušení zápisu se používá úpravy

$$L_p = 10 \cdot \log \frac{P_{\sim ef}^2}{P_0^2} \text{ dB} = 20 \cdot \log \frac{P_{\sim ef}}{P_0} \text{ dB} \quad (1.24)$$

podle vzorce

$$\log \frac{a^2}{b^2} = \log \left(\frac{a}{b} \right)^2 = 2 \cdot \log \left(\frac{a}{b} \right). \quad (1.25)$$

3.1.9 AKUSTICKÁ INTENZITA A AKUSTICKÝ VÝKON

Následující odstavec věnovaný akustickému výkonu a akustické intenzitě uvádím pouze pro úplnost. Výukový koncept digitálního zpracování zvukového signálu se bez jejich zavedení zcela obejde. Vzhledem k tomu, že však jsou obě tyto veličiny uváděny v učebnicích pro střední školy a jsou velmi rozšířené i v hovorovém jazyce, shrnu zde alespoň základní definice a vztahy.

Energetický popis zvukového pole je založený na předpokladu možnosti konání práce vlněním. Energie zvukového vlnění tak v podstatě vyjadřuje hypotetickou možnost konání mechanické práce kmitajícím zdrojem vlnění na dálku prostřednictvím rozvlněného látkového prostředí. Akustický výkon P je přitom mechanický výkon kmitajícího zdroje mechanického vlnění, který udává, jakou celkovou práci by takto mohl zdroj vykonat za čas jedné sekundy. Intenzita zvuku je pak zvuková energie, která projde za jednotku času jednotkovou plochou. Jedná se tedy o část celkového výkonu P vyzářeného zdrojem, vztaženou na plochu o velikosti $S = 1 \text{ m}^2$ kolmou ke směru šíření. Tím udává, jakou část z celkové hypotetické práce by prostřednictvím vlnění prostředí kmitající zdroj mohl vykonat za čas jedné sekundy na objektu s účinnou plochou 1 m^2 umístěném v přímém zvukovém poli zdroje zvuku. Jednotkou akustické intenzity je watt na metr čtvereční ($[P] = \text{W} \cdot \text{m}^{-2}$). Vzhledem k závislosti intenzity na orientaci jednotkové měřicí plochy vůči směru šíření vlnění je ovšem nutné používat vektorový zápis

$$\vec{I} = \frac{P}{S} . \quad (1.26)$$

Akustická intenzita popisuje zvukové vlnění látkového prostředí v určitém místě s vyšší měrou abstrakce než akustický tlak. Nelze ji přímo měřit. Lze ji však vypočítat jako součin měřitelných veličin akustického tlaku p_a a akustické rychlosti v_a , kdy pro efektivní hodnotu akustické intenzity platí vztah

$$\vec{I} = p_{\sim\text{ef}} \cdot \vec{v}_{\sim\text{ef}} . \quad (1.27)$$

Při aproximaci rovinnou vlnou ve volném akustickém poli lze velikost akustické intenzity přibližně určit z definice jmenovité akustické impedance látkového prostředí (1.14) upravené na tvar

$$p_{\sim\text{ef}} = v_{\sim\text{ef}} \cdot \rho_{\sim} \cdot c , \quad (1.28)$$

což vede k výslednému aproximativnímu vztahu pro výpočet velikosti akustické intenzity

$$I = \frac{P_{\sim\text{ef}}^2}{\rho_{\sim} \cdot c} , \quad (1.29)$$

kde měřená veličina popisující zvukové pole, efektivní hodnota p_{ef} , vystupuje v kvadrátu. ρ je střední hodnota hustoty prostředí, c je rychlost šíření vlnění a jejich součin představuje akustickou impedanci Z_0 s hodnotou pro vzduch řádově $400 \text{ N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-3}$.

Hlavním důvodem, proč nepoužívám hladinové vyjádření zároveň pro akustický tlak i akustickou intenzitu je, že při současném zavedení obou veličin se vzorce pro jejich výpočet a tabulky z počátku žákům velmi pletou. To nic nemění na faktu, že hladinové vyjádření pro výkon je historicky starší a bylo tudíž výchozí pro hladinové vyjádření akustického tlaku. Hladina akustického výkonu L_W se vypočítá podle vztahu

$$L_W = 10 \cdot \log \frac{P}{P_0} \text{ dB} , \quad (1.30)$$

kde P_0 je referenční výkon. Pro hladinu intenzity pak platí vztah

$$L_I = 10 \cdot \log \frac{I}{I_0} \text{ dB} , \quad (1.31)$$

kde referenční hodnota získaná výpočtem podle vzorce 1.29 z naměřené hodnoty akustického tlaku $p_0=20\cdot 10^{-6} \text{ Pa}$ odpovídá $I_0=1\cdot 10^{-12} \text{ Wm}^{-2}$. Úpravou vzorce 1.31 lze opět získat vztah pro zpětný přepočítání hladiny akustické intenzity na velikost intenzity

$$I = I_0 \cdot 10^{0,1\cdot L_I} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2} . \quad (1.32)$$

Pro dokonale rovinnou postupnou vlnu v dokonale volném poli by teoreticky platilo, že $L_p = L_I$. V podmínkách blížících se ideálu volného pole, jako jsou velké bezodrazové měřicí laboratoře, lze v dostatečné vzdálenosti od zdroje v prvním přiblížení skutečně vyjít ze vztahu 1.32 a považovat $L_p \approx L_I$. V běžných podmínkách měření ovšem není z principu možné zaměňovat hodnoty hladiny akustického tlaku za hodnoty akustické intenzity.

Tab.6: Souvislost hladinového vyjádření akustického tlaku a akust. intenzity pro zdvojnásobování

ΔL	-12 dB	-9 dB	-6 dB	-3 dB	0 dB	+3 dB	+6 dB	+9 dB	+12 dB	+15 dB	+18 dB
p_a/p_0	$1/\sqrt{16}$	$1/\sqrt{8}$	$1/\sqrt{4}$	$1/\sqrt{2}$	1	$\sqrt{2}$	$\sqrt{4}$	$\sqrt{8}$	$\sqrt{16}$	$\sqrt{32}$	$\sqrt{64}$
	0,25	$\approx 0,35$	0,5	$\approx 0,7$		$\approx 1,4$	2	$\approx 2,8$	4	$\approx 5,7$	8
I / I_0	1/16	1/8	1/4	1/2	1	2	4	8	16	32	64

Tab.7: Souvislost hladinového vyjádření akustického tlaku a akust. intenzity pro zdesetinásobování

ΔL	-20 dB	-10 dB	0 dB	+10 dB	+20 dB	+30 dB	+40 dB	+50 dB	+60 dB	...	+120 dB
p_a/p_0	$\sqrt{10^{-2}}$	$\sqrt{10^{-1}}$	1	$\sqrt{10}$	$\sqrt{10^2}$	$\sqrt{10^3}$	$\sqrt{10^4}$	$\sqrt{10^5}$	$\sqrt{10^6}$...	$\sqrt{10^{12}}$
	0,1	$\approx 0,3$		≈ 3	10	≈ 30	100	≈ 300	1 000		1 000 000
I / I_0	10^{-2}	10^{-1}	1	10^1	10^2	10^3	10^4	10^5	10^6	...	10^{12}
	0,01	0,1		10	100	1 000	10 000	100 000	1 000 000		

3.2 Základy číslicového zpracování zvuku

V dnešní době snad již neexistuje oblast fyziky, která by se obešla bez využití výpočetní techniky. Teoretická fyzika vytváří počítačové modely svých předpovědí, experimentální fyzika pracuje s digitálními měřicími přístroji propojenými s počítači a i ve výuce fyziky se počítače postupně prosadily jako důležitá učební pomůcka. Místo odečítání číselných hodnot veličiny ze stupnice ručkového měřicího přístroje a jejich pracného zapisování do sešitu nebo na tabuli je tak možné i během omezeného počtu vyučovacích hodin věnovaných výuce fyziky provádět dlouhodobá měření na reálných systémech, případně takové systémy modelovat v počítači na základě znalosti matematických vztahů. Ve fyzice na střední škole většinou mlčky předpokládáme, že digitální měřicí přístroje jsou složitá zařízení, která prostě „nějak“ fungují a neřešíme, jak vlastně fungují. Fyzika jakoby pro mnohé učitele fyziky končila u vstupních zdírek digitálního měřicího přístroje a dál už je na učiteli informatiky a výpočetní techniky, aby žáky vše potřebné naučil. Zobrazení naměřených či vypočítaných hodnot na displeji s velkým počtem cifer pak žáky často svádí k představě, že měření digitálními přístroji je dokonale spolehlivé a nekonečně přesné.

Fyzika na střední škole vychází z toho, že sledované fyzikální veličiny se mění jako spojitě funkce času a že proto hodnota konkrétní veličiny existuje v každém okamžiku plynoucího času. V předcházející kapitole 3.1 jsem zmínil, že zvukové vlnění vzduchu lze prostřednictvím akusticko-elektrického převodníku (mikrofonu) převést na kmitání elektrické. Základním předpokladem přitom je, že mezi časovým průběhem veličin popisujících zvukové vlnění v místě mikrofonu a časovým průběhem elektrického kmitání na výstupu tohoto měniče existuje jednoznačná souvislost, ideálně přímá úměrnost. Pak platí v libovolném časovém okamžiku jednoznačný vztah mezi okamžitou hodnotou akustického tlaku a jím vyvolanou okamžitou hodnotou střídavého napětí. Časové průběhy různých veličin – akustického tlaku, výchylky kmitání membrány mikrofonu a napětí na jeho výstupu – nesoucí tu samou informaci jsou analogické (z latinského „analogos“, obdoba). Napětí na výstupu mikrofonu zaznamenané v čase tak představuje jakýsi „otisk“ časového průběhu akustického tlaku v místě mikrofonu. Analogový záznam zvuku v tomto smyslu představuje získaný „plynulý“ časový průběh napětí.

Počítače a digitální zvuková technika však umějí pracovat pouze s čísly. Pokud tedy chceme zvukovou informaci přenést do počítače a dále zpracovávat nebo zvuk přímo v počítači vytvářet, musíme nejprve najít vhodný popis „plynule“ se měnícího časového

průběhu veličiny nesoucí zvukovou informaci pomocí jednotlivých čísel. Digitální zvuk pak představují vhodně zvolená a vhodně uspořádaná čísla. Analogově-digitální převod se obecně skládá ze tří procesů: Vzorkování spojitého časového průběhu analogového signálu, kvantizace hodnot vzorků a jejich kódování. Funkční hardwarový modul, který tyto tři operace provádí, se nazývá analogově-digitální převodník, krátce A/D-převodník. Zpětné převedení kódovaného digitálního signálu na analogový realizují obvody takzvaného digitálně-analogového převodníku, neboli D/A-převodníku.

3.2.1 VZORKOVÁNÍ

U spojitě se měnícího časového průběhu okamžité výchylky kmitání y nesoucí analogový zvukový signál existuje její hodnota v každém časovém okamžiku t , lidově řečeno pořád. Matematicky to znamená spojitost průběhu funkce $y(t)$ v čase t . Kdybychom chtěli dokonale popsat spojitý průběh takové funkce čísly, museli bychom popsat její funkční hodnotu v každém časovém okamžiku. To ale u spojitě funkce znamená nekonečně mnoho bodů a je samozřejmě v praxi neproveditelné. Můžeme však namísto toho průběh spojitě funkce popsat pomocí, sice ne nekonečně mnoha, ale pouze velmi mnoha jednotlivých bodů. Ze spojitého časového průběhu proměnné fyzikální veličiny čísly jsou proto v pravidelném taktu určovány jednotlivé číselné hodnoty veličiny. Tím získáme posloupnost čísel příslušejících funkčním hodnotám v určitých pevných časových okamžicích. Prozatím předpokládejme, že hodnotu veličiny samotné lze přiřazeným číslem popsat zcela přesně.

Určování hodnot spojitě funkce $y(t)$ v pravidelných časových intervalech si lze představit jako odebrání vzorků funkce v časových okamžicích

$$t = n \cdot T_s, \quad (2.1)$$

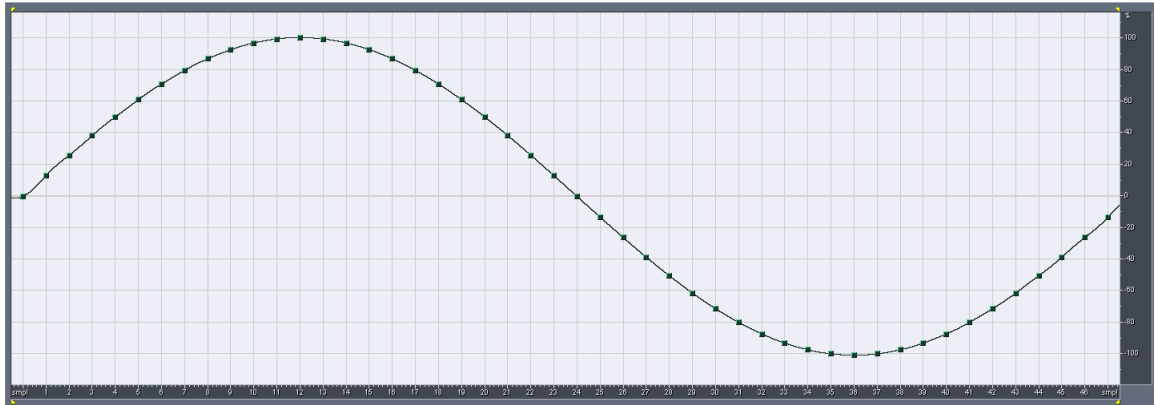
kde délka časového intervalu mezi jednotlivými odběry vzorků je označena jako perioda vzorkování T_s . I v češtině je konvencí užívat index „s“ z anglického slova „sample“ (vzorek). Pro četnost odebrání vzorků f_s neboli frekvenci vzorkování pak platí vztah

$$f_s = \frac{1}{T_s}. \quad (2.2)$$

Vzorkovaný časový průběh veličiny $y(t)$ je posloupností jednotlivých číselných hodnot vzorků $y[n]$, kde n je celé číslo určující pořadí vzorku v posloupnosti číslované od nuly a hranaté závorky značí, že se matematicky už nejedná o funkci, ale o posloupnost. Navzorkovaný signál tedy tvoří sled jednotlivých čísel. Stále předpokládáme, že hodnoty

veličiny y mohou být číslem popsány přesně. V časových okamžicích $t = n \cdot T_s$ by si pak byly hodnoty funkce a posloupnosti, která je jejím časově nespojitým obrazem, rovny. Platilo by

$$y[n] = y(nT_s). \quad (2.3)$$



Obr. 16: Interpolovaný časový průběh harmonického kmitání s frekvencí $f = 1$ kHz vzorkovaného taktém $f_s = 48$ kHz. Jedna perioda kmitání je popsána posloupností 48 číselných hodnot vzorků. Zdroj: vlastní

Z posloupnosti vzorků $y[n]$ je při znalosti frekvence vzorkování f_s možné spojitý průběh funkce zpětně rekonstruovat vhodnou interpolací. Otázkou je, kolik bodů, respektive kolik čísel, je potřeba, aby popsaly spojitý průběh funkce tak, aby nedošlo ke ztrátě informace nesené původním spojitým časovým průběhem. Odpověď částečně našel koncem dvacátých let minulého století Harry Nyquist (1889–1976). Nyquist zjistil, že spojitý časový průběh harmonických funkcí je možné zpětně rekonstruovat z posloupnosti jednotlivých hodnot, jsou-li k dispozici alespoň 2 vzorky na její periodu. Vzorkovací frekvence f_s musí tedy být alespoň dvojnásobná ve srovnání s frekvencí vzorkovaného harmonického kmitání f . Toto základní pravidlo pro volbu vzorkovací frekvence se nazývá Nyquistovo kritérium. Při pevné vzorkovací frekvenci f_s je pak možné popsat posloupností vzorků a z nich následně opět rekonstruovat spojitý průběh harmonických signálů s frekvencí f splňující podmínku

$$f \leq f_{\text{mez}} = \frac{1}{2} f_s, \quad (2.4)$$

kde f_{mez} udává horní mezní frekvenci, po jejímž překročení již není jednoznačná rekonstrukce původní spojitě funkce z posloupnosti hodnot možná. Otázkou je, co by se stalo, kdyby byl předpoklad uvedený ve vzorci 2.4 porušen a došlo k navzorkování harmonického průběhu s frekvencí kmitání vyšší než f_{mez} .

Základní problém nahrazení spojitého průběhu funkce posloupností jednotlivých hodnot je v tom, že pokud budou různé spojitě časové průběhy signálu nabývat v okamžicích

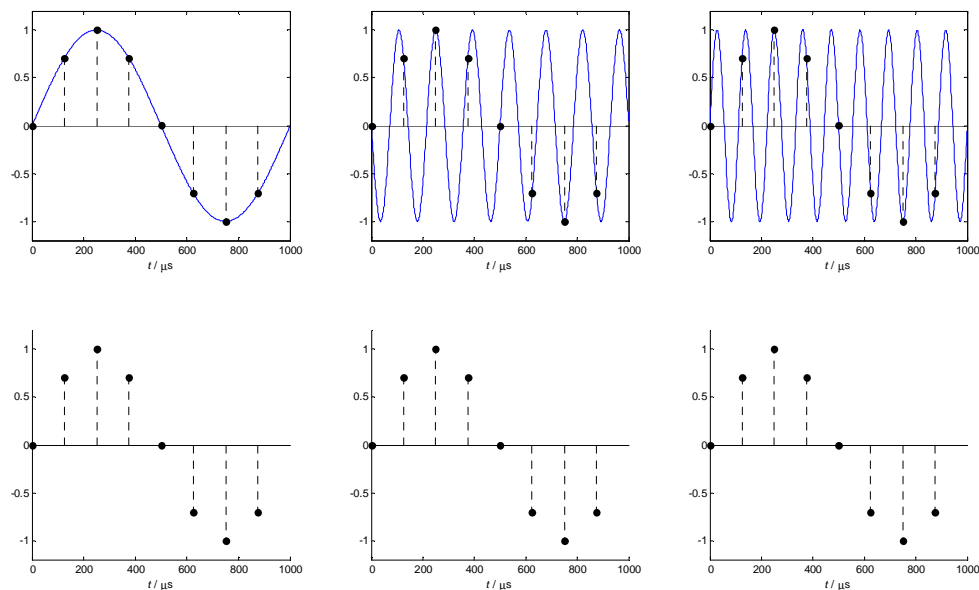
určení vzorku stejných hodnot, vytvoří úplně stejnou a vzájemně zcela neodlišitelnou posloupnost vzorků. Pokud budeme uvažovat nejjednodušší případ vzorkování čistě harmonického signálu, pak tento případ nastane pro každý harmonický signál s frekvencí vyšší než je polovina vzorkovací frekvence. To je možné snadno ověřit v MATLABu. Příklad na obrázku 17 vznikl navzorkováním harmonických kmitání s normovanou amplitudou $y_A = 1$ popsanych harmonickými funkcemi

$$y_1 = y_A \cdot \sin(2\pi f_1 \cdot t) \quad (2.5)$$

$$y_2 = y_A \cdot \sin(2\pi f_2 \cdot t + \pi) = -A \cdot \sin(2\pi f_2 \cdot t) \quad (2.6)$$

s frekvencemi $f_1 = 7$ kHz a $f_2 = 9$ kHz v rozporu s požadavkem Nyquistova kritéria nízkým vzorkovacím taktem $f_s = 8$ kHz. Vzorkováním obou funkcí přitom vznikne stejná posloupnost vzorků $y[n]$ jako vzorkováním harmonického kmitání s frekvencí $f_0 = 1$ kHz popsané rovnicí

$$y_0 = y_A \cdot \sin(2\pi f_0 \cdot t) \quad (2.7)$$



Obr. 17: Ukázka vzorkování harmonických signálů s frekvencemi $f_0 = 1$ kHz, $f_1 = 7$ kHz a $f_2 = 9$ kHz vzorkovací frekvencí $f_s = 8$ kHz. Nahoře původní spojitý signál, dole posloupnost vzorků. Vytvořeno v MATLABu

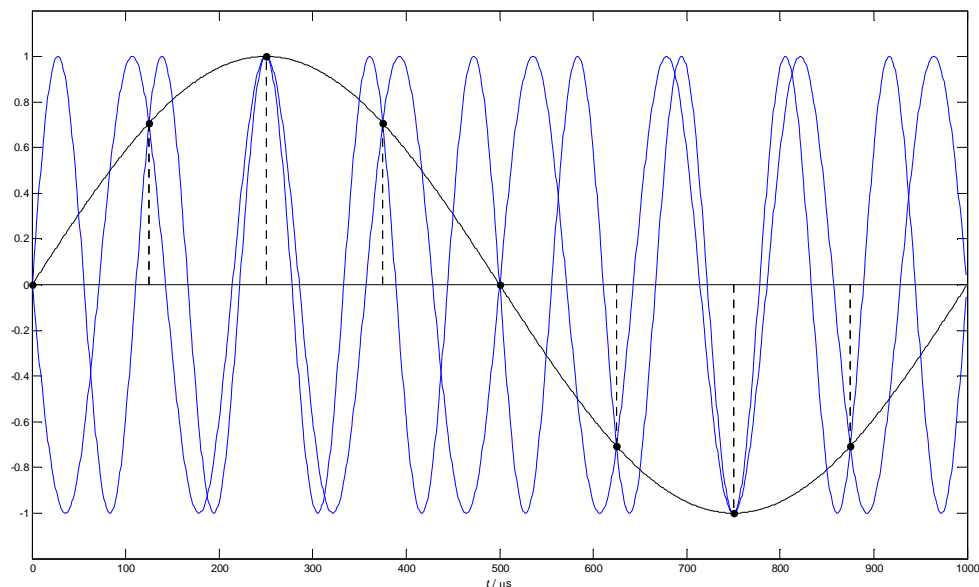
Graf časového průběhu okamžité výchylky kmitání na obrázku 17 a 18 ukazuje, že všechna tři kmitání nabývají v okamžiku určení hodnoty vzorku stejné číselné hodnoty. Stejná posloupnost sedmi vzorků by tak mohla vzniknout z kteréhokoli ze zobrazených časových průběhů kmitání. Původní signály s frekvencí vyšší než $f_{mez} = f_s/2$ by se po navzorkování a zpětné rekonstrukci spojitého signálu z posloupnosti vzorků jevily vždy jako signál s nejnižší frekvencí, který odpovídá dané posloupnosti. Po zpětném převodu uvedeného

příkladu posloupností získaných podvzorkováním signálu 7 kHz a 9 kHz by se nám tedy každá z těchto frekvencí jevila nesprávně jako kmitání s frekvencí 1 kHz. Nepravý časový průběh vzniklý interpolací posloupnosti vzorků, jejímž skutečným původcem bylo kmitání s frekvencí vyšší než mezní frekvence $f_s/2$, se označuje jako „alias“. Jev způsobený vzorkováním signálu s vyšší frekvencí než $f_s/2$ se proto nazývá nejčastěji anglicky „aliasing“.

To platí i pro všechny další možné frekvence f_{alias} dané vztahem

$$f_{\text{alias}}(a) = |f - (a \cdot f_s)|, \quad (2.8)$$

v němž a je libovolné celé číslo $a \in (-\infty, +\infty) \wedge a \in \mathbb{Z}$ s výjimkou $a = 0$, kdy se jedná o skutečnou nejnižší frekvenci harmonického signálu odpovídající posloupnosti vzorků. Pro $a \in (0, +\infty)$ mají skutečný vstupní harmonický signál a zdánlivý signál (alias) vzniklý jeho podvzorkováním v rozporu s Nyquistovým požadavkem vzorce 2.4 shodnou počáteční fázi. Pro $a \in (-\infty, 0) \wedge a \in \mathbb{Z}$ je počáteční fáze skutečné vstupní funkce před podvzorkováním opačná vzhledem k počáteční fázi zdánlivého signálu (aliasu), tedy posunutá o π radiánů, respektive o 180° . Vzorec 2.8 ve své podstatě popisuje periodické překlápění vyšších frekvenčních pásem nad $f_s/2$ do přenosového pásma s rozsahem 0 Hz až $f_s/2$ Hz.



Obr. 18: Znázornění příčiny aliasingu harmonických signálů $s_{f_0} = 1$ kHz, $f_1 = 7$ kHz a $f_2 = 9$ kHz při vzorkovací frekvenci $f_s = 8$ kHz, kdy vytvoří stejnou posloupnost vzorků. Vytvořeno v MATLABu.

Časový průběh sledované veličiny ovšem nemusí být jen čistě harmonický. Libovolný periodický průběh funkce je ovšem možné považovat za složený ze součtu jednotlivých harmonických složek. Pak tedy i libovolný obecně periodický průběh může být vzorkován podle stejného pravidla, avšak frekvence nejvyšší harmonické složky, která bude posloupností

vzorků ještě spolehlivě popsána, bude ve vztahu k použité vzorkovací frekvenci poloviční. Výše uvedený vztah mezi vzorkovací frekvencí a maximální přenášenou frekvencí platí za určitých okolností dokonce obecně pro jakýkoli, tedy i zcela neperiodický, průběh funkce. Aliasing tak představuje při digitálním zpracování zvukového signálu potenciálně značný problém, neboť pro zvukové signály s mnoha frekvenčními složkami by se všechny vysokofrekvenční složky signálu z pásem nad $f_{mez} = f_s/2$ periodicky zrcadlově překlápěly do frekvenčního pásma 0 Hz až $f_s/2$ Hz a staly se přitom neoddelitelnou součástí signálu v přenosovém pásmu, kterou posléze už nelze nijak odstranit. Tím by byl výsledný signál z hlediska spolehlivosti přenosu původní zvukové informace zcela znehodnocen.

Nyquistovu podmínku vzorkování spojitého signálu dále zkoumal Claude Shannon (1916–2001) a dokázal, že jednoznačná zpětná rekonstrukce původního spojitého signálu z posloupnosti číselných hodnot vzorků je možná, jen pokud bude ještě před vzorkováním šířka pásma vstupního signálu frekvenčně omezená tak, že jeho horní mezní frekvence bude vždy menší než polovina vzorkovací frekvence. Vzorec 2.4 tedy lze pro pevně danou vzorkovací frekvenci interpretovat jako striktní podmínku pro volbu šířky přenášeného pásma vstupního signálu. Při vzorkování vstupního analogového signálu příslušné obvody A/D- převodníku zvukové karty proto musí ze signálu nejprve dokonale odstranit frekvenční složky nad $f_s/2$ nebo vzorkovat signál s tak vysokou frekvencí, aby se nad ní nevyskytovaly už žádné frekvenční složky vstupního signálu. Druhý jmenovaný postup se nazývá převzorkování, anglicky „oversampling“.

V praxi se přitom používá kombinace obou postupů. Nejprve je analogový signál vzorkován s mnohanásobně vyšší vzorkovací frekvencí než by bylo pro přenos zvukového pásma potřeba, aby se tak snížila pravděpodobnost výskytu frekvenčních složek signálu nad $f_s/2$. Standardně se u zvukových karet PC používá 8-, 16- až 64- nebo dokonce i 128-násobné převzorkování. Zvuková karta při vzorkování 48 kHz s 64-násobným převzorkováním tak ve skutečnosti odebírá vzorky s frekvencí 3,76 MHz, což znamená šířku přenosového pásma přes 1,5 MHz. Následně jsou výpočetně realizovaným frekvenčním filtrem z takto navzorkované posloupnosti odstraněny vysoké frekvence nad požadovaným akustickým pásmem a poté je posloupnost výpočetně převedena na standardizovanou vzorkovací frekvenci (viz tabulka 8). Při práci se zvukovou kartou počítače, jejíž A/D převodník pracuje interně s převzorkováním tedy není nutné se obávat, že by k jevu „aliasingu“ došlo. Stejně tak i profesionální zvukový software používá při převodu záznamu na nižší vzorkovací frekvenci výpočetně realizovaný anti-aliasingový filtr. Důsledkem procesu vzorkování s níž však každopádně musíme počítat je určité konečné časové rozlišení digitálního záznamu a ze vzorkovacího kritéria plynoucí

omezení šířky přenosového pásma. To se pro vzorkovací frekvence nižší než 32 kHz projevuje už jako slyšitelné omezení vysokých frekvencí přenášeného digitálního zvuku.

Tab. 8: Vzorkovací frekvence f_s , časové trvání vzorku T_s , šířka přenášeného pásma B a použití v praxi

f_s / Hz	$T_s / \mu\text{s}$	B / Hz	
8 000	125,0	4 000	digitální pevná telefonní síť
16 000	62,5	8 000	minimum pro dobře srozumitelný záznam a přenos zvuku lidské řeči
32 000	31,3	16 000	minimum pro záznam a přenos hudby
44 100	22,7	22 050	Audio-CD
48 000	20,8	24 000	Zvukové karty PC standardu AC'97, zvuková stopa DVD a DVB-T
96 000	10,4	48 000	Zvukové karty PC standardu Intel HD Audio, běžná zvuková technika
192 000	5,2	96 000	profesionální zvuková technika hudebního studia

Požadavkům na kvalitní záznam a přenos slyšitelného kmitočtového rozsahu zvuku vyhoví vzorkovací takt odběru vzorků alespoň 40 kHz. Ve spotřební elektronice se stále používá vzorkovací frekvence Audio-CD 44 100 Hz, což je pozůstatek původní techniky ukládání digitálního zvuku do obrazové stopy (PAL) videokazet Betamax z dob, kdy neexistovalo jiné záznamové médium s dostatečnou datovou kapacitou. Ve výpočetní technice jsou standardem vzorkovací frekvence 48 kHz a 96 kHz vycházející ze základní vzorkovací frekvence 8 kHz používané v telekomunikacích. Tomu se přizpůsobily i standardy pro zvukové stopy filmů na DVD, digitální televizní vysílání (DVB-T) a digitální rozhlas (DAB). V profesionální zvukové technice je tak dnes obvyklé použití vzorkovacích frekvencí 48 kHz, 96 kHz a 192 kHz a následný přepočítání vzorkovací frekvence podle použitého média. Při zpracování zvukových signálů z Audio-CD nebo přípravě testovacích signálů a záznamů pro standard Audio-CD je však mnohdy vhodnější použít vyšší vzorkovací frekvence soudělné s cílovou vzorkovací frekvencí 44,1 kHz jako například 88,2 kHz nebo 176,4 kHz.

Profesionální zvukové karty podporují hardwarově obě základní vzorkovací frekvence 44,1 kHz a 48 kHz i jejich celočíselné násobky (2 a 4 násobek). Jako zdroj vzorkovacího taktu mají proto vestavěn ne jen jeden, ale 2 přesné oscilátory. Zvukové karty standardu AC'97 integrované na základní desce počítače (tzv. „on-board“) pracují na pevném vzorkovacím kmitočtu 48 kHz a při záznamu s vzorkovací frekvencí 44,1 kHz musejí posloupnost čísel převzorkovávat. Stejně tak musejí posloupnost převzorkovávat při přehrávání signálů vzorkovaných 44,1 kHz (např. z CD). Problém představuje převod mezi nesoudělnými vzorkovacími frekvencemi 44,1 kHz a 48 kHz. Ten by mohl sice být teoreticky bezztrátový, ale protože je v praxi vždy kompromisem mezi přesností a výpočetní náročností, může při nevhodné implementaci převzorkovacího algoritmu dojít ke slyšitelné degradaci zvukového signálu. Velmi zde tedy záleží na hardwarovém řešení a ovladačích konkrétní zvukové karty.

3.2.2 BINÁRNÍ KÓDOVÁNÍ ČÍSELNÉ HODNOTY VZORKU

Veličiny, jejichž hodnota se může plynule měnit, jsou takzvaně spojité v hodnotě a mohou nabývat nekonečného počtu hodnot. Při vzorkování jsme předpokládali, že hodnotu vzorku sledované veličiny lze dále vyjádřit číslem. Pokud bychom číselnou hodnotu vzorku spojité veličiny chtěli určit úplně přesně, muselo by mít číslo teoreticky nekonečný počet cifer. Výpočty s takovým číslem by však trvaly nekonečně dlouho a k jeho uložení bychom potřebovali nekonečně velkou paměť. Aby mohl být zvuk uložen a nebo dále zpracováván v počítači, musí tedy být popsán čísly s konečnou délkou. Protože počítače pracují ve dvoustavové logice, musí být navíc zvuk popsán čísly v takzvaném binárním kódu, kdy číselnou hodnotu veličiny reprezentuje určitá kombinace nul a jedniček. Digitální zvukový signál (z latinského „digitus“, číslo) je tedy vlastně jen sled binárně kódovaných čísel.

Uchování informace obecně vyžaduje systém, který nabývá v nejjednodušším případě alespoň dvou různých jednoznačně odlišitelných stavů. Takový systém je možné realizovat například mechanickým spínačem, který má dva vzájemně se vylučující stavy: „zapnuto“ nebo „vypnuto“. Počítače a všechny digitální přístroje využívají pro uchování informace systémy s mnoha jednotlivými dvoustavovými prvky. Matematicky dvoustavové systémy popisuje nejjednodušší číselná soustava s pouhými dvěma znaky, takzvaná dvojková neboli binární soustava (z latinského „bini“, česky dvojí). V běžném životě je častější desítková neboli dekadická číselná soustava (z latinského „deca-“ „-adic“, desetičetný) s deseti znaky, pro které se používají arabské číslice 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 a 9. Někdy se jí říká také decimální číselná soustava (z latinského „decima“, desetina). V desítkové číselné soustavě se říká znakům „čísllice“. Aby nemohlo dojít k záměně číselných soustav, jmenuje se cifra ve dvojkové soustavě „binární jednotka“, zkráceně "bit" (z anglického „binary unit“ nebo „binary digit“). Jako znaky binární soustavy je zvykem používat arabské číslice 0 a 1. Jeden bit pak nese nejmenší možné množství informace o dvoustavovém systému. Symbolem pro stav zapnuto je znak „1“, pro stav vypnuto znak „0“. V digitálních elektronických obvodech jsou tyto dva stavy realizovány dvěma jednoznačně rozlišitelnými hodnotami napětí.

V **desítkové číselné soustavě** s deseti číslicemi 0 až 9 je číslo součtem násobků mocnin deseti počínaje nultou mocninou. U celých čísel v desítkové soustavě první číslice zprava reprezentuje počet jedniček (10^0), druhá číslice zprava počet desítek (10^1), třetí počet stovek (10^2), čtvrtá počet tisíců (10^3) a tak dále, jak znázorňuje tabulka 9. Pomocí tohoto zápisu lze popsat libovolné kladné celé číslo. Každá další použitá cifra přitom vždy zdesetinásobuje počet možných jednoznačných stavů.

Tab. 9: Dekadické číselné hodnoty g -tého řádu desítkové číselné soustavy pro její nejnižší řády

řád g dekadického čísla	6	5	4	3	2	1	0
dek.hodnota	10^6	10^5	10^4	10^3	10^2	10^1	10^0
x_g	1 000 000	100 000	10 000	1 000	100	10	1

Pro libovolné kladné celé číslo x v desítkové soustavě zapsané zprava doleva platí, že

$$x = a_0 \cdot 10^0 + a_1 \cdot 10^1 + a_2 \cdot 10^2 \dots + a_{G-1} \cdot 10^{G-1} = \sum_{g=0}^{G-1} a_g \cdot 10^g, \quad (2.9)$$

kde $a_g \in \{0;1;2;3;4;5;6;7;8;9\}$, g je řád konkrétní cifry v desítkové soustavě počítáno zprava doleva a G je celkový počet cifer dekadického čísla.

Ve **dvojkové číselné soustavě** je to obdobné. Libovolné kladné celé číslo x z desítkové soustavy je vyjádřeno ve dvojkové soustavě jako součet násobků mocnin dvou. Při zápisu binárního čísla zprava doleva platí tedy obdobně, že

$$x = b_0 \cdot 2^0 + b_1 \cdot 2^1 + b_2 \cdot 2^2 \dots + b_{W-1} \cdot 10^{W-1} = \sum_{w=0}^{W-1} b_w \cdot 2^w, \quad (2.10)$$

přičemž zde $b_w \in \{0;1\}$ je jeden ze dvou možných znaků dvojkové soustavy, w označuje řád konkrétní cifry ve dvojkové soustavě počítáno zprava doleva a W je celkový počet cifer (bitů) binárního čísla. Zprava čteno odpovídá prvnímu nejnižšímu bitu hodnota $x_{b_0} = 2^0 = 1$ v decimální soustavě, druhému bitu zprava $x_{b_1} = 2^1 = 2$ decimálně, třetímu $x_{b_2} = 2^2 = 4$, čtvrtému $x_{b_3} = 2^3 = 8$, pátému $x_{b_4} = 2^4 = 16$, šestému $x_{b_4} = 2^5 = 32$ decimálně, a tak dále jak ukazuje tabulka 10. Každý použitý bit přitom zdvojnásobuje počet možných jednoznačných stavů, které je možné binárně zakódovat.

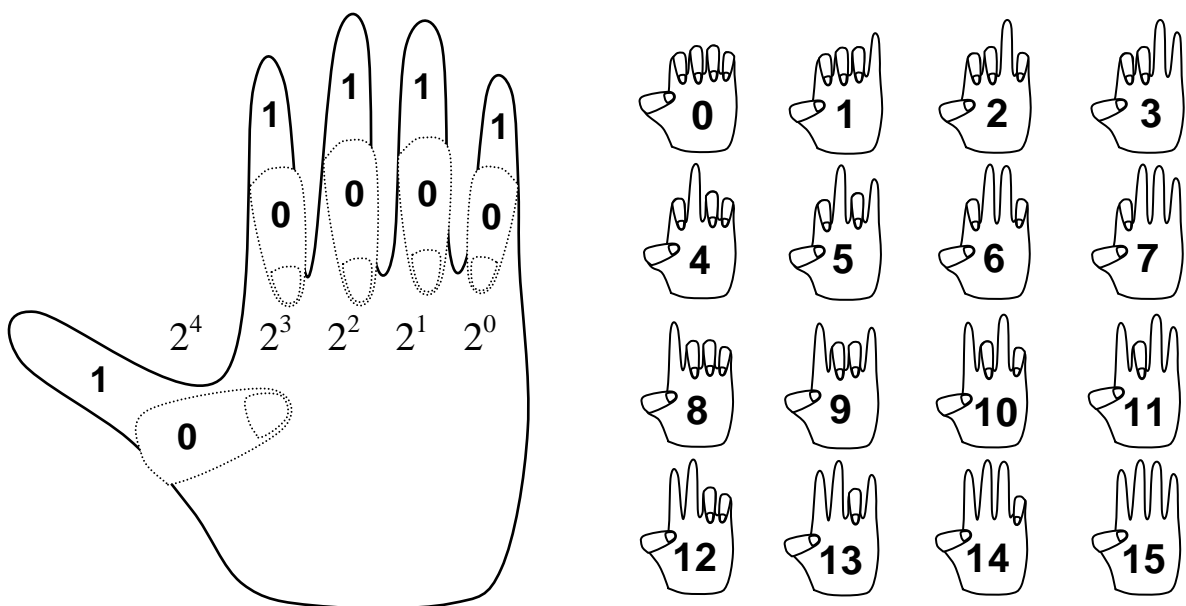
Tab. 10: Dekadické číselné hodnoty w -tého řádu pro nejnižší řády dvojkové číselné soustavy

řád w binárního čísla	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
dek.hodnota	2^{12}	2^{11}	2^{10}	2^9	2^8	2^7	2^6	2^5	2^4	2^3	2^2	2^1	2^0
x_{bw}	4096	2048	1024	512	256	128	64	32	16	8	4	2	1

Desítková číselná soustava se prosadila jako dominantní pravděpodobně proto, že lidé počítali na prstech obou rukou. Na prstech je však možné počítat i ve dvojkové číselné soustavě. Nejsnáze se takto lze naučit počítat na prstech levé ruky při pohledu na její vnitřní

stranu, tedy ze strany dlaně, podle obrázku 19. Budeme počítat zprava od malíčku jako nejmenšího prstu symbolizujícího nejnižší řád binárního čísla, tedy nejnižší bit. Číslům z desítkové číselné soustavy je pak možné přiřadit jednoznačný binární kód podle následujícího algoritmu: Zdvžený prst reprezentuje znak „1“. Pokrčený prst reprezentuje znak „0“. Při použití jednoho prstu jsou možné pouze dva různé stavy 0 nebo 1. Pomocí dvou prstů však už můžeme vytvořit dvoubitové stavy 00, 01, 10 a 11, což jsou celkem $2 \cdot 2 = 4$ možné stavy, pro tři prsty je to $2 \cdot 2 \cdot 2 = 8$ možných tříbitových stavů 000, 001, 010, 011, 100, 101, 110 a 111.

Zdvžený prst znamená přičtení odpovídající číselné hodnoty prstu v desítkové soustavě dané jeho pořadím v posloupnosti prstů $w \in \{0; 1; 2; 3; 4\}$ indexované zprava od nuly. Pozor tedy na to, že malíček levé ruky jako první prst zprava zde zastupuje nultý řád. Naopak skrčený prst reprezentuje znak binární soustavy „0“ a znamená přičtení nulové decimální číselné hodnoty. Z tabulky 11 je dobře viditelné že, když dojde ke stavu, kdy všechny bity mají hodnotu „1“, je vícebitový binární systém ve stavu nasycení a pro rozšíření rozsahu je nutné doplnit další vyšší bit, čímž se počet možných kombinací zdvojnásobí. Při použití 4 prstů pro model 4 bitového kodéru je tedy možné takto vytvořit 16 jednoznačných kombinací reprezentujících 16 čísel desítkové soustavy od 0 do 15 (viz obrázek 19 vpravo). Při použití všech 5 prstů pro model 5 bitového kodéru to znamená celkem 32 kombinací.



Obr. 19: Princip počítání v binární číselné soustavě na prstech levé ruky (vlevo) a příklady binárních kódů čísel 0 až 15 z desítkové soustavy (vpravo) při využití čtyř prstů levé ruky. Zdroj: vlastní

Tab. 11: Binární kódy 4 a 5 bitových čísel pro převod čísel z desítkové do dvojkové číselné soustavy

w	3	2	1	0
dekadicky	binárně			
0	0	0	0	0
1	0	0	0	1
2	0	0	1	0
3	0	0	1	1
4	0	1	0	0
5	0	1	0	1
6	0	1	1	0
7	0	1	1	1
8	1	0	0	0
9	1	0	0	1
10	1	0	1	0
11	1	0	1	1
12	1	1	0	0
13	1	1	0	1
14	1	1	1	0
15	1	1	1	1

w	4	3	2	1	0
dekadicky	binárně				
16	1	0	0	0	0
17	1	0	0	0	1
18	1	0	0	1	0
19	1	0	0	1	1
20	1	0	1	0	0
21	1	0	1	0	1
22	1	0	1	1	0
23	1	0	1	1	1
24	1	1	0	0	0
25	1	1	0	0	1
26	1	1	0	1	0
27	1	1	0	1	1
28	1	1	1	0	0
29	1	1	1	0	1
30	1	1	1	1	0
31	1	1	1	1	1

Pomocí jednoduchého pětibitového systému prstů jedné ruky je možné ukázat na prstech například svůj věk v binárním kódu. Na střední škole to budou dekadická čísla 15 (01111), 16 (10000), 17 (10001), 18 (10010) a 19 (10011). Vezměme si jako příklad, jak ukázat na prstech věk 18 let. Máme obecně dvě možnosti. Jednak můžeme postupně počítat po jedné od 0 až do dosažení požadovaného čísla. To v jednoduchém příkladu s věkem znamená učinit z výchozího stavu 00000 18 kroků, tedy 18 porovnání číselné hodnoty zobrazené systémem pěti prstů s požadovanou hodnotou a podle potřeby následné změny kódu. Z didaktického hlediska to je velmi názorné. V případě určování binárního kódu vysokých číselných hodnot to však znamená učinit v extrémním případě až 2^w kroků porovnání a následné změny kódu.

Druhá možnost jak dojít k binárnímu kódu požadovaného čísla z decimální soustavy je postupovat při určení binárního kódu čísla naopak od nejvyššího bitu, tedy zleva doprava. Vždy přitom porovnáme požadovanou hodnotu čísla z dekadické soustavy s dekadickou hodnotou aktuálního stavu binárního kódu. Výchozí stav je opět 00000. Když je číselná hodnota odpovídající danému bitu vyšší než hodnota, kterou musíme přičíst, abychom dostali požadovanou hodnotu, přiřadíme tomuto bitu znak „0“. Když bude po přičtení dekadické hodnoty příslušející danému bitu výsledná dekadická hodnota binárního kódu menší nebo rovna požadované hodnotě, přiřadíme bitu stav „1“. Poté pokračujeme na další nižší bit, tedy v našem případě na další prst. Takto se každým krokem dekadická hodnota aktuálního binárního kódu postupně odspodu více a více přibližuje k požadované hodnotě. Porovnávání

požadovaného čísla s aktuální hodnotou binárního kódu měněného od nejvyššího bitu je obecně rychlejší metodou a je při ní nutné provést vždy přesně tolik kroků, kolik má převodník bitů, tedy pro W bitový systém přesně W kroků.

Uvedený příklad s binárním kódem pro věk žáků a studentů je nejjednodušší možný a tak v sobě skrývá i jedno zásadní zjednodušení. Jedná se o přiřazování binárních kódů pro omezenou množinu celých čísel z desítkové soustavy. Protože je při 5 bitech k dispozici dostatek kombinací znaků binárního kódu pro zakódování všech možných čísel z této množiny, odpovídá výsledná dekadická hodnota příslušející binárnímu kódu požadované číselné hodnotě vždy zcela přesně. Jenže reálná situace je většinou taková, že potřebujeme binárně zakódovat čísla s libovolnou hodnotou z určitého spojitého intervalu, jichž může být nekonečně mnoho, a máme k dispozici jen určitý pevný počet bitů a tudíž i omezený počet kombinací binárního kódu.

3.2.3 KVANTIZACE HODNOTY VZORKU

Kvantizace je obecně proces převodu hodnoty vzorku fyzikální veličiny určené vzorkováním spojitého průběhu podle dříve učiněného předpokladu s nekonečně velkou přesností na hodnotu popsanou číslem s konečným počtem cifer, respektive bitů, a tím i konečnou přesností. Technicky jsou ve zvukové technice A/D-převodníky realizovány jako převodníky spojitě hodnoty vstupního napětí vzorku $u[n]$ na součet napětí v síti rezistorů $u_q[n]$ s nimiž je vstupní napětí každého vzorku porovnáváno. Při binární reprezentaci čísel tento proces představuje v podstatě výběr nejbližší hodnoty u_q z množiny dostupných hodnot napětí popsaných binárními čísly, jejichž celkový počet je dán použitým počtem bitů. Pro jednoduchost uvažujme nejprve kvantizaci hodnoty stejnosměrné veličiny. Základním typem kvantizace je přitom lineární kvantizace, při níž jsou hodnoty přiřaditelných napěťových úrovní rozloženy na rozsah kvantizéru v pravidelných rozestupech Δu_q . Velikost kvantizačního intervalu Δu_q je pak dána poměrem počtu všech dostupných kvantizačních úrovní vůči velikosti rozsahu kvantizéru. Ten však obvykle není pevný a nastavuje se podle očekávaného rozsahu hodnot signálu. Softwarové zpracování digitálních signálů proto nejčastěji pracuje s relativním vyjádřením okamžitých hodnot signálu vůči horní hranici rozsahu kvantizéru (tzv. „full scale“, zkratka „FS“) daným poměrem hodnoty napětí konkrétního vzorku k nejvyšší přiřaditelné úrovni napětí převodníku

$$\frac{u_q}{u_{FS}} = q. \quad (2.11)$$

Veličina q dále označuje relativní velikost hodnoty vzorku u_q vztaženou na nejvyšší možnou hodnotu napětí u_{FS} v rozsahu kvantizéru. Tím dostáváme relativní vyjádření hodnot napětí normované na interval číselných hodnot od 0 do 1. Při použití W bitů, máme v celém tomto intervalu teoreticky k dispozici

$$Q = 2^W \quad (2.12)$$

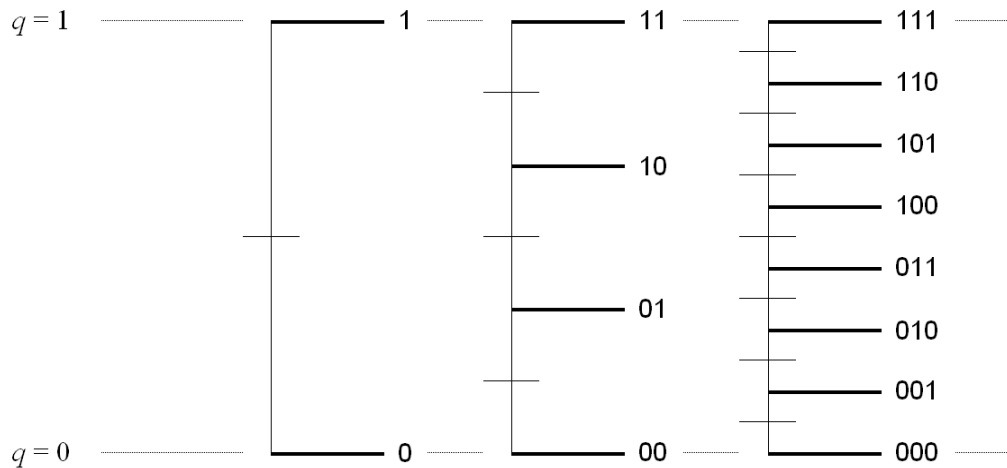
možných diskretních hodnot, kterých může napětí u_q nabývat. Je-li počet kvantizačních úrovní Q , intervalů mezi nimi je vždy o jeden méně, tedy jen $Q-1$. Relativní velikost kvantizačních intervalů Δq normalizovaných na jednotkový rozsah proto odpovídá

$$\Delta q = \frac{1}{Q-1} = \frac{1}{2^W - 1}. \quad (2.13)$$

Hodnoty dostupných kvantizačních úrovní tvoří konečnou množinu s Q prvky. Kvantizaci pak můžeme popsat jako nahrazení spojité hodnoty sledovaného vstupního napětí u z omezeného intervalu hodnot $u \in \langle 0; u_{FS} \rangle$ nejbližší odpovídající relativní kvantizační úrovní q z intervalu $q \in \langle 0; 1 \rangle$. Veličina q jako diskretní obraz napětí u přitom v normovaném decimálním tvaru může nabývat jen hodnot $q \in \{ 0; \Delta q; 2\Delta q; 3\Delta q; \dots (Q-2) \cdot \Delta q; 1 \}$. Pro diskretní hodnoty absolutního vyjádření napětí kvantizační úrovně $u_q = q \cdot u_{FS}$ to znamená výběr některé z hodnot napětí $u_q \in \{ 0; \Delta u_q; 2\Delta u_q; 3\Delta u_q; \dots (Q-2) \cdot \Delta u_q; u_{FS} \}$, kde absolutní velikost kvantizačního intervalu je

$$\Delta u_q = \frac{u_{FS}}{Q-1} = \frac{u_{FS}}{2^W - 1} = u_{FS} \cdot \Delta q \quad (2.14)$$

Nejjednodušší technikou analogově-digitálního převodu je aproximace přesné hodnoty napětí vzorku nejbližší hodnotou kvantizační úrovně postupně od nejvyššího řádu binárního čísla. Převodník s W bity tak postupně ve W krocích nahrazuje požadovanou hodnotu napětí na vstupu kvantizéru součtem známých hodnot napětí na rezistorech odpovídajícím stavu jednotlivých bitů. Ve schématu na obrázku 20 je pro větší názornost uveden normovaný rozhodovací diagram 3-bitového převodníku nejprve pro stejnosměrný signál. Aproximace hodnoty vzorku začíná nejvyšším bitem kódu (takzvaný „most significant bit“, zkratka „MSB“). Na obrázku 20 je to první bit zleva. Vzorek s libovolnou hodnotou v rozsahu kvantizéru je postupně v každém kroku nahrazen nejbližší kvantizační úrovní pro daný řád. Hledání nejbližší kvantizační úrovně je přitom vlastně porovnáváním hodnoty vzorku vůči rozhodovací úrovni v polovině intervalu mezi dvěma nejbližšími kvantizačními úrovněmi.



Obr. 20: Rozhodovací diagram postupné aproximace hodnoty vzorku kvantizační úrovně pro A/D převod stejnosměrné veličiny v normalizovaném rozsahu $q \in \langle 0;1 \rangle$ 3 bitovým kvantizérem. Zdroj: vlastní

V diagramech na obrázcích 20, 21 a 22 jsou jednotlivé kvantizační úrovně vyznačeny silnými vodorovnými úsečkami a pomocné rozhodovací úrovně uprostřed mezi kvantizačními úrovněmi krátkou tenkou čarou. Když se normovaná relativní hodnota vzorku v daném kroku převodu nachází nad rozhodovací úrovní, je jí přidělena vyšší úroveň a v kódu pro daný bit zapsán znak „1“, když se naopak hodnota vzorku nachází pod rozhodovací úrovní, je v daném řádu přidělena nižší úroveň a zapsán znak „0“. Poté převod pokračuje porovnáváním hodnoty vzorku s kvantizačními úrovněmi pro nižší řád (nižší bit) až do $w = W - 1$. V diagramech na obrázcích 20, 21 a 22 to znamená vždy další krok doprava. Bit po bitu tak vzniká digitální kód hodnoty vzorku. Samotný binární kód pak tvoří seřazené znaky jednotlivých bitů.

Velikost kvantizačního intervalu Δq normalizovaného rozsahu ekvidistantně rozděleného na Q úrovně odpovídá relativní hodnotě nejmenšího kódovaného bitu, takzvaného LSB (z anglického „least significant bit“). Dále při pevné délce binárního kódu w není možné rozlišit už žádnou meziúroveň a popsat tak menší hodnotu než je právě hodnota Δq . V aproximaci požadované hodnoty kvantizační úrovně by však bylo teoreticky možné dále pokračovat libovolným počtem kroků odpovídajícím kvantizaci více bity. Při pevně daném rozsah kvantizéru přitom každý další použitý bit znamená zdvojnásobení počtu dostupných kvantizačních úrovně pro aproximaci požadované hodnoty veličiny. To však, jak je ostatně jasně vidět ze schématu relativního rozložení kvantizačních hladin pro jednotlivé řády převodu v normovaném rozsahu na obrázku 20, neznamená rozdělení rozsahu předchozího vyššího řádu na poloviny. Je třeba si uvědomit, že při plném využití všech kombinací binárního kódu počet rozhodovacích úrovně a přiřaditelných kvantizačních úrovně není

soudělný. Intervalů mezi hladinami je totiž o jeden méně než kvantizačních úrovní, a tak rozdvajování úrovní v normalizovaném rozsahu nevede k půlení kvantizačních intervalů. Proto v normalizovaném zobrazení diagramů postupné aproximace neodpovídají hodnoty kvantizačních úrovní v nižším bitu hodnotám rozhodovacích úrovní pro přiřazení znaku v předchozím vyšším bitu.

3.2.4 KÓDOVÁNÍ STŘÍDAVÝCH ZVUKOVÝCH SIGNÁLŮ

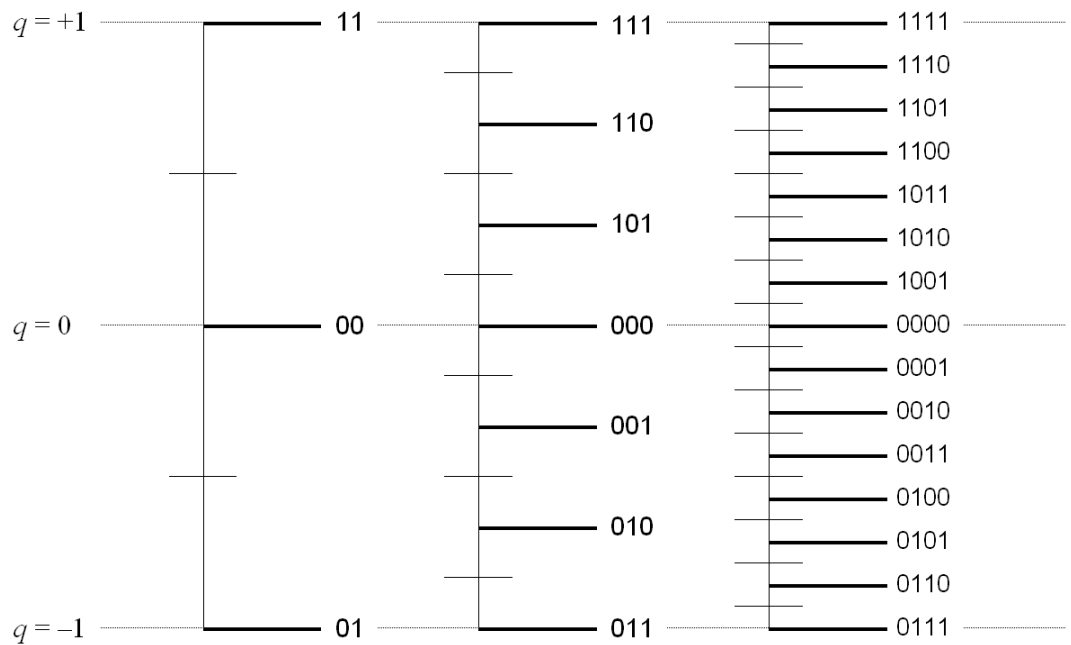
V případě zvuku se však nejedná o stejnosměrný, ale o střídavý signál. Při kvantizaci a binární reprezentaci střídavé veličiny je přitom žádoucí, aby pracovní rozsah kvantizéru byl symetrický vůči nule a aby nulové hodnotě byla jednoznačně přiřazena kvantizační úroveň. Takovému symetrickému převodníku střídavé veličiny s kvantizační úrovní pro nulu se říká typ „mid-tread“. Má-li existovat kód pro nulovou výchylku kmitání a má-li být současně rozkmit symetrický, musí být k dispozici lichý počet kvantizačních úrovní. Při daném počtu bitů ovšem z principu není možné vytvořit jednu kvantizační úroveň navíc, v důsledku čehož u převodníků typu „mid-tread“ zůstává binární kód pro jednu kvantizační úroveň nevyužitý a je jich pak k dispozici celkem $Q - 1$.

Aby byl binární kód hodnot střídavé veličiny co nejnázornější, reprezentuje dále nejvyšší bit (MSB) binárního čísla, tedy první bit zleva, polaritu střídavé veličiny. Pokud tedy hodnota normovaného signálu je v intervalu $\langle -1; 0 \rangle$ včetně nulové hodnoty, nabývá nejvyšší bit (MSB) stavu „0“. Naopak hodnota signálu z intervalu $(0; +1 \rangle$ znamená stav nejvyššího bitu „1“. Pro aproximaci kvantizovaného napětí $u \in \langle -u_{FS}; +u_{FS} \rangle$ jsou v rozsah převodníku typu mid-tread k dispozici diskrétní hodnoty $u_{qMT} \in \{ -u_{FS}; \dots - \Delta u_{qMT}; 0; + \Delta u_{qMT}; \dots + u_{FS} \}$, s tím, že absolutní velikost kvantizačního intervalu Δu_{qMT} zde je dán vztahem

$$\Delta u_{qMT} = \frac{2 \cdot u_{FS}}{(Q-1)-1} = \frac{2 \cdot u_{FS}}{2^W - 2} = \frac{u_{FS}}{(2^{W-1})-1} = u_{FS} \cdot \Delta q_{MT}. \quad (2.15)$$

Relativní hodnoty kvantizačních úrovní q pro střídavé veličiny v normovaném rozsahu $q \in \langle -1; +1 \rangle$ v případě typu mid-tread pak jsou $q_{MT} \in \{ -1; \dots - \Delta q_{MT}; 0; + \Delta q_{MT}; \dots + 1 \}$, kde relativní velikost kvantizačního kroku Δq_{MT} odpovídá normovanému vztahu

$$\Delta q_{MT} = \frac{2}{2^W - 2} = \frac{1}{(2^{W-1})-1}. \quad (2.16)$$



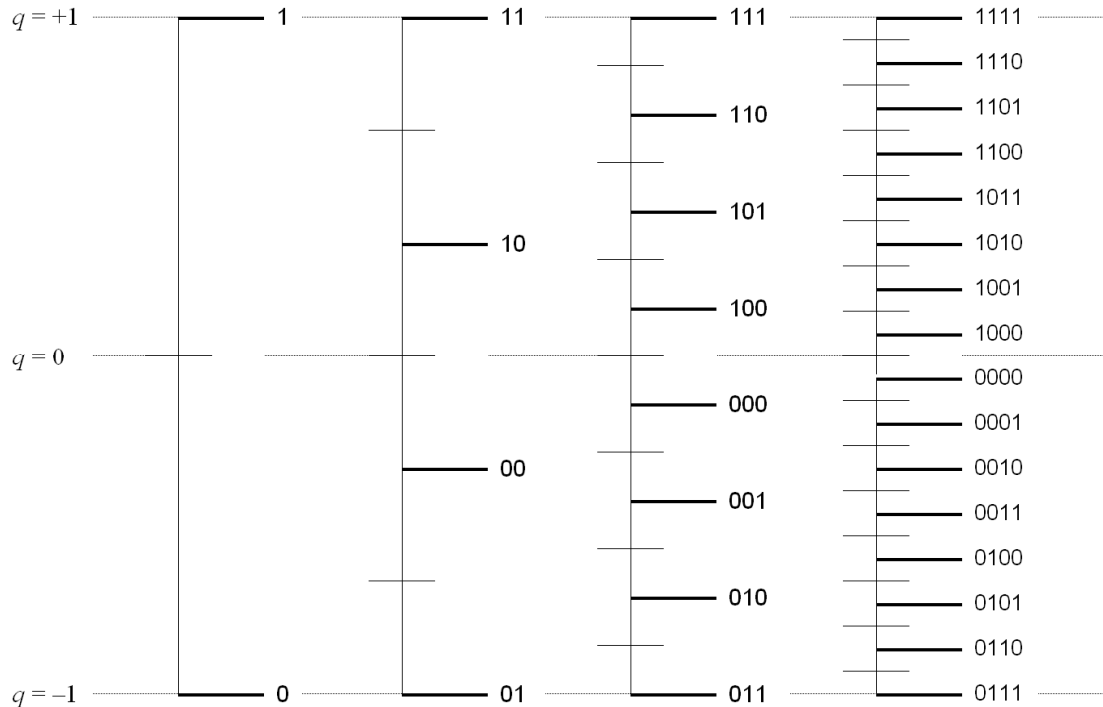
Obr. 21: Rozhodovací diagram postupné aproximace hodnoty vzorku kvantizační úrovní pro A/D převod střídavé veličiny v normalizovaném rozsahu $q \in \langle -1; +1 \rangle$ 4 bitovým kvantizérem typu mid-tread.

Zdroj: vlastní

Dekadická hodnota q_v udávající v podstatě pořadová čísla kvantizačních úrovní rozložených v rozsahu kvantizéru s jednotkovým krokem $\Delta q_v = 1$ nabývá pro převodníky typu „mid-tread“ celočíselných hodnot $q_{vMT} \in \left\{ -\left(\frac{1}{2}Q - 1\right); \dots -1; 0; +1; \dots +\left(\frac{1}{2}Q - 1\right) \right\}$, jimž ve 4-bitovém převodníku odpovídají binární čísla od 0111 do 1111. Protože nejvyšší bit (MSB) zde reprezentuje znaménko čísla (+ nebo –, anglicky „sign“) říká se mu u tohoto způsobu kódování polaritu a hodnoty střídavé veličiny „sign bit“. Podle toho se výsledná číselná reprezentace označuje „signed integer“ (kladná i záporná celá čísla) nebo „signed PCM“. Výhodou použití převodníku typu „mid-tread“ v kombinaci s tímto způsobem kódování polaritu je, že pro nulovou hodnotu střídavého signálu bude binární kód vždy tvořený jen samými nulami a bude tudíž velmi snadno identifikovatelný.

U převodníků s malým počtem bitů, například u dvoubitového převodníku, by však vyřazení jedné z kódových kombinací a s ní jedné kvantizační úrovně znamenalo citelnou ztrátu rozlišení kvantizéru. Používají se tedy i převodníky se sudým počtem kvantizačních úrovní symetricky rozmístěných vůči nule, ale bez kvantizační úrovně pro nulu. Říká se jim typ „mid-rise“. Takto lze realizovat dokonce i jednobitový převodník střídavých veličin. Pro kvantizované vstupní napětí $u \in \langle -u_{FS}; +u_{FS} \rangle$ jsou v rozsahu A/D-převodníku typu mid-rise k dispozici kvantizační úrovně s hodnotami $u_{qMR} \in \left\{ -u_{FS}; \dots -\frac{1}{2}\Delta u_q; +\frac{1}{2}\Delta u_q; \dots +u_{FS} \right\}$ a v normovaném vyjádření hodnot kvantizačních úrovní vůči velikosti rozsahu kvantizéru

$q_{MR} \in \left\{ -1; \dots -\frac{1}{2}\Delta q; +\frac{1}{2}\Delta q; \dots +1 \right\}$ ekvidistantně rozmístěné s kvantizačním intervalem $\Delta u_{qMR} = \Delta u_q$ podle vzorce shodného se vzorcem 2.14, respektive s normalizovaným kvantizačním intervalem $\Delta q_{MR} = \Delta q$ daným vzorcem 2.13.



Obr. 22: Rozhodovací diagram postupné aproximace hodnoty vzorku kvantizační úrovní pro A/D převod střídavé veličiny v normalizovaném rozsahu $q \in \langle -1; +1 \rangle$ 4 bitovým kvantizérem typu mid-rise.

Zdroj: vlastní

Kromě kvantizérů s ekvidistantním rozložením kvantizačních úrovní ovšem existují i kvantizéry s nerovnoměrným, takzvaně nelineárním, rozložením kvantizačních úrovní, u nichž nejčastěji velikost kvantizačního intervalu postupně s hodnotou narůstá. Například se může s každým krokem zdvojnásobovat. Celkový počet kvantizačních úrovní je opět dán počtem bitů. Hodnoty velikosti kvantizačních intervalů a relativní hodnoty jednotlivých kvantizačních úrovní, respektive jim odpovídající binární kód, jsou pro nelineární kvantizaci tedy dány nejen počtem bitů, ale vždy také použitým typem kvantizéru.

Hodnotu vzorku digitálního zvukového signálu je výhodné udávat pomocí hladinového vyjádření vůči maximu rozkmitu (FS) jako hladinu kvantizační úrovně vzorku

$$L_q[n] = 20 \cdot \log q[n] \quad \text{dBFS}, \quad (2.17)$$

kde maximální možnému úrovní vzorku odpovídá hladina $L_{qFS} = 0$ dB FS a nulové úrovní signálu odpovídá hladina $L_{q0} = -\infty$ dB FS. Takovouto stupnici se zápornými číselnými hodnotami v decibelech používá většina softwarových zvukových editorů na svislé ose grafu

časového průběhu signálu. Pomocí hladinového vyjádření je pak možné u posloupnosti vzorků reprezentujících harmonický průběh signálu obdobným způsobem udávat vůči maximu rozkmitu jeho relativní amplitudu q_A jako hladinu amplitudy L_{qA} , případně u libovolného průběhu určit efektivní hodnotu bloku N vzorků q_{RMS} a vyjádřit ji jako hladinu normované efektivní hodnoty posloupnosti vzorků digitálního signálu

$$L_{qRMS} = 20 \cdot \log \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} (q[n])^2} \quad \text{dB FS}. \quad (2.18)$$

Pomocí hladinového vyjádření je tak možné snadno dát do souvislosti zvukové kmitání zdroje a jím způsobené zvukové vlnění vzduchu s průběhem napětí analogového zvukového signálu, jež je jeho příčinou či důsledkem, a v případě signálu digitálního dokonce i přímo sled binárních čísel, jimiž je tento zvuk popsán. Za předpokladu lineární závislosti mezi akustickým tlakem vzduchu v určitém místě, výchylkou mechanických kmitů zdroje zvuku i výchylkou mechanických kmitů jeho snímače, napětím na vstupu elektro-akustického měniče i výstupu měniče akusticko-elektrického a digitálním popisem zvuku pomocí ekvidistantní kvantizace platí v každém okamžiku odběru vzorku $t = n \cdot T_s$ rovnost poměrů tlaku, výchylky, napětí a přibližně i kvantizační úrovně vůči jejich velikosti při maximálním rozkmitu v rozsahu převodníku (FS), na něž se váže společná referenční hodnota veličin, jako

$$\frac{p_{\sim}(t)}{p_{FS}} = \frac{y_{\sim}(t)}{y_{FS}} = \frac{u_{\sim}(t)}{u_{FS}} = \frac{u_q[n] + u_{qE}[n]}{u_{FS}} = q[n] + q_E[n] \approx q[n]. \quad (2.19)$$

Mezi hladinovým vyjádřením okamžitých hodnot všech sledovaných lineárně závislých veličin popisujících jeden konkrétní zvuk, pak platí vzájemné rovnosti. Odpovídající rovnosti obdobně platí pro hladinové vyjádření amplitud harmonických průběhů i pro vyjádření efektivních hodnot akustického tlaku, výchylky kmitání, napětí a výsledné posloupnosti čísel. V případě digitálního popisu zvuku s ohledem na učiněnou aproximaci ovšem platí jen rovnost přibližná (odchylka q_E). Dostáváme tak důležité vztahy mezi hladinou okamžité hodnoty střídavé složky tlaku $L_{p\sim}$ a hladinou konkrétní kvantizační úrovně L_q , respektive vztahy mezi hladinou akustického tlaku L_p a efektivní hodnotou posloupnosti čísel

$$L_{p\sim}(t) = 20 \cdot \log \frac{p_{\sim}(t)}{p_{FS}} \text{ dB} \approx 20 \cdot \log q[n] \text{ dB FS} = L_q[n], \quad (2.20)$$

$$L_p = 20 \cdot \log \frac{P_{\sim\text{ef}}}{p_{FS}} \text{ dB} \approx 20 \cdot \log \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} (q[n])^2} \text{ dB FS} = L_{qRMS}, \quad (2.21)$$

$$L_{pA} = 20 \cdot \log \frac{P_{\sim A}}{p_{FS}} \text{ dB} \approx 20 \cdot \log \sqrt{2} \cdot q_{RMS} \text{ dB FS} \approx L_{qRMS} + 3 \text{ dB}. \quad (2.22)$$

3.2.5 KVANTIZAČNÍ CHYBA

Nahrazením hodnoty vzorku analogového signálu nejbližší kvantizační úrovní A/D převodníku vzniká vždy určitá odchylka q_E , protože hodnota konkrétní kvantizační úrovně je buď o trochu větší, nebo o trochu menší než byla původní hodnota vzorku před kvantizací. Proces kvantizace je tedy ztrátový. Dochází při něm ke ztrátě přesnosti hodnot vzorků veličiny jejich nahrazením hodnotami kvantizačních úrovní popsaných čísly s konečným počtem cifer. Je to podobné jako při měření délek pravítkem, kde vzniká zaokrouhlovací chyba jako rozdíl mezi skutečnou číselnou hodnotou měřeného rozměru a hodnotou přiřazenou této délce na délkové stupnici pravítka. Největší chyba, která může vzniknout přiřazením určité úrovně na rovnoměrně rozložené stupnici, je polovina intervalu mezi dvěma úrovněmi. Například u milimetrové délkové stupnice pravítka má zaokrouhlovací chyba velikost půl milimetru. Člověk se při odečítání hodnot na stupnici můžeme pokusit ještě odhadnout hodnotu mezi dvěma úrovněmi. Kvantizér však musí vždy pevně zvolit jednu z úrovní, protože při určitém počtu bitů nemá k dispozici už žádný další znak, kterým by mohl popsat polohu hodnoty mezi úrovněmi. Mohl by však použít další bit. Velikost kvantizační chyby je tak vždy kompromisem mezi přesností popisu vzorku a délkou binárního kódu.

V měřicí technice se používá nejčastěji bitová hloubka 8, 10 nebo 12 bitů. V audiotechnice toto rozlišení nestačí a nejběžnější jsou převodníky 16 a 24 bitů. Tabulka 12 srovnává aproximační přesnost převodníků typu mid-tread pro různé kvantizační hloubky W , kde Δq_{MT} zde značí velikost ekvidistantně rozmístěných kvantizačních intervalů připadajících na celkový počet $Q-1$ kvantizačních úrovní pro celý rozkmit střídavého signálu (obě polarity). Polovina rozestupu kvantizačních hladin $\frac{1}{2} \Delta q_{MT}$ má pak význam největší možné relativní velikosti kvantizační chyby q_E uvedené pro názornost v procentech i pomocí hladinového vyjádření jako $L_{q_E MT \max}$ v decibelech vůči maximálnímu rozkmitu (dB FS).

Tab. 12: Základní parametry W -bitových převodníků typu mid-tread (s nulou).

W	$Q-1$	Δq_{MT}	$\frac{1}{2} \Delta q_{MT}$	$\Delta L_{q_{MT}}$	$L_{q_E MT \max}$	aproximace $W-6,02$ dB
2 bity	3	1	50 %		-6,02 dB FS	12,04 dB
3 bity	7	0,334	16,7 %	9,54 dB	-15,56 dB FS	18,06 dB
4 bity	15	0,143	7,14 %	16,90 dB	-22,92 dB FS	24,08 dB
5 bitů	31	$6,67 \cdot 10^{-02}$	3,34 %	23,52 dB	-29,54 dB FS	30,10 dB
6 bitů	63	$3,23 \cdot 10^{-02}$	1,61 %	29,83 dB	-35,85 dB FS	36,12 dB
8 bitů	255	$7,87 \cdot 10^{-03}$	0,394 %	42,08 dB	-48,10 dB FS	48,16 dB
10 bitů	1 023	$1,96 \cdot 10^{-03}$	0,0978 %	54,17 dB	-60,19 dB FS	60,21 dB
12 bitů	4 095	$4,89 \cdot 10^{-04}$	0,0244 %	66,22 dB	-72,24 dB FS	72,25 dB
16 bitů	65 535	$3,05 \cdot 10^{-05}$	0,00153 %	90,31 dB	-96,33 dB FS	96,33 dB
20 bitů	1 048 575	$1,91 \cdot 10^{-06}$		114,39 dB	-120,41 dB FS	120,41 dB
24 bitů	16 777 215	$1,19 \cdot 10^{-07}$		138,47 dB	-144,49 dB FS	144,49 dB

Rozestup kvantizačních úrovní Δq_{MT} ekvidistantního kvantizéru v tabulce 12 znamená současně i nejnižší možnou hodnotu kvantizační úrovně střídavého signálu, kterou lze pomocí kodéru typu mid-tread zakódovat. $\Delta L_{q_{MT}}$ zde pak značí velikost kvantizačního intervalu a $L_{q_{E_{MT \max}}}$ nejvyšší možnou hodnotu kvantizační chyby q_E pro každý jednotlivý vzorek v hladinovém vyjádření vůči maximální hodnotě rozsahu kvantizéru ($L_{q_{FS}} = 0$ dB FS). Je však zvykem velikost kvantizační chyby udávat spíše pro delší blok N vzorků jako odstup hladiny efektivní hodnoty kvantizační chyby od hladiny efektivní hodnoty kódovaného signálu, takzvaný *SQR* (z anglického „*Signal to Quantization error Ratio*“), podobně jako se udává v analogové zvukové technice odstup signálu od šumu (*SNR*, *Signal to Noise Ratio*). Odstup kvantizační chyby *SQR* je tedy analogicky dán logaritmizovaným poměrem efektivní hodnoty kvantizační chyby vůči efektivní hodnotě harmonického testovacího signálu s plným rozkmitem v rozsahu kvantizéru (relativní amplituda $u_A/u_{FS} = q_A = 1$), respektive rozdílem hladin efektivní hodnoty harmonického testovacího signálu s plným rozkmitem v rozsahu kvantizéru A/D převodníku a hladiny efektivní hodnoty vzniklé kvantizační chyby

$$SQR = 20 \cdot \log \frac{q_{E \text{ RMS}}}{q_{FS \sin \text{ RMS}}} = L_{q_{E \text{ RMS}}} - L_{q_{FS \sin \text{ RMS}}} \text{ dB} \approx L_{q_{E \text{ RMS}}} - 3 \text{ dB}. \quad (2.23)$$

Pro maximální velikost hladiny kvantizační chyby libovolného průběhu kvantizovaného signálu vztaženou na hodnotu nejvyšší úrovně kvantizéru platí jednodušší a obecnější vztah

$$L_{q_{E \max}} = 20 \cdot \log q_{E \max} \leq SQR. \quad (2.24)$$

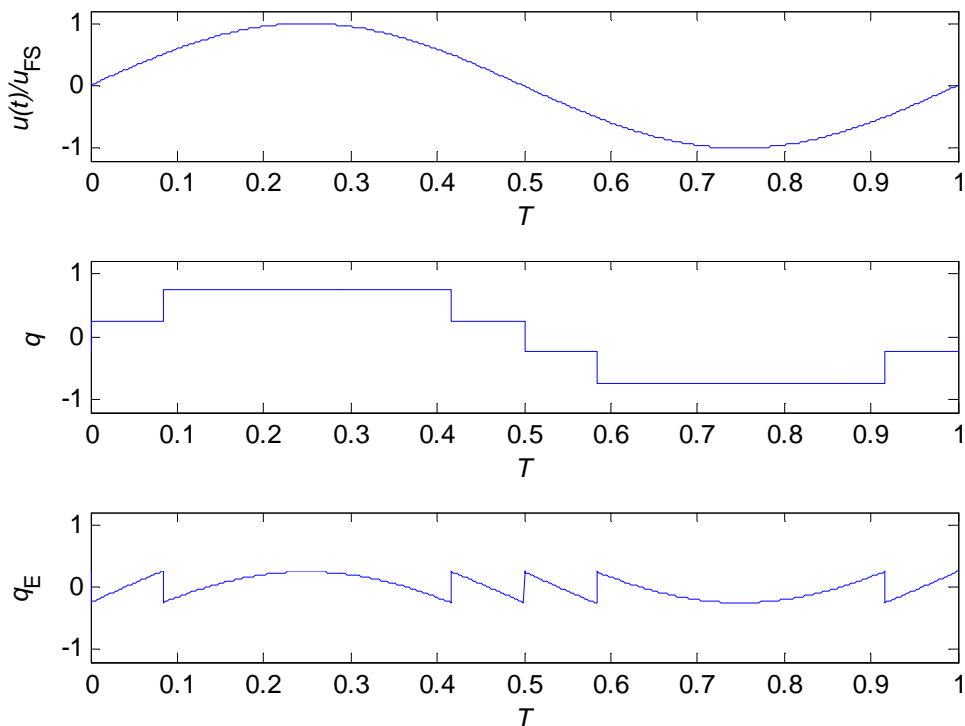
Relativní velikost chyby kvantizace vztažená na maximální rozsah kvantizéru je u stejnosměrného lineárního kvantizéru s ekvidistantním rozložením kvantizačních úrovní nepřímo úměrná použitému počtu bitů. Protože v poměrném hladinovém vyjádření v decibelech se přidáním každého bitu maximální možná binárně kódovaná číselná hodnota zdvojnásobuje, můžeme u vícebitového stejnosměrného kvantizéru uvažovat zvýšení odstupu kvantizační chyby od kvantizovaného signálu s každým použitým bitem zhruba o 6 dB, z čehož vychází aproximace velikosti odstupu hladiny kvantizační chyby od kvantizovaného signálu jednoduchým vzorcem

$$SQR \approx 6,02 \cdot W. \quad (2.25)$$

Pro převodníky střídavých veličin typu mid tread je vzhledem ke snížení počtu kvantizačních úrovní jejich symetrizací vůči nule tento jednoduchý model platný až pro vícebitové převodníky zhruba od 8 bitů výše, jak je vidět ze srovnání hodnot vypočtených podle vzorců 2.16 a 2.25 v posledních dvou sloupcích tabulky 12. Musíme si totiž uvědomit,

že pro lineární kvantizaci vzorku střídavé veličiny W bity je kvantizační rozsah kvantizéru typu mid-tread (s nulou) rozdělený jen na $2^W - 1$ pravidelně rozložených úrovní, mezi nimiž je pak celkem $2^W - 2$ intervalů, které mají pokrýt celý kvantizační rozsah převodníku střídavé veličiny, tedy obě polarity signálu v celkovém rozsahu relativních hodnot $q \in \langle -1; +1 \rangle$.

Na chybu kvantizace je možné pohlížet jako na nežádoucí přidání určité malé kladné nebo záporné hodnoty kvantizované veličiny k původní hodnotě každého kvantizovaného vzorku. Časový průběh kvantizační chyby posloupnosti vzorků $q[n]$ pak ve zvukové technice můžeme chápat jako nechtěný zvukový signál vytvořený posloupností vzorků chyby kvantizace $q_E[n]$ přidaný k původnímu analogovému signálu. Pro čistě harmonický testovací signál je časový průběh kvantizační chyby periodický a subjektivně má charakter bzučení připomínajícího zkreslení harmonického signálu vyššími harmonickými frekvencemi. Ve zvukovém editoru je toto možné demonstrovat pomocí rekvantizace harmonického signálu kvantizovaného původně vysokým počtem bitů na velmi malou bitovou hloubku. V grafu časového průběhu rekvantizovaného signálu (obrázek 23) je pak dobře viditelné obsazení jednotlivých kvantizačních hladin jako výrazné „zuby“. Pro kvantizační hloubku menší než 8 bitů je tento jev už i dobře slyšitelný. Rozdílový signál reprezentující časový průběh posloupnosti vzorků kvantizační chyby lze získat součtovou mixáží rekvantizovaného signálu s fázově invertovaným původním signálem a samostatně poslechnout i zobrazit (obr. 23 dole).

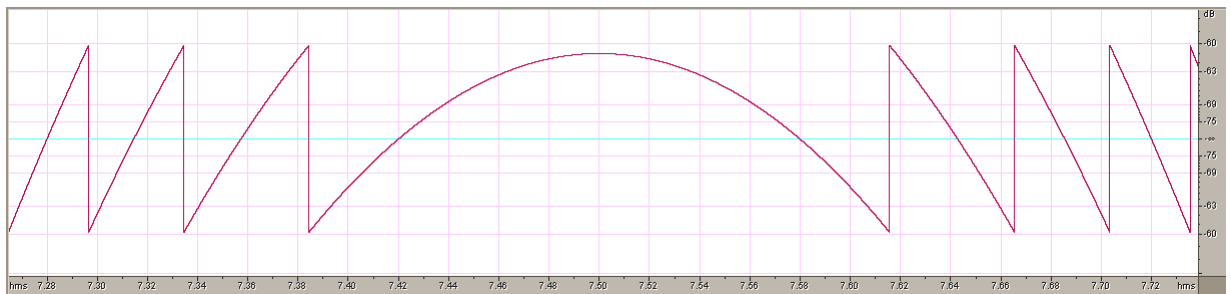


Obr. 23: Princip vzniku časového průběhu kvantizační odchylky pro 2-bitový převodník typu mid-rise. Nahoře před rekvantizací, uprostřed rekvantizovaný a dole rozdílový signál. Vytvořeno v MATLABu.

V případě harmonického průběhu testovacího signálu je možné při odhadu odstupu efektivní hodnoty kvantizační chyby a kvantizovaného signálu [98] vyjít ze vztahu

$$SQR_{\sin} \approx 6,02 \cdot W + 1,76 \text{ dB} . \quad (2.26)$$

Korekce SQR zde vychází z toho, že u harmonických signálů má hodnota kvantizační chyby časový průběh z velké části tvarově blízký pilovému průběhu, pro nějž je efektivní hodnota $\frac{\sqrt{3}}{2}$ násobně, tedy zhruba 1,2 krát nižší, než pro harmonický průběh. Efektivní hodnota chyby kvantizace harmonického signálu v aproximaci pilovým průběhem ($q_{\sim\text{RMS pila}} = \frac{1}{\sqrt{3}} q_{\sim\text{A pila}}$) má v hladinovém vyjádření hodnotu $L_{\text{RMS pila}} \approx L_{\sim\text{A pila}} - 4,77 \text{ dB}$ na rozdíl od hladiny efektivní hodnoty harmonického průběhu $L_{\text{RMS sin}} \approx L_{\sim\text{A sin}} - 3,01 \text{ dB}$ ($q_{\sim\text{RMS sin}} = \frac{1}{\sqrt{2}} q_{\sim\text{A sin}}$), vztaženo na amplitudy každého z průběhů. Odtud vychází teoretická hodnota korekce 1,76 dB ve vzorci 2.26 použitelném při odhadu SQR pro převodníky s velkým počtem bitů ($W > 10$ bit). Experimentálně ověřená hodnota SQR pro testovací signál s frekvencí 1 kHz v případě 10 bitového lineárního převodníku s maximální velikostí chyby vzorku $L_{qE \text{ MT max}} = -60,19 \text{ dB}$ je $SQR_{\sin} = 61,92 \text{ dB}$, tedy jen o 1,73 dB vyšší než dává jednoduchý odhad podle vzorce 2.25.



Obr. 24: Detail časového průběhu kvantizační odchylky signálu kvantizovaného $W=10$ bit typu mid-tread. Zdroj: Vlastní.

Pro nejběžnější 16-bitový převodník tak bude odstup kvantizační chyby od signálu a tím i maximální využitelný dynamický rozsah 16-bitové digitální zvukové stopy zhruba 96 dB. V případě harmonického signálu můžeme uvažovat dokonce hodnotu SQR až 98 dB. Potřebná dynamika pro subjektivně akceptovatelný přenos zvukového signálu přitom odpovídá zhruba 60 dB, takže minimální bitová hloubka digitálního záznamu lidské řeči a hudby musí být alespoň 10 bitů. Potřebná bitová hloubka ale samozřejmě záleží také na předpokládané hlasitosti reprodukce zvukového signálu. Pokud hladina akustického tlaku odpovídající hladině efektivní hodnoty kvantizační chyby nepřekročí práh slyšení, nebude ještě vliv kvantizace signálu možné slyšet. Pro 10 bity kvantizovaný zvukový signál by to znamenalo maximální hladinu akustického tlaku pro harmonický testovací signál jen +60 dB SPL. Při vyšší hlasitosti reprodukce už bude vliv kvantizace potenciálně slyšitelný.

U širokopásmových signálů s obecně neperiodickým průběhem je situace složitější. Důsledky vnesení kvantizační chyby do původního signálu při jeho rekvantizaci je však možné demonstrovat například pro zaznamenaný řečový signál následně rekvantizovaný ze 16 bitů na 4 bity, 3 bity a 2 bity nebo při pozvolném snižování rozkmitu signálu na 8 bitů. Rekvantizovaný záznam pak zní, jakoby do něj byl přidán širokopásmový šum. Takto je možné názorně zavést označení chyby kvantizace jako „kvantizační šum“. Kvantizační šum však není posloupností náhodných čísel, jako je ideální bílý šum, protože s původním signálem je takzvaně korelovaný a tak časový průběh užitečného signálu jakoby napodobuje.

3.2.6 DATOVÝ TOK

Součin bitové hloubky a vzorkovací frekvence udává kolik bitů je potřeba pro popis každé sekundy vzorkovaného binárně kódovaného digitálního signálu (anglicky Pulse Code Modulation, zkr. PCM). Tato veličina se označuje jako datový tok signálu, anglicky „bitrate“.

$$\text{Datový tok} = f_s \cdot W \quad \text{bit} \cdot \text{s}^{-1}. \quad (2.27)$$

Pro vícekanálový zvukový signál, například stereofonní (2 kanálový), je potřeba tuto hodnotu násobit počtem stop. Z velikosti datového toku je možné dále určit, kolik bitů, respektive kolik 8-bajtových slabik (1 Byte = 8 bit), je potřeba k uložení zvukového signálu určitého časového trvání. Pro rychlou orientaci slouží následující tabulky 13 a 14, v nichž $1 \text{ kbit} = 2^{10} \text{ bit} = 1024 \text{ bit} \approx 10^3 \text{ bit}$ a $1 \text{ MByte} = 2^{20} \text{ Byte} = 1\,048\,576 \text{ Byte} \approx 10^6 \text{ Byte}$.

Tab. 13: Datový tok monofonních audio stop v závislosti na vzorkovací frekvenci f_s a bitové hloubce W

f_s /Hz	8 000	16 000	32 000	44 100	48 000	96 000	192 000
W	Datový tok PCM v kbit/s						
8 bit	62,5	125	250	344,5	375	750	1 500
10 bit	78,125	156,25	312,5	430,7	468,75	937,5	1 875
12 bit	93,75	187,5	375	516,8	562,5	1 125	2 250
16 bit	125	250	500	689,1	750	1 500	3 000
20 bit	156,25	312,5	625	861,3	937,5	1 875	3 750
24 bit	187,5	375	750	1033,6	1 125	2 250	4 500

Tab. 14: Orientační velikost zvukového souboru v závislosti na vzorkovací frekvenci f_s a bitové hloubce W

f_s /Hz	8 000	16 000	32 000	44 100	48 000	96 000	192 000
W	Velikost souboru Wave (LPCM mono) v MByte za minutu						
8 bit	0,46	0,92	1,83	2,52	2,75	5,49	10,99
10 bit	0,57	1,14	2,29	3,15	3,43	6,87	13,73
12 bit	0,69	1,37	2,75	3,79	4,12	8,24	16,48
16 bit	0,92	1,83	3,66	5,05	5,49	10,99	21,97
20 bit	1,14	2,29	4,58	6,31	6,87	13,73	27,47
24 bit	1,37	2,75	5,49	7,57	8,24	16,48	32,96

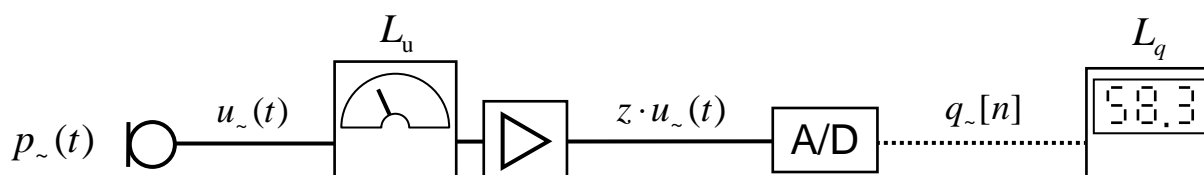
3.3 Měřicí technika pro reálné experimenty v akustice na středním stupni vzdělávání

Je paradoxem, že většina žáků dnes nosí v kapse nebo batohu modernější zvukovou techniku než je ta, pomocí níž se akustika učí na školách. Žáci si však většinou sami neuvědomí, že svůj notebook, tablet, chytrý mobilní telefon nebo MP3 přehrávač mohou snadno proměnit v měřicí přístroj pro snímání akustických veličin, který ve spojení s vhodnými externími senzory a softwarem zvládne v principu to, co profesionální měřicí technika. Při odpovídající modifikaci experimentálních úloh přitom není ani v žákovských experimentech nutné činit zásadní ústupky z požadavků na reprodukovatelnost experimentů a spolehlivost akustických měření.

Přestože učebnice fyziky pro základní i střední školu [33, 36, 67, 82] uvádějí jako základní měřené veličiny v akustice intenzitu zvuku a její hladinu, v praxi je to jiná akustická veličina, kterou potřebujeme měřit. Nejčastěji se tak v akustických experimentech snímá a zaznamenává časový průběh okamžité hodnoty akustického tlaku v místě měření, z něhož se určuje efektivní hodnota a dále hladina akustického tlaku v decibelech (viz kapitola 3.1). Ostatní akustické veličiny, jako například akustickou intenzitu a akustický výkon zdroje zvuku, lze následně za přesně daných podmínek určit výpočty podle platných fyzikálních vztahů z několika současných měření časového průběhu akustického tlaku na různých pozicích ve zvukovém poli.

3.3.1 PRINCIP MĚŘENÍ AKUSTICKÝCH VELIČIN

Úkolem zařízení pro měření akustického tlaku je zjednodušeně řečeno převést kolísání tlaku v místě měření na číselné hodnoty veličiny zobrazené na stupnici nebo displej měřicího přístroje. Prvním článkem měřicího řetězce je vlastní senzor, česky snímač, akustického tlaku. Ten má dvě funkční části. Akusticko-mechanický měnič ve formě vzduchové komory uzavřené na jedné straně pružnou membránou přeměňuje tlakové změny $p_{-}(t)$ působící v místě senzoru na výchylku membrány $y_{-}(t)$. S membránou spojený mechano-elektrický měnič přitom přeměňuje časový průběh výchylky membrány $y_{-}(t)$ na časový průběh napětí $u_{-}(t)$. V praxi se často jedná o jediný neoddělitelný konstrukční prvek nazývaný pak zjednodušeně akusticko-elektrický měnič (na obrázku 25 vlevo). V hovorovém jazyce se mu nejčastěji říká mikrofon.



Obr. 25: Blokové schéma řetězce pro snímání akustického tlaku a digitální záznam zvukového signálu.
Zdroj: vlastní

Napětí na výstupu senzoru akustického tlaku můžeme měřit přímo střídavým analogovým milivoltmetrem s velkým vstupním odporem ($1\text{ M}\Omega$). Výchylka ručky na cejchované stupnici přitom odpovídá efektivní hodnotě napětí na výstupu senzoru u_{ef} za dobu τ , která reprezentuje akustický tlak p_{ef} . V digitálních měřicích přístrojích je spojitý časový průběh napětí na výstupu snímače $u_{\sim}(t)$ zpracováván analogově-digitálním převodníkem (blok A/D na obrázku 25). Pro optimální využití kvantizačního rozsahu A/D-převodníku je ovšem ještě před kvantizací nutné časový průběh výstupního napětí mikrofonu napět'ově zesílit předzesilovačem s nastavitelným zesílením (z -násobně) na hodnotu $z \cdot u_{\sim}(t)$.

Z kontinuálního časového průběhu napětí $z \cdot u_{\sim}(t)$ jsou poté vzorkováním v pravidelných časových intervalech určovány jeho jednotlivé hodnoty $z \cdot u_{\sim}[n]$. Sled jednotlivých hodnot napětí je dále při kvantizaci převeden na posloupnost čísel $q[n]$ v binární reprezentaci s přesností danou počtem bitů převodníku. Číselné hodnoty posloupnosti mohou být ukládány na paměťové médium nebo dále výpočetně zpracovávány. Současně může být digitálním zařízením z bloku N vzorků vypočtena a na displeji (případně v grafu) zobrazována efektivní hodnota q_{RMS} reprezentující akustický tlak p_{ef} za dobu trvání vyhodnocovaného bloku vzorků $\tau = N \cdot T_s$. Pro ustálené zvuky je časová konstanta pro výpočet efektivní hodnoty standardně $\tau = 1\text{ s}$, pro rychle proměnné zvuky je vhodnější volit $\tau = 0,1\text{ s}$.

Existuje několik fyzikálních principů funkce mechanicko-elektrického měniče. Ve zvukové technice jsou nejčastější princip elektro-dynamický používaný u takzvaných dynamických mikrofonů a kapacitní používaný u takzvaných kondenzátorových mikrofonů.

U **elektrodynamických měničů** jako mechanicko-elektrický měnič slouží s membránou snímače spojená cívka tvořená vodičem délky l kmitající v důsledku změn tlaku sem a tam v magnetickém poli permanentního magnetu s magnetickou indukci B . Výstupní napětí snímače vzniká na fyzikálním principu elektromagnetické indukce. Tento jev popisuje Faradayův zákon, který říká, že indukované napětí U na vodiči cívky je vyvoláno časovou

změnou magnetického indukčního toku Φ v cívce a působí proti změně (Lenzův zákon), která ho vyvolala. Když změnu velikosti magnetického indukčního toku označíme zjednodušeně „středoškolsky“ $\Delta\Phi$ a krátký časový interval Δt , platí pro indukované napětí známý vztah

$$U = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}. \quad (3.1)$$

Velikost indukovaného napětí na výstupu elektrodynamického měniče tedy závisí na velikosti časové změny magnetického indukčního toku kmitací cívkou. V případě, že vodič délky l kolmý na směr magnetické indukce B vytvořené permanentním magnetem uvnitř snímače kmitá spolu s membránou snímače kolmo ke směru \vec{l} i \vec{B} s okamžitou velikostí rychlosti kmitání $\vec{v}_\perp(t)$, platí pro velikost okamžité hodnoty výstupního napětí na cívce vztah

$$u_\perp(t) = B \cdot l \cdot v_\perp(t). \quad (3.2)$$

To znamená, že pro ustálené harmonické kmitání s amplitudou výchylky $y_{\sim A}$ při konstantní velikosti magnetické indukce B a konstantní délce vodiče kmitací cívky l ($\vec{B} \perp \vec{l} \perp \vec{y}_\perp$) závisí amplituda výstupního napětí $u_{\sim A}$ ideálního elektrodynamického senzoru lineárně na velikosti amplitudy rychlosti kmitání membrány $v_{\sim A}$. Napětí na výstupu ideálního elektrodynamického měniče tedy není přímo úměrné velikosti okamžité výchylky membrány, ale velikosti okamžité rychlosti kmitání. Proto se tomuto typu mechano-elektrického převodníku říká také rychlostní měnič. Důsledkem fyzikálního principu funkce elektrodynamického měniče je, že při konstantní amplitudě výchylky se stoupající frekvencí kmitání membrány napětí na výstupu elektrodynamického senzoru lineárně narůstá. U mikrofonů pracujících na tomto principu to je více či méně úspěšně kompenzováno mechanickými vlastnostmi kmitajícího systému membrány s rezonanční frekvencí na spodním okraji přenášeného pásma. Výsledné vlastnosti snímače tak mohou být vhodné pro snímání a záznam zvuku hudebních nástrojů a lidského hlasu, ale kvůli dlouhému dokmitávání těžké membrány na závěsu s malou tuhostí (nutné pro nízkou rezonanční frekvenci) a i tak značně nevyrovnané citlivosti na různé frekvence kmitání se tento typ snímače pro objektivní hodnocení širokopásmových zvuků nehodí.

V případě užití principu **kapacitního měniče** měříme v podstatě změny napětí na nabitěm deskovém kondenzátoru tvořeném vodivě pokovenou pohyblivou membránou jako jednou deskou a pevnou zadní elektrodou jako druhou deskou kondenzátoru. Dielektrikem mezi deskami kondenzátoru je vzduch. Platí pro něj obecný vzorec kondenzátoru

$$Q = U \cdot C, \quad (3.3)$$

kde Q je celkový náboj, U napětí mezi deskami kondenzátoru a C je geometrií desek daná kapacita kondenzátoru. Předpokládáme, že náboj na deskách kondenzátoru Q je konstantní. Kapacita kondenzátoru C pak závisí na překrývající se ploše desek S , na jejich vzdálenosti d a také na dielektriku mezi deskami popsaném permitivitou ε , častěji vyjádřenou jako součin permitivity vakua ε_0 a relativní permitivity ε_r (suchý vzduch $\varepsilon_r = 1$). Pro kapacitu deskového kondenzátoru pak platí vztah

$$C = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \cdot \frac{S}{d}. \quad (3.4)$$

Při neměnné účinné ploše elektrod S , konstantním náboji mezi elektrodami Q a konstantní permitivitě $\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r$ působí změna vzdálenosti membrány od protější elektrody změnu jeho kapacity, která je této změně vzdálenosti přímo úměrná. Časový průběh napětí na kondenzátoru $u_-(t)$ v závislosti na kolísání velikosti mezery mezi membránou a zadní deskou $d_-(t)$ způsobené okamžitou výchylkou kmitání membrány $y_-(t) = d_-(t)$ má pak tvar

$$u_-(t) = \frac{Q}{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot S} \cdot d_-(t). \quad (3.5)$$

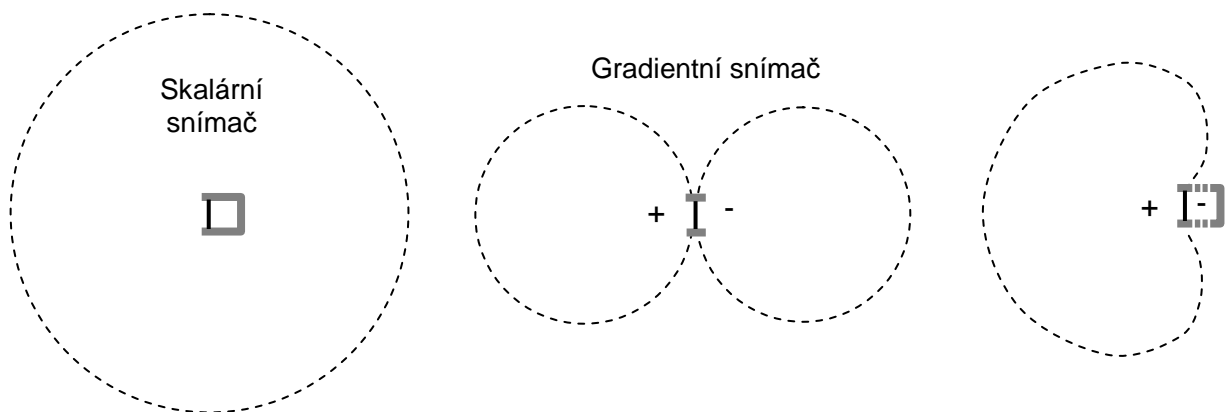
Výstupní napětí kapacitního mechano-elektrického měniče tedy závisí lineárně na výchylce membrány $y_-(t)$ a přitom nijak nezávisí na rychlosti, jakou membrána kmitá. Pro ideální kapacitní akusticko-elektrický měnič je proto výstupní napětí senzoru z principu nezávislé na frekvenci tlakových změn, které kmitání membrány způsobují. Vzhledem k lineární závislosti napětí na výchylce kmitání membrány pak efektivní hodnota napětí u_{-ef} na výstupu ideálního kapacitního akusticko-elektrického měniče reprezentuje akustický tlak $p_a = p_{-ef}$. Tloušťka membrány mikrofonů pracujících na principu kapacitního snímače je řádově 1 μm , vzduchová mezera mezi jeho elektrodami řádově 10 μm . Amplituda výchylky kmitání membrány vlivem tlakových změn pak dosahuje řádově 10 nm na pascal, tedy řádově až 1 μm při 100 Pa.

Kapacitní princip mechano-elektrického měniče se na první pohled jeví jako ve všech ohledech výhodná volba pro telekomunikaci, záznamovou i měřicí techniku. Má jen jednu podstatnou nevýhodu. Aby snímač fungoval, musí být deskový kondenzátor tvořící vlastní mechanicko-elektrický měnič nabit konstantním nábojem Q . V praxi se to řeší připojením kapacitního měniče ke stabilizovanému zdroji stejnosměrného napětí o velikosti desítek až stovek voltů (audiotechnika 48 V, měřicí technika až 200 V). Pro mobilní zařízení to byl ale dlouho problém. Zásadní přelom znamenala až technologie výroby kapacitních měničů s trvale vázaným elektrickým nábojem ve vrstvě speciálního dielektrika, takzvaném elektretu, kterou pro použití v mikrofonech vyvinuli a roku 1961 patentovali James West a Gerhard

Sessler [37]. Předpolarizovaná je buď membrána mikrofону tvořená tenkou povrchově pokovenou elektretovou fólií (typ foil-elektret) nebo vrstva dielektrika umístěná zevnitř na perforované zadní elektrodě (typ back-elektret). Jako dielektrikum jsou používány nejrůznější materiály, které akceptují a dlouhodobě udrží prostorový elektrický náboj, počínaje původním polytetrafluorethylenem (PTFE, Teflon) až po moderní keramické materiály a dielektrické vrstvy na bázi oxidů křemíku.

3.3.2 ZÁKLADNÍ PARAMETRY AKUSTICKÝCH SENZORŮ

Senzory zvuku pro experimenty a měření v akustice se někdy označují také jako měřicí mikrofóny. Pro jejich technické parametry platí obdobná základní hodnotící kritéria jako pro mikrofóny z kategorie spotřební elektrotechniky a profesionální zvukové techniky (viz např. IEC 60268-4). To ovšem neznamená, že lze jako senzor zvuku v akustických experimentech na středním stupni vzdělávání s přihlédnutím k nižším požadavkům na přesnost měření použít jakýkoli mikrofón. Nevhodná volba typu snímače může totiž vést ke zcela fatálním systematickým chybám takového neuváženého akustického „měření“.



Obr. 26: Schématické znázornění tří základních směrých charakteristik citlivosti akustických senzorů.
Zdroj: vlastní

Jako první věc je třeba si uvědomit, že ne každý mikrofón je spolehlivým snímačem velikosti akustického tlaku v místě měření. Velmi zde záleží na konstrukci akusticko-mechanického měniče, která má zásadní vliv na takzvanou **směrskou charakteristiku** citlivosti senzoru. Výše popsaný příklad kapsle uzavřené pružnou membránou vykazuje pro zvukové vlnění s vlnovou délkou řádově větší než velikost senzoru kulově symetrickou směrskou charakteristiku (viz obrázek 26 vlevo). Zakreslené křivky zde ve dvojrozměrném řezu procházejícím osou symetrie válcového pouzdra senzoru vyznačují teoretické souřadnice

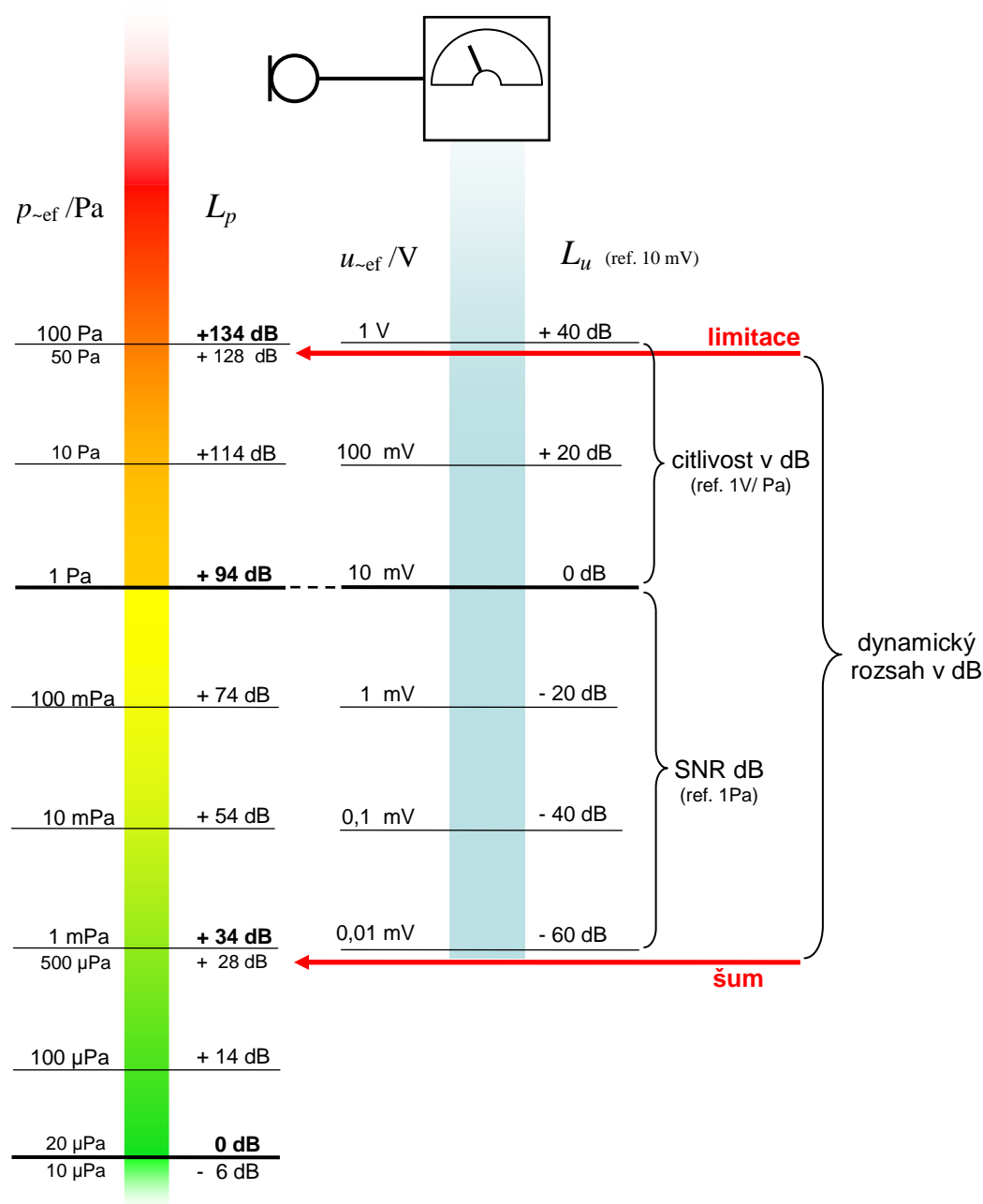
ideálního zdroje zvuku kmitajícího s konstantní amplitudou, na nichž by takový zdroj vyvolal vždy stejnou výchylku kmitání membrány ve volném poli pevně umístěného senzoru. Senzor s kulově symetrickou charakteristikou se pak chová jako akustický přijímací monopól a je možné ho v experimentech bez obav používat jako skalární snímač akustického tlaku.

Ideální oboustranně otevřený snímač by se naopak choval jako akustický dipól, který vykazuje extrémně nesymetrickou, takzvaně osmičkovou směrovou charakteristiku (obrázek 26 uprostřed). Membrána v oboustranně otevřeném pouzdře je rozkmitávána ne velikostí tlaku v místě měření, ale rozdílem tlaku působícího ve zvukovém poli na opačných stranách membrány. V případě snímání akustického tlaku v idealizované rovinné vlně přitom velmi záleží na orientaci membrány senzoru ve zvukovém poli. Výchylka kmitání membrány snímače v určitém místě zvukového pole totiž silně závisí na úhlu natočení senzoru vůči směru šíření přímého zvukového vlnění. Přímé zvukové vlnění dopadající na senzor pod úhlem 90° k normále membrány působí na opačných stranách membrány v protifázi a tak ji vůbec nerozkmitá. S narůstajícím úhlem mezi směrem dopadu přímého vlnění a osou snímače určenou normálou plochy membrány proto citlivost takového senzoru prudce klesá a citlivost na přímý zvuk přicházející ze strany je téměř nulová. Nejedná se tedy z principu o skalární snímač akustického tlaku. Protože snímač této konstrukce v tlakovém poli reaguje prohnutím membrány na rozdíl tlaku před a za membránou, reprezentuje napětí na výstupu snímače pouze velikost tlakového spádu ve směru normály jeho membrány neboli gradientu tlaku. Ideální dipólový snímač se proto v akustice označuje také jako gradientní tlakový snímač.

Běžně dostupné profesionální kondenzátorové i dynamické mikrofony pro záznam zpěvu a zvuku hudebních nástrojů mají částečně otevřenou kapsli, typicky s několika malými otvory na boku nebo zadní straně, která vykazuje takzvaně kardioidní směrovou charakteristiku (viz obrázek 26 vpravo). Tuto směrovou charakteristiku citlivosti senzoru je možné popsat jako lineární superpozici směrových charakteristik ideálního skalárního a ideálního gradientního snímače. Pro použití v kvantitativně vyhodnocovaných fyzikálních experimentech a přesných měřeních však směrové mikrofony nejsou vhodné, protože ve výstupním signálu takového snímače není prakticky možné zjistit, v jakém poměru se tyto dvě složky podílely na rozkmitání membrány senzoru. Nevěděli bychom tedy, co vlastně měříme.

Vztah mezi snímanou fyzikální veličinou a jí vyvolanou odezvou na výstupu snímače, pro mechanicko-elektrické snímače veličinou elektrickou, popisuje přenosová funkce měniče. Tento parametr, označovaný hovorově jako **citlivost** v případě skalárního senzoru akustického tlaku udává velikost elektrického napětí na výstupu senzoru v závislosti na akustickém tlaku působícím na membránu snímače (viz obrázky 27, 35 a 36). Citlivost akustických senzorů je

běžně udávána buď přímo v milivoltech na pascal nebo v decibelech jako logaritmizovaný poměr vůči referenční hodnotě citlivosti 1 V/Pa. Hodnota výstupního napětí je obecně frekvenčně závislá. Je proto udávána vždy pro pevně danou frekvenci v měřeném pásmu, standardně pro čistý tón 1 kHz. Druhý způsob značení citlivosti se může zprvu zdát matoucí, protože čím je hodnota citlivosti v decibelech vztažená k teoretické hodnotě 1 V/Pa nižší, tím je senzor citlivější. Princip udávání citlivosti senzoru v mV a decibelech objasňuje schéma na obrázku 27.

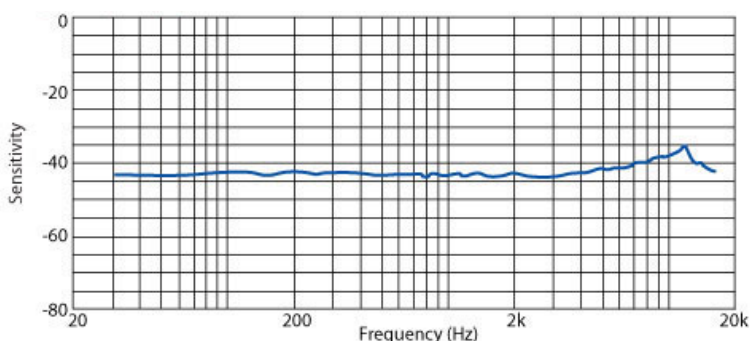


Obr. 27: Schématické znázornění významu přenosového faktoru mezi akustickým tlakem a výstupním napětím akusticko-elektrického měniče a jejich hladinovými vyjádřeními v decibelech pro citlivost 10 mV/Pa.

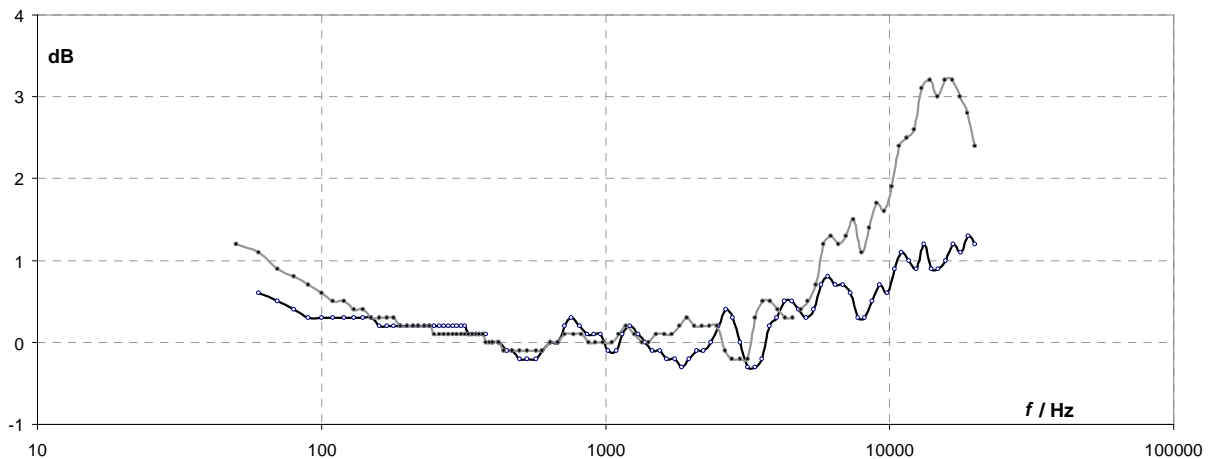
Zdroj: vlastní

Pro snímání zvuku za účelem jeho kvantitativního hodnocení musí mít přenosová funkce mezi akustickým tlakem a napětím co nejbližší k lineární závislosti a to v obrovském rozsahu hodnot akustického tlaku řádově od μPa do desítek Pa, což by vyžadovalo, aby se membrána akusticko-mechanického měniče pohybovala jako dokonale tuhý píst. Této idealizaci je přitom možné se s dostatečnou přesností přiblížit jen pro malé amplitudy výchylky kmitání realizované u kondenzátorových mikrofonů ve skutečnosti spíše průhybem jejich tenké membrány. S narůstající výchylkou dochází vlivem zpočátku ještě zanedbatelné nelinearity mezi akustickým tlakem a výchylkou k limitaci výstupního střídavého napětí a tím i k nárůstu harmonického zkreslení výstupního signálu senzoru. Limitace výstupního harmonického signálu tak ohraničuje shora využitelný **dynamický rozsah** snímače akustického tlaku. Musíme však vzít v úvahu i oblast linearity přenosové funkce mikrofonního předzesilovače, u kterého se zpravidla se zvyšujícím se akustickým tlakem, a tedy i napětím na vstupu předzesilovače, projeví nelinearita mezi napětím na vstupu a na výstupu ještě dříve než u mechanických částí senzoru. Zdola je měřicí rozsah senzoru omezen šumem kapacitního měniče, respektive opět spíše šumem připojeného předzesilovače.

Přenosová funkce akustického snímače by měla kromě požadavku na její linearitu být frekvenčně nezávislá ve frekvenčním rozsahu ideálně od 20 Hz do 20 kHz. Reálně má tento požadavek formu tolerančního pásma frekvenční závislosti přenosového faktoru (typicky ± 1 dB nebo ± 3 dB). Grafické znázornění závislosti výstupního napětí senzoru na frekvenci tlakových změn při jejich konstantní amplitudě, takzvaná **frekvenční charakteristika** senzoru, by pak měla mít co nejvyrovnanější průběh bez výrazných špiček a zvlnění. U kondenzátorových mikrofonů je vyrovnaného frekvenčního průběhu dosaženo fyzikálním principem kapacitního měniče společně s posunutím rezonanční frekvence membrány směrem k vysokým kmitočetům, nejlépe zcela mimo požadované frekvenční pásmo měření. Technicky je tohoto požadavku dosaženo použitím tenké membrány s velmi vysokou vnitřní tuhostí a vysokou tuhostí jejího závěsu. Takový mechanický systém pak vykazuje rezonanční frekvenci v řádu až desítek kHz.



Obr. 28: Frekvenční charakteristika senzoru akustického tlaku Projects Unlimited POM-3044P-R.
Zdroj: [57]



Obr. 29: Frekvenční charakteristiky měřicího mikrofonu Beyerdynamic MM1 pro 2 různé kusy stejného typu se sériovými čísly 4306 (15. 4. 2009, černá křivka) a 8471 (2. 4. 2012, šedá křivka, výraznější zvlnění). Zdroj dat grafu: Interní databáze výrobce, zprostředkoval Klaus Kirhhöfer.

Měření frekvenční charakteristiky je standardně realizováno v přibližně volném zvukovém poli bezodrazové měřicí místnosti. Měřený senzor je umístěn ve vzdálenosti typicky jednoho metru od referenčního zvukového zdroje a namířen přímo ke zdroji tak, že dopadající zvukové vlny jsou rovnoběžné s membránou senzoru. Při vysokých frekvencích, při nichž je vlnová délka zvuku srovnatelná s rozměrem senzoru, však dochází u zvukových vln dopadajících na membránu k nárůstu tlakových změn na membráně senzoru oproti skutečným hodnotám akustického tlaku na měřené pozici. To se projevuje jako zdvih frekvenční závislosti citlivosti senzoru v oblasti mezi 10 a 20 kHz, což je dobře viditelné jak v grafu na obrázku 28 tak i na obrázku 29. Střídavý tlak před membránou senzoru je pak v důsledku přítomnosti objektu velikosti srovnatelné s vlnovou délkou zvuku vyšší, než jaký by byl akustický tlak ve stejném místě bez přítomnosti senzoru. V mnoha měřeních pomocí senzoru akustického tlaku tedy není účelné, aby byla membrána senzoru rovnoběžná s vlnoplochami přímého zvuku, respektive, aby osa senzoru daná normálou jeho membrány směřovala ke zdroji zvuku. Pro měření vysokofrekvenčních zdrojů je lépe nasměřovat osu měřicího mikrofonu buď kolmo ke směru šíření zvuku od zdroje nebo pod úhlem zhruba 45°.

3.3.3 MĚŘICÍ SYSTÉM PRO ŠKOLSKÉ EXPERIMENTY V AKUSTICE VYUŽÍVAJÍCÍ ZVUKOVOU KARTU POČÍTAČE

Nejjednodušší měřicí systém pro reálné experimenty v akustice lze vytvořit připojením měřicího mikrofону vlastní výroby do mikrofonního vstupu zvukové karty počítače. K vyhodnocování měření v případě žákovských experimentů pak jako měřicí rozhraní mohou sloužit přímo notebooky nebo stolní osobní počítače s integrovanou zvukovou kartou na základní desce (tzv. on-board) podle spotřebitelských standardů AC'97 a Intel High Definition Audio. Jako software pro řízení a vyhodnocování měření lze použít některý z dostupných zvukových editorů pro záznam a digitální zpracování zvuku, například Adobe Audition (dříve Cool Edit Pro) ve zkušební verzi nebo volně dostupný program Audacity. Alternativně lze externí měřicí mikrofón připojit i do mikrofonního vstupu mobilních zařízení, tedy tabletů nebo smartphonů s operačním systémem Android, iOS či Windows Phone a instalovanými aplikacemi pro záznam a měření zvuku jako jsou například „Sound Tools“, „Sound Meter“, „deciBel“ a mnohé další.

Počítačem řízený digitální měřicí systém pro výuku akustiky musí spolehlivě plnit tři základní úlohy: První z nich je reprodukovatelné snímání a záznam časového průběhu okamžitých hodnot akustického tlaku na určité pozici ve zvukovém poli. Druhá nejčastější úloha vychází ze zaznamenaných dat a spočívá v určení efektivní hodnoty libovolného časového průběhu signálu, případně u ustálených harmonických signálů amplitudy rozkmitu signálu, a výpočtu jejich hladin za zvolený časový interval. Ty jsou pak udávány v decibelech buď jen relativně vzhledem k maximu rozkmitu digitálního signálu jako L_q v dB FS nebo po kalibraci přímo jako hladina akustického tlaku L_p v dB SPL vůči dohodnuté vztažné hodnotě akustického tlaku $p_0 = 20 \mu\text{Pa}$. Třetí typickou úlohou je spektrální analýza bloku N vzorků digitálního signálu realizovaná rychlou Fourierovou transformací, která udává relativní příspěvky jednotlivých užších frekvenčních pásem k výslednému akustickému tlaku.

Profesionální akustická měřicí technika vychází z přísných požadavků mezinárodních norem, zejména normy ISO 61672 (dříve ISO 60651). I pro demonstrační a žákovské experimenty v akustice je přitom požadována shoda nebo alespoň přiblížení se platným normám. V tomto případě je to snaha splnit požadavky na parametry měřicího zařízení v rámci specifikace třídy 2, aktuálně nejnižší třídy přesnosti výše uvedené normy ISO 61672. Pro necertifikovaná orientační měření ve výuce to znamená měřitelný rozsah hladin akustického tlaku 30 až 130 dB SPL ve frekvenčním pásmu od 20 Hz do 20 kHz při celkové nejistotě určení hladiny akustického tlaku $\pm 1,5$ dB. Tyto požadavky jsou však pro jednoduché

měřicí systémy na samé hranici splnitelnosti, a proto se, jak dále zdůvodním, často musíme spokojit s určitým kompromisem v podobě větší nejistoty určení hladiny akustického tlaku nebo zúžení frekvenčního rozsahu i rozsahu hodnot akustického tlaku, v němž bude požadovaná spolehlivost měření ještě splněna.

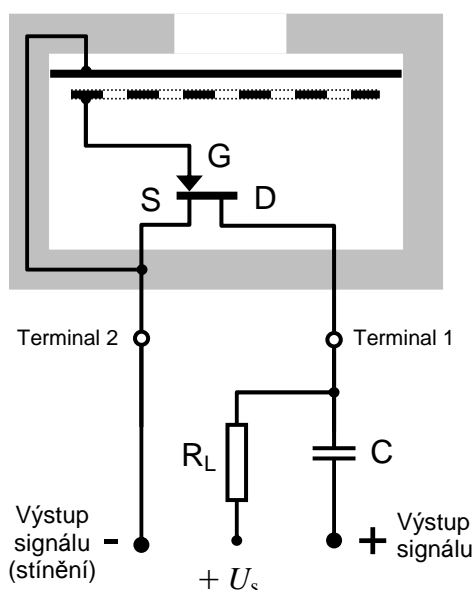
Při výběru vhodného typu senzoru pro snímání akustického tlaku v kvantitativně vyhodnocovaných akustických experimentech platí dvě základní pravidla: Akusticko-mechanická část měnič musí být konstruována tak, aby výchylka membrány byla přímo úměrná akustickému tlaku v místě měření, a současně musí mechanicko-elektrická část senzoru používat takový fyzikální princip, u kterého je elektrické napětí na výstupu přímo úměrné výchylce kmitů membrány. Pouze tak je možné výstupní napětí interpretovat jako napěťový obraz akustického tlaku v místě měření. Tyto dvě podmínky přitom splňují pouze malomembránové kapacitní senzory s uzavřenou kapslí a kulovou směrovou charakteristikou.

Do této kategorie patří i řada typů cenově dostupných elektretových kondenzátorových mikrofonů využívajících principu kapacitního mechano-elektrického měniče s permanentně vázaným nábojem. Elektretové kondenzátorové mikrofonní vložky (zkráceně ECM) se dnes používají v řadě přístrojů od mobilních telefonů až po profesionální zvukovou techniku. Jsou základem dokonce i modulů zvukoměrů a měřicích mikrofonů LEYBOLD, PHYWE, VERNIER a PASCO nebo poloprofesionálních zvukoměrů TESTO, VOLCRAFT či CEM. Nejvyšší kvality elektretové mikrofonní vložky jsou osazovány do profesionálních klopových mikrofonů a náhlavních sad používaných při snímání zvuku pro televizní vysílání a živá pódiová vystoupení. Na vybraných kusech těchto typů ECM vložek jsou pak založeny měřicí mikrofony určené ke kontrole nastavení ozvučení (např. Bayerdynamic MM-1, Behringer ECM 8000, Audix TM-1 nebo Haun MBC 550).

Elektretové mikrofonní vložky pro celé tohoto široké spektrum aplikací lze zakoupit jako samostatné elektrosoučástky a to v různém provedení, s různými technickými parametry, a cenami zhruba od 20 až do 500 Kč. Nejběžnější jsou pevně zalisované válcové elektretové mikrofonní vložky s průměrem pouzdra 6 mm nebo 9,7 mm, lišící se na pohled dále většinou pouze provedením výstupních kontaktů pro letování nebo zasunutí do konektoru. Pro použití jako senzor akustického tlaku se nejlépe hodí mikrofonní vložky s průměrem 6 mm v takzvaném „back-electret“ provedení s předpolarizovaným dielektrikem naneseným na perforované zadní desce kondenzátoru a přední desce tvořené tenkou kovovou či vodivě pokovenou membránou snímače. Díky tomu je možné pro výrobu membrány použít materiál s výhodnějšími mechanickými parametry než u membrán z dielektrických fólií. Při dodržení několika jednoduchých pravidel pak je možné takovou součástku s úspěchem použít jako

spolehlivý senzor akustického tlaku nejen v jednoduchých školských experimentech, ale dokonce i pro některá náročnější akustická měření.

U obou velikostí elektretových mikrofonních vložek jsou dostupné v zásadě jen dvě směrové charakteristiky: kulová a kardioidní. Požadovaný skalární senzor akustického tlaku s kulovou směrovou charakteristikou je v katalogích součástek označován jako omnidirekcionální (všesměrový, zkratka „omni“). Ostatní nabízené směrové charakteristiky značené jako „uni“ (unidirekcionální, resp. kardioidní směrová charakteristika) a „noise cancelling“ jsou pro stavbu měřicích mikrofonů nevhodné. Od všesměrových senzorů je lze na pohled rozeznat podle jednoho či více malých otvorů na zadní straně mikrofonní vložky. Používají se například ve směrových mikrofonech určených pro snímání lidského hlasu v hlučném prostředí, přičemž mikrofonní vložky označované jako „noise cancelling“ jsou určeny pro snímání z velmi malé vzdálenosti (např. u headsetů), kdy k potlačení zvukového pozadí využívají navíc jev, při němž se zvětšením vzdálenosti zdroje zvuku od senzoru výrazně klesá citlivost senzoru v oblasti nízkých kmitočtů.



Obr. 30: Schéma elektrického zapojení elektretové mikrofonní vložky s vestavěným tranzistorem J-FET.
Zdroj: vlastní

K elektrickému přizpůsobení velmi vysoké výstupní impedance kondenzátoru mechano-elektrického měniče je přímo v kapsli senzoru vestavěn monopolární tranzistor řízený elektrickým polem (typ J-FET, schéma zapojení viz obrázek 30) s vysokou vstupní impedancí a výstupní impedancí typicky 2,2 k Ω . Standardně jsou ECM-kapsle specifikovány pro stejnosměrné napájení U_s tohoto tranzistoru o velikosti 2 V (maximálně cca. 10 V). Za těchto podmínek je citlivost senzorů podle typu a konkrétního kusu zhruba od 5 mV/Pa do 12 mV/Pa. Závislost citlivosti senzoru na velikosti napájecího napětí U_s je zřejmá

z obrázku 35. Už od $U_s = 1$ V jsou přitom senzory plně funkční, což umožňuje napájení běžnými typy baterií a akumulátorů. Podstatné je, že jak integrované zvukové karty, tak mobilní telefony a tablety, umožňují přímé připojení externího elektretového mikrofonu včetně zajištění potřebného napájení v něm vestavěného monopolárního tranzistoru.

Za účelem stavby jednoduchých měřicích mikrofonů jsem v roce 2012 testoval cenově dostupné mikrofonní vložky od dodavatelů PUI Audio, Kingstate Electronics a Pro-Signal (Farnell), a dále Hitpoint (Monacor) v cenovém rozpětí od zhruba 20 do 100 Kč za kus. Orientační ceny v tabulce platí pro odběr 10 kusů (aktualizováno k datu 16. 7. 2015). Zkoušené typy elektretových mikrofonních vložek a jejich katalogové parametry jsou shrnuty v tabulce 15. Všechny jmenované kapsle jsou typu „omni“. Deset z nich má průměr 6 mm, pouze dva zkoušené typy mají v minulosti standardně používaný průměr 9,7 mm.

Tab. 15: Přehled základních parametrů testovaných elektretových mikrofonních vložek

Výrobce	Typové označení	Citlivost pro 1 kHz		Odstup šumu SNR / dB (ref. 1Pa)	Výstupní kontakty	Cena v Kč
		ref. 1V / Pa	mV / Pa			
PUI Audio	POM-2738 P-R	-38 ±3 dB	13 ±5	—	piny 1,9 mm	60
	POM-3042 P-R	-42 ±3 dB	8 ±3	—	piny 1,9 mm	58
	POM-3044 P-R	-44 ±3 dB	6 ±3	—	piny 1,9 mm	26
Kingstate Electronics	KECG 2742 PBL-A	-42 ±3 dB	8 ±3	>58dB	piny 1,9 mm	30
	KECG 2742 TBL-A	-42 ±3 dB	8 ±3	>60dB	pájení	41
	KEAG 45NPF-W (9,7 mm)	—	—	—	piny 2,5 mm	10
Pro-Signal	ABM - 703 RC	-40 ±3 dB	10 ±4	>60dB	piny 1,9 mm	44
	ABM - 704 RC	-40 ±3 dB	10 ±4	>60dB	pájení	48
	ABM - 705 RC	-42 ±3 dB	8 ±3	>60dB	pájení	32
	ABM - 706 RC	-41 ±3 dB	9 ±4	>60dB	pájení	29
	ABM - 707 RC (9,7 mm)	-41 ±3 dB	9 ±4	>60dB	piny 2,5 mm	27
Hitpoint	PMOF-6027PN-42UQ	-42 ±3 dB	8 ±3	>58dB	piny 1,9 mm	20

K základnímu testování součástek jsem používal školní měřicí systém LEYBOLD Didactic Sensor-CASSY 2, analogový milivoltmetr, osciloskop a vestavěné zvukové karty běžných notebooků a stolních PC (standardsy AC'97 a Intel High Definition Audio). Pro žákovské experimenty se podle dosavadních zkušeností uvedené parametry citlivosti senzorů a odstupu výstupního signálu při akustickém tlaku o velikosti 1 pascalu od šumu vestavěného J-FET předzesilovače jeví pro užití v jednoduchém měřicím systému jako dostatečné.

Při pájení vodičů měřicího kabelu ke kontaktům mikrofonní vložky je nutné postupovat velmi rychle (při 300°C do 2 s na každý spoj). Při delším pájení hrozí totiž zahřátí kapsle nad Curiovu teplotu elektretu, kdy dochází ke ztrátě permanentní polarizace. I při

nižších teplotách přitom může dojít ke snížení náboje elektretu. Ideálním řešením pro kusovou výrobu a samostatnou práci žáků jsou proto elektretové vložky s kontakty pro konektor 1,9 mm nebo 2,5 mm (tzv. „pin-type“). Zde je nutné dbát pouze na spolehlivé upevnění mikrofonní vložky v pouzdře měřicího mikrofonu, aby při používání nedošlo k rozpojení kontaktu. Jako měřicí kabel je možné použít kvalitní stíněný audiokabel s dostatečným průřezem vodičů nebo laboratorní koaxiální kabel ($50 \Omega/\text{m}$, $75 \Omega/\text{m}$). Při přímém připojení senzoru ke zvukové kartě by délka kabelu mezi mikrofonní vložkou a předzesilovačem zvukové karty neměla přesahovat zhruba 3 metry. Při nutnosti delšího vedení než 5 metrů je pak na zvážení použití přídavného mikrofonního předzesilovače v těsné blízkosti senzoru.

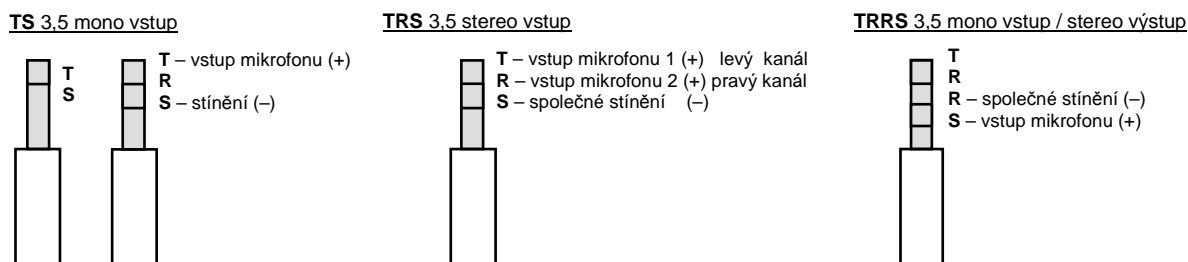
Samotnou mikrofonní vložku s kontakty naletovanými na měřicím kabelu je v experimentech obtížné upevnit a navíc je takový senzor velmi náchylný na mechanické poškození. Při hledání vhodného mechanicky odolného pouzdra měřicího mikrofonu s minimálním ovlivněním zvukového pole se osvědčila dvě řešení. Ideální je umístit senzor akustického tlaku do zhruba 20 až 30 cm dlouhé tenkostěnné trubičky z hliníku, mosazi či nerezové oceli s odpovídajícím vnitřním průměrem (6 mm, 10 mm) nebo ji na potřebný průměr navrtat. Snazší a levnější variantou je vestavba senzoru do rozměrově vyhovujícího kovového pouzdra některého z běžně dostupných audio konektorů, jako třeba sluchátkového konektoru nebo kabelové spojky typu Jack 3,5 mm (např. Rean NYS 226, NYS 231 a NYS 240) či obdobné kabelové spojky typu CINCH.



Obr. 31: Mikrofonní vložka vestavěná do hliníkové trubičky s měřicím kabelem a konektorem (vlevo) a vestavba mikrofonní vložky do pouzdra sluchátkového konektoru TRS 3,5 mm. Zdroj: vlastní

Přizpůsobení výstupní impedance kapacitního snímače tranzistorem J-FET vestavěným přímo v kapsli senzoru a přítomnost vhodného zdroje pro jeho napájení na straně zvukového rozhraní počítače umožňují snadné připojení elektretové mikrofonní vložky k mikrofonnímu předzesilovači integrovaných zvukových karet, mobilních telefonů i tabletů.

Je však nutné dbát na správné osazení kontaktů. Napájení J-FET tranzistoru v kapsli je řešeno jako takzvané fantomové napájení v podobě stejnosměrného napětí přítomného mezi oběma výstupními vodiči kapsle (viz obrázek 30). Od střídavého výstupního napětí je toto stejnosměrné napětí na vstupu zvukové karty odděleno vazebním kondenzátorem C ($1 \mu\text{F}$ až $22 \mu\text{F}$). Napájecí proud bývá pro případ nechtěného připojení sluchátek do mikrofonního vstupu nebo připojení dynamického mikrofonu omezen rezistorem R_L ($\text{k}\Omega$), aby nemohlo dojít ke spálení kmitací cívky.



Obr. 32: Osazení konektorů pro připojení externích mikrofonů k PC a mobilním zařízením. Zdroj: vlastní

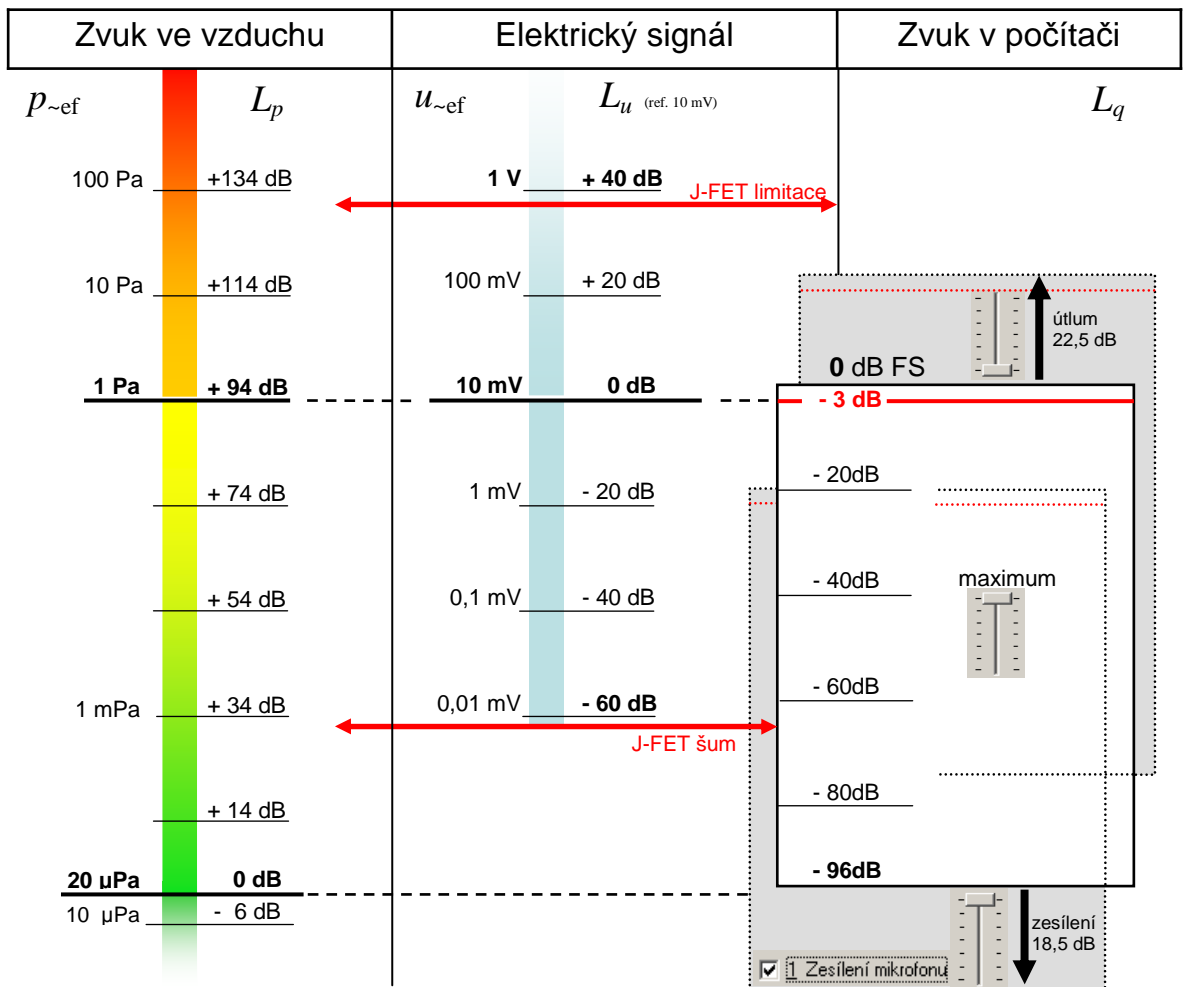
Starší vestavné zvukové karty mají pouze monofonní mikrofonní vstup pro dvoupólový konektory typu TS 3,5 mm (mono-Jack). Označení kontaktů vychází z anglického „Tip“, „Ring“ a „Sleve“, kde „T“ označuje špičku, „R“ prostřední kroužek a „S“ kontakt nejbližší pouzdru. Aktuálně vyráběné notebooky a stolní PC ale většinou mají již standardně stereofonní mikrofonní vstup pro 3-pólové konektory TRS 3,5 mm (stereo-Jack). Ke zvukové kartě se stereofonním vstupem je tak možné připojit současně dva snímače. Kontakty T a R mikrofonního TRS vstupu zvukové karty v tom případě nesou výstupní signál ze snímačů i fantomové napájecí napětí U_s . Na kontakt „S“ se připojuje společné stínění. U chytrých mobilních telefonů a tabletů je většinou k dispozici jediný společný konektor 3,5 mm jak pro jednokanálový mikrofonní vstup, tak současně i stereofonní sluchátkový výstup. Osazení 4 kontaktů zdířky typu TRRS 3,5 mm a z toho vycházející osazení konektoru externího mikrofonu není bohužel normováno a může se tak principiálně lišit přístroj od přístroje. Platí to ale zejména u starších typů mobilních telefonů.



Obr. 33: Chytrý mobilní telefon s připojeným externím měřicím mikrofonem. Zdroj: vlastní

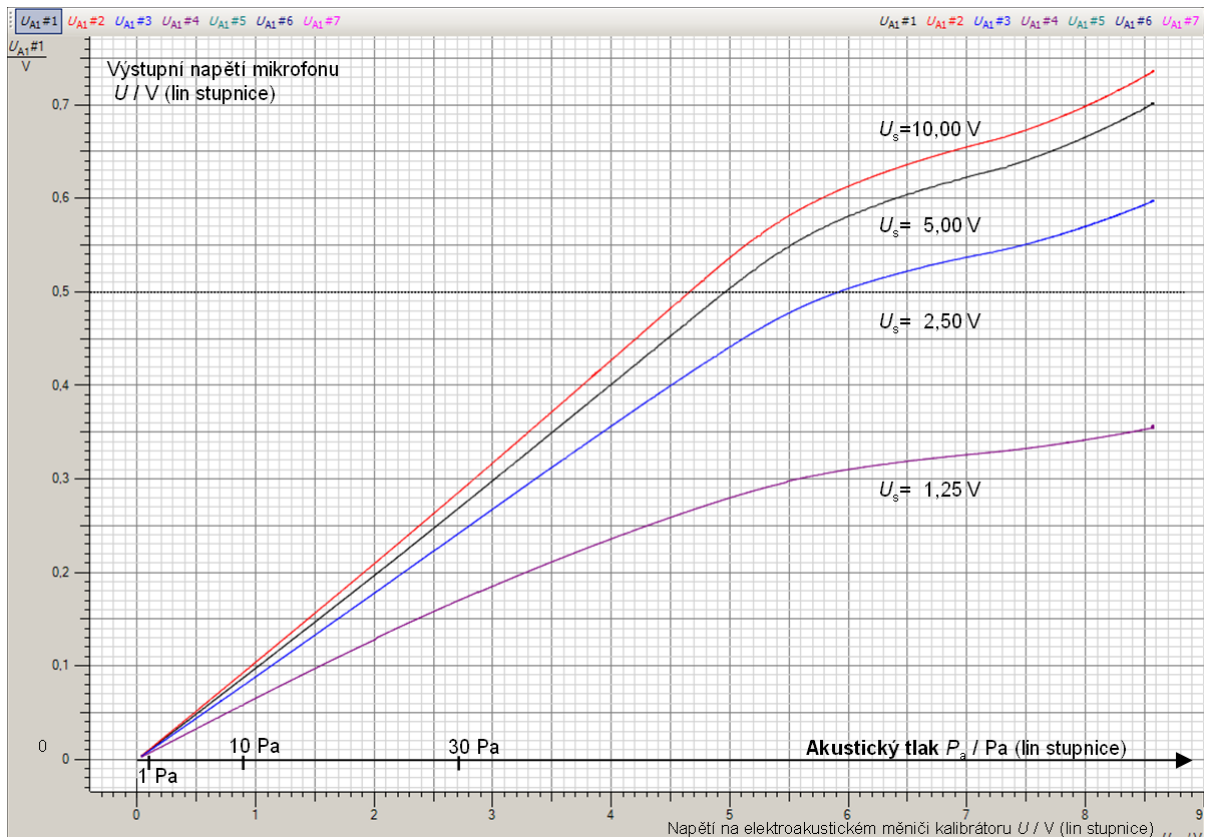
U zkoušených mobilních telefonů nejrozšířenějších značek bylo osazení následovné: Na druhý kroužek (R2) 4-pólového konektoru (T-R1-R2-S) se připojuje stínění a kontakt neblíže pouzdru konektoru běžně používaný pro stínění (poněkud nelogicky) nese mikrofonní signál. Toto rozložení kontaktů se potvrdilo i u zkoušených tabletů a notebooků s jediným společným konektorem. Tímto provedením řeší vývojáři mobilních zařízení kompatibilitu s běžnými stereofonními sluchátky a zároveň i odstínění mikrofonního signálu na kabelu sluchátek s integrovaným mikrofonem (tzv. headsetu) od signálu jdoucího do sluchátek. Doporučuji však každému zájemci o připojení externího mikrofonu, aby nejprve prostudoval návod konkrétního přístroje a pro jistotu ještě sám měřením ověřil osazení kontaktů na konektoru, než k přístroji připojí neoriginální příslušenství v podobě vlastnoručně vyrobeného externího mikrofonu.

Modelový příklad na obrázku 34 objasňuje souvislost mezi hladinami akustického tlaku, napětí a kvantizační úrovně pro připojení senzoru zvuku s citlivostí 10 mV/Pa ke zvukové kartě standardu AC`97 zde pro zjednodušení s citlivostí vstupu 10 mV_{ef} při plném rozkmitu signálu (full scale) odpovídající amplitudě napětí na vstupu $(10 \cdot \sqrt{2})$ mV. U většiny zvukových karet standardu AC`97 je citlivost mikrofonního vstupu regulovatelná v rozsahu od -22,5 dB (útlum) do +18,5 dB (zesílení). Ze schématu na obrázku 27 je patrné, že dynamický rozsah digitálního záznamu může být zhruba 85 dB. Spodní hranice rozsahu je dána šumem použitého tranzistoru J-FET v kapsli senzoru a při dané citlivosti senzoru odpovídá akustickému tlaku zhruba 33 až 35 dB. Limitace výstupního střídavého napětí tranzistoru nastává při hodnotách napětí odpovídajících akustickému tlaku typicky mezi 120 a 130 dB. V přenosové charakteristice skutečné mikrofonní vložky na obrázcích 35 a 36 je vidět, že k limitaci zde při napájení 2,5 V začíná docházet zhruba nad 128 dB. Při zařazení maximálního útlumu bychom v modelovém příkladu ovšem zvukovou kartou mohli bez ořezu zaznamenat harmonický průběh s největší možnou amplitudou akustického tlaku pouze 119,5 dB, respektive efektivní hodnotou 116,5 dB. Pro snímání a měření vysokých hodnot akustického tlaku je tak výhodnější použít mikrofonní vložku s nízkou citlivostí, zatímco pro běžné hodnoty akustického tlaku do 110 dB je vždy snahou použít senzor s co největší možnou citlivostí a odstupem výstupního signálu při akustickém tlaku 1 Pa od šumu J-FETu.

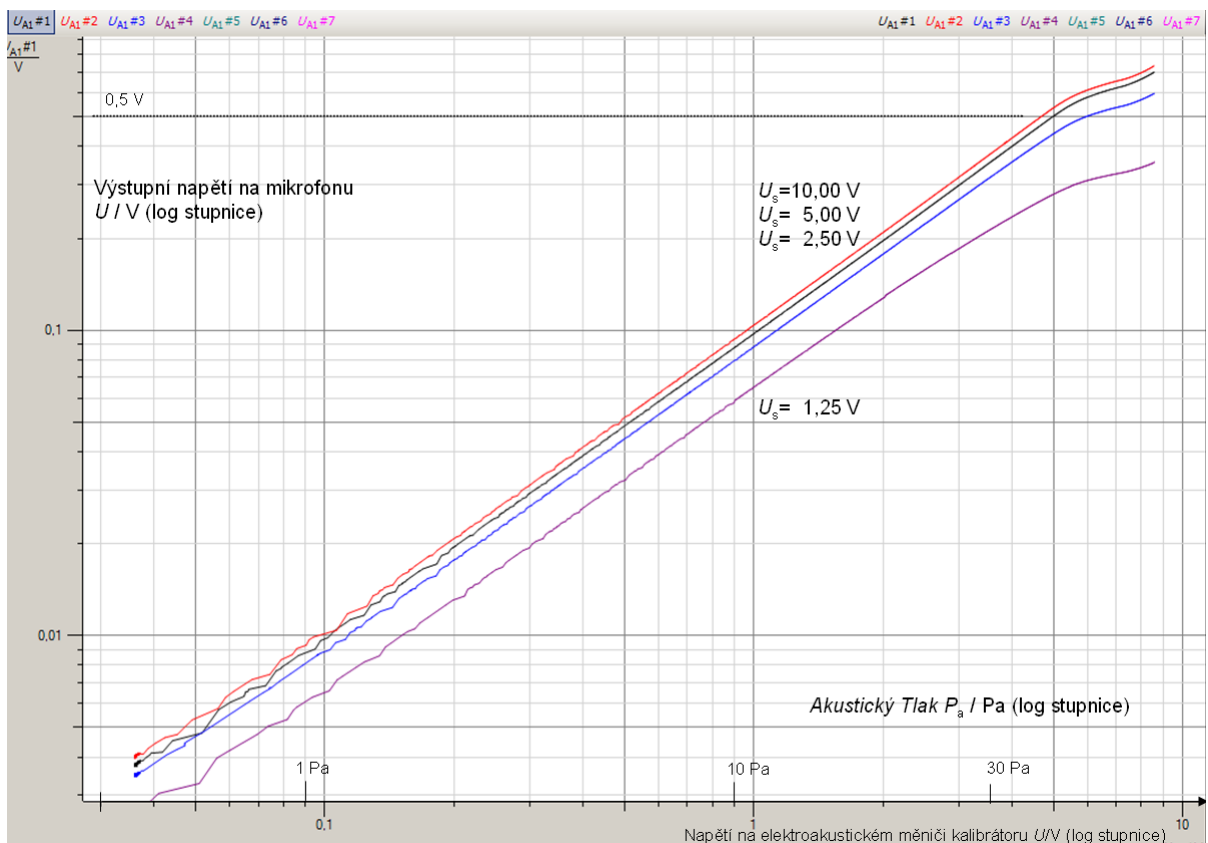


Obr. 34: Schéma vzájemného vztahu hladin akustického tlaku, hladin elektrického napětí a hladin relativního vybuzení A/D-převodníku zvukové karty pro zjednodušený modelový příklad. Zdroj: vlastní

Při měření parametrů a kalibraci ECM-senzorů je nutné připojit na výstup senzoru milivoltmetr, osciloskop nebo počítačem řízený laboratorní měřicí systém. To je možné přes jednoduchý adaptér s horní propustí pro oddělení stejnosměrného napájecího napětí od výstupního signálu. (schéma zapojení viz obrázek 30 dole). Na osciloskopu je pak možné odečítat špičkové hodnoty napětí, na analogovém milivoltmetru efektivní hodnoty napětí mikrofonního výstupu. Digitální voltmetry nejsou pro tento účel vhodnou volbou, protože řada z těch levnějších neměří přímo efektivní hodnotu, ale určuje ji na základě jiného aproximativního vztahu. Pro frekvenci střídavého napětí v elektrické síti tento postup dává shodný výsledek s výpočtem efektivní hodnoty. Pro jiné frekvence, jako v našem případě pro frekvence v pásmu od desítek Hz do řádově desítek kHz, však digitální voltmetr zobrazuje na displeji nespolehlivé hodnoty. Průběh přenosového faktoru na obrázcích 35 a 36 byl zaznamenán měřicím rozhraním LD Sensor CASSY 2 snímajícím současně efektivní hodnotu napětí na výstupu mikrofonní vložky (svislá osa) a na vstupu použitého testovacího zdroje zvuku (vodorovná osa, viz dále) buzeného signálovým generátorem LEYBOLD LD 522 639.



Obr. 35: Naměřené průběhy přenosové funkce senzoru KECG2742PBL-A pro různá napájecí napětí U_s v zobrazení s lineárními osami. Zdroj: vlastní. Vytvořeno v CassyLab2.



Obr. 36: Naměřené průběhy přenosové funkce senzoru KECG2742PBL-A pro různá napájecí napětí U_s v zobrazení s logaritmickými osami. Zdroj: vlastní. Vytvořeno v CassyLab2.

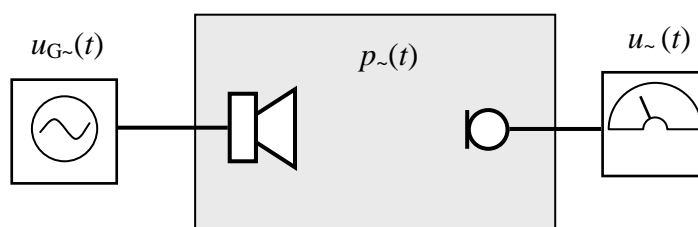
3.3.4 KALIBRACE SENZORU

Citlivost elektretových mikrofonních vložek je výrobcí udávána s přesností ± 3 dB. Pokud bychom vycházeli z údaje o citlivosti uváděné výrobcem, byl by výsledek orientačních měření hladiny akustického tlaku zatížen značnou chybou o velikosti jednotek dB. Odchylna citlivosti reálné součástky od udávané hodnoty citlivosti hodnoty má navíc pravděpodobnostní charakter a tak i pokud například 90% vyrobených součástek spadá do katalogové tolerance, nevypovídá to mnoho o citlivosti jedné konkrétní součástky. Termické vlivy při letování kontaktů kapsle nebo její mechanická deformace při montáži mohou znamenat další snížení citlivosti o jednotky až desítky dB. Nelze vyloučit ani výrobní vadu konkrétní součástky. V průběhu používání pak může snadno dojít k mechanickému poškození senzoru například vystavením vysokému akustickému tlaku, v důsledku nárazu nebo pádu. I při pečlivém zacházení a uskladnění elektretové mikrofonní vložky přitom dochází k pozvolnému snižování citlivosti vlivem ztráty náboje elektretu (zhruba 1 dB za 10 let). Proto je nutné každý senzor akustického tlaku před měřením kalibrovat. To se týká nejen senzoru samotného, ale celého měřicího řetězce včetně předzesilovačů zvukové karty a zdroje napájecího napětí pro předzesilovač (J-FET) vestavěný v mikrofonní vložce. Při použití různých zvukových karet, mobilních telefonů nebo tabletů se hodnoty citlivosti vstupů a velikost napájecího napětí pro J-FET mohou lišit o desítky procent. Požadavek na kalibraci se ale týká zejména mikrofonního předzesilovače v použitém přístroji, kde kvůli velkému rozsahu možných nastavení zesílení a útlumu nebo případně i nechtěnému sepnutí funkce automatického nastavení citlivosti hrozí systematická chyba měření až desítky dB.

Pro kalibraci senzoru, respektive celého měřicího systému, je nutné použít dlouhodobě stabilní normál akustického tlaku. Měřit akustický tlak zkalibrovaným měřicím systémem potom znamená srovnávat neznámý akustický tlak s tímto výchozím normálem. Obecně existují tři základní postupy kalibrace senzorů akustického tlaku: 1) Srovnání s přesně ocejchovaným mikrofonem ve zvukovém poli referenčního zdroje, 2) kalibrace pomocí ocejchovaného referenčního zdroje a 3) reciproká kalibrace, kdy kalibrovaný mikrofon slouží jako zdroj zvuku snímáný přesně ocejchovaným mikrofonem. Všechny metody kalibrace kladou vysoké požadavky na zvukové pole. To musí v případě srovnávacího měření splňovat buď parametry volného pole, které je přibližně realizovatelné v bezodrazové místnosti, nebo naopak parametry pro pole difúzní vyžadující speciální dozvukovou místnost. Běžná školní třída nebo laboratoř fyziky nespĺňují požadavky ani na jednu z obou měřicích místností.

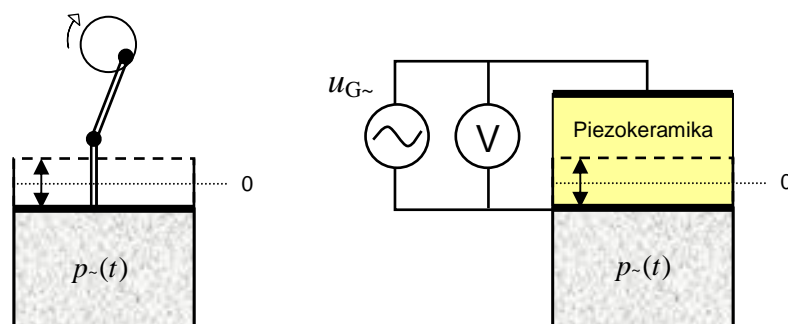
Ve škole nebo v domácích podmínkách tak máme dvě možnosti jak vlastnoručně sestavený měřicí systém s neznámými parametry alespoň hrubě ocejchovat. V přiblížení se

požadavkům na volné zvukové pole je možné jako referenční zdroj zvuku použít širokopásmový reproduktor, pokud se při snímání jím vyvolaných tlakových změn nachází senzor v blízkém zvukovém poli cca. 30 až 50 cm od membrány, kde převládá aktivní složka přímého zvuku reproduktoru nad reaktivní dozvukovou složkou místnosti. V takových podmínkách lze provést na pevně zvolené pozici srovnání vlastnoručně vyrobeného měřicího přístroje s ocejchovaným zvukoměrem nebo měřicím mikrofonom se známou citlivostí. Jako měřicí signál se typicky používá čistý tón s frekvencí 1 kHz. Vícepásmové reprosoustavy s několika měniči nejsou pro tento způsob kalibrace příliš vhodné, protože se v oblasti poblíž 1 kHz většinou nachází dělicí frekvence frekvenční výhybky a zvuk je tak vyzařován jak výškovým, tak hloubkovým reproduktorem, což má za následek vznik součtového zvukového pole s potenciálně silně prostorově závislým rozložením akustického tlaku ve zvukovém poli.



Obr. 37: Blokové schéma základního principu kalibrace senzoru zvuku. Zdroj: vlastní.

Druhou možností je provést kalibraci senzoru akustického tlaku ve střídavém tlakovém poli uzavřené komory s rozměry menšími než je pro danou frekvenci vlnová délka zvuku ve vzduchu. Tohoto principu využívají ruční zvukové kalibrátory třídy 2 podle normy IEC 60942 (reference 114 dB na 1 kHz) nebo spolehlivější laboratorní mechanické pistofony. Základním problémem kalibrace jednoduchých měřicích mikrofonů je však nutnost zakázkové výroby adaptéru s těsněními pro rozměry zvoleného pouzdra senzoru, které svým průměrem a tvarem neodpovídá rozměrovým normám pro profesionální měřicí mikrofony. Celý jednoduchý kalibrátor, nebo alespoň referenční zdroj zvuku pro základní testování senzorů, je možné vyrobit například z malého piezoelektrického měniče. Referenční střídavý tlak v uzavřené komoře je po porovnání s ocejchovaným kalibrátorem možné následně vztáhnout na napěťový normál v podobě snáže dostupného ocejchovaného střídavého voltmetru. Takový vlastnoručně vyrobený jednoduchý kalibrátor je pak možné používat k pravidelné kontrole funkce a kalibraci snímačů akustického tlaku v běžných podmínkách výuky fyziky na střední škole. V praxi je vhodné na začátku a na konci každého měření vždy zaznamenat referenční akustický tlak z kalibrátoru, což odpovídá kalibraci celého měřicího řetězce před a po měření. Zjištěný rozdíl mezi dvěma následujícími kalibracemi měřicího systému okamžitě odhalí zda není měření zatíženo hrubou chybou či případnou poruchou.



Obr. 38: Schématické znázornění fyzikálního principu funkce tlakové komory mechanického pistofonu a tlakové komory buzené kmitající piezodestíčkou napájenou frekvenčním generátorem. Zdroj: vlastní.

Součástí měřicí sady pro žákovské experimenty by proto měl být jednoduchý kalibrátor měřících mikrofonů s tlakovou komorou jako dlouhodobě stabilní reference pro měření velikosti akustického tlaku i pro pravidelnou kontrolu funkčnosti senzorů, prováděnou ideálně před a po každém měření. V prototypch použité měniče s piezokeramickou destičkou měnící vlivem střídavého napětí svou tloušťku se v uzavřené komoře kalibrátoru chovají jako píst ve válci mechanického pistofonu (viz obrázek 38) a tak za předpokladu, že komprese, resp. expanze v tlakové komoře je adiabatická, lze na základě linearizované adiabatické rovnice (viz příloha C2) uvažovat i lineární závislost akustického tlaku v komoře na střídavém napětí na piezoelektrickém měniči. To je pro akustické frekvence od cca. 30 Hz výše splněno. Zdrojem harmonického elektrického signálu pro piezoelektrický měnič může být buď laboratorní výkonový tónový generátor nebo softwarový generátor harmonických signálů zvukového editoru ve spojení D/A převodníkem a sluchátkovým zesilovačem zvukové karty, u něž je hodnota výstupního napětí, respektive napětí na vstupu kalibrátoru, sledována cejchovaným osciloskopem (amplituda) nebo analogovým voltmetrem (efektivní hodnota). Vzhledem k mnou použitým piezokeramickým měničům Kiocera KBS-20DB-4P-0 a Murata PKM34EW se jedná spíše o experimentální kalibraci, kterou je však hodnotu akustického tlaku v komoře při pevně dané frekvenci harmonického signálu 1 kHz možné na základě porovnání s úředně ocejchovaným kalibrátorem vztáhnout na známý tlakový normál. Vyšší spolehlivosti kalibrace senzoru pro orientační měření hladin akustického tlaku je pak možné dosáhnout kombinací metody kalibrace v tlakové komoře s kalibrací v přibližně volném poli.

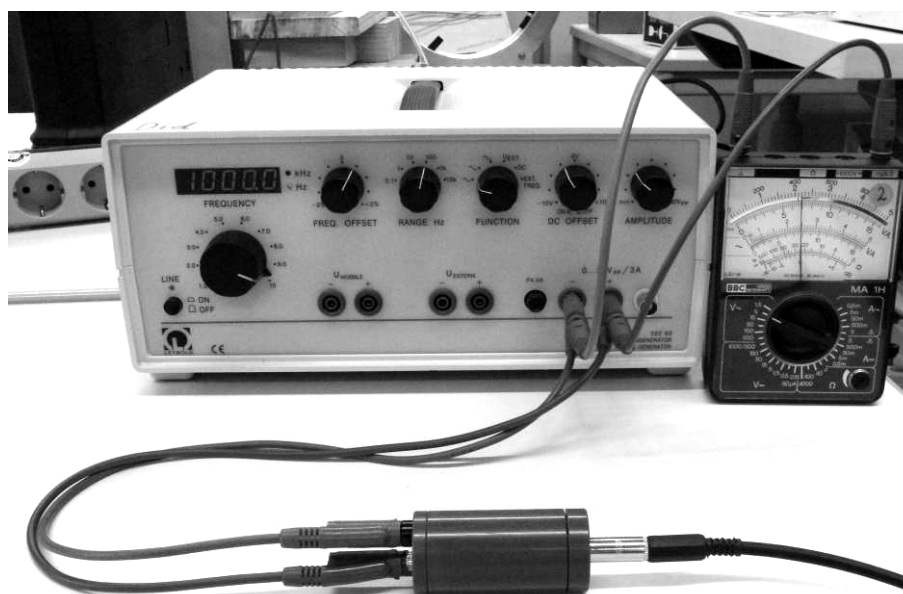


Obr. 39: Prototyp jednoduchého kalibrátoru měřících mikrofonů s tlakovou komorou buzenou piezodestíčkou Kiocera KBS-20DB-4P-0 a adaptérem pro testování ECM mikrofonních vložek. Zdroj: vlastní.

Na obrázku 40 je v popředí vidět tlaková komora jednoho z prototypů jednoduchého kalibrátoru (šedý válec dole) s vestavěným piezoelektrickým elektro-akustickým měničem Kiocera KBS-20DB-4P-0 buzeným signálovým generátorem v pozadí (LEYBOLD Didactic LD 522 639). Toto pokusné kalibrační zařízení bylo ocejchováno srovnáním s mechanickým laboratorním pistofonem Brüel&Kjaer Typ 4220 s konstantním zdvihem pístu (zapůjčil Michael Günther, LSE FAU Erlangen, březen 2012) vytvářejícím referenční střídavý tlak v komoře 31,7 Pa, což odpovídá hladině efektivní hodnoty střídavé složky tlaku 124 dB vztažených na referenční hodnotu 20 μ Pa. Hodnoty napětí odpovídající efektivním hodnotám střídavého tlaku 1 Pa (94 dB SPL) a 10 Pa (114 dB SPL) dosažitelné po připojení kalibrátoru ke sluchátkovému výstupu zvukové karty, byly určeny lineární interpolací. Jak dokládají měřené průběhy přenosového faktoru mezi střídavým tlakem v uzavřené komoře buzené piezoelektrickým měničem Murata PKM34EW a výstupním napětím senzoru na obrázcích 35 a 36, je průběh přenosového faktoru piezoelektrických aktorů v požadovaném rozsahu výchylek kmitání piezokeramické destičky ideálnímu lineárnímu průběhu velmi blízký.

Tab. 16: Příklady parametrů vybraných prototypů jednoduchých kalibrátorů

Podmínky v tlakové komoře		Napětí na vstupu piezoměniče $U_{G\sim ef}$	
L_p	$p_{\sim ef}$	Murata PKM34EW (přímo pouzdro měniče)	Kiocera KBS-20DB-4P-0 v tlakové komoře cca. 3 cm ³
124 dB	31,7 Pa	2,90 V _{~ef}	3,52 V _{~ef}
114 dB	10 Pa	0,915 V _{~ef}	1,11 V _{~ef}
94 dB	1 Pa	0,0915 V _{~ef}	0,111 V _{~ef}



Obr. 40: Kalibrace měřicího mikrofону v jednom z prototypů tlakové komory buzené piezoaktorem.
Zdroj: vlastní.

3.4 Laboratorní úloha měření rychlosti zvuku ve vzduchu

Rychlost šíření zvukového vlnění je v akustice jedním ze základních parametrů látkového prostředí. Následující kapitola je proto věnována fyzikálně-didaktickému rozboru několika metod měření rychlosti zvuku vhodných pro zařazení do výuky na středním stupni vzdělávání jako laboratorní úloha fyzikálního praktika. Obecně existují dva druhy metod experimentálního určení rychlosti zvukového vlnění. Nejjednodušší metoda vychází z měření času, za který urazí vlnoplocha ve volném prostoru určitou vzdálenost. Další metody zkoumají vlnové jevy a určují rychlost zvuku ze vztahu mezi frekvencí kmitání a vlnovou délkou jím vyvolaného vlnění látkového prostředí. Příkladem druhé kategorie metod měření rychlosti zvuku je i laboratorní úloha uváděná ve středoškolských učebnicích [35, 36] a laboratorní úloha fyzikálního praktika pro přípravu učitelů fyziky [68] na Západočeské univerzitě v Plzni, z nichž jsem při návrhu experimentů vycházel.

Všechny zde popsané metody měření rychlosti zvuku byly optimalizovány pro řízení a vyhodnocování experimentu počítačem. Jsou vhodné jak jako názorné demonstrační experimenty pro podporu frontální výuky, tak zejména jako samostatně prováděné žákovské experimenty. Vybavení potřebné k realizaci experimentů zahrnuje počítač se zvukovou kartou, reproduktor se zesilovačem, jeden až dva měřicí mikrofony, mikrofonní stojany nebo laboratorní stativový materiál a signálovou kabeláž. Na počítači samozřejmě musí být instalován příslušný software pro záznam a zpracování zvukového signálu (např. Audacity nebo Adobe Audition). Dále je potřeba teploměr, navíjecí metr nebo měřicí pásmo s olovníci, případně laserový měřič délek.

3.4.1 MĚŘENÍ RYCHLOSTI ZVUKU VE VZDUCHU METODOU VYHODNOCOVÁNÍ ČASOVÉHO ZPOŽDĚNÍ NA ZNÁMÉ DRÁZE

První pokusy s měřením rychlosti zvuku ve vzduchu prováděl už začátkem 17. století Marin Mersenne (1588–1648). Základní metoda určení rychlosti zvuku vycházela z měření časového zpoždění mezi viděným zábleskem výstřelu ze vzdáleného kanónu a zvukem výstřelu slyšeným v určité vzdálenosti. Na základě tohoto experimentu došel Mersenne k hodnotě rychlosti zvuku $448 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Čas přitom určoval nejprve pomocí počítání úderů svého srdce, později pomocí kyvadla. Jeho současník Pierre Petrus Gassendi (1592-1655) při experimentech se sledováním a poslechem vzdáleného výstřelu došel k podobně vysoké hodnotě přes 470 m/s. Druhá Mersennova metoda vycházela z měření vzdálenosti

experimentátora od rozměrné zdi, zatímco hlasitě volal slovní spojení určitého časového trvání, a hledal přitom vzdálenost od zdi, kde jím slyšená ozvěna naváže na vyslovená slova bez slyšitelné pauzy. Časové trvání slovních spojení měřil opět pomocí kyvadla. Touto metodou Mersenne došel k pozoruhodně dobrému výsledku $316 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

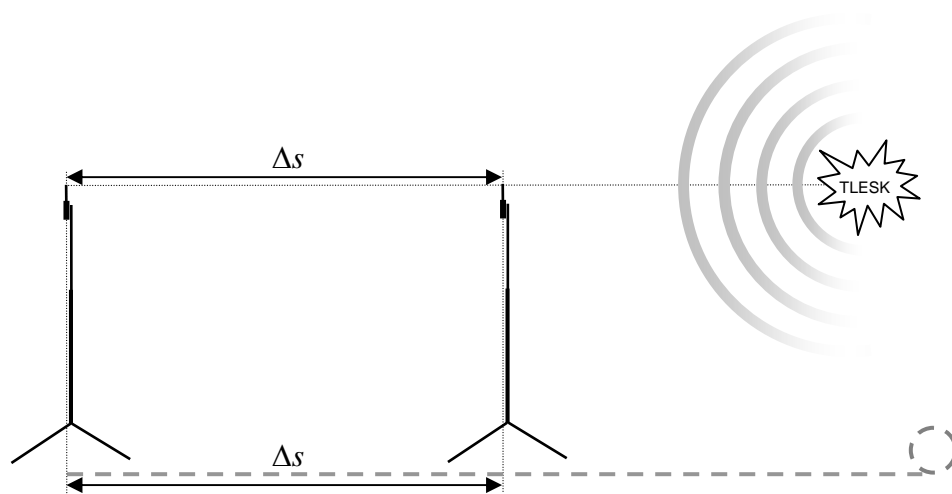
Na základě experimentů řady dalších vědců byla hodnota rychlosti zvuku ve vzduchu soustavně zpřesňována až na dnes známou hodnotu. V roce 1656 Giovanni Alfonso Borelli (1608–1679) a Vincenzo Viviani (1622–1703) došli při sledování a poslechu vzdáleného výstřelu snížením systematických chyb měření času a vzdálenosti k výsledku zhruba $350 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Později Giovanni Ludovico Bianconi (1717–1781) stejným způsobem prokázal závislost rychlosti šíření zvuku v prostředí na termodynamické teplotě vzduchu (1740) měřeními doby, za kterou zvuk urazí určitou dráhu v zimě a v létě. V 19. století pak Henri Regnault (1810–1878) za účelem vyloučení vlivu pozorovatele měřicího časové zpoždění sestrojil automatickou mechanicko-elektrickou měřicí aparaturu. Výstřel současně sepnul elektrický obvod. V určité vzdálenosti umístěný mechanický spínač tvořený membránou s kontaktem na dopad čela tlakové vlny vyvolané výstřelem zareagoval svým prohnutím, čímž elektrický obvod přerušil. Časový průběh experimentu přitom zaznamenával hodinovým strojkem poháněný mechanický zapisovač na válec otáčející se známou konstantní rychlostí.

Měření rychlosti zvuku ve školních podmínkách v zásadě vychází z těchto historických experimentů. Pouze při jejich realizaci využívá moderní technické prostředky v podobě zvukového rozhraní počítače s připojenými měřicími mikrofony. Při snímání jednoho zdroje zvuku dvěma od zdroje zvuku různě vzdálenými snímači akustického tlaku je každý z mikrofonních signálů zaznamenáván s jiným časovým posunem odpovídajícím právě vzdálenosti daného mikrofону od zdroje zvuku. Analýzou časového průběhu zaznamenaných mikrofonních signálů je pro impulsy a prudké náběhy možné snadno určit časový posun Δt mezi oběma stopami záznamu a známe-li polohu zdroje zvuku a polohu membrán mikrofónů v prostoru, lze z těchto údajů vypočítat velikost rychlosti šíření zvuku vlněním vzduchu.

Z hlediska geometrie úlohy je nejjednodušší umístění obou mikrofónů a zdroje zvuku na jedné přímce v uspořádání podle obrázku 41. Pak naměřená vzdálenost mikrofónů odpovídá přímo dráhovému rozdílu Δs , který musí urazit čelo zvukové vlny za hledaný čas Δt . Rychlost zvuku ve vzduchu c pro rozdíl vzdálenosti mikrofónů od zdroje Δs a odpovídající časový posun Δt lze pak vypočítat ze vztahu

$$c = \frac{\Delta s}{\Delta t}. \quad (4.1)$$

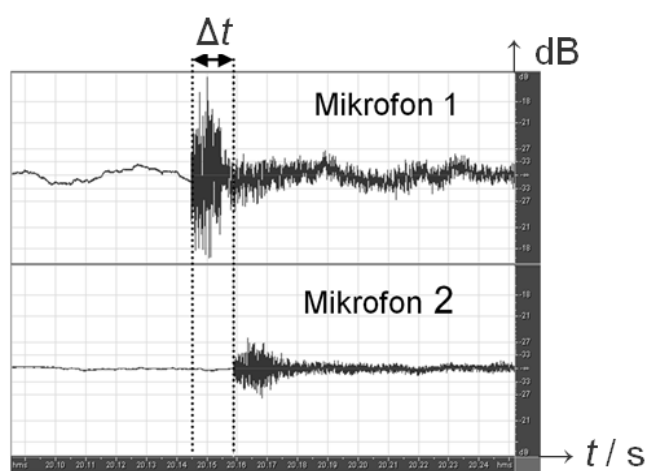
Tato metoda určení rychlosti zvuku v podstatě vychází z jednoduché analogie šíření zvukového vlnění s kinematikou translačního pohybu, kdy se čelní vlnoplocha tlakové vlny impulsu při omezení modelu šíření zvukového vlnění na jednu dimenzi pohybuje rovnoměrným přímočarým pohybem rychlostí c podobně, jako se v mechanickém modelu pohybuje po přímkové trajektorii hmotný bod. Díky tomu je to metoda velmi názorná a pro žáky snadno pochopitelná. Je však třeba žákům důkladně vysvětlit základní mechanický princip šíření zvukového vlnění (viz kapitola 3.1), protože užitím analogie šíření malé výseče vlnoplochy s rovnoměrným přímočarým pohybem hmotného bodu může u žáků snadno dojít k nechtěnému posílení představy o korpuskulárním charakteru zvuku v podobě šíření fiktivních zvukových částic nebo molekul vzduchu od zdroje zvuku k mikrofonu (viz kapitola o vstupních žákovských představách).



Obr. 41: Schéma umístění mikrofonů a zdroje zvuku při měření rychlosti zvuku ve vzduchu. Zdroj: vlastní

Optimální je umístění snímačů ve stejné výšce se zdrojem zvuku a to nejlépe ve výšce očí stojící osoby (1,5 až 1,8 m nad zemí). Stejně tak je možné mikrofony umístit těsně nad podlahu. V prostorových podmínkách školní třídy nebo chodby tak jsou například s měřicími kabely délky 3 m při umístění notebooku se zvukovou kartou lehce mimo spojnici mikrofonů realizovatelné dráhové rozdíly Δs 2 až 5 metrů. Přímou na spojnici mezi oběma mikrofony ani mezi zdrojem zvuku a bližším z mikrofonů se však nesmí nacházet žádná překážka. Pro vzdálenost mikrofonních vložek větší než 1 metr je při jejich stejné výšce nad zemí možné tuto vzdálenost určit změřením vzdálenosti jejich svislých průmětů na podlahu realizovaných olovnicí. Nejistota v určení vzdálenosti vstupních otvorů měřicích mikrofonů pomocí měřicího pásma nataženého na podlaze pod mikrofony a olovnice je na rovné podlaze do ± 5 mm. Na 5 metrové dráze to znamená relativní nejistotu v určení vzdálenosti 0,1%. Zpřesnění měření vzdálenosti lze dosáhnout použitím laserového měřiče délek s přesností určení vzdálenosti lepší než ± 1 mm.

Jako měřicí impuls se osvědčilo silné tlesknutí provedené na spojnici obou mikrofonů co nejdále od bližšího mikrofonu. Pro mikrofony umístěné přesně ve výšce očí měřicí osoby poskytuje dobrou kontrolu umístění zdroje zvuku na jedné přímce s oběma mikrofony pohled na měřicí mikrofony mezi dlaněmi připravenými k tlesknutí. Je-li z tohoto pohledu vzdálenější senzor těsně v zákrytu za bližším mikrofonem, je podmínka pro jednodimenzionální zjednodušení úlohy dostatečně dobře splněna. V případě umístění mikrofonů na podlaze, je nutné tlesknout těsně nad podlahou. Vlivem odchylky od uspořádání obou mikrofonů na jedné přímce se zdrojem zvuku, kdy skutečný dráhový rozdíl je pro vlnoplochu menší než vzdálenost mezi mikrofonními membránami, potenciálně vzniká systematická chyba v řádu milimetrů až jednotek centimetru.



Obr. 42: Časový průběh zaznamenaných mikrofonních signálů. Nahoře bližší mikrofon (levý kanál stereofonní stopy), dole vzdálenější mikrofon (pravý kanál). Zdroj: vlastní

Měření časového zpoždění spočívá v záznamu časového průběhu akustického tlaku registrovaného oběma mikrofony s vysokou vzorkovací frekvencí 48 000, 96 000 nebo 192 000 vzorků za sekundu. Osvědčilo se kontinuálně zaznamenávat alespoň desetkrát za sebou opakované tlesknutí vždy s odstupem zhruba 2 až 3 sekund. V grafu časového průběhu akustického tlaku (obrázek 42) je pak vždy dobře patrný časový okamžik, kdy čelo zvukové vlny vyvolalo výchylku na bližším mikrofonu a kdy na mikrofonu vzdálenějším. Z rozdílů těchto časů lze snadno určit časový rozdíl Δt jako střední hodnotu časových rozdílů ideálně alespoň pro 10 tlesknutí. V záznamech časového průběhu akustického tlaku oběma mikrofony odpovídá prudký náběh „přímé cestě“ šíření zvuku. Až poté k mikrofonu dorazí mnohočetné zpožděné odrazy od podlahy, stropu a stěn místnosti. Ukázky zaznamenaných zvukových stop spolu s tabulkami vyhodnocení měření jsou uloženy na příloženém CD-ROM v adresáři „K4 Laboratorní úloha“. Pro bližší představu o principu vyhodnocení měření slouží následující tabulka:

Tab. 17: Teoretické hodnoty rychlosti zvuku podle vzorce C2.14 a časové zpoždění mikrofonních záznamů na jeden metr dráhy v milisekundách a počtu vzorků při vzorkování $f_s = 48 \text{ kHz}$ ($T_s \approx 20,8 \cdot 10^{-6} \text{ s}$).

$\vartheta / ^\circ\text{C}$	$c / \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$\Delta t_{1\text{m}} / 10^{-3}\cdot\text{s}$	počet vzorků
+40	354,9	2,817	135
+35	351,9	2,840	136
+30	349,0	2,864	137
+25	346,1	2,888	139
+20	343,2	2,912	140
+15	340,3	2,937	141
+10	337,3	2,963	142
+5	334,3	2,990	144
0	331,3	3,017	145
-5	328,2	3,044	146
-10	325,1	3,073	148
-15	322,0	3,103	149
-20	318,8	3,134	150
-25	315,7	3,165	152

Časové rozlišení záznamu a tudíž i statistická nejistota určení času z grafu časového průběhu kmitání je při vzorkovacím taktu 48 kHz 20,83 μs , což na dráze $\Delta s = 1$ metr odpovídá za normálních podmínek časovému zpoždění zhruba 140 vzorků, na $\Delta s = 5$ metrů zhruba 700 vzorků. Teoretická relativní nejistota určení časového zpoždění na pětimetrové dráze z jednoho tlesknutí je tedy menší než 0,15%. Výslednou střední hodnotu časového zpoždění lze dále zpřesnit zvýšením počtu opakování tlesknutí. Tlesknutím vytvořené měřicí pulsy jsou totiž časově nezávislé na vzorkovacím kmitočtu a jejich distribuce v časovém intervalu trvání jednoho vzorku proto statisticky odpovídá normálnímu rozložení. Při vyhodnocení časového zpoždění z deseti a více následujících tlesknutí se tak nejistota v určení času ještě až o řád sníží. Hlavní zdroj nejistoty a možné systematické chyby měření rychlosti zvuku tak představuje nejistota určení vzdálenosti mezi vstupními otvory tlakových senzorů. Je však možné celé měření opakovat pro několik různých vzdáleností mezi snímači, například vždy s 5 tlesknutími pro 10 různých vzdáleností, a snížit tak celkovou relativní nejistotu určení rychlosti zvuku až na méně než 0,03%, respektive absolutní nejistotu menší než $\pm 0,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

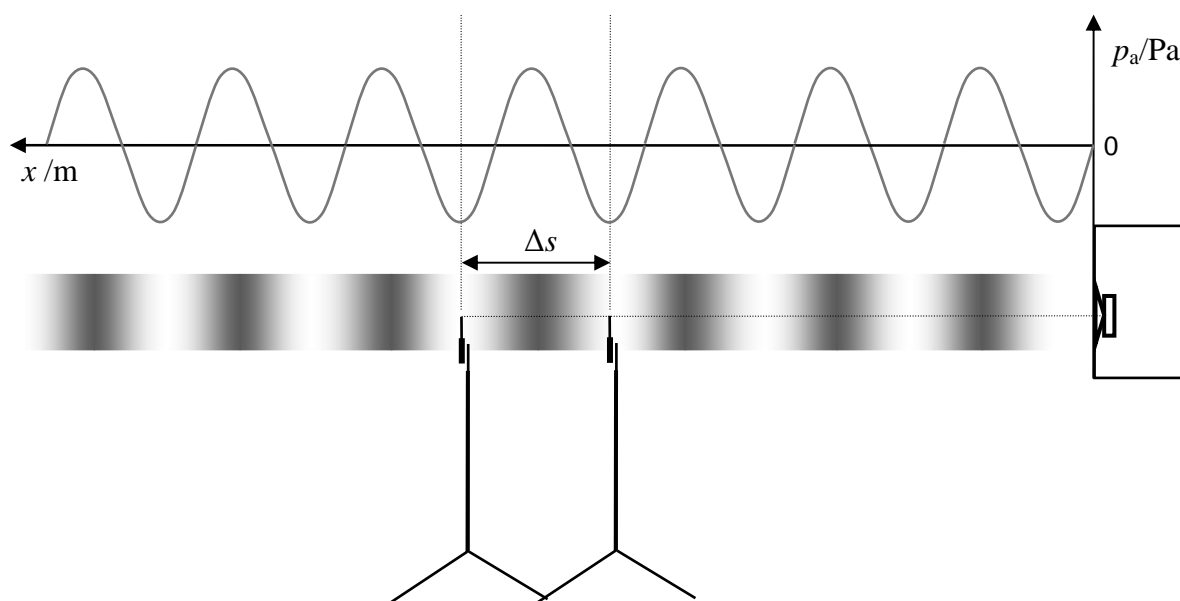
Některé typy vestavěných zvukových rozhraní počítačů zpracovávají zvukový signál z obou vstupních kanálů prokládaně jediným A/D převodníkem. To způsobuje trvalý časový posun mezi oběma kanály stereofonního záznamu v délce trvání jednoho vzorku. Dráha, kterou vlnění urazí za dobu trvání jednoho vzorku (cca. $20 \cdot 10^{-6} \text{ s}$ pro $f_s = 48 \text{ Khz}$), přitom odpovídá zhruba 7 mm. Doporučuji proto ověřit synchronizaci obou kanálů nahráním deseti tlesknutí s mikrofony umístěnými těsně vedle sebe ve stejné vzdálenosti od zdroje zvuku a podle potřeby zjištěnou systematickou chybu měření kompenzovat buď výpočetně, nebo lépe opakováním měření se záměnou pořadí mikrofonů přesunutím zdroje zvuku na opačnou stranu prodloužení spojnice obou mikrofonů.

Alternativou synchronního snímání tranzientních zvuků dvojicí mikrofonů připojených ke stereofonnímu mikrofonnímu vstupu počítače je realizace měření rychlosti zvuku dvěma smartphony nebo tablety se zabudovaným mikrofonem nebo s měřicím mikrofonem zapojeným do jejich monofonního mikrofonního vstupu (viz kapitola 3.3). Díky absenci spojovacích vodičů je pak možné realizovat měření rychlosti zvuku ve venkovním prostoru na dráze v řádu desítek metrů. Na začátku měření je ovšem nezbytně nutné provést synchronizaci obou odděleně zaznamenávaných měřicích stop. To lze provést záznamem synchronizační sekvence pulsů mikrofony obou nezávislých měřicích zařízení umístěnými ve stejné vzdálenosti od zdroje zvuku. Stačí nejprve nahrát 10 tlesknutí oběma mikrofony na bližší pozici, poté se stále spuštěným záznamem přesunout druhé měřicí zařízení na vzdálenější pozici od zdroje a provést měření časového zpoždění mezi oběma pozicemi pro dalších 10 tlesknutí. V případě snímání zvuku na velké vzdálenosti ve volném prostoru (např. 100 m) je možné jako měřicí impuls použít například výstřel ze startovací pistole na prodloužené spojnici mikrofonů obou záznamových zařízení. Při zpracování zaznamenaných stop z mobilních zařízení ve zvukovém editoru na počítači je pak ideální synchronizovat obě stopy vystřižením záznamu před synchronizační sekvencí s přesností na jeden vzorek.

Obdobným způsobem jako při měření časového zpoždění dvěma mikrofony lze pomocí jediného mikrofonu bez nutnosti synchronizace zaznamenat a následně v počítači vyhodnotit zpoždění mezi přímým a odraženým zvukem od rozměrné překážky, jako je například stěna budovy nebo jedna ze stěn velké učebny. Je-li spojnice zdroje zvuku a mikrofonu na stěnu kolmá, platí opět jednorozměrné zjednodušení šíření vlnoplochy. Vzdálenost mezi stěnou a mikrofonem je přitom polovina dráhy, kterou musí tlaková vlna urazit na cestě k překážce a po odrazu od ní zpět k mikrofonu. Je však třeba dát pozor na to, aby zvuk odražený od některé další blízké plochy jako například od podlahy, boční stěny nebo stropu nedorazil k mikrofonu dříve než zvuk odražený od plochy kolmé ke spojnici zdroje zvuku a mikrofonu. To je v případě umístění mikrofonu 1 m od zdi a zdroje zvuku 2 m od zdi splněno pro vzdálenosti spojnice mikrofonu a zdroje od bočních zdí a podlahy, respektive stropu, alespoň 1,5 m. Při umístění mikrofonu ve výšce 1,8 m do jednoho metru od zdi pak je z tohoto důvodu možné zdroj zvuku posunout do vzdálenosti maximálně 3 metrů od zdi. Variace experimentu měření rychlosti zvuku pomocí vyhodnocování časového zpoždění na známé dráze s použitím dvou mobilních telefonů nebo odrazem od zdi jsou vhodné pro realizaci formou samostatného žakovského projektu.

3.4.2 MĚŘENÍ RYCHLOSTI ZVUKU VE VZDUCHU METODOU HŘEBENOVÉHO FILTRU

Vraťme se ještě krátce k předchozímu experimentu. Místo tleskání můžeme jako zdroj zvuku použít reproduktor. Ten však lze ve spojení s tónovým generátorem použít i jako zdroj harmonického zvukového vlnění. Při současném snímání akustického tlaku ve zvukovém poli harmonicky kmitajícího zdroje dvěma nesoumísnými snímači pak dráhový rozdíl mezi oběma mikrofony Δs způsobí opět časový posun zaznamenaných harmonických mikrofonních signálů Δt , který se ale v případě harmonického kmitání projeví jako zpoždění fáze kmitání signálu vzdálenějšího senzoru vůči senzoru bližšímu. Fázový posuv mezi oběma kmitáními přitom závisí na poměru vzdálenosti senzorů k vlnové délce zvuku. Při součtové mixáži mikrofonních signálů zaznamenaných v různé vzdálenosti od zdroje harmonického zvukového kmitání do jedné záznamové stopy je výsledné kmitání superpozicí těchto dvou fázově posunutých harmonických kmitání. Situace je schématicky znázorněna na obrázku 43. S ohledem na rozsah velikosti vlnových délek zvuku (viz tabulka 1 v kapitole 3.1) přitom pro zkoumání tohoto jevu stačí rozdíl vzdálenosti mikrofonů od zdroje v řádu desítek centimetrů.



Obr. 43: Schéma umístění zdroje zvuku a mikrofonů pro vznik jevu hřebenového filtru. Zdroj: vlastní

Redukujme za předpokladu umístění zdroje zvuku i obou snímačů na přímce úlohu opět na jeden rozměr a zanedbejme odrazy od stěn místnosti. Při daném rozdílu vzdálenosti membrán mikrofonů od zdroje Δs platí, že pokud je Δs rovno celistvým násobkům vlnové délky λ , jsou tlakové změny v místech mikrofonů, a tudíž i směřované signály, ve fázi.

Výsledný součtový signál má pak hodnotu danou součtem amplitud obou kmitání. Amplituda kmitání součtového signálu dosáhne maxima teoreticky pro všechny vzdálenosti

$$\Delta s = k_{\max} \cdot \lambda, \quad (4.2)$$

kde k_{\max} je kladné celé číslo určující kolik vlnových délek připadá na vzdálenost mezi mikrofony (řád maxima) a λ je vlnová délka zvukového vlnění.

Pokud je harmonické zvukové kmitání v místech mikrofonů naopak vzájemně v protifázi, má výsledný součtový signál hodnotu minimální. To nastane, když vzdálenost mezi membránami mikrofonů Δs odpovídá lichým násobkům půlvln podle vztahu

$$\Delta s = (2k_{\min} - 1) \cdot \frac{\lambda}{2}, \quad (4.3)$$

v němž k_{\min} je kladné celé číslo určující pořadí minima při zvětšování vzdálenosti (řád minima) a λ vlnová délka. Vztah mezi vlnovou délkou zvukového vlnění prostředí λ a frekvencí f změn akustického tlaku v určitém bodě zvukového pole je popsán vzorcem

$$\lambda = \frac{c}{f}, \quad (4.4)$$

v němž c je hledaná rychlost šíření mechanického vlnění. Pro frekvence buzení f , při nichž dojde superpozicí kmitání k největšímu možnému zesílení součtového signálu, tak platí, že

$$f_{k_{\max}} = k_{\max} \cdot \frac{c}{\Delta s}. \quad (4.5)$$

Pro frekvence vedoucí ke vzniku minima součtového signálu naopak platí podmínka

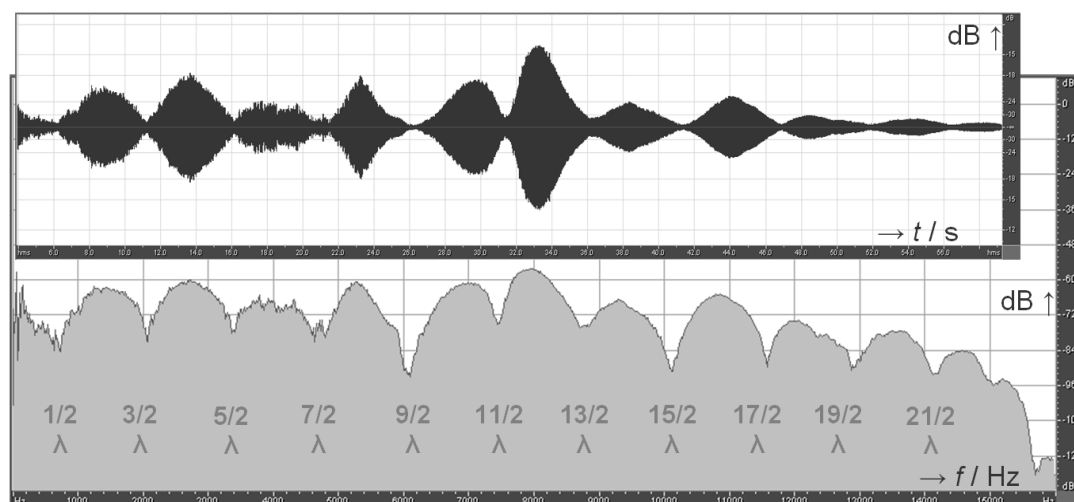
$$f_{k_{\min}} = \frac{(2k_{\min} - 1) \cdot c}{2 \Delta s}, \quad (4.6)$$

kde k_{\max} a k_{\min} označují pořadí maxima a minima na frekvenční ose ve směru rostoucí frekvence. Frekvence $f_{k_{\max}}$, respektive $f_{k_{\min}}$, jsou v tomto smyslu ty frekvence, pro které se při daném rozdílu vzdáleností mezi snímači objeví k -té maximum, respektive k -té minimum.

Jsou tedy dvě možnosti jak experiment realizovat. Buď můžeme při konstantní frekvenci měnit vzájemnou vzdálenost snímačů ve zvukovém poli a měřit vzdálenosti, pro něž se objevují maxima a minima součtového signálu nebo naopak při konstantní vzdálenosti snímačů postupně měnit frekvenci kmitání zdroje zvukového vlnění a hledat frekvence buzení, pro něž se objevují jednotlivá minima a maxima součtového signálu. V experimentu

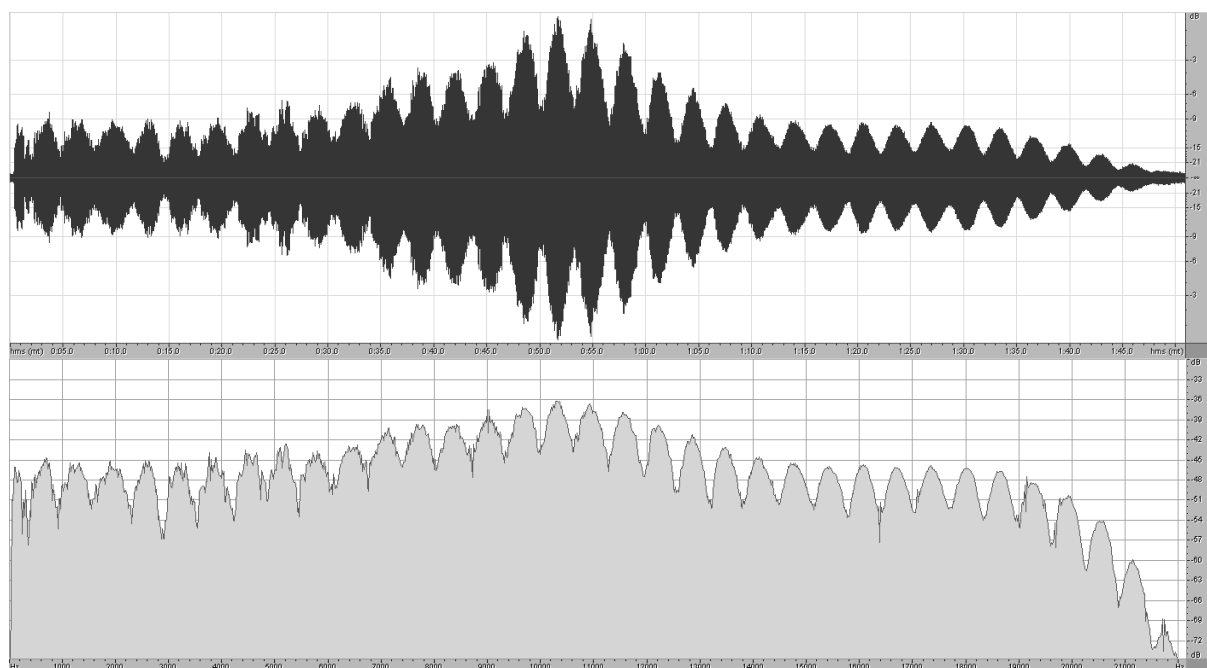
řízeném a vyhodnocovaném počítačem je možné snadno realizovat druhou jmenovanou variantu a jak měřicí signál, tak záznam odezvy systému na měřicí signál ovládat synchronně ve vícecestovém zvukovém editoru. K superpozici kmitání pak dochází při součtové mixáži záznamových stop nahraných oběma mikrofony do jedné zvukové stopy. Základními měřicími signály pro zjišťování frekvenční odezvy akustických systémů jsou tón plynule proměnné frekvence při konstantní amplitudě (sweep) a širokopásmový šum s vyrovnaným frekvenčním spektrem v přenášeném pásmu (bílý šum). Uvedené podmínky pro skládání kmitů totiž platí nejen pro součet fázově posunutých harmonických signálů ale obecně i pro fázově posunuté frekvenční složky dvou sčítaných časově posunutých širokopásmových signálů.

Při součtu dvou fázově posunutých, tonálních signálů s konstantní amplitudou a proměnnou frekvencí je u součtového signálu přímo slyšitelné kolísání amplitudy v čase v závislosti na aktuální frekvenci časově proměnného tónu. Pro určité frekvence dochází u součtového signálu k zesílení slyšitelnému jako zvýšení hlasitosti, pro jiné frekvence naopak ke slyšitelnému zeslabení součtového signálu. U širokopásmových signálů se to projevuje jako tonální zabarvení zvuku. Na obrázcích 44 je nahoře zobrazen časový průběh kmitání a dole spektrum součtového signálu v případě buzení systému dvou nesoumírných mikrofonů tónem proměnné frekvence při rozdílu vzdálenosti mikrofonů od zdroje $\Delta s = 0,25$ m. Obálková křivka časového průběhu kmitání i spektrální závislost příspěvků jednotlivých frekvenčních pásem součtového signálu mají typický tvar se střídajícími se maximy a minimy. Protože jak v časovém, tak zejména ve spektrálním oboru součtový signál svým pravidelným tvarem připomíná hřeben na vlasy, dostal tento jev střídavě vyzdvihující a potlačující určité frekvence název jev hřebenového filtru.

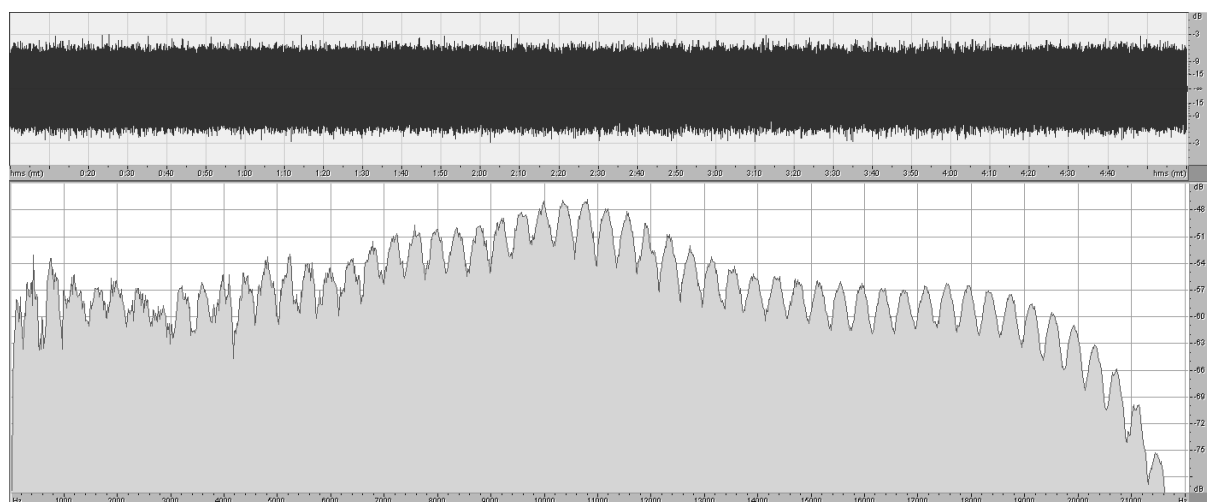


Obr. 44: Časový průběh (nahore) a spektrum (dole) součtového signálu dvou mikrofonních signálů zaznamenaných současně v různé vzdálenosti od zdroje zvuku pro $\Delta s = 0,25$ m. Zdroj: vlastní

V demonstračním experimentu doporučuji pro názornost použít jako měřicí stopu nejprve čistý tón s lineárním nárůstem frekvence od 0 Hz do 24 kHz ($f_s = 48$ kHz) v délce 60 sekund a poté se soustředit na vybrané pásmo frekvencí. Frekvenční analýza zvukových editorů vždy rozloží zvolený počet subpásem FFT na celkové přenášené pásmo dané vzorkovací frekvencí. Pro lepší využití pevného rozlišení v oblasti nízkých kmitočtů je proto někdy vhodné přenosové pásmo zúžit použitím nižší frekvence vzorkování ($f_s = 32$ kHz; $f_s = 24$ kHz). Čím bude měřicí signál delší, tím lepší může být výsledné frekvenční rozlišení.



Obr. 45: Časový průběh (nahore) a spektrum (dole) součtového mikrofonního signálu při snímání širokopásmového šumu pro $\Delta s = 0,540$ m. Zdroj: vlastní



Obr. 46: Časový průběh (nahore) a spektrum (dole) součtového signálu při snímání širokopásmového šumu pro $\Delta s = 0,869$ m. Zdroj: vlastní

Pokud provádíme průměrování spekter signálu za celou dobu trvání, splňuje výše specifikovaný měřicí tón proměnné frekvence podmínky pro stacionární širokopásmový signál. Širokopásmový šum splňuje dané požadavky implicitně. Proto je možné analyzovat i výsledný součtový signál prostředky dlouhodobé analýzy. Platí přitom, že čím bude měřicí signál trvat déle, tím lepší bude rozlišení spektrální analýzy a teoreticky i výsledek celého měření. Pomocí spektrální analýzy s 32 768 spektrálními pásmy je při šířce pásma 16 kHz ($f_s = 32$ kHz) rozlišení ve frekvenci dané šířkou pásma histogramu lepší než 0,5 Hz. Relativní nejistota určení frekvence se přitom snižuje s rostoucí hodnotou frekvence. Jak se však ukázalo, není účelné snažit se o to, dosáhnout za každou cenu co nejjemnějšího frekvenčního rozlišení histogramu. Pro další zpracování měření je mnohem důležitější základní tvar průběhu frekvenční závislosti amplitudy součtového signálu, který je dokonce lépe patrný ve vyhlazeném zobrazení spektrální analýzy s menším počtem širších pásem (např. 8 192 pásem s šířkou cca. 3 Hz při $f_s = 48$ kHz), než jemné detaily průběhu zobrazeného s rozlišením na desetiny hertzu.

Při umístění zdroje zvuku a mikrofonů na jedné přímce při vzdálenost mezi mikrofony 1 metr vznikne v celém pásmu do 24 kHz teoreticky 70 minim (za teploty 20°C). Platí přitom, že čím bude rozdíl vzdálenosti mikrofonů od zdroje zvuku větší, tím více minim a maxim zaznameneáme a pomyslný „hřeben“ bude mít více „zubů“. Při vzdálenosti 0,25 m získáme v pásmu do 24 kHz jen 17 minim. Jak je vidět na obrázcích 44, 45 a 46 jsou maxima průběhu frekvenční závislosti amplitudy součtového signálu plochá a často bývají i silně zdeformovaná. S ohledem na nejistotu v určení frekvence je proto vhodnější určovat frekvence lokálních minim a vybírat raději jen dokonale ostrá minima. Pro výpočet rychlosti zvuku z frekvencí lokálních minim $f_{k \min}$ potom platí vztah

$$c = \frac{2 \cdot \Delta s \cdot f_{k \min}}{(2k_{\min} - 1)} . \quad (4.7)$$

U rychlého demonstračního experimentu realizovaného pro jednu pevnou vzdálenost mezi mikrofony bude po odečtení několika vybraných ostrých vysokofrekvenčních minim absolutní nejistota měření v řádu jednotek metrů za sekundu. Opakováním měření pro alespoň deset různých vzdálenosti mikrofonů, pečlivým odečítáním frekvencí z grafu a vhodným vyhodnocením zjištěných frekvencí však lze absolutní statistickou nejistotu určení rychlosti zvuku snížit až na hodnotu menší než $\pm 0,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Zdrojem statistických nejistot a systematických chyb ovlivňujících výslednou hodnotu rychlosti zvuku ve vzduchu zjištěnou touto metodou je vedle nejistoty určení vzdálenosti přímým měřením (± 1 mm) zejména určování frekvence z grafu frekvenční analýzy. Absolutní

nejistota určení frekvence z histogramu frekvenční závislosti amplitudy signálu by podle šířky jeho pásem mohla být teoreticky lepší než 1 Hz (cca. 0,5 Hz pro $f_s=32$ kHz; cca. 0,75 Hz pro $f_s=48$ kHz), přičemž relativní nejistota se s rostoucí frekvencí snižuje z desetin až na setiny procenta. Minima průběhu součtového signálu však téměř nikdy nejsou dokonale ostrá, často bývají různě deformovaná nebo posunutá. Určení každého jednotlivého lokálního minima průběhu z histogramu spektrální analýzy je tak zatížené značnou statistickou nejistotou typicky v řádu ± 10 Hz, ale potenciálně i systematickou chybou v řádu až desítek hertzů.

Víme však, že podle teoretického modelu jevu hřebenového filtru mají být jednotlivé frekvence lokálních minim vždy přesnými celočíselnými násobky minima prvního řádu. Proto je při zpracování výsledků měření v Excelu výhodné použít interpolaci zjištěných frekvencí lineární regresí a směrnici regresní přímky určit z více hodnot nalezených frekvencí metodou nejmenších čtverců. Pro regresní přímku zde platí obecná rovnice přímky ve tvaru

$$f = a \cdot k + b, \quad (4.8)$$

kde f je frekvence, proměnná k značí řád minima nebo maxima, a je směrnice regresní přímky a b posun funkčních hodnot. Číselná hodnota směrnice a_{\min} pak přímo odpovídá zpřesněné číselné hodnotě frekvence prvního minima $f_{k1 \min}$ pro $k = 1$ určené interpolací z frekvencí minim vyšších řádů. Rychlost zvuku je pak při vyhodnocování minim průběhu závislosti akustického tlaku na frekvenci součtového signálu možné vypočítat jako součin hodnoty vzdálenosti mezi senzory a číselné hodnoty směrnice regresní přímky

$$c = 2 \cdot \Delta s \cdot a_{\min}. \quad (4.9)$$

Když si uvědomíme, že směrnice regresní přímky a zde zastupuje frekvenci s recipročným rozměrem času, má vzorec 4.9 úplně stejný fyzikální význam jako vzorec 4.1. Faktor 2 ve vzorci 4.9 přitom vychází z toho, že řady minim a maxim se stoupající frekvencí číslujeme od jedné počínaje frekvencí nejnižšího lokálního minima obálky součtového signálu, pro niž vzdálenost mezi senzory odpovídá polovině vlnové délky. Pro všechna další vzniklá minima pak vzdálenost mezi senzory odpovídá lichým celočíselným násobkům polovin vlnové délky (půlvlnám), zatímco pro maxima to jsou sudé násobky polovin vlnové délky.

V případě snímání tónu proměnné frekvence dvěma nesoumístitnými mikrofony je však možná i jiná interpretace experimentu. Je třeba si uvědomit, že v důsledku změny frekvence v čase má kmitání zaznamenané vzdálenějším mikrofonom vždy o něco nižší frekvenci než kmitání zaznamenané bližším mikrofonom. Zjednodušeně řečeno ke vzdálenějšímu mikrofону dorazí tlakové změny s určitou frekvencí se zpožděním daným právě rozdílem vzdáleností

mezi oběma mikrofony. Zatímco z pohledu postupujícího vlnění tedy znamená prostorový odstup mezi dvěma snímači časové zpoždění, jehož důsledkem je u harmonického průběhu vlny určitá pozdější fáze kmitu na vzdálenějším snímači, existuje u tónu proměnné frekvence v každém časovém okamžiku zároveň i rozdíl ve frekvenci kmitání registrovaného oběma snímači. Vznik časového průběhu součtového signálu je tak možné interpretovat též jako zázněje mezi dvěma časově posunutými harmonickými signály proměnné frekvence.

Perioda záznějů T_z , s níž kolísá obálka amplitudy časového průběhu součtového signálu, přitom odpovídá převrácené hodnotě rozdílu frekvencí obou kmitání,

$$\Delta f = f_2(t) - f_1(t) = \frac{1}{T_z}, \quad (4.10)$$

který je však při neměnné poloze obou snímačů po celou dobu trvání obou frekvenčně posunutých kmitání konstantní. $f_2(t)$ přitom označuje okamžitou hodnotu frekvence změny tlaku v místě bližšího a $f_1(t)$ v místě vzdálenějšího snímače. Rozdíl frekvence v záznamech časově proměnného signálu dvěma nesoumísnými snímači je kromě časového zpoždění na dráze mezi snímači dán též rychlostí změny frekvence kmitání zdroje zvuku v čase

$$\frac{\Delta f}{\Delta t} = \frac{f_{\text{kon}} - f_{\text{poč}}}{\tau} = \frac{B}{\tau}, \quad (4.11)$$

kde $f_{\text{poč}}$ je počáteční frekvence, f_{kon} konečná frekvence a B šířka pásma dána jejich rozdílem. τ značí časové trvání tónu proměnné frekvence. Například tón proměnné frekvence 0 Hz až 24 000 Hz trvajících 240 sekund znamená změnu frekvence o 100 Hz za sekundu. Časové zpoždění obou mikrofonních signálů Δt přitom závisí na vzdálenosti Δs , kterou tlakové vlny reprezentující tón proměnné frekvence musí urazit na cestě od prvního ke druhému snímači. Z toho je možné vypočítat rychlost šíření zvuku podle vzorce

$$c = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \Delta s \cdot B \cdot \frac{T_z}{\tau}. \quad (4.12)$$

Při snímání jednoho zdroje dvojicí mikrofonů dochází k superpozici dvou kmitání odpovídajících různým pozicím mikrofonů v přímém zvukovém poli postupného vlnění, nikoli k interferenci dvou vlnění v prostoru. V experimentu řízeném počítačem nastává navíc skládání kmitů dokonce až v číslicovém vyjádření. Experiment je však možné provádět i ve variantě se dvěma zdroji zvuku umístěnými na přímce v různé vzdálenosti od jednoho mikrofonu, kdy dochází skutečně přímo k interferenci dvou postupných zvukových vlnění vzduchu. Opět platí, že dráhový rozdíl způsobí pro harmonické signály nebo jednotlivé frekvenční složky širokopásmových signálů rozdíl fázový. Pokud reproduktory nasměrujeme

proti sobě, nebo použijeme jeden reproduktor nasměrovaný proti zdi, pak dochází v prostoru mezi nimi k interferenci dvou proti sobě postupujících vlnění a tím ke vzniku stojatého vlnění. To jsou ovšem experimenty vhodné spíše pro realizaci v navazující projektové výuce.

Na tvar časového průběhu a spektra součtového mikrofonního signálu má samozřejmě vliv i zvlnění frekvenční charakteristiky zdroje zvuku, zejména použitého reproduktoru, a zvlnění způsobené odrazovým zvukovým polem měřicí místnosti. Vzhledem k extrémnímu zvlnění frekvenční charakteristiky výsledného součtového signálu záznamů jejich superpozicí, a v dalších úlohách pak stojatým vlněním, jsou však i při použití běžných reproduktorů minima a maxima způsobená jevem hřebenového filtru, či dále vlnovými jevy, v grafu dobře viditelná. Pro omezení vlivu frekvenčně závislého dozvuku místnosti je možné umístit podél spojnice mikrofonů a za vzdálenějším mikrofonem mobilní panely z akusticky pohltivých materiálů (např. z polyuretanové nebo melaminové pěny) a omezit tak snímání odrazů zvuku od blízkých stěn a podlahy měřicí místnosti.

U vícepásmových reprosoustav s několika vzájemně interferujícími měniči pevně vestavěnými do jedné reproduktorové skříně je v experimentech jako zdroj zvuku vhodné používat vždy pouze jeden z reproduktorových měničů. To lze zajistit omezením frekvenčního pásma měřicího signálu nebo zvukotěsným zakrytím nepoužívaných měničů reprosoustavy, nejspíše těch výškových, a zaslepením bassreflexových otvorů ozvučnice. U aktivních vícepásmových reproduktorů k počítači většinou není hloubkový reproduktor shora nijak frekvenčně omezen a chová se tak jako širokopásmový měnič použitelný řádově až do 10 kHz. U kvalitnějších dvoupásmových reprosoustav s frekvenční výhybkou je hloubkový reproduktor využitelný jako zdroj zvuku jen v úzkém frekvenčním rozsahu od desítek hertzů do frekvence dělicího kmitočtu, typicky kolem 1 kHz. Výškový reproduktor je naopak omezen dělicí frekvencí zdola a lze ho použít ve zhruba desetkrát širším pásmu od řádově 1 kHz až do horní mezní frekvence, typicky 15 až 20 kHz. Měření je pak nejlepší rozdělit na dvě části a odezvu na nízké frekvence až do dělicího kmitočtu výhybky měřit na ose hloubkového reproduktoru, pro vysoké frekvence na ose výškového reproduktoru, a přizpůsobit tomu i šířky pásma, respektive vzorkovací frekvence měřicích signálů (např. pro nízké kmitočty $f_s = 4$ kHz, pro vysoké $f_s = 48$ kHz). Oblast frekvencí v okolí dělicího kmitočtu reprosoustavy a oblasti rezonančních frekvencí vestavěných elektroakustických měničů je při vyhodnocování měření lépe vynechat.

3.4.3 MĚŘENÍ RYCHLOSTI ZVUKU VE VZDUCHU METODOU ANALÝZY STOJATÉHO VLNĚNÍ VZDUCHOVÝCH SLOUPCŮ V TRUBICÍCH

Když k uchu přiložíme velkou lasturu, hrnek nebo dlouhou trubici můžeme z dutiny slyšet zvuk jakoby tonálně zabarvený. Některé frekvenční složky okolních zvuků, ruchů a šumu se nám subjektivně zdají být hlasitější než jiné. Je to způsobeno tím, že v dutinách, na jejichž vnitřním povrchu se vlnění mnohočetně odráží, dochází snadno ke vzniku stojatého vlnění vzduchu. Frekvence buzení, při kterých se stojatá vlna v dutině vytvoří, přitom závisí na tvaru dutiny a rychlosti šíření vlnění plynem vyplňujícím dutinu. Stojaté vlnění v dutině vyvolají buď harmonické signály s určitými frekvencemi, nebo širokopásmový signál, který v sobě tyto frekvence obsahuje. Nejjednodušší je pracovat s trubicemi kruhového průřezu a délkou několikanásobně větší než je jejich vnitřní průměr. Díky symetrii je tak možné volit výhodně souřadnicový systém a redukovat obecně trojrozměrnou úlohu na jednu dimenzi. Tvar vlnoploch skutečného vlnění v trubici se při její dostatečné délce ve srovnání s průměrem trubice blíží modelu rovinné vlny. Stojaté vlnění v trubici je možné snadno vybudit i bez přístrojů úderem plochou dlaně na jeden její otevřený konec. Když dlaně po úderu na oboustranně otevřenou trubici rychle oddálíte, má vzniklá odezva trubice na úder dlaně slyšitelně jinou výšku, než když trubici dlaní po jejím dopadu těsně uzavřete.

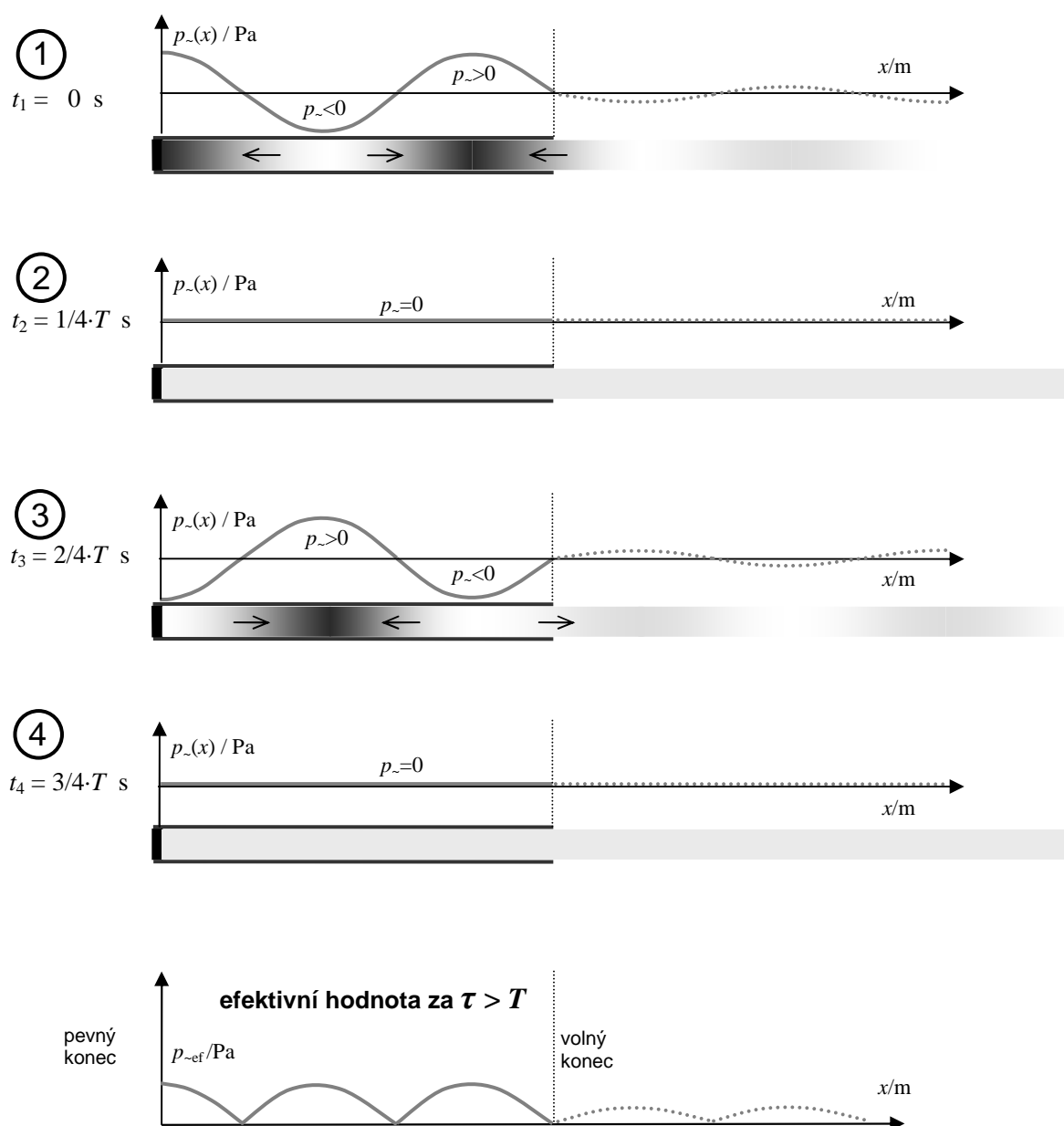
Z důvodu rozšířenosti experimentů s jednostranně uzavřenými trubicemi ve školských laboratorních úlohách [35, 36, 68] se věnujme nejprve právě jim. Zvuk, který proniká z vnějšího prostředí do jednostranně uzavřené trubice otevřeným koncem, se odráží uvnitř opakovaně na uzavřeném i otevřeném konci vzduchového sloupce v trubici. Interferencí těchto odražených vlnění za určitých podmínek vzniká stojaté vlnění. Pro výchylku translačního kmitání elementů vzduchu v podélné stojaté vlně platí okrajová podmínka nulové výchylky elementů vzduchu na uzavřeném konci, zatímco na otevřeném konci je výchylka kmitání elementů vzduchu maximální. Na uzavřeném konci trubice se vytvoří uzel výchylky translačních kmitů elementů vzduchu a na otevřeném konci kmitna výchylky translačních kmitů vzduchu (viz obrázek 47).

Ke vzniku podélného stojatého vlnění vzduchu v jednostranně otevřené trubici tak dojde vždy, když na délku vzduchového sloupce v trubici připadá lichý počet čtvrtln vlnění vyvolaného budícím signálem. Pro podélné stojaté vlnění vzduchu v jednostranně uzavřené trubici tedy platí, že

$$L = (2k - 1) \cdot \frac{\lambda_k}{4}, \quad (4.13)$$

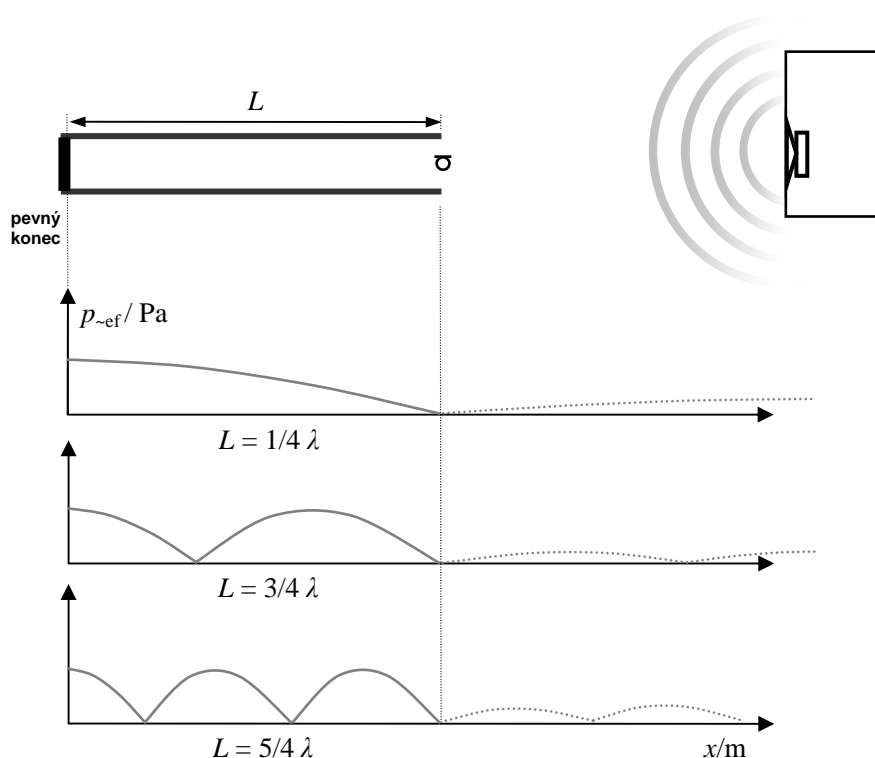
kde L je délka vzduchového sloupce v trubici a λ_k je příslušná vlnová délka vzniklého stojatého vlnění. Řád stojaté vlny, zvaný též mód stojatého vlnění, k je nezáporné celé číslo, takže závorka $(2k - 1)$ vždy dává liché celé číslo označující počet čtvrtvln, které připadají na délku vzduchového sloupce v trubici s vnitřní délkou L . Při dosazení za λ_k ze vztahu $\lambda_k = \frac{c}{f_k}$, kde f_k je frekvence buzení, která v prostředí vyvolá zvukové vlnění o vlnové délce λ_k a c je rychlost šíření zvukového vlnění prostředím, má vztah podobu

$$L = (2k - 1) \cdot \frac{1}{4} \cdot \frac{c}{f_k}. \quad (4.14)$$



Obr. 47: Schéma vzniku stojatého vlnění v jednostranně uzavřené trubici pro $L = 5/4 \lambda$ ($k=3$). Okamžité hodnoty střídavé složky tlaku $p_-(x)$ ve stojaté zvukové vlně v závislosti na souřadnici pro 4 význačné fáze kmitání, dole závislost efektivní hodnoty $p_{-ef}(x)$ za $\tau > T$ na souřadnici. Zdroj: vlastní

Velikost výchylky translačních kmitů elementů vzduchu je však u podélného vlnění v plynech obtížně měřitelná. Měřicí mikrofony jsou svojí konstrukcí obecně snímače akustického tlaku (viz kapitola 3.3). Platí však, že v místech kmiten výchylky elementů vzduchu se vytvoří uzly akustického tlaku a naopak v místech uzlů výchylky kmitny akustického tlaku. Je to logické. V prostoru mezi dvěma maximy opačně orientovaných výchylek podélného kmitání totiž dochází ke střídavému stlačování a rozpínání vzduchu. V jednodimenzionálním přiblížení tedy pro prostorové rozložení akustického tlaku v podélné stojaté vlně platí, že je vůči prostorovému rozložení amplitudy výchylky kmitání elementů vzduchu komplementární, tedy posunutě přesně o čtvrtinu vlnové délky.



Obr. 48: Schéma rozložení akustického tlaku v jednostranně otevřené trubici délky L pro první 3 módy stojaté vlny $L = 1/4 \lambda$ ($k=1$), $L = 3/4 \lambda$ ($k=2$) a $L = 5/4 \lambda$ ($k=3$). Zdroj: vlastní

Na obrázku 47 jsou z didaktických důvodů znázorněny 4 význačné fáze kmitání vzduchu a prostorové rozložení tlaku ve stojaté zvukové vlně vzduchového sloupce v trubici. V ilustracích je velikost okamžité hodnoty střídavé složky tlaku zobrazena ve stupních šedi, kdy nejtmaší místo značí oblast přetlaku $p(x) > p_0$ a nejsvětlejší oblast podtlaku $p(x) < p_0$ vůči atmosférickému tlaku p_0 . Šipky naznačují směr pohybu elementů vzduchu v jednotlivých fázích kmitu. Pod grafy rozložení tlaku v jednotlivých fázích kmitu je na obrázku 47 dole znázorněno prostorové rozložení výsledného akustického tlaku p_{ef} v trubici určené za dobu $\tau > T$. V ilustracích a grafech na obrázcích 48 a 52 je dále znázorněno už pouze prostorové rozložení efektivní hodnoty akustického tlaku $p_{ef}(x)$. Plochá maxima průběhu závislosti

akustického tlaku $p_{\text{ef}}(x)$ na souřadnici označují kmitny akustického tlaku, uzlům akustického tlaku naopak odpovídají ostrá minima průběhu.

Laboratorní úlohu je možné realizovat ve dvou variantách. První možností je změna délky vzduchového sloupce při konstantní frekvenci buzení. To je ve školských úlohách nejčastěji prováděno posouváním pístu tvořícího uzavřený konec jednostranně uzavřené trubice nebo zasouváním trubice do nádoby s vodou tak, že pevný konec vzduchového sloupce tvoří vodní hladina v trubici. Jako zdroj zvuku s konstantní frekvencí kmitání se pro vybuzení stojatého vlnění v trubici na školách používá ladička nebo na vhodnou frekvenci nastavený tónový generátor s reproduktorem. Druhou možností je při konstantní délce vzduchového sloupce hledat vlastní frekvence stojatého vlnění změnou frekvence buzení na tónovém generátoru. Rychlost zvuku se přitom v obou případech určuje výpočtem ze vzorce pro souvislost vlnové délky, frekvence a rychlosti šíření vlnění vzduchu v trubici. V experimentu řízeném a vyhodnocovaném počítačem lze pro vybuzení podélného stojatého vlnění v trubici konstantní délky použít čistý tón s lineárním nárůstem frekvence při konstantní amplitudě kmitání nebo širokopásmový bílý šum.

Pro experiment jsou vhodné trubice vyrobené z tuhého akusticky neprůzvučného a nepohltivého materiálu. V domácnosti nejnázde dostupné jsou pevné plastové trubice od vysavače, z nichž je díky standardizaci průměru (35 mm na jedné straně vnitřní průměr na druhé vnější) možné snadno sestavovat oboustranně otevřené zvukovody délky až několika metrů. Optimálně vyhoví i kanalizační trubky z polyvinylchloridu (PVC) a polypropylenu (PP), dostupné ve standardizovaných průměrech od 40 mm do 160 mm a délkách od 0,5 m do 4 m. K odpadním a kanalizačním potrubím je snadno dostupné i příslušenství v podobě zátek, spojek a dalších tvarovek, které se buď lepí speciálním lepidlem, nebo se zasouvají do pryžového těsnícího kroužku v hrdle trubic. Pozor je však třeba dát na tvar zakončení trubice. Ta by měla mít ideálně po celé délce konstantní průřez a neměla by být na konci zúžená ani rozšířená. Díky totálnímu odrazu na vnitřním povrchu trubicového zvukovodu mají vhodné akustické vlastnosti i trubice vyrobené z recyklovaného papíru jako jsou papírové role od látek prodávaných na metráž (standardně délka cca. 1,5 m) a podlahových krytin (koberce a lina šíře 2 nebo 4 m). Tyto trubice je možné snadno získat v různých průměrech jako odpad v příslušných maloobchodech. Naopak ocelové, měděné a hliníkové trubky nejsou pro tento experiment vhodné, protože se u nich kvůli nízké vnitřnímu tlumení vlnění v materiálu trubice uplatňuje kromě stojatého vlnění vzduchového sloupce také stojaté vlnění stěny trubice.

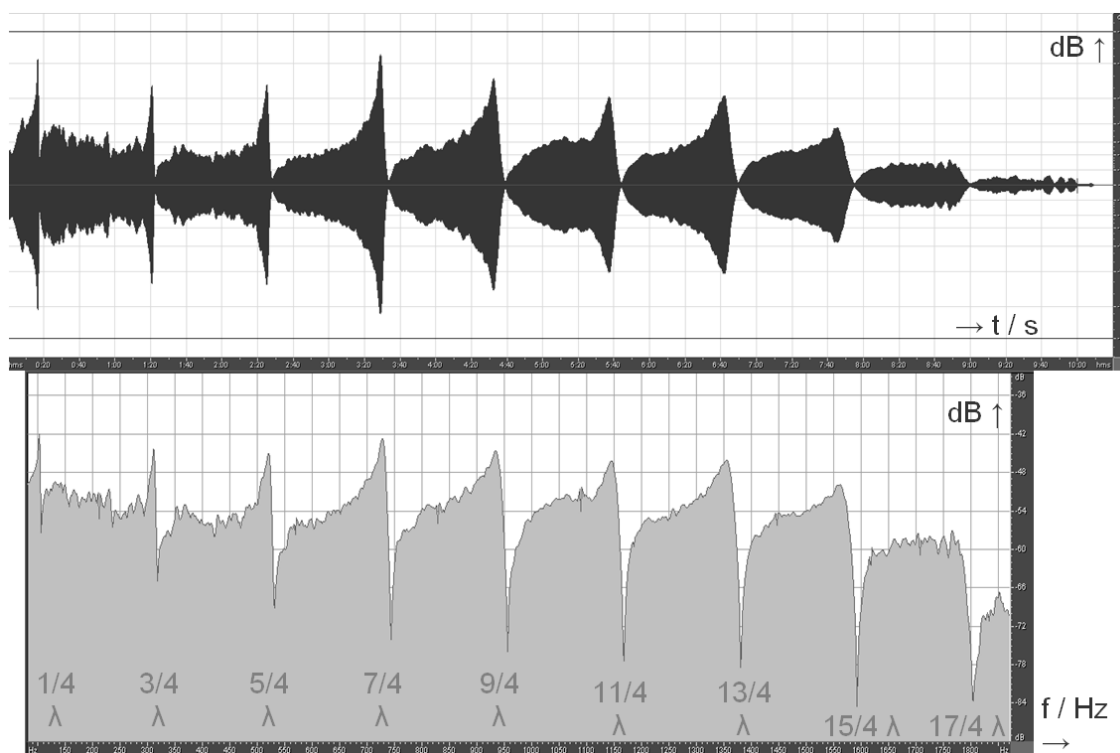
Jako zdroj zvuku je možné použít širokopásmový reproduktor pokrývající celé měřené pásmo nebo měření rozdělit na dvě části a sledovat zvlášť nízkofrekvenční a zvlášť

vysokofrekvenční odezvu trubic odděleným použitím hloubkového a výškového reproduktoru vícepásmové reprosoustavy. Pro optimální využití pevného rozlišení spektrální analýzy v přenosovém pásmu používám při měření nízkofrekvenční odezvy trubic zúžení vyhodnocovaného frekvenčního pásma na rozsah od 0 Hz do 2 kHz ($f_s=4$ kHz) nebo do 3 kHz ($f_s=6$ kHz) podvzorkováním. Je však nutné pamatovat na to, že čím méně vzorků signálu za sekundu zaznamenáváme, tím delší musí použitý měřicí signál být, abychom získali dostatek vzorků pro časové průměrování spekter. Zatímco rychlý demonstrační experiment pro celé pásmo frekvencí lze s úspěchem provést i za méně než 60 sekund, je v případě měření nízkofrekvenční odezvy trubice potřebná délka měření zhruba desetinásobná.

Měřicí mikrofon umístěný v blízkosti roviny řezu ústí trubice snímá okamžitou hodnotu střídavé složky tlaku v tomto místě. Vyhodnocovanou veličinou v experimentu je pak relativní změna amplitudy akustického tlaku. Stejně tak bychom ale mohli sledovat efektivní hodnotu střídavé složky tlaku p_{ef} . V grafu časového průběhu signálu zaznamenané odezvy vzduchového sloupce v trubici na tón proměnné frekvence je viditelné pravidelné kolísání obálky amplitudy kmitání v závislosti na časové změně frekvence signálu. Stavů vybuzeného stojatého vlnění vzduchu v trubici přitom odpovídají lokální minima obáلكové křivky. Snímáním akustického tlaku ve stojatém vlnění vzduchu uvnitř trubice po celé její délce je pak pro různé módy možné experimentálně ověřit, že na volném konci vzduchového sloupce při splnění podmínky vzniku stojatého vlnění dosahuje v rovině řezu trubice výstupní napětí senzoru akustického tlaku skutečně vždy minima, zatímco na uzavřeném konci má vždy maximální hodnotu. Na základě těchto experimentů byly vytvořeny obrázky 48 a 52.

Na obrázku 49 je příklad vyhodnocení nízkofrekvenční odezvy vzduchového sloupce v jednostranně uzavřené trubici délky 80 cm. Při buzení tónem proměnné frekvence jsou už přímo v časovém průběhu odezvy trubice (obrázek 49 nahoře) na obálce amplitudy kmitání dobře vidět hledaná minima akustického tlaku. Pokud tón proměnné frekvence zkoumáme metodami dlouhodobé frekvenční analýzy s časovým rozlišením odpovídajícím celé jeho délce, jeví se jako širokopásmový signál. V tomto případě je oprávněné volit maximální možnou délku bloku a průměrování spekter přes celou délku signálu. Pro vzorkovací kmitočet 4 kHz a 32 768 spektrálních čar tak může být šířka pásem histogramu spektrální analýzy, respektive nejistota určení frekvence, i v nízkofrekvenčním pásmu do 2 kHz menší než 0,1 Hz. Z grafu spektrální analýzy (obrázek 49 dole) je pak možné snadno určit frekvence lokálních minim.

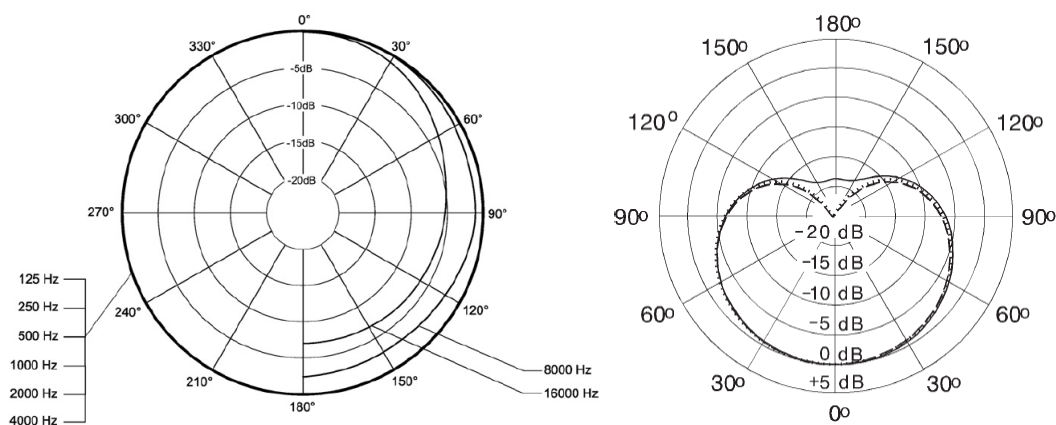
Ukázky zvukových stop měření spolu s tabulkami a grafy vyhodnocení měření pro trubice délky 0,80 m, 1,19 m, a 1,25 m jsou uloženy na přiloženém CD-ROM v adresáři „K4 Laboratorní úloha“.



Obr. 49: Časový průběh (nahore) a spektrum (dole) nízkofrekvenční odezvy jednostranně uzavřené trubice délky 0,8 m. Zdroj: vlastní

Zajímavým jevem u jednostranně uzavřených trubíc je prudký zákmit před dosažením interferenčního minima. Tato ostrá lokální maxima se objevují zejména jako důsledek kombinace několika stojatých vlnění. Kromě stojatého vlnění vzduchového sloupce mezi otevřeným a uzavřeným koncem trubice vzniká totiž ještě také stojaté vlnění mezi dnem trubice a membránou reproduktoru, respektive mezi dnem trubice a membránou mikrofonu. Výsledné zvukové pole je pak kombinací všech těchto stojatých vlnění s přímým zvukem vyzařovaným reproduktorem. Důležité však je, aby nedošlo v důsledku chybných předpokladů k záměně frekvenčně blízkého minima a maxima. Takovým chybným předpokladem by mohlo být například, že senzorem zvuku snímáme výchylku kmitání, která je ve vzniklé stojaté vlně na volném konci trubice maximální [68]. To samozřejmě neplatí.

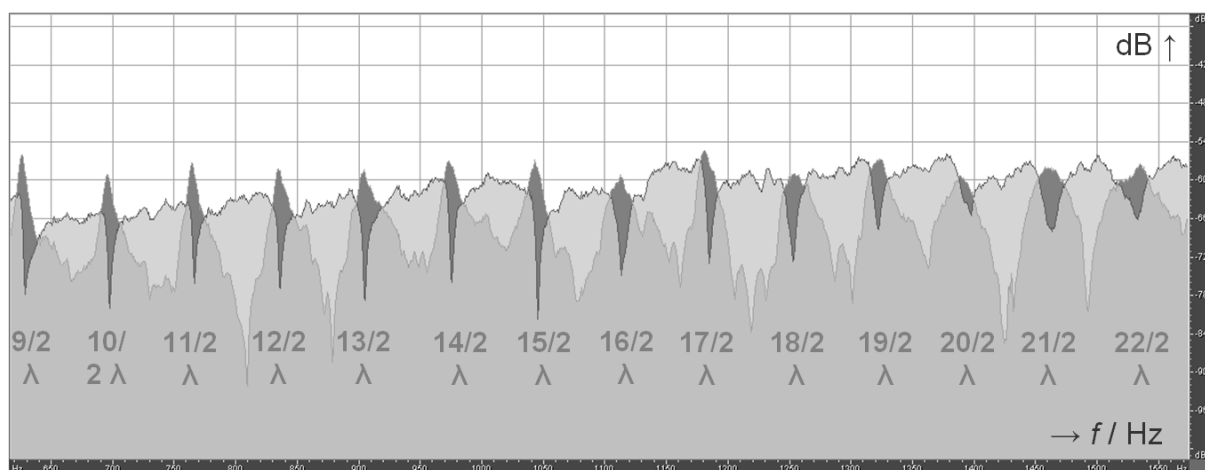
V experimentu hraje důležitou roli směrová charakteristika použitého mikrofonu. Měřicí mikrofony s kulovou směrovou charakteristikou (obrázek 50 vlevo) snímají velikost akustického tlaku bez ohledu na to, z jakého směru na mikrofonní kapsli zvukové vlny dopadají. Vokální a nástrojové mikrofony mají ovšem částečně otevřené kapsle s kardioidní směrovou charakteristikou, která je symetrická podle osy mikrofonní kapsle, ale vůči rovině membrány silně nesymetrická (obrázek 50 vpravo). Jedná se technicky řečeno o superpozici skalární a gradientní sondy akustického tlaku (viz kapitola 3.3).



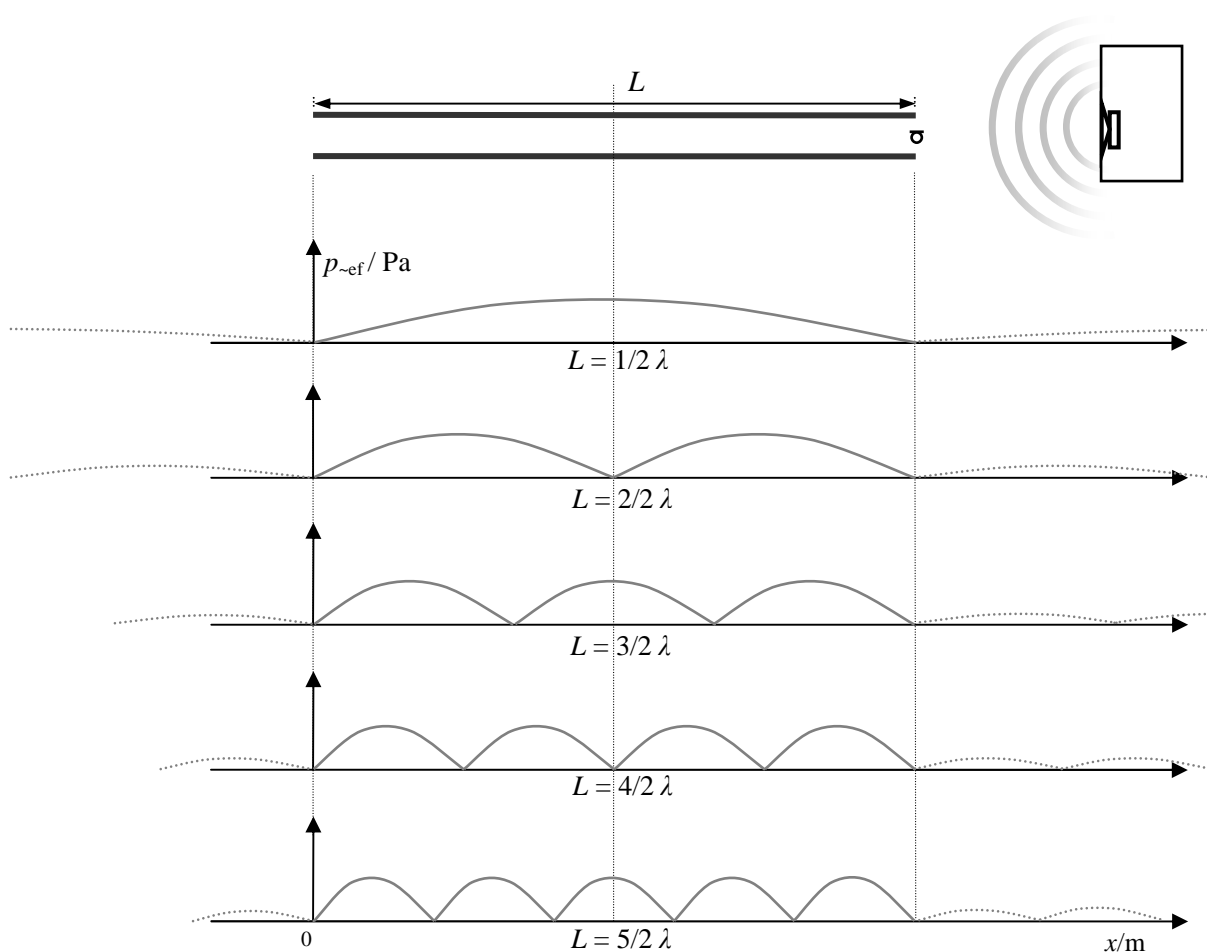
Obr. 50: Směrové charakteristiky měřicího mikrofonu Beyerdynamic MM-1 (kulová vlevo) a nástrojového mikrofonu Shure SKM 109 (kardioidní vpravo; — 250 Hz, 500 Hz, - - - 1 kHz) Zdroj: [4, 73]

V dalším experimentu byl pro ověření vhodnosti různých typů mikrofonů pro snímání akustických veličin namísto skalárního senzoru akustického tlaku použit pár směrových nástrojových mikrofonů *Shure KSM 109* [73]. Vhodným natočením malomembránového nástrojového mikrofonu vůči akustickému poli lze totiž účelně využít vlastností kardioidní směrové charakteristiky a podle úhlu, který svírá osa kapsle s normálem vlnoplochy, jedním mikrofonem snímat velikost akustického tlaku a druhý použít jako snímač gradientu akustického tlaku. Gradient akustického tlaku by měl být maximální přesně uprostřed mezi dvěma kmitnami akustického tlaku, tedy v místech uzlů akustického tlaku. Výsledkem experimentu pro dva navzájem kolmo umístěné mikrofony s kardioidní směrovou charakteristikou je graf na obrázku 51.

V experimentu popisovaném dále byla snímána odezva oboustranně otevřené trubice délky $L = 2,47$ m. Oba mikrofony byly umístěny v těsné blízkosti otevřeného konce trubice bližšího ke zdroji zvuku (reproduktoru) tak, že kolmo k ose trubice nasměrovaný mikrofon snímal změny akustického tlaku (světlejší histogram na obrázku 51 v popředí) a druhý s osou kapsle rovnoběžnou s osou trubice snímal gradient akustického tlaku (tmavší histogram na obr. 8 v pozadí). Zdrojem buzení byl podvzorkovaný bílý šum s šířkou pásma 2 kHz. V grafu na obrázku 51 je dobře vidět, že frekvencím, pro něž nastává ve stojaté vlně minimum velikosti akustického tlaku, zhruba odpovídají maxima gradientu akustického tlaku. U oboustranně otevřené trubice s délkou 2,47 m je výsledkem měření nízkofrekvenční odezvy 28 hodnot frekvence jednotlivých lokálních minim akustického tlaku, respektive maxim průběhu gradientu akustického tlaku. Graf na obrázku 51 ukazuje ve výřezu pouze centrální část frekvenčního spektra od 600 Hz do 1600 Hz odezvy vzduchového sloupce buzeného bílým šumem analyzovanou s rozlišením 32 768 spektrálních pásem.



Obr. 51: Spektrální analýza signálů skalárního snímače akustického tlaku (světle šedá) a gradientního snímače (tmavě šedá) nízkofrekvenční odezvy oboustranně otevřené trubice 2,47 m. Zdroj: vlastní



Obr. 52: Schéma rozložení akustického tlaku v oboustranně otevřené trubici délky L . Zdroj: vlastní

U oboustranně otevřených trubic má vzniklá stojatá vlna na obou otevřených koncích kmitny výchylky translačních kmitů elementů vzduchu a tudíž uzly akustického tlaku. Na délku vzduchového sloupce v oboustranně otevřené trubici L pak připadají celočíselné násobky poloviny vlnové délky vlnění vybuzeného kmitáním s frekvencí f . Platí, že

$$L = k \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{c}{f_k} \quad (4.15)$$

I když frekvence z grafu spektrální analýzy je podle zvolené šířky pásma a rozlišení frekvenční analýzy možné teoreticky určovat s přesností na jednotky až na desetiny hertzu, platí opět, že minimum není dokonale ostré a může být posunuté. Výsledná statistická nejistota určení frekvence z grafu je tak řádově větší než teoretická a dosahuje ve skutečnosti až ± 10 Hz. Statistickou nejistotu i případnou systematickou chybu určení frekvence z grafu spektrální analýzy je za předpokladu lineární závislosti frekvencí odpovídajícím jednotlivým módům stojatého vlnění možné snížit vyhodnocením výsledků měření v MS Excel lineární interpolací, v níž je směrnice regresní přímky (rovnice 4.8) určena metodou nejmenších čtverců. Jelikož hodnota směrnice interpolační přímky a_{\min} představuje zpřesněnou hodnotu frekvence prvního módu, je možné rychlost zvuku pro jednostranně uzavřenou trubici snadno vypočítat podle vzorce

$$c = 4 \cdot L \cdot a_{\min} \quad (4.16)$$

a pro trubicí oboustranně otevřenou podle vzorce

$$c = 2 \cdot L \cdot a_{\min} \quad (4.17)$$

Fyzikální význam obou uvedených vzorců je vzhledem k tomu, že směrnice interpolační přímky odpovídá frekvenci s reciprokým rozměrem času, shodný se vzorcem 4.1.

Při interpolaci několika desítek hodnot frekvencí, pro něž nastávají jednotlivé módy stojatého vlnění a následným opakování experimentu s několika trubicemi různé délky je možné nejistotu určení rychlosti zvuku snížit z řádově jednotek metrů za sekundu až na $\pm 0,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Nejvíce limitující pro spolehlivost výsledků celého měření je určení vzdálenosti mezi krajními uzly akustického tlaku oboustranně otevřené trubice, respektive mezi krajním uzlem a krajním kmitnou akustického tlaku u trubice jednostranně uzavřené. Prvotní předpoklad byl, že pro všechny módy stojatého vlnění vzduchu v oboustranně otevřené trubicí je vzdálenost krajních uzlů akustického tlaku rovna délce vzduchového sloupce v trubicí. Nahrazením délky vzduchového sloupce, jehož stojaté vlnění zkoumáme, naměřenou délkou trubice však vzniká systematická chyba určení délky vzduchového sloupce. Není totiž možné automaticky činit předpoklad, že jsou si délka trubice a vzduchového sloupce vymezeného hranami řezu přesně rovny. Nejde zde tedy o systematickou chybu měření délky, ale spíš o to určit, zda se uzel akustického tlaku skutečně vytvoří přesně v rovině řezu trubice nebo jestli, a případně o kolik, bude posunutý mimo něj.

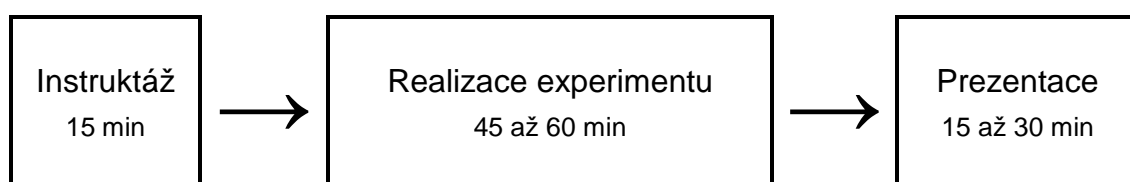
Určení korekce délky vzduchového sloupce v trubici je však obtížné, protože závisí nejen na průměru trubice a její délce, ale i na tvaru hrany trubice a objektech v okolí ústí trubice (např. měřicí mikrofon). Okrajová korekce pro otevřený konec tenkostěnné trubice o vnitřním průměru D bez vnější příruby by měla odpovídat $+0,6 \cdot D$ [2, 5, 24]. Pro trubice s přírubou narůstá na vyšší hodnoty než $+0,6 D$, typicky na zhruba 0,8-násobek vnitřního průměru trubice. Spolehlivost výsledku měření tedy záleží zejména na poměru délky trubice k jejímu průměru. Důvodem vzniku kmitny výchylky translačního kmitání elementů vzduchu vně trubice je pravděpodobně to, že na hraně otevřeného konce trubice už neplatí jednoduchá jednodimenzionální aproximace rovinnými stojatými vlnami. Na rozložení tlaku v dutině trubice je tak nutné pohlížet jako na obecně trojrozměrný problém s možností redukce na dvě dimenze vzhledem k ose symetrie trubice. Korekce modelové odchylky v modelu idealizované rovinné stojaté vlny pak má kompenzovat odlišnost skutečného prostorového rozložení akustického tlaku v trubici prodloužením idealizovaného válcového vzduchového sloupce. Z porovnání výsledků přímého výpočtu rychlosti zvuku z naměřených hodnot podle vzorců 4.16 a 4.17 (viz soubor „Vyhodnocení rychlosti zvuku.xls“) s teoretickými hodnotami rychlosti zvuku podle modelu ideálního plynu (příloha C2 tabulka C2.2), s tabulkovými hodnotami [43] a dále s výsledky výpočtu se zahrnutím korekce délky vzduchového sloupce se však jakákoli korekce délky nejeví jako smysluplná.

3.4.4 ORGANIZACE LABORATORNÍ ÚLOHY Z AKUSTIKY NA STŘEDNÍ ŠKOLE

Ve výuce na střední škole vzhledem k časové náročnosti laboratorní úlohy navrhuji vyhradit pro její realizaci dvě spojené vyučovací hodiny fyzikálního praktika v celkové délce trvání 90 minut, z nichž vlastní měření trvá minimálně 45 min čistého pracovního času. Před začátkem měření je vhodné provést krátkou úvodní instruktáž k úloze (cca. 15 minut), po níž následuje měření rychlosti zvuku ve vzduchu metodou analýzy projevů stojatého vlnění vzduchových sloupců v trubicích a srovnání takto získaných výsledků s výsledky měření rychlosti zvuku přímou metodou a s tabulkovými hodnotami, respektive s teoretickou předpovědí rychlosti zvuku podle matematického modelu rychlosti šíření mechanického zvukového vlnění ideálního plynu (viz příloha C2). Šablona pro rychlé vyhodnocení měření v MS Excel je uložena v adresáři „K4 Laboratorní úloha“ na přiloženém CD-ROM.

Organizačně je laboratorní úlohu nejvhodnější pojmut jako skupinovou výuku, kdy jednu měřicí skupinu tvoří ideálně dva až tři žáci, pokud možno ne více než čtyři. V případě dělené výuky fyzikálního praktika na střední škole (polovina žáků dané třídy, dvě vyučovací

hodiny jednou za dva týdny), to znamená 4 až 5 skupin, tedy 4 až 5 hlavních měřicích stanovišť. Každé měřicí stanoviště je tvořeno jedním osobním počítačem se zvukovou kartou a softwarem pro záznam zvuku, dvěma měřicími mikrofony, měřicími kabely a stativy. Doporučuji, aby při nepřímé metodě měření rychlosti zvuku každá skupina proměřovala stojaté vlnění vzduchového sloupce v trubici jiné délky a to jak pro trubice oboustranně otevřené, tak i trubice jednostranně uzavřené. Diferenciace jedné úlohy odlišností základních parametrů zkoumaného systému zvyšuje u žáků motivaci k bádání a při současném zachování kompetitivní složky dává každé ze zúčastněných skupin možnost realizovat své originální měření, dosáhnout vlastního úspěchu a jedinečnými výsledky samostatně realizovaného experimentu zaujmout žáky ostatních skupin. To je pak důležité pro závěrečnou prezentaci a diskusi. V případě dílčího neúspěchu naopak není konkrétní skupina vystavena takovému tlaku plynoucímu ze srovnávání výsledků stejného úkolu.



Obr. 53: Schéma organizačního a časového rozvržení laboratorní úlohy

Kvůli vzájemnému ovlivňování nemohou měření jednotlivých skupin probíhat současně. Řešením je, z pozice vyučujícího měřicím skupinám přidělit čísla a postupovat při měření v pořadí podle čísel skupin. Další domluvu a organizaci je vhodné ponechat na žácích samotných. Po dobu probíhajícího měření jednotlivých skupin (cca. 60 až 120 sekund) je nutné omezit hlasitou verbální komunikaci a hluk ve třídě. To klade obecně vyšší požadavky na disciplínu a nácvik efektivní neverbální komunikace mezi členy skupiny i mezi skupinami navzájem.

Při měření rychlosti zvuku přímou metodou se žáci střídají na jednom až dvou dalších stanovištích. Měření a vyhodnocení výsledků je rychlé, trvá jen zhruba 5 až 10 minut. Je vhodné nechat na žácích samotných, jak provedení této druhé části úlohy zorganizují – zda si vícečlenná skupina rozdělí úkoly nebo měření přímou metodou bude provádět celá skupina. Zdánlivě stejný úkol díky možné variaci umístění mikrofonů vede k originálnímu výsledku měření každé skupiny. Prvek samostatnosti, experimentování a tvůrčího řešení úlohy zde má přednost před jednotvárným vykonáváním instrukcí tradičního laboratorního měření. Jednoduchost přímé metody měření naopak dává prostor kreativitě řešení. V případě

nedostatku času provede vyhledání tabulkových hodnot a teoretický výpočet prioritně skupina, která je s oběma metodami měření nejdříve hotová a následně je prezentuje ostatním skupinám. Zkušenost ovšem ukázala, že v silně heterogenních skupinách je rozumným krokem provést diferenciaci úlohy s ohledem na schopnosti a dovednosti konkrétních žáků. Jedna až dvě skupiny dovednostně nejpokročilejších žáků se tak mohou věnovat komplikovanějšímu počítačem řízenému experimentu analýzy stojatého vlnění při změně frekvence, zatímco pro další skupiny je vhodné měření tradiční školskou metodou změny délky sloupce při konstantní frekvenci buzení a nebo jednoduchou metodou vyhodnocování časového zpoždění na určité dráze. Díky tomu mohou všichni žáci realizovat měření metodou odpovídající jejich aktuálním schopnostem.

Na závěr doporučuji vždy nechat jednotlivé měřicí skupiny prezentovat výsledky svého měření před ostatními skupinami a provést společné shrnutí zjištěných vlastností zkoumaných fyzikálních jevů. Na tuto část je vhodné vyhradit 15 až 30 minut času. Prezentace výsledků se přitom opírá o vizualizaci časových průběhů akustického tlaku a frekvenčních spekter akustického tlaku zaznamenaných zvukových stop ve zvukových editorech a tabulku naměřených hodnot a grafické zobrazení výsledků v MS Excel. Šablona pro zpracování měření a ukázka výsledků měření je umístěna na CD-ROM ve složce „K4 Laboratorní úloha“ v souboru „Šablona rychlost zvuku“. Ukázka vyhodnocení měření je umístěna v souboru „Ukázka vyhodnocení měření rychlosti zvuku“.

4 Shrnutí

Disertační práce zkoumá možnosti modernizace výuky o zvuku a zvukové technice na středním stupni vzdělávání zavedením nového mezioborového výukového konceptu akustiky a digitálního zpracování zvukového signálu. Výchozím bodem návrhu konceptu je kritické didaktické zhodnocení a didaktická interpretace stávajících výukových konceptů akustiky nejčastěji používaných učebnic fyziky a vlastní formativní pedagogický výzkum v podobě dotazníkového šetření vstupních představ cílové skupiny žáků střední školy o zvuku a zvukových jevech, jejich fyzikálních modelech a veličinách pro popis zvuku.

Hlavní část disertační práce tvoří vlastní výukový koncept rozdělený do čtyř kapitol. První kapitola se reviduje středoškolské formulace fyzikální akustiky a zavádí jednotný model zvuku objektivně popisovaného primárně veličinou akustický tlak a jejím hladinovým vyjádřením. Druhá kapitola pomocí tohoto modelu vysvětluje základy číslicového zpracování zvuku a analýzy digitálních zvukových signálů v časovém i ve frekvenčním oboru. Třetí kapitola objasňuje základní principy funkce digitální akustické měřicí a záznamové techniky. Zaměřuje se zejména na měření akustického tlaku pomocí elektretových kapacitních snímačů použitých dále ve čtvrté kapitole při návrhu počítačem řízeného a vyhodnocovaného měření rychlosti zvuku. Modernizaci této tradiční středoškolské laboratorní úlohy zahrnuje jak měření rychlosti zvuku metodou vyhodnocování časového zpoždění na dráze mezi dvěma snímači akustického tlaku, tak i metodami založenými na vyhodnocování jevů vznikajících při snímání harmonicky kmitajícího zdroje zvuku dvěma různě vzdálenými senzory a analýze záznamů akustického tlaku ve zvukovém poli stojatého zvukového vlnění vybuzeného testovacím signály v trubicových akustických interferometrech.

Celý koncept kromě jednotného modelu zvuku propojuje metodika použití digitální počítačové techniky a zvukového softwaru pro kvantitativně vyhodnocované experimenty a měření v akustice. Každá kapitola je doplněna demonstračními experimenty, ukázkami a praktickým workshopem s žákovskými experimenty sloužícími jako příprava na projektovou výuku akustiky, v níž má u žáků dojít jak k tvůrčí aplikaci učiva konceptu, tak k dalšímu samostatnému utváření vědomostí a dovedností práce se zvukem.

Seznam použité literatury

- [1] ALTENBURG, K., SCHALLREUTER, W. *Grimsehl: Lehrbuch der Physik*. 25. vydání. Leipzig: Teubner, 1989, 424 s. ISBN 3-322-00252-7
- [2] ANDERSON, Herbert S. a Floyd C. OSTENSEN. Effect of Frequency on the end Correction of Pipes. *Physical Review*. 1928, vol. 31, issue 2, s. 267 274. DOI: 10.1103/PhysRev.31.267. Dostupné z: <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRev.31.267>
- [3] ANTON, Gisela; DURST, Jürgen a Angela FÖSEL. *Erlanger SchülerForschungs-Zentrum für Bayern (ESFZ)* [online]. Erlangen: Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg [cit. 2014-06-30]. Dostupný z: <http://www.esfz.nat.uni-erlangen.de/>
- [4] BEYERDYNAMIC. *MM 1: Measurement Microphone: Product Information* [online]. Heilbronn (DE): Beyerdynamic, 2006 [cit. 2014-06-01]. Dostupný z: http://eastern-europe.beyerdynamic.com/shop/media/usermanual/MM1_BA_DEF_A5.pdf
- [5] BOELKES, Taylor a Ingrid HOFFMANN. Pipe Diameter and End Correction of a Resonant Standing Wave. *ISB Journal of Physics*. 2011, vol. 5, issue 1 (January 2011). ISSN 1906-862X. Dostupné z: <http://www.isb.ac.th/hs/jop/vol5iss1/Papers/1EndCorrection.pdf>
- [6] BOHN, Dennis A. Environmental Effects on the Speed of Sound. *J. Audio Eng. Soc.* 1988, vol. 36, no. 4 (April 1988), s. 223 231. Dostupné z: <http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=5156>
- [7] BOSI, Marina a GOLDBERG, Richard E. *Introduction to digital audio coding and standards*. Berlin: Springer, 2003. xix, 434 s. The Springer international series in engineering and computer science; 721. ISBN 1-4020-7357-7.
- [8] DITTMANN, Helmut. Physiologische aspekty der Akustik. In *Vysokoškolské demonstrační experimenty z fyziky: Sborník z workshpů*, Plzeň: ZČU, 2001. s. 83–90. ISBN: 80-7082-716-5.
- [9] DVORÁK, Leoš. Rychlost zvuku stokrát jinak. In *Souhrnný sborník Veletrhu nápadů učitelů fyziky* [on-line]. 2007. Dostupné z: <http://vnuf.cz/sbornik/prispevky/12-21-Dvorak.html>
- [10] European Commission: Education, Audiovisual & Culture Executive Agency. *Organisation of the education system in the Czech Republic 2009/10*. EURYDICE data base. Dostupné z: http://eacea.ec.europa.eu/education/eurydice/eurybase_en.php
- [11] HALLIDAY, David et al. *Fyzika: vysokoškolská učebnice obecné fyziky. Část 2, Mechanika - Termodynamika*. Vyd. 1. Brno: VUTIM, 2000. viii, s.330-576, [35] s. příloh. Překlady vysokoškolských učebnic; sv. 1. ISBN 80-214-1868-0.
- [12] HARTMANN, William M. *Signals, sound and sensation*. New York: Springer, ©1998. xvii, 647 s. Modern acoustics nad signal processing. ISBN 1-56396-283-7.
- [13] HASKELL, Robert E. *Transfer of Learning: Cognition and Instruction*. New York: Academic Press, 2001. ISBN: 978-0-1233-0595-4
- [14] HELMHOLTZ, Hermann von: *Die Lehre von den Tonempfindungen als physiologische Grundlage für die Theorie der Musik*. Braunschweig: Verlag F. Vieweg, 1862.
- [15] HERRMANN, Friedrich. *Der Karlsruher Physikkurs. Ein Lehrbuch für den Unterricht der Sekundarstufe I. Teil 2. Daten, Elektrizität, Licht*. 6. Auflage Oktober 2003. Köln: Aulis Verlag Deubner, 2003.

- [16] HERRMANN, Friedrich. *Der Karlsruher Physikkurs. Ein Lehrbuch für den Unterricht der Sekundarstufe I. Teil 3. Reaktionen, Wellen, Atome*. Verbesserte Auflage 2002. Köln: Aulis Verlag Deubner, 2003.
- [17] HESTENES, David, WELLS, Malcolm a SWACKHAMER, Gregg. Force Concept Inventory. In *The Physics Teacher* Vol. 30, March 1992, s. 141-158.
- [18] HESTENES, David, WELLS, Malcolm. A Mechanics Baseline Test. In *The Physics Teacher* Vol.30, March 1992, s. 159-166.
- [19] HUBENÁK, Josef. Přímé měření rychlosti zvuku. In *Souhrnný sborník Veletrhu nápadů učitelů fyziky* [on-line]. 2001 Dostupné z: <http://vnuf.cz/sbornik/prispevky/06-09-Hubenak.html>
- [20] HUBER, David Miles a RUNSTEIN, Robert E. *Modern recording techniques*. 6th ed. Amsterdam: Elsevier, ©2005. xix, 652 s. ISBN 0-240-80625-5.
- [21] CHARALAMBIDIS, Alexandros, CÍSAŘ, Zbyněk a HURNÍK, Lukáš. *Hudební výchova 2: pro gymnázia*. 1. vyd. Praha: SPN - pedagogické nakladatelství, 2003. 191 s. ISBN 80-7235-219-9.
- [22] CHRÁSKA, Miroslav. *Metody pedagogického výzkumu: základy kvantitativního výzkumu*. Vyd. 1. Praha: Grada, 2007. 265 s. Pedagogika. ISBN 978-80-247-1369-4.
- [23] INGLE, Vinay K. a PROAKIS, John G. *Digital signal processing using MATLAB*. 2nd ed. Toronto: Nelson, ©2007. xiv, 605 s. BookWare companion series. ISBN 978-0-495-07311-6.
- [24] IQBAL, Syed Rashad a MAJEED, Hudhaifa Mazin Abdull. End Correction of a Resonant Standing Wave in Open Pipes of Different Diameters. *Journal of Natural Sciences Research*. 2013, vol. 3, issue 4, s. 21-24. ISSN 2225-0921. Dostupné z: <http://www.iiste.org/Journals/index.php/JNSR/article/viewFile/4896/4974>
- [25] JIŘÍČEK, Ondřej. *Úvod do akustiky*. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002. 146 s. ISBN 80-01-02460-1.
- [26] KADLEC, František. *Zpracování akustických signálů*. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002. 189 s. ISBN 80-01-02588-8.
- [27] KINGSTATE ELECTRONICS. *Electret Condenser Microphone: KECG2742CBL-A: MKD-7218* [online]. Edition 1.2. Taiwan: Kingstate Electronics, 2006 [cit. 2011-07-15] Dostupný z: www.farnell.com/datasheets/97498.pdf
- [28] KINGSTATE ELECTRONICS. *Electret Condenser Microphone: KECG2742PBL-A: MKD-7161* [online]. Edition 1.2. Taiwan: Kingstate Electronics, 2006 [cit. 2011-07-15] Dostupný z: www.farnell.com/datasheets/1696445.pdf
- [29] LD DIDACTIC. *LD Didactic* [online]. LD Didactic, [cit. 2015-06-05]. Dostupný z: <http://www.ld-didactic.de/>
- [30] *Lehrplan Gymnasium, Gewichtete Fassung: Physik, Klassen- und Jahrgangsstufen 6–12*. Dresden: Sächsisches Staatsministerium für Kultus. Juni 2001. Dostupné z: <http://www.sn.schule.de/~physik/physik.pdf>
- [31] *Lehrplan Gymnasium: Physik*. Dresden: Sächsisches Staatsministerium für Kultus und Sport, 2011. Dostupné z: http://www.schule.sachsen.de/lpdb/web/downloads/lp_gy_physik_2011.pdf?v2
- [32] LEPIL, Oldřich, BEDNAŘÍK, Milan a HÝBLOVÁ, Radmila. *Fyzika pro střední školy I*. Dotisk 4., přeprac. vyd. Praha: Prometheus, 2001. 266 s. Učebnice pro střední školy. ISBN 80-7196-184-1.

- [33] LEPIL, Oldřich, BEDNAŘÍK, Milan a HÝBLOVÁ, Radmila. *Fyzika pro střední školy I*. 5. přeprac. vyd. Praha: Prometheus, 2012. 253 s. Učebnice pro střední školy. ISBN 978-80-7196-428-5.
- [34] LEPIL, Oldřich. *Demonstrujeme kmity netradičně*. 1. vyd. Praha: Prometheus, 1996. 55 s. Praxe učitele matematiky - fyziky - informatiky; roč. 2 (1996). ISBN 80-7196-028-4.
- [35] LEPIL, Oldřich. *Fyzika pro gymnázia. Mechanické kmitání a vlnění*. 1. vyd. Praha: Prometheus, 1994. 135 s. Učebnice pro střední školy. ISBN 80-901619-6-0.
- [36] LEPIL, Oldřich. *Fyzika pro gymnázia. Mechanické kmitání a vlnění*. 4. vyd. Praha: Prometheus, 2009. 129 s. ISBN 978-80-7196-387-5.
- [37] LERCH, Reinhard, SESSLER, Gerhard M., WOLF, Dietrich D. *Technische Akustik: Grundlagen und Anwendungen*. Springer Verlag, 2009.
- [38] MAŇÁK, Josef, ed. a ŠVEC, Vlastimil, ed. *Cesty pedagogického výzkumu*. Brno: Paido, 2004. 78 s. Pedagogický výzkum v teorii a praxi; sv. 1. ISBN 80-7315-078-6.
- [39] MANDÍKOVÁ, Dana, ČÍŽKOVÁ, Dita.: Prekoncepce studentů o síle a pohybu – výsledky testu FCI. PMFA, 55, č.2, JČMF 2010. s.148-154. CS-ISSN-0032-2423. Dostupný z: http://kdf.mff.cuni.cz/~mandikova/prekoncepty/PMFA%20_pdf
- [40] MANDÍKOVÁ, Dana, ČÍŽKOVÁ, Dita.: *Prekoncepce studentů o síle a pohybu*. In *Matematika–fyzika–informatika*. roč. 19. Praha: Prométheus, 2010. ISSN 1210-1761. Dostupný z: http://kdf.mff.cuni.cz/~mandikova/prekoncepty/MFI_pdf
- [41] MANDÍKOVÁ, Dana, TRNA Josef. *Žákovské prekoncepce ve výuce fyziky*. 1. vyd. Brno: Paido, 2011. 245 s. 336. ISBN 978-80-7315-226-0.
- [42] MANDÍKOVÁ, Dana. *Intuitivní představy žáků o elektrickém proudu a napětí*. Praha: Metodický portál VÚP, 2007. Dostupný z: www.rvp.cz/clanek/1144
- [43] *Matematické, fyzikální a chemické tabulky: pro SŠ a nižší ročníky víceletých gymnázií*. Bohumír Kotlík [et al.]. 1. vyd. Havlíčkův Brod: Fragment, 2003. 287 s. ISBN 80-7200-521-9.
- [44] *Matematické, fyzikální a chemické tabulky: Pro střední školy*. 12. vyd. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 1982. 346 s.
- [45] *Matematické, fyzikální a chemické tabulky: Pro střední školy*. 4. vyd. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 1970. 346 s.
- [46] MATHELITSCH, Leopold; VEROVNIK, Ivo. *Akustische Phänomene*. Praxis Schriftenreihe Physik. Köln: Aulis Verlag, Deubner&Co, 2004, ISBN: 978-3-7614-2532-9
- [47] MELKA, Alois. *Základy experimentální psychoakustiky*. 1. vyd. Praha: Akademie múzických umění, 2005. 327 s. Akustická knihovna Zvukového studia Hudební fakulty AMU; 5. ISBN 80-7331-043-0.
- [48] Ministerstvo školství, mládeže a tělovýchovy. *Učební dokumenty pro gymnázia. Učební plány, Učební osnovy. Osmiletý studijní cyklus, čtyřletý studijní cyklus*. Praha: Nakladatelství Fortuna, 1999. ISBN 80-7168-659-X. Dostupné z: http://www.vuppraha.cz/wp-content/uploads/2009/12/ucebni_dok_gymnazia.pdf
- [49] NIEMIERSKI, Bolesław. Taxonomies of Educational Goals as a Lead into Creative Teacher Training. In: *Polish Journal of Social Science*, Vol. IV No. 1 s. 93-106, Vydavatel: Mieczysław Plopa, Elbląg: Elbląg University of Humanities and Economy, 2009. ISSN 978-8-3891-1319-8

- [50] NOVOTNÝ, Ivan a HRUŠKA, Michal. *Biologie člověka: pro gymnázia*. 4.,rozš. a upr. vyd. Praha: Fortuna, 2007. 239 s. ISBN 978-80-7373-007-9.
- [51] PASCO. *PASCO* [online]. Roseville (Kalifornie): PASCO, c1996-2014 [cit. 2015-06-05]. Dostupný z: <http://www.pasco.com/>
- [52] PASCO. *PASCO.CZ* [online]. c2013 [cit. 2015-06-05]. Dostupný z: <http://www.pasco.cz/>
- [53] PETŘÍK, Josef a RAUNER, Karel. *Elektronika (digitální část)*. Vyd. 1. Plzeň: Západočeská univerzita, 2003. 105 s. ISBN 80-7082-776-9.
- [54] PETŘÍK, Josef. Počítačem podporované experimenty z akustiky využívající zvukové karty a měřicí jednotky ADDA navržené na KOF, In *Vysokoškolské demonstrační experimenty z fyziky: Sborník z workshpů*, Plzeň: ZČU, 2001. s. 68-82. ISBN: 80-7082-716-5.
- [55] PHYWE. *PHYWE: excellence in science* [online]. Göttingen: PHYWE, [cit. 2015-06-05]. Dostupný z: <http://www.phywe-systeme.com/>
- [56] PODOBSKÝ, Jaroslav. *Procházky akustikou: studijní materiál pro další vzdělávání učitelů fyziky. 1. část, Kmitání, vlnění, zvukové jevy, akustické útvary*. Hradec Králové: MAFY, 1999. 137 s. ISBN 80-86148-28-9.
- [57] PPOJECTS UNLIMITED. *POM-3044P-R* [online]. Dayton Ohio (US): Projects Unlimited c2006 [cit. 2014-06-01]. Dostupný z: www.puiaudio.com/pdf/POM-3044P-R.pdf
- [58] PRO SIGNAL. *ABM-705-RC* [online]. 2009 [cit. 2012-07-15]. Dostupný z: www.farnell.com/datasheets/1671459.pdf
- [59] PSUTKA, Josef et al. *Mluvíme s počítačem česky*. Vyd. 1. Praha: Academia, 2006. 746 s. Česká matice technická; roč. 111, č. spisu 502. ISBN 80-200-1309-1.
- [60] PUJOL, Rémy, et al. *Promenade around the cochlea* [online]. Montpellier (Francie), [cit. 2014-06-01]. Dostupné z: <http://www.cochlea.org>
- [61] *Rámcový vzdělávací program pro gymnázia*. [online]. Praha: Výzkumný ústav pedagogický v Praze, 2007. 100 s. [cit. 2013-02-20]. ISBN 978-80-87000-11-3. Dostupné z: http://www.vuppraha.cz/wp-content/uploads/2009/12/RVPG-2007-07_final.pdf.
- [62] *Rámcový vzdělávací program pro obor vzdělání 18-20-M/01 Informační technologie*. Praha: Ministerstvo školství, mládeže a tělovýchovy, 2008. [cit. 2013-02-20]. Dostupné z: <http://www.nuov.cz/ramcove-vzdelavaci-programy>
- [63] *Rámcový vzdělávací program pro obor vzdělání 26-41-M/01 Elektrotechnika*. Praha: Ministerstvo školství, mládeže a tělovýchovy, 2007. [cit. 2013-02-20]. Dostupné z: <http://www.nuov.cz/ramcove-vzdelavaci-programy>
- [64] *Rámcový vzdělávací program pro obor vzdělání 26-45-M/01 Telekomunikace*. Praha: Ministerstvo školství, mládeže a tělovýchovy, 2007. [cit. 2013-02-20]. Dostupné z: <http://www.nuov.cz/ramcove-vzdelavaci-programy>
- [65] *Rámcový vzdělávací program pro obor vzdělání 82-41-M/17 Multimediální tvorba*. Praha: Ministerstvo školství, mládeže a tělovýchovy, 2008. [cit. 2013-02-20]. Dostupné z: <http://www.nuov.cz/ramcove-vzdelavaci-programy>
- [66] *Rámcový vzdělávací program pro základní vzdělávání*. Praha: Výzkumný ústav pedagogický, 2007. [cit. 2013-02-20]. Dostupné z: <http://rvp.cz/informace/dokumenty-rvp/rvp-zv>

- [67] RAUNER, Karel et al. *Fyzika 8: učebnice pro základní školy a víceletá gymnázia*. 1. vyd. Plzeň: Fraus, 2006. 128 s. ISBN 80-7238-525-9.
- [68] RAUNER, Karel, HAVEL, Václav a PROKŠOVÁ, Jitka. *Fyzikální praktikum: magnetismus, kmity a vlnění, optika, atomová a jaderná fyzika. II*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 1999. 84 s. ISBN 80-7082-505-7.
- [69] RAUNER, Karel. *Elektronika (fyzikální a analogová část)*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2003. 199 s. ISBN 80-7082-775-0.
- [70] ROUBAL, Pavel. *Informatika a výpočetní technika pro střední školy: teoretická učebnice*. Vyd. 1. Brno: Computer Press, 2010. 103 s. ISBN 978-80-251-3228-9.
- [71] ROUBAL, Pavel. *Informatika a výpočetní technika pro střední školy: praktická učebnice*. Vyd. 1. Brno: Computer Press, 2010. 112 s. ISBN 978-80-251-3227-2.
- [72] SENGPIEL, Eberhard. *Forum für Mikrofonaufnahmetechnik und Tonstudioteknik* [online]. Berlin: Sengspielaudio, [cit.2011-04-14]. Dostupné z: <http://www.sengpielaudio.com>
- [73] SHURE. *KSM109: Cardioid Condenser Microphone: User Guide* [online]. Rev. 3. Niles (US): Shure, c2005 [cit. 2014-06-01]. Dostupný z: http://cdn.shure.com/user_guide/upload/900/us_pro_ksm109_en_ug.pdf
- [74] SPANIAS, Andreas, PAINTER, Ted a ATTI, Venkatraman. *Audio signal processing and coding*. Hoboken: John Wiley & Sons, 2007. xx, 464 s. ISBN 978-0-471-79147-8.
- [75] Staatsinstitut für Schulqualität und Bildungsforschung Abteilung Gymnasium. *Der Lehrplan für das Gymnasium in Bayern im Überblick*. 2. Auflage. München: 2010.
- [76] Staatsinstitut für Schulqualität und Bildungsforschung München. *Grundlagen der Biophysik. Handreichung für den Unterricht in der gymnasialen Oberstufe*. Augsburg: Brigg Pädagogik Verlag GmbH, 2009.
- [77] SVOBODA, Emanuel, HOUDEK, Václav a SVOBODA, Miroslav. *Pokusy z fyziky na střední škole*. 2. 1. vyd. Praha: Prometheus, 1997. 176 s. ISBN 80-7196-008-X.
- [78] SYROVÝ, Václav. *Hudební akustika*. 1. vyd. Praha: Akademie múzických umění, 2003. 427 s. Akustická knihovna Zvukového studia Hudební fakulty AMU; 2. ISBN 80-7331-901-2.
- [79] ŠNAJDER, Ľubomír a KIREŠ, Marián. *Práca s multimédiami: tematický zošit*. 1. vyd. Bratislava: Slovenské pedagogické nakladateľstvo, 2005. 48 s. Informatika pre stredné školy. ISBN 80-10-00422-7.
- [80] ŠPELDA, Antonín. *Hudební akustika: pro posluchače filosofických a pedagogických fakult a akademií múzických umění*. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 1978.
- [81] ŠVAŘÍČEK, Roman a kol. *Kvalitativní výzkum v pedagogických vědách*. Vyd. 1. Praha: Portál, 2007. 377 s. ISBN 978-80-7367-313-0.
- [82] TESAŘ, Jiří, JÁCHYM, František. *Fyzika 6 pro základní školu: Zvukové jevy, vesmír*. Brno: SPN – pedagogické nakladatelství, 2011. ISBN 978-80-7235492-4.
- [83] The Ministry of Education, Youth and Sport of the Czech Republic. *The Education System in the Czech Republic*. 2nd Edition, Prague: CERMAT, 2012. ISBN: 978-80-87601-12-9
- [84] The Nobel Prize in Physiology or Medicine 1961. *Nobelprize.org: The Official Web Site of The Nobel Prize* [online]. Nobel Media AB, c2013 [cit. 2014-06-01]. Dostupný z: http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/medicine/laureates/1961/

- [85] *The Virtual Laboratory*. Berlin: Max Planck Institute for the History of Science, 2001. ISSN 1866-4784. Dostupné z: http://vlp.mpiwg-berlin.mpg.de/index_html
- [86] VERNIER. *Vernier* [online]. Vernier, c2014 [cit. 2015-06-05]. Dostupný z: <http://www.vernier.com/>
- [87] VERNIER. *Vybavení pro výuku přírodovědných oborů* [online]. Edufor, c2009-2014 [cit. 2015-06-05]. Dostupný z: <http://www.vernier.cz/uvod/rozcestnik>
- [88] VLACHÝ, Václav. *Praxe zvukové techniky*. 2. vyd. Praha: Muzikus, ©2000. 257 s. ISBN 80-86253-05-8.
- [89] VOŠKÜHLER, Adrian. SOUNDS: Software zur Klanganalyse und Klangvisualisierung [software]. Freie Universität Berlin. Dostupný z: <http://didaktik.physik.fu-berlin.de/sounds/>
- [90] VOŠKÜHLER, Adrian; NORDMEIER, Volkhard: SOUNDS - Akustik mit der Soundkarte. In: *Lehren und Lernen mit neuen Medien*. Münster: LIT Verlag, 2006. Svazek 26, s. 102-104. ISBN 3-8258-9561-0.
- [91] VYŠŠÍ ODBORNÁ A STŘEDNÍ PRŮMYSLOVÁ ŠKOLA ELEKTROTECHNICKÁ PLZEŇ. *Školní vzdělávací program: Informační technologie* [online] 2012 [cit. 2014-06-01], 306 s. Dostupný z: http://www.spse.pilsedu.cz/wp-content/uploads/2013/02/SVP_IT_ISS.pdf
- [92] VYŠŠÍ ODBORNÁ A STŘEDNÍ PRŮMYSLOVÁ ŠKOLA ELEKTROTECHNICKÁ PLZEŇ. *Školní vzdělávací program: Elektrotechnika* [online]. 2011 [cit. 2014-06-01], 317 s. Dostupný z: http://www.spse.pilsedu.cz/wp-content/uploads/2013/02/%C5%A0VP_E1.pdf
- [93] VYŠŠÍ ODBORNÁ A STŘEDNÍ PRŮMYSLOVÁ ŠKOLA ELEKTROTECHNICKÁ PLZEŇ. *Školní vzdělávací program: Technické lyceum* [online]. 2010 [cit. 2014-06-01], 324 s. Dostupný z: http://www.spse.pilsedu.cz/wp-content/uploads/2013/02/SVP_TL.pdf
- [94] WATKINSON, John. *The art of digital audio*. 3rd ed. Oxford: Focal Press, ©2001. xiv, 752 p. ISBN 0-240-51587-0.
- [95] WULF, Patrick, EULER, Manfred. Ein Ton fliegt durch die Luft. Vorstellungen von Primarstufenkindern zum Phänomenbereich Schall. In: MÜLLER, Rainer, WODZINSKI, Rita a HOPF Martin. *Schülervorstellungen in der Physik*. Köln: Aulis Verlag Deubner + Co, 2007.
- [96] ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA. *Bav se vědou: Středoškolská odborná činnost – seminární práce a projekty* [online]. Plzeň: ZČU, [cit. 2015-04-17]. Dostupný z: <http://bavsevedou.zcu.cz/zaci/soc-prace/>
- [97] ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA. *Systematická podpora popularizace výzkumu a vývoje ZČU: Přednášky pro základní a střední školy* [online]. Plzeň: ZČU [cit. 2014-06-01]. Dostupný z: http://sppvav.zcu.cz/prozajemce/Pro_ZS_SS/nabidkaprednasek.html
- [98] ZÖLZER, Udo. *Digital audio signal processing*. Chichester: John Wiley & Sons, 1997. 279 s. ISBN 0-471-97226-6.

Seznam publikovaných prací studenta

- [Aich01] AICHINGER, D. *Využití jevů fyziologické akustiky při digitálním zpracování audiosignálů*. Plzeň, 2007. Diplomová práce. Západočeská univerzita, Fakulta pedagogická. Vedoucí práce Josef Petřík.
- [Aich02] AICHINGER, D. Demonstrační experimenty v psychoakustice. In *Veletrh nápadů učitelů fyziky 13*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2008. s. 279–284. ISBN: 978-80-7043-728-5
- [Aich03] AICHINGER, D. Teaching Digital Signal Processing with MATLAB. In *Moderní trendy v přípravě učitelů fyziky 4*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2009. s. 70–73. ISBN: 978-80-7043-785-8
- [Aich04] AICHINGER, D., ADAMI, A., BELGHAOUTI, I. From EUREKA dream to DAB reality: A report from user's point of view. In *10th Workshop Digital Broadcasting*. Stuttgart: Fraunhofer Verlag, 2009. s. 34–42. ISBN: 978-3-8396-0054-2
- [Aich05] AICHINGER, D., MEYN, J. Vom Gehör zur MP3: Interdisziplinäre Ansätze zur Akustik im Physikunterricht. In *PhyDid B: Beiträge zur Frühjahrstagung des Fachverbandes Didaktik der Physik der Deutschen Physikalischen Gesellschaft*. [online]. Berlin, 2011. ISSN: 2191-379X
- [Aich06] AICHINGER, D. Měření rychlosti zvuku ve vzduchu metodou hřebenového filtru. In *Moderní trendy v přípravě učitelů fyziky 5*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2011. s. 11–19. ISBN: 978-80-261-0030-0
- [Aich07] AICHINGER, D., BEZDĚK, J., FEIFERLÍKOVÁ, R., PLZÁK, J. Objektivní analýza pěveckého hlasu ve výuce zpěvu. In *Media4u Magazine*. [online]. Praha, 2013. ISSN: 1214 – 9187
- [Aich08] AICHINGER, D. Měřicí systém pro žákovské experimenty v akustice, Část 1. - Akustické senzory pro žákovské experimenty. In *Media4u Magazine*. [online]. Praha, 2013. ISSN: 1214 – 9187

Seznam obrázků

Obr. 1: Grafické modely postupného podélného vlnění.....	26
Obr. 2: Podélné stojaté vlnění vzduchového sloupce v jednostranně uzavřené trubici	35
Obr. 3: Umějí žáci pojmenovat časové průběhy základních typů zvuků?.....	49
Obr. 4: Obrázky k určení žáky preferovaného grafického modelu zvuku.....	50
Obr. 5: Schéma rozdělení jednotlivých úrovní výukového konceptu	59
Obr. 6: Časový průběh výchylky ustáleného harmonického kmitání.....	64
Obr. 7: Časový průběh kmitání čistého tónu a složeného tónu	66
Obr. 8: Časový průběh kmitání pro jednotkový a tónový puls a bílý šum	66
Obr. 9: Schématické znázornění vzniku podélného mechanického vlnění vzduchu.....	70
Obr. 10: Prostorové rozložení akustického tlaku v rovinné postupné podélné vlně.....	71
Obr. 11: jednodimenzionální nespojitý model látkového prostředí v rozvlněném stavu	75
Obr. 12: Interpolovaný průběh výchylky podélného kmitání nekonečné řady kyvadel	77
Obr. 13: Časový průběh sekvence tónů s konstantním krokem zvyšováním amplitudy	83
Obr. 14: Časový průběh sekvence tónů s postupným zdvojnásobováním amplitudy	83
Obr. 15: Grafické znázornění stupnice hladin akustického tlaku v decibelech	86
Obr. 16: Interpolovaný časový průběh harmonického kmitání s frekvencí.....	91
Obr. 17: Ukázka vzorkování harmonických signálů	92
Obr. 18: Znázornění příčiny aliasingu harmonických signálů	93
Obr. 19: Princip počítání v binární číselné soustavě na prstech levé ruky	98
Obr. 20: Rozhodovací diagram postupné aproximace hodnoty vzorku stejnosměrné veličiny.....	102
Obr. 21: Rozhodovací diagram aproximace hodnoty vzorku střídavé veličiny typ mid-tread.....	104
Obr. 22: Rozhodovací diagram aproximace hodnoty vzorku střídavé veličiny typ mid-rise	105
Obr. 23: Princip vzniku časového průběhu kvantizační odchylky.	109
Obr. 24: Detail časového průběhu kvantizační odchylky.....	110
Obr. 25: Blokové schéma řetězce pro snímání akustického tlaku	113
Obr. 26: Schématické znázornění směrových charakteristik citlivosti akustických senzorů.	116
Obr. 27: Schématické znázornění významu přenosového faktoru	118
Obr. 28: Frekvenční charakteristika senzoru Projects Unlimited POM-3044P-R.....	119
Obr. 29: Frekvenční charakteristiky měřicího mikrofonu Beyerdynamic MM1	120
Obr. 30: Schéma elektrického zapojení elektretové mikrofonní vložky	123
Obr. 31: Mikrofonní vložka vestavěná do hliníkové trubičky a sluchátkového konektoru.....	125
Obr. 32: Osazení konektorů pro připojení externích mikrofonů k PC a mobilním zařízením.....	126
Obr. 33: Chytrý mobilní telefon s připojeným externím měřicím mikrofonem	126
Obr. 34: Schéma vzájemného vztahu hladin akustického tlaku a vybuzení A/D-převodníku.....	128
Obr. 35: Naměřené průběhy přenosové funkce senzoru KECG2742PBL-A	129
Obr. 36: Naměřené průběhy přenosové funkce senzoru KECG2742PBL-A s logaritmickými osami.....	129
Obr. 37: Blokové schéma základního principu kalibrace senzoru zvuku.....	131
Obr. 38: Schématické znázornění fyzikálního principu funkce tlakové komory	132
Obr. 39: Prototyp jednoduchého kalibrátoru měřicích mikrofonů s tlakovou komorou	132
Obr. 40: Kalibrace měřicího mikrofonu v jednom z prototypů tlakové komory.....	133
Obr. 41: Schéma umístění mikrofonů a zdroje zvuku při měření rychlosti zvuku ve vzduchu.....	136
Obr. 42: Časový průběh zaznamenaných mikrofonních signálů.....	137
Obr. 43: Schéma umístění zdroje zvuku a mikrofonů pro vznik jevu hřebenového filtru	140
Obr. 44: Časový průběh a spektrum součtového signálu pro $\Delta s = 0,25$ m.....	142
Obr. 45: Časový průběh a spektrum součtového mikrofonního signálu pro $\Delta s = 0,540$ m.....	143
Obr. 46: Časový průběh a spektrum součtového signálu pro $\Delta s = 0,869$ m.....	143
Obr. 47: Schéma vzniku stojatého vlnění v jednostranně uzavřené trubici.....	149
Obr. 48: Schéma rozložení akustického tlaku v jednostranně otevřené trubici délky	150
Obr. 49: Časový průběh a spektrum nízkofrekvenční odezvy jednostranně uzavřené trubice	153
Obr. 50: Směrové charakteristiky měřicího a nástrojového mikrofonu	154
Obr. 51: Spektrální analýza signálů skalárního a gradientního snímače	155
Obr. 52: Schéma rozložení akustického tlaku v oboustranně otevřené trubici délky	155
Obr. 53: Schéma organizačního a časového rozvržení laboratorní úlohy	158

Seznam tabulek

Tab. 1: Přehled dílčích cílů disertační práce	14
Tab. 2: Pomůcka pro rychlý odhad velikosti vlnové délky ve vzduchu z frekvence kmitání.	70
Tab. 3: Schématické znázornění časového průběhu kmitání pružně-hmotného elementu	77
Tab. 4: Hodnoty hladin akustického tlaku pro zdvojnásobování velikosti akustického tlaku	85
Tab. 5: Hodnoty hladin akustického tlaku pro zdesetinásobování velikosti akustického tlaku	85
Tab. 6: Souvislost hladinového vyjádření akustického tlaku a intenzity pro zdvojnásobování	88
Tab. 7: Souvislost hladinového vyjádření akustického tlaku a intenzity pro zdesetinásobování	88
Tab. 8: Vzorkovací frekvence f_s , časové trvání vzorku T_s , šířka přenášeného pásma B	95
Tab. 9: Dekadické číselné hodnoty g -tého řádu desítkové číselné soustavy pro její nejnižší řády	97
Tab. 10: Dekadické číselné hodnoty w -tého řádu pro nejnižší řády dvojkové číselné soustavy	97
Tab. 11: Binární kódy 4 a 5 bitových čísel dvojkové číselné soustavy	99
Tab. 12: Základní parametry W -bitových převodníků typu mid-tread (s nulou)	107
Tab. 13: Datový tok monofonních audio stop	111
Tab. 14: Orientační velikost zvukového souboru	111
Tab. 15: Přehled základních parametrů testovaných elektretových mikrofonních vložek	124
Tab. 16: Příklady parametrů vybraných prototypů jednoduchých kalibrátorů	133
Tab. 17: Teoretické hodnoty rychlosti zvuku	138

Summary

<i>An interdisciplinary concept for teaching acoustics and digital audio processing</i>

Acoustics at secondary level schools in Czech Republic in present days is being taught as an appendix of the physics lessons dealing vibrations and waves. There are of course still many themes related to sound being taught in other school subjects. However this happens often in such a way, that pupils don't recognize the physics behind. Teaching methods and inconsistent concepts of sound used in different school subjects can't fully explain the origin, transmission and reception of sound. Examples for this are the human hearing threaded in biology, a different sound concept used in music lessons, speech reception and production concepts as taught in language lessons and besides these just all the basic questions concerning daily sound phenomena in pupil's everyday life. Furthermore digital acoustic communication and sound processing plays an increasingly important role in our lives and shouldn't therefore be overlooked in the computer and multimedia lessons.

This dissertation thesis presents an interdisciplinary education concept for teaching acoustics and its applications in digital signal processing at secondary level schools. The thesis is divided into two parts: Part one summarizes normative governmental and curricular requirements, analyzes school books and surveys pupil's conceptions about sound. Part two suggests a new concept of teaching acoustics consisting of 4 chapters: Chapter 1 explains basics of physical acoustics. Chapter 2 introduces pupils into digital sound processing and audio coding. Chapter 3 deals with computer audio interface based measurement systems, that enable students to carry out quantitative experiments and measurements described in chapter 4, devoted to measuring the speed of sound in air using interference phenomena and standing sound waves in tubes.

Each chapter contains a workshop with instructed experiments near to real life applications that enable students to examine different set-ups, modify parameters and to hear and visualize the results. This helps the pupils to get the feel for the examined acoustic phenomena, improve their understanding of sound, motivates them to systematically try out and encourage them to use the knowledge and mastered skills in a productive way. Finally pupils have to solve problem situations in their own acoustic and audio projects.

Zusammenfassung

Ein interdisziplinäres Unterrichtskonzept für Akustik und digitale Audiosignalverarbeitung

Im Schulunterricht an der Sekundärstufe in der Tschechischen Republik wird Akustik meist nur als ein Randgebiet der Lehre von Schwingungen und Wellen behandelt. Dabei gibt es eine Reihe von fachübergreifenden Themen, die in den Rahmenbildungsprogrammen anderer Schulfächer stehen, mit den Methoden dieser Fächer aber nicht vollständig erklärt und übermittelt werden können. Beispiele dafür sind die Funktionsweise des menschlichen Gehörs, akustische Alltagsphänomene, musikalische Akustik, Sprachrezeption und Produktion oder die Anwendungen technischer Akustik im Alltag.

Die vorgelegte Dissertation stellt ein neues fächerübergreifendes Unterrichtskonzept für die Sekundärstufe II, konkret für technische Fachoberschulen und Gymnasium. Die Dissertation ist in zwei Teile gegliedert. Teil eins fasst normative Anforderungen für den Akustikunterricht an der Sekundärstufe II zusammen, untersucht Physiklehrbücher und erforscht Schülerkonzepte über den Schall. Teil zwei der Dissertation widmet sich dem eigentlichen Unterrichtskonzept für Akustik in vier Kapiteln. Kapitel 1 dient als Einführung in physikalische Akustik, Kapitel 2 behandelt Grundlagen digitaler Audiosignalverarbeitung, sowie der Zeitverlaufs- und Frequenzanalyse digitaler Audiosignale. Im Kapitel 3 wird akustische Messtechnik für Schülerexperimente vorgestellt, die im Kapitel 4 bei Messung der Schallgeschwindigkeit in Luft mittels Untersuchung von Interferenzphänomenen und stehenden akustischen wellen praktische Anwendung findet.

Jedes Kapitel des Konzeptes wird von angeleiteten Workshops begleitet, in denen Schüler lernen selbst produktiv zu arbeiten. Es werden fächerübergreifende Arbeits- und Unterrichtsmethoden vorgestellt, die es ermöglichen Themen aus dem Bereich Akustik und Audio im Unterricht zu behandeln. Direkte Sinneserfahrung wird dabei in den Vordergrund gestellt. Ausgehend von realen Experimenten und Simulationen zur akustischen Wahrnehmung sollen ihre Eigenschaften und Grenzen erarbeitet werden. Dies ermöglicht den Schülern die behandelten Phänomene selbst zu entdecken, mittels digitaler Signalverarbeitung auszuprobieren und anschließend im Projektunterricht kreativ anzuwenden.

Poděkování

Rád bych tímto poděkoval všem, kteří byli přímo či nepřímo nápomocni při vzniku této disertační práce. Předně děkuji školitelce doc. PaedDr. Jarmile Honzíkove Ph.D. z Fakulty pedagogické, Ing. Oldřichu Turečkovi Ph.D. z Fakulty elektrotechnické a pracovníkům Pedagogické knihovny Západočeské univerzity v Plzni. Dále děkuji Prof. Dr. Jan-Peter Meynovi, Dr. Angele Fösel, Prof. Dr. Gisele Anton, Dr. Jürgen Durstovi a Dr. Andreasu Strunzovi z fyzikálního institutu Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg, jakož i Prof. Dr.-Ing. Heinz Gerhäuserovi, Dr.-Ing. Bernhardu Grillovi a Dr.-Ing. Jürgen Herre z Fraunhoferova institutu v Tennenlohe. V neposlední řadě děkuji Ing. Liboru Firstovi a Ing. Mgr. Janu Plzákovi z Vyšší odborné a Střední průmyslové školy elektrotechnické v Plzni za podporu při ověřování konceptu ve výuce a realizaci dotazníkového šetření.

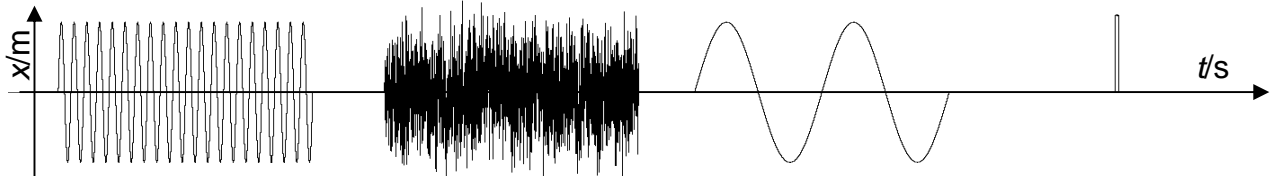
Přílohy

Příloha A: Dotazník k výzkumu představ studentů středních škol o zvuku

Škola _____ Třída _____ Věk _____ Muž / Žena

Zakroužkujte prosím vždy pouze jednu z nabízených odpovědí podle Vašeho vlastního úsudku.

1. Přiřaďte ke grafům časového průběhu kmitání název zvuku. Časové měřítko je pro všechny průběhy stejné.



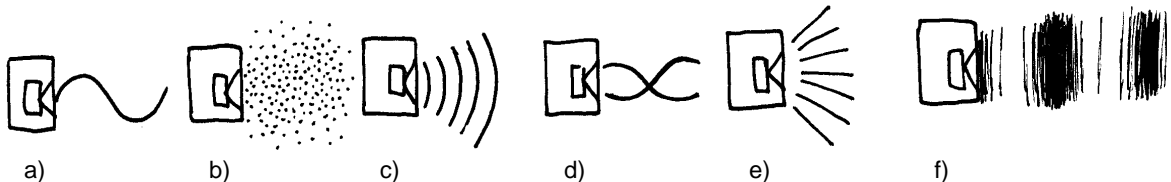
- 1.1 a) tón 100 Hz
b) tón 1 kHz
c) impuls
d) šum

- 1.2 a) tón 100 Hz
b) tón 1 kHz
c) impuls
d) šum

- 1.3 a) tón 100 Hz
b) tón 1 kHz
c) impuls
d) šum

- 1.4 a) tón 100 Hz
b) tón 1 kHz
c) impuls
d) šum

2. Který z následujících obrázků podle Vás nejlépe popisuje vznik a šíření zvuku ve vzduchu?



3. Rychlost zvuku ve vzduchu je přibližně 340 m/s. To znamená, že:

- a) Membrána reproduktoru kmitá ve vzduchu rychlostí 340 m/s.
b) Molekuly vzduchu kmitají kolem rovnovážné polohy rychlostí 340 m/s.
c) Oblasti lokálního přetlaku ve vzduchu kmitají kolem rovnovážné polohy rychlostí 340 m/s.
d) Molekuly vzduchu se pohybují od reproduktoru k posluchači rychlostí 340 m/s.
e) Zvukové částice se pohybují od reproduktoru k posluchači vzduchem rychlostí 340 m/s.
f) Tlakové změny ve vzduchu se pohybují od reproduktoru k posluchači rychlostí 340 m/s.

4. Když popisujeme šíření zvuku ve vzduchu pomocí kmitání elementů prostředí, jsou tím myšleny:

- a) jednotlivé atomy
b) prachové částice
c) objemové výseče vzduchu
d) jednotlivé molekuly vzduchu
e) fiktivní zvukové částice
f) myšlené výseče prostoru

5. Vlnová délka zvukového vlnění ve vzduchu pro čistý tón o frekvenci 1 kHz bude zhruba:

- a) 1 mm
b) 3 mm
c) 1 cm
d) 3 cm
e) 10 cm
f) 30 cm
g) 1 m
h) 3 m

6. Amplitudu výchylky kmitání zdvojnásobíme. Která veličina se podle Vás také zdvojnásobí?

- a) výška zvuku
b) hlasitost zvuku
c) rychlost kmitání elementů prostředí
d) tlakové změny v místě měření
e) intenzita zvuku
f) výkon zdroje zvuku

7. Když tlesknete, na kterém z následujících míst bude zvuk tlesknutí nejdéle doznívat?

- a) v koupelně
b) v ložnici
c) venku na louce
d) na schodišti domu
e) v kině
f) v tělocvičně

8. Který z následujících materiálů podle Vás pohltí při stejné ploše a tloušťce nejvíce zvuku?

- a) pěnový polystyren
b) beton
c) smrkové dřevo (masiv)
d) polyesterové rouno (vata)
e) pěnový polyuretan (molitan)
f) ocel

9. Kterou fyzikální veličinu snímá přístroj pro měření zvuku, takzvaný zvukoměr?



- a) hlasitost zvuku
b) intenzitu zvuku
c) akustický výkon zdroje zvuku
d) rychlost kmitání elementů prostředí
e) výchylku kmitání elementů prostředí
f) tlakové rozdíly v místě měření

10. S jakým časovým odstupem lidský sluch rozliší dva po sobě následující zvuky? Jsou to řádově:

- a) sekundy
b) desetiny sekundy
c) setiny sekundy
d) tisícin sekundy
e) desetitisíciny sekundy
f) stotisíciny sekundy

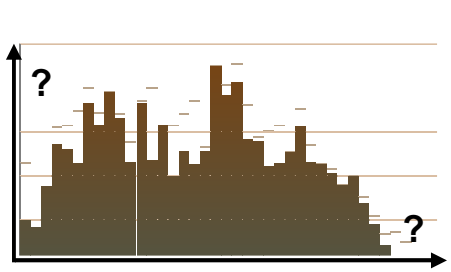
11. V jaké frekvenční oblasti je sluch zdravého člověka nejcitlivější?

- a) 250 Hz až 1 kHz
b) 1 kHz až 3 kHz
c) 3 kHz až 5 kHz
d) 5 kHz až 10 kHz
e) 10 kHz až 20 kHz
f) Je to silně individuální.

12. Decibel (zkratka dB) je:

- a) jednotka výchylky kmitání
b) míra síly zvuku
c) jednotka hlasitosti zvuku
d) stupeň škodlivosti hluku
e) relativní vyjádřením nějaké veličiny
f) jednotka intenzity zvuku

13. Na displeji MP3-přehrávače se zobrazuje graf spektrální analýzy. Závislost kterých dvou veličin znázorňuje?



13.1 Na vodorovné ose:

(zleva doprava)

- a) čas
b) vzdálenost
c) frekvence
d) výkon
e) barva zvuku

13.2 Na svislé ose:

(směrem zdola nahoru)

- a) intenzita
b) hlasitost
c) mechanická výchylka
d) relativní četnost
e) tlak

14. V souborech MP3 lze na jedno CD uložit až 20krát více hudby. Jak to podle Vás kodér MP3 dělá?

- a) Odstraní neslyšitelné zvuky.
b) Využívá, že se periodické zvuky opakují.
c) Odebere vysoké frekvence.
d) Uloží se jen frekvence, na kterých je nějaký zvuk.
e) Popisuje zvuk méně přesně tam, kde to není slyšet
f) Uloženy jsou jen hlasité zvuky.

15. Protihluková opatření mají snížit hluk o 2 decibely z 65 na 63 dB. Jak myslíte, že se sníží hlasitost hluku?

- a) Nebude slyšet už žádný hluk.
b) Hluk bude asi desetkrát méně hlasitý.
c) Hlasitost hluku se sníží asi na polovinu.
d) Slyšitelný rozdíl bude jen nepatrný.
e) Nebude to vůbec slyšitelný rozdíl.
f) Každý člověk bude změnu hlasitosti vnímat jinak.

16. Na základě čeho jste v dotazníku převážně volili odpovědi?

- a) Učili jsme se to na základní škole.
b) Učili jsme se to na střední škole.
c) Říkali mi to doma. (např. otec, děda)
d) Informace mám z médií.
e) Četl jsem odbornou literaturu.
f) Odpovědi jsem pouze odhadoval / odhadovala.

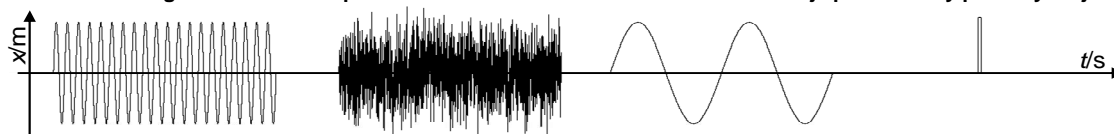
17. Vyznačte zakroužkováním čísla na stupnici, o čem byste se chtěli ve škole učit: (0 pro vůbec ne, 5 je nejvíce)

Hudební nástroje	0 --- 1 --- 2 --- 3 --- 4 --- 5	Hluk a jeho měření	0 --- 1 --- 2 --- 3 --- 4 --- 5
Lidský sluch	0 --- 1 --- 2 --- 3 --- 4 --- 5	Snímání a nahrávání zvuku	0 --- 1 --- 2 --- 3 --- 4 --- 5
Lidský hlas a řeč	0 --- 1 --- 2 --- 3 --- 4 --- 5	Digitální zpracování zvuku	0 --- 1 --- 2 --- 3 --- 4 --- 5
Využití ultrazvuku	0 --- 1 --- 2 --- 3 --- 4 --- 5	Datová komprese MP3	0 --- 1 --- 2 --- 3 --- 4 --- 5

Děkujeme za Vaši spolupráci.

Příloha B1.1: Grafy vyhodnocení odpovědí na otázku číslo 1.1

1. Přiřaďte ke grafům časového průběhu kmitání název zvuku. Časové měřítko je pro všechny průběhy stejné.



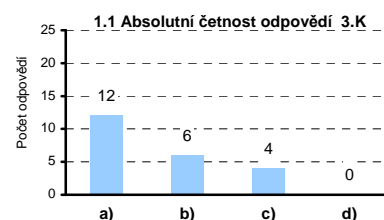
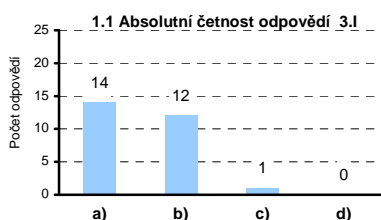
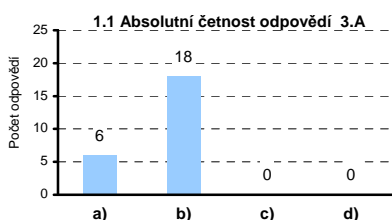
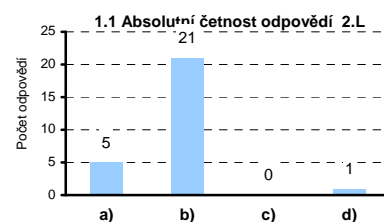
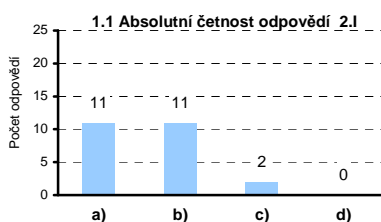
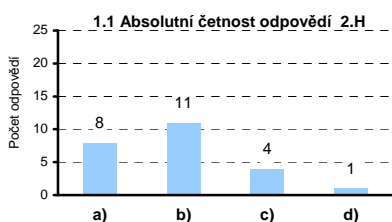
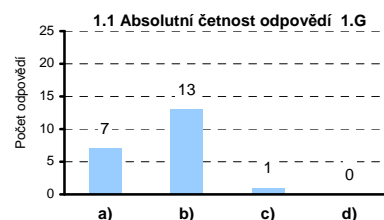
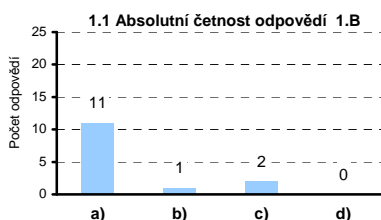
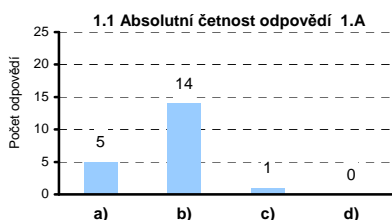
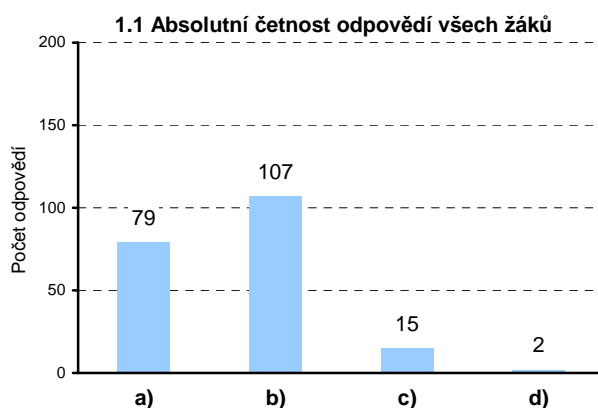
- 1.1 a) tón 100 Hz
b) tón 1 kHz
c) impuls
d) šum

- 1.2 a) tón 100 Hz
b) tón 1 kHz
c) impuls
d) šum

- 1.3 a) tón 100 Hz
b) tón 1 kHz
c) impuls
d) šum

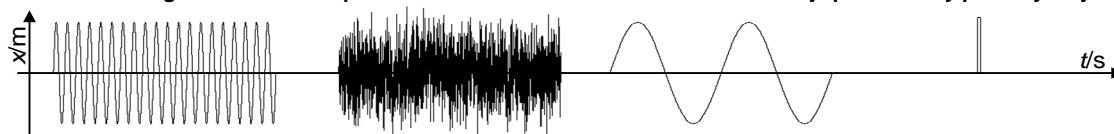
- 1.4 a) tón 100 Hz
b) tón 1 kHz
c) impuls
d) šum

Otázka 1.1				
Třída	a)	b)	c)	d)
1.A	5	14	1	
1.B	11	1	2	
1.G	7	13	1	
2.H	8	11	4	1
2.I	11	11	2	
2.L	5	21		1
3.A	6	18		
3.I	14	12	1	
3.K	12	6	4	
celkem	79	107	15	2
%	37%	50%	7%	1%



Příloha B1.2: Grafy vyhodnocení odpovědí na otázku číslo 1.2

1. Přiřaďte ke grafům časového průběhu kmitání název zvuku. Časové měřítko je pro všechny průběhy stejné.



- 1.1 a) tón 100 Hz
b) tón 1 kHz
c) impuls
d) šum

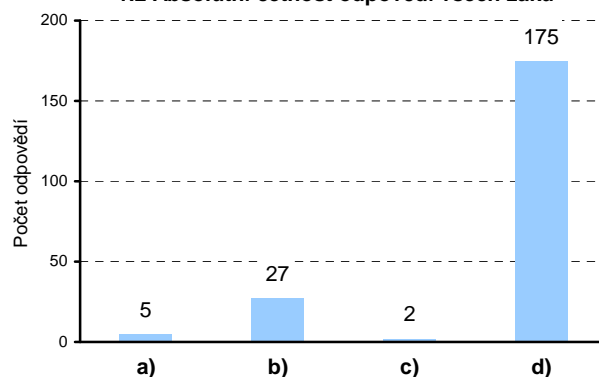
- 1.2 a) tón 100 Hz
b) tón 1 kHz
c) impuls
d) šum

- 1.3 a) tón 100 Hz
b) tón 1 kHz
c) impuls
d) šum

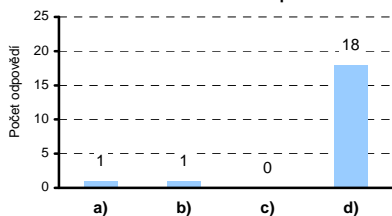
- 1.4 a) tón 100 Hz
b) tón 1 kHz
c) impuls
d) šum

Otázka 1.2				
Třída	a)	b)	c)	d)
1.A	1	1		18
1.B		4		11
1.G		2		21
2.H		6		18
2.I	2	3		20
2.L			2	25
3.A		1		24
3.I		5		22
3.K	2	5		16
celkem	5	27	2	175
%	2%	13%	1%	83%

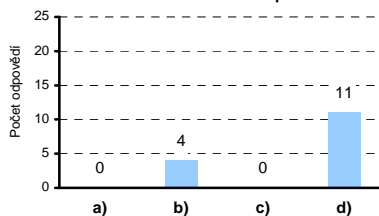
1.2 Absolutní četnost odpovědí všech žáků



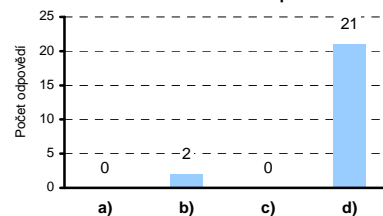
1.2 Absolutní četnost odpovědí 1.A



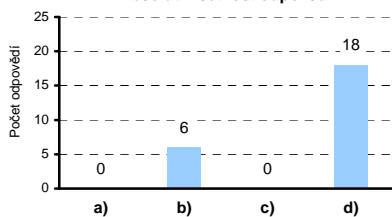
1.2 Absolutní četnost odpovědí 1.B



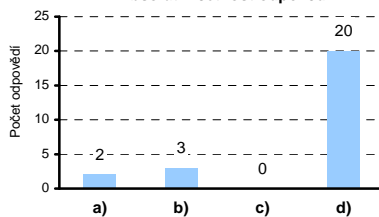
1.2 Absolutní četnost odpovědí 1.G



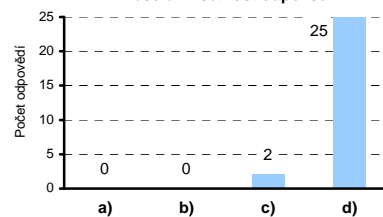
1.2 Absolutní četnost odpovědí 2.H



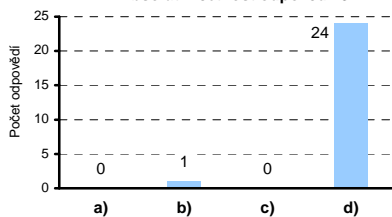
1.2 Absolutní četnost odpovědí 2.I



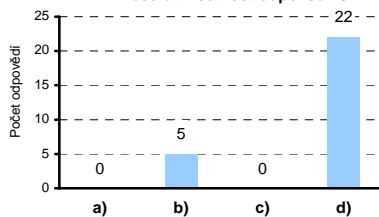
1.2 Absolutní četnost odpovědí 2.L



1.2 Absolutní četnost odpovědí 3.A



1.2 Absolutní četnost odpovědí 3.I

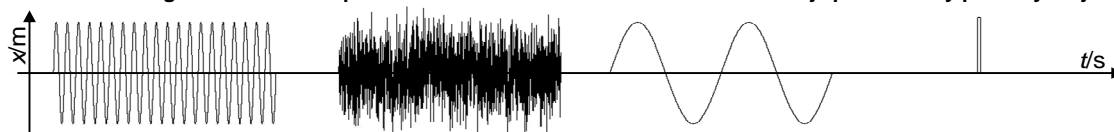


1.2 Absolutní četnost odpovědí 3.K



Příloha B1.3: Grafy vyhodnocení odpovědí na otázku číslo 1.3

1. Přiřadte ke grafům časového průběhu kmitání název zvuku. Časové měřítko je pro všechny průběhy stejné.



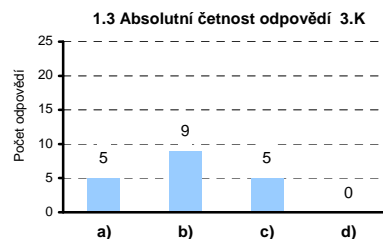
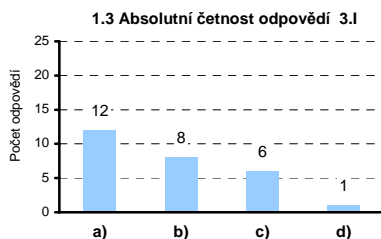
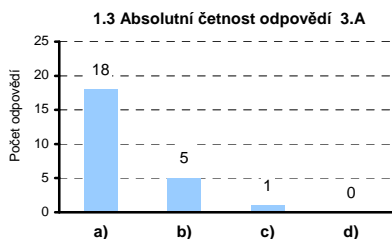
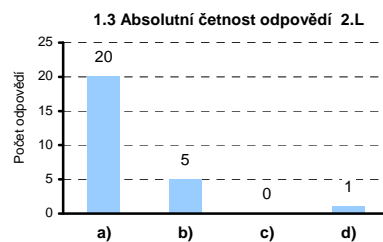
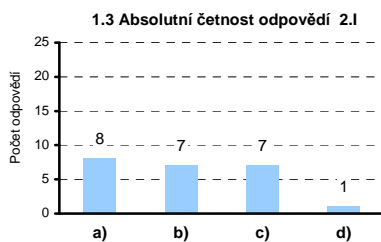
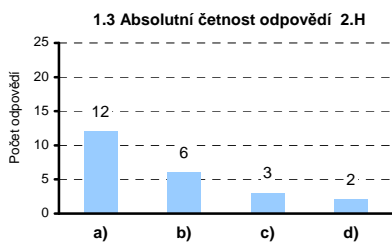
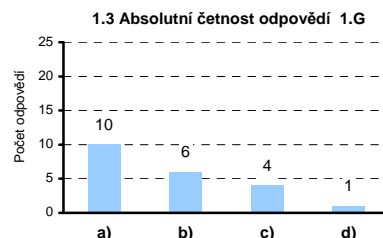
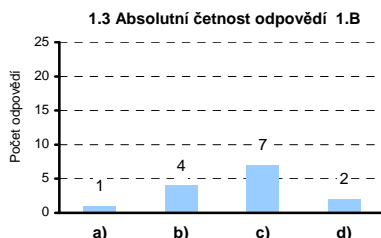
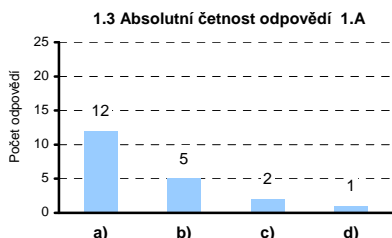
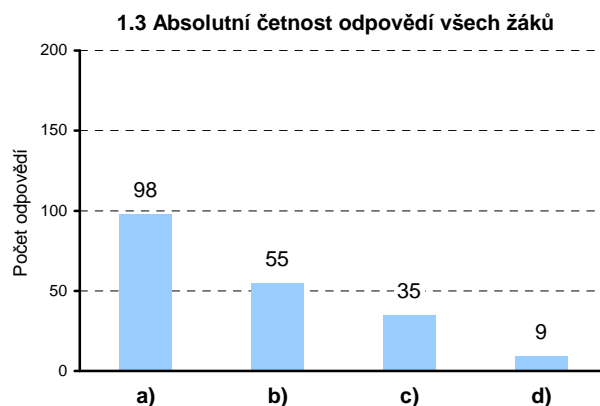
- 1.1 a) tón 100 Hz
b) tón 1 kHz
c) impuls
d) šum

- 1.2 a) tón 100 Hz
b) tón 1 kHz
c) impuls
d) šum

- 1.3 a) tón 100 Hz
b) tón 1 kHz
c) impuls
d) šum

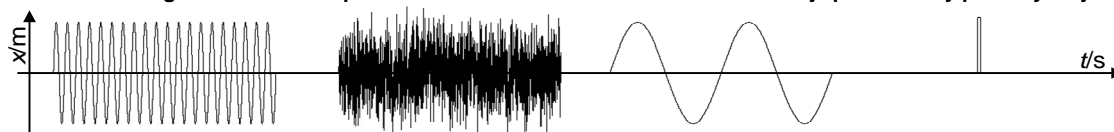
- 1.4 a) tón 100 Hz
b) tón 1 kHz
c) impuls
d) šum

Otázka 1.3				
Třída	a)	b)	c)	d)
1.A	12	5	2	1
1.B	1	4	7	2
1.G	10	6	4	1
2.H	12	6	3	2
2.I	8	7	7	1
2.L	20	5		1
3.A	18	5	1	
3.I	12	8	6	1
3.K	5	9	5	
celkem	98	55	35	9
%	46%	26%	17%	4%



Příloha B1.4: Grafy vyhodnocení odpovědí na otázku číslo 1.4

1. Přiřaďte ke grafům časového průběhu kmitání název zvuku. Časové měřítko je pro všechny průběhy stejné.



- 1.1 a) tón 100 Hz
 b) tón 1 kHz
 c) impuls
 d) šum

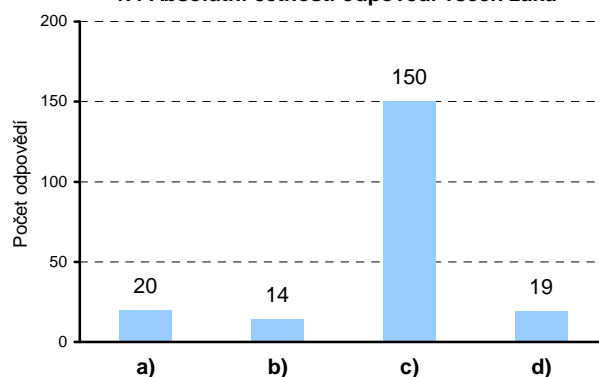
- 1.2 a) tón 100 Hz
 b) tón 1 kHz
 c) impuls
 d) šum

- 1.3 a) tón 100 Hz
 b) tón 1 kHz
 c) impuls
 d) šum

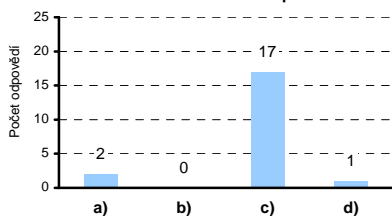
- 1.4 a) tón 100 Hz
 b) tón 1 kHz
 c) impuls
 d) šum

Otázka 1.4				
Třída	a)	b)	c)	d)
1.A	2		17	1
1.B	3	5	5	2
1.G	4		18	1
2.H	4	1	16	2
2.I	3	3	15	3
2.L	1	1	24	
3.A			23	1
3.I	1	2	20	4
3.K	2	2	12	5
celkem	20	14	150	19
%	9%	7%	71%	9%

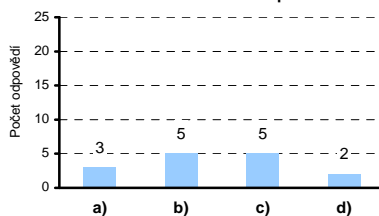
1.4 Absolutní četnosti odpovědí všech žáků



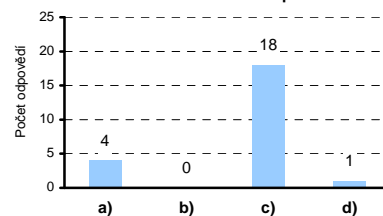
1.4 Absolutní četnosti odpovědí 1.A



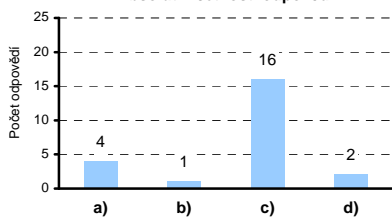
1.4 Absolutní četnosti odpovědí 1.B



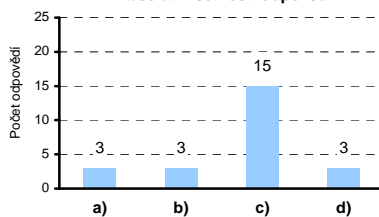
1.4 Absolutní četnosti odpovědí 1.G



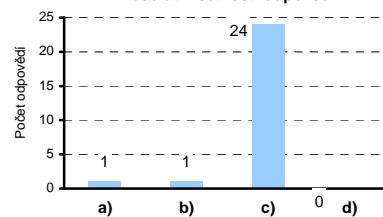
1.4 Absolutní četnosti odpovědí 2.H



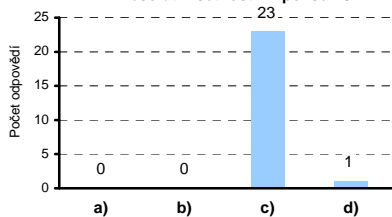
1.4 Absolutní četnosti odpovědí 2.I



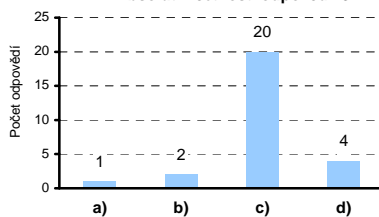
1.4 Absolutní četnosti odpovědí 2.L



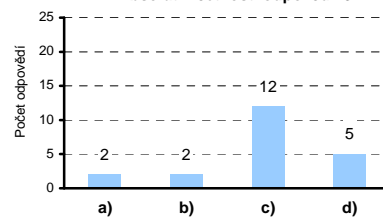
1.4 Absolutní četnosti odpovědí 3.A



1.4 Absolutní četnosti odpovědí 3.I

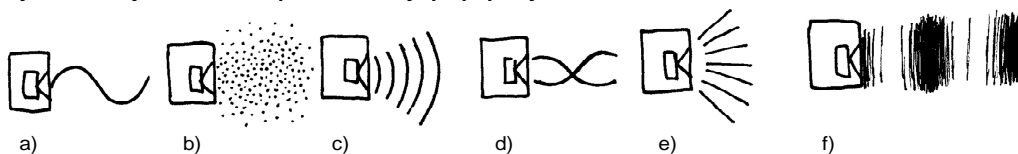


1.4 Absolutní četnosti odpovědí 3.K

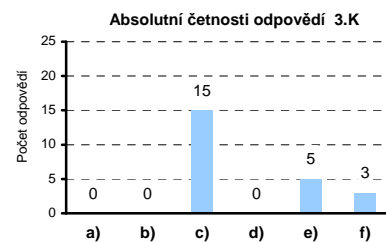
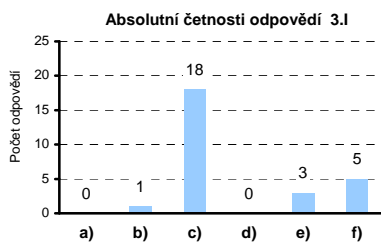
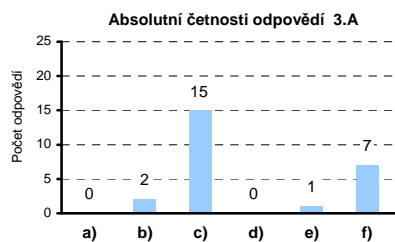
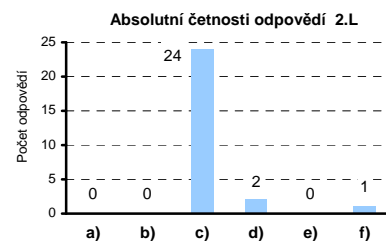
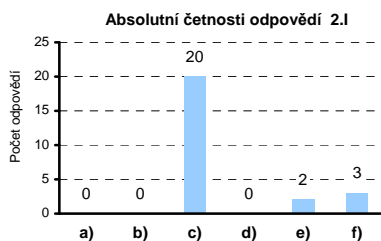
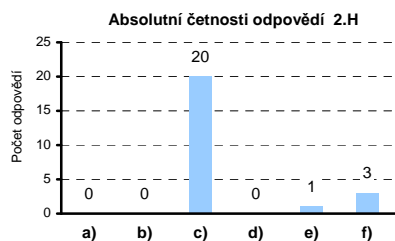
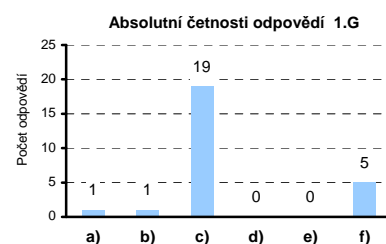
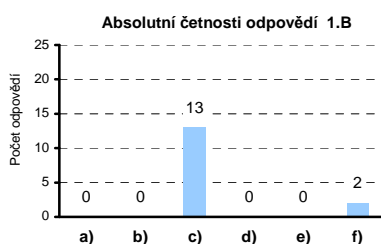
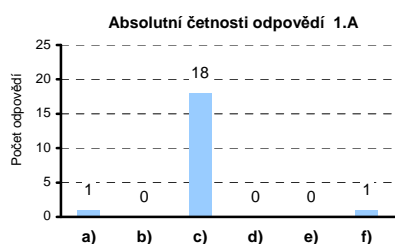
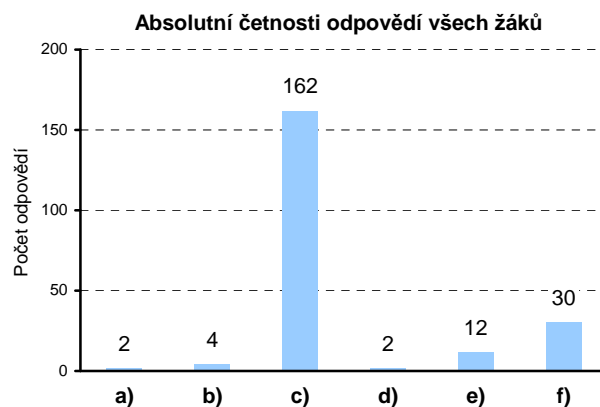


Příloha B2: Grafy vyhodnocení odpovědí na otázku číslo 2

2. Který z následujících obrázků podle Vás nejlépe popisuje vznik a šíření zvuku ve vzduchu?



Otázka 2						
Třída	a)	b)	c)	d)	e)	f)
1.A	1		18			1
1.B			13			2
1.G	1	1	19			5
2.H			20		1	3
2.I			20		2	3
2.L			24	2		1
3.A		2	15		1	7
3.I		1	18		3	5
3.K			15		5	3
celkem	2	4	162	2	12	30
%	1%	2%	76%	1%	6%	14%

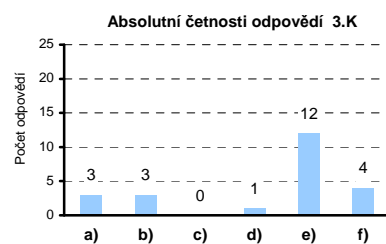
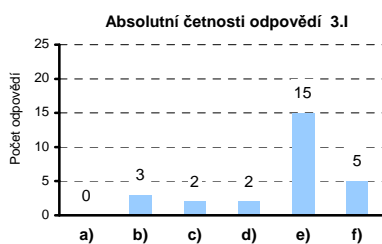
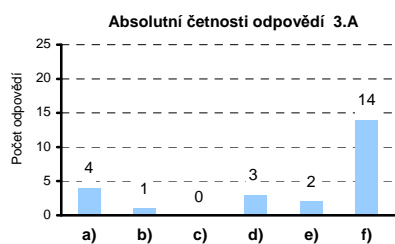
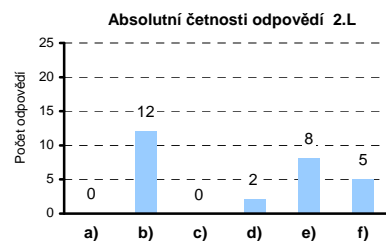
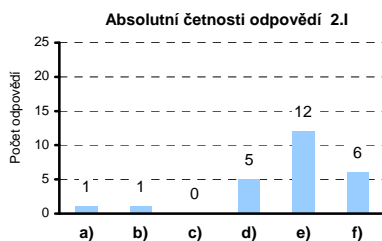
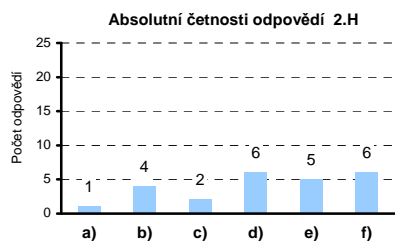
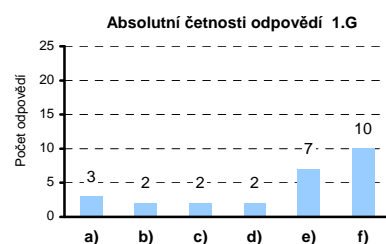
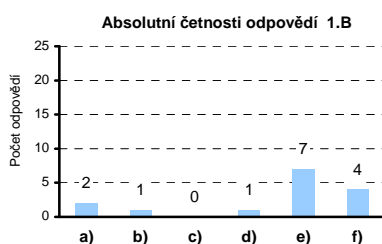
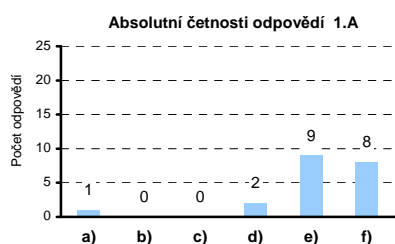
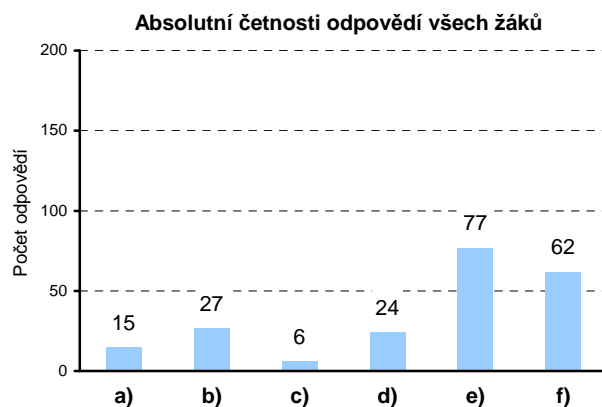


Příloha B3: Grafy vyhodnocení odpovědí na otázku číslo 3

3. Rychlost zvuku ve vzduchu je přibližně 340 m/s. To znamená, že:

- Membrána reproduktoru kmitá ve vzduchu rychlostí 340 m/s.
- Molekuly vzduchu kmitají kolem rovnovážné polohy rychlostí 340 m/s.
- Oblasti lokálního přetlaku ve vzduchu kmitají kolem rovnovážné polohy rychlostí 340 m/s.
- Molekuly vzduchu se pohybují od reproduktoru k posluchači rychlostí 340 m/s.
- Zvukové částice se pohybují od reproduktoru k posluchači vzduchem rychlostí 340 m/s.
- Tlakové změny ve vzduchu se pohybují od reproduktoru k posluchači rychlostí 340 m/s.

Otázka 3							
Třída	a)	b)	c)	d)	e)	f)	
1.A	1			2	9	8	
1.B	2	1		1	7	4	
1.G	3	2	2	2	7	10	
2.H	1	4	2	6	5	6	
2.I	1	1		5	12	6	
2.L		12		2	8	5	
3.A	4	1		3	2	14	
3.I		3	2	2	15	5	
3.K	3	3		1	12	4	
celkem	15	27	6	24	77	62	
	%	7%	13%	3%	11%	36%	29%

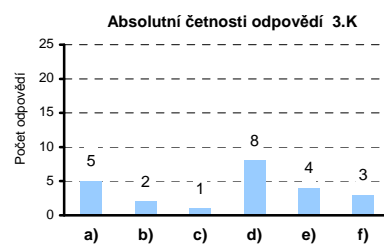
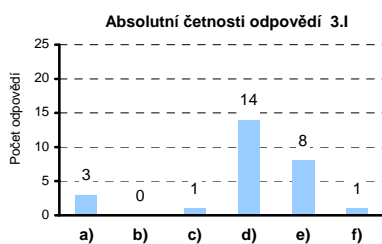
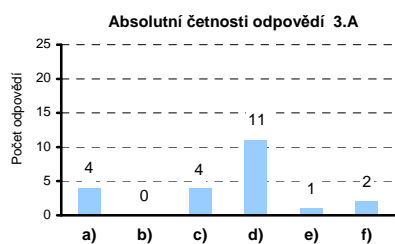
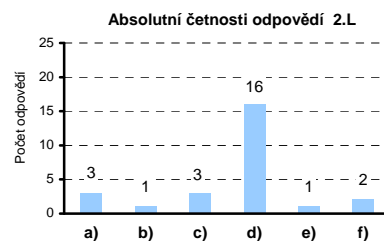
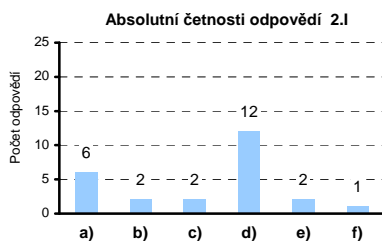
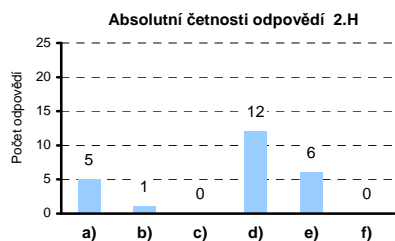
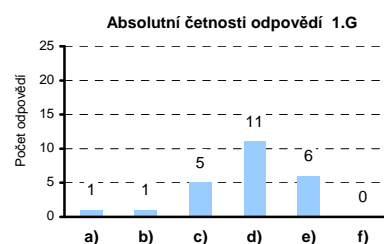
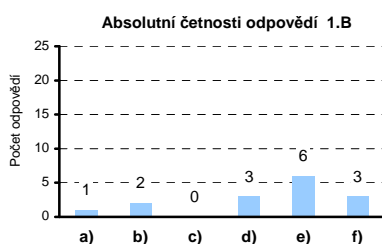
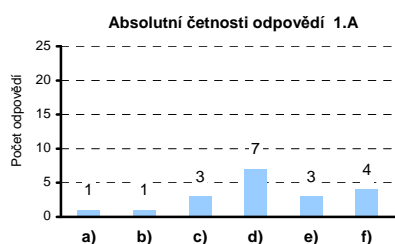
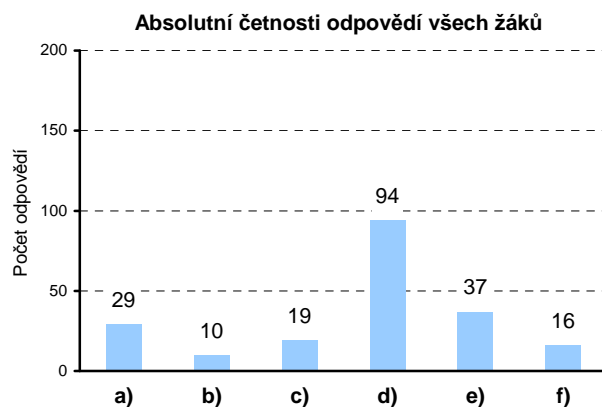


Příloha B4: Grafy vyhodnocení odpovědí na otázku číslo 4

4. Když popisujeme šíření zvuku ve vzduchu pomocí kmitání elementů prostředí, jsou tím myšleny:

- | | | |
|---------------------|--------------------------------|-----------------------------|
| a) jednotlivé atomy | c) objemové výseče vzduchu | e) fiktivní zvukové částice |
| b) prachové částice | d) jednotlivé molekuly vzduchu | f) myšlené výseče prostoru |

Otázka 4						
Třída	a)	b)	c)	d)	e)	f)
1.A	1	1	3	7	3	4
1.B	1	2		3	6	3
1.G	1	1	5	11	6	
2.H	5	1		12	6	
2.I	6	2	2	12	2	1
2.L	3	1	3	16	1	2
3.A	4		4	11	1	2
3.I	3		1	14	8	1
3.K	5	2	1	8	4	3
celkem	29	10	19	94	37	16
%	14%	5%	9%	44%	17%	8%

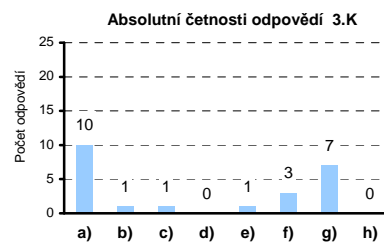
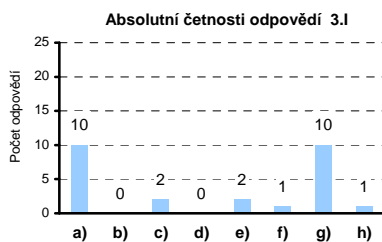
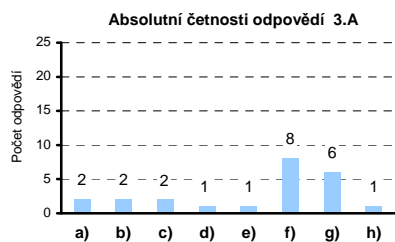
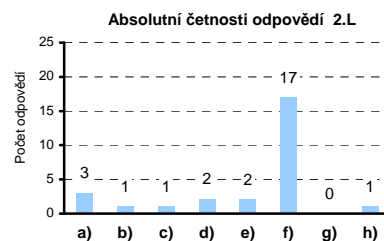
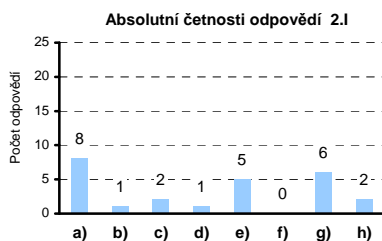
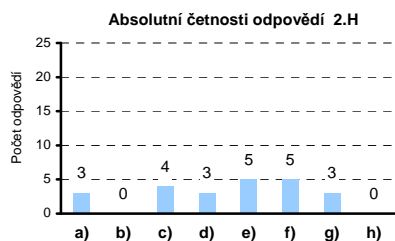
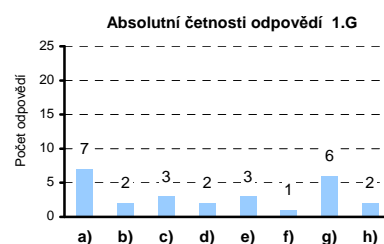
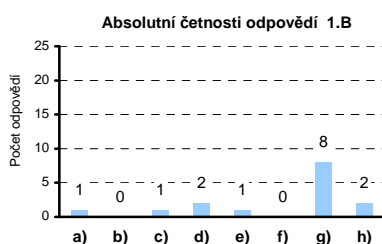
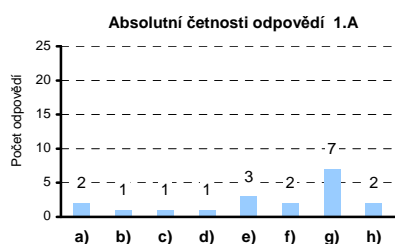
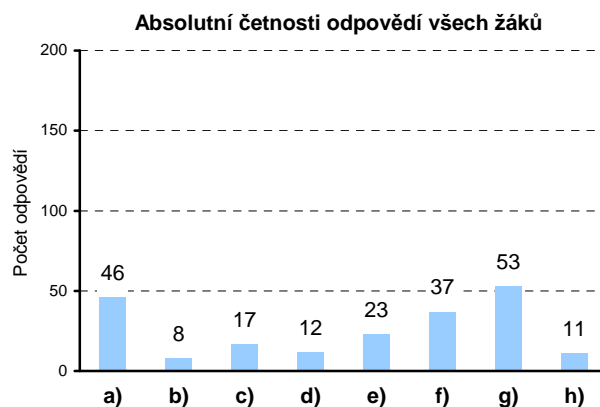


Příloha B5: Grafy vyhodnocení odpovědí na otázku číslo 5

5. Vlnová délka zvukového vlnění ve vzduchu pro čistý tón o frekvenci 1 kHz bude zhruba:

- a) 1 mm c) 1 cm e) 10 cm g) 1 m
 b) 3 mm d) 3 cm f) 30 cm h) 3 m

Otázka 5								
Třída	a)	b)	c)	d)	e)	f)	g)	h)
1.A	2	1	1	1	3	2	7	2
1.B	1		1	2	1		8	2
1.G	7	2	3	2	3	1	6	2
2.H	3		4	3	5	5	3	
2.I	8	1	2	1	5		6	2
2.L	3	1	1	2	2	17		1
3.A	2	2	2	1	1	8	6	1
3.I	10		2		2	1	10	1
3.K	10	1	1		1	3	7	
celkem	46	8	17	12	23	37	53	11
%	22%	4%	8%	6%	11%	17%	25%	5%

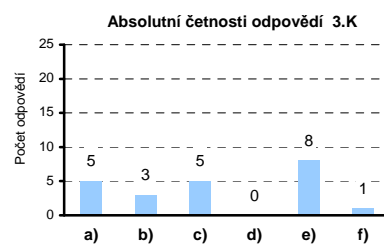
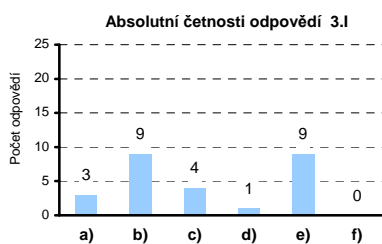
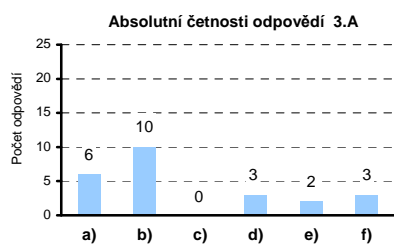
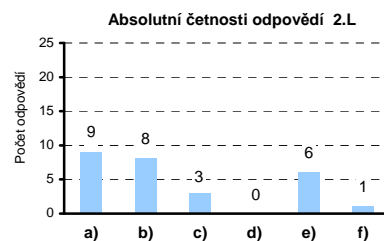
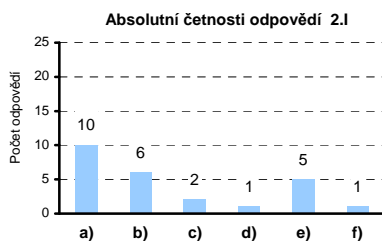
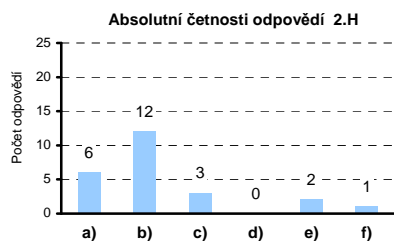
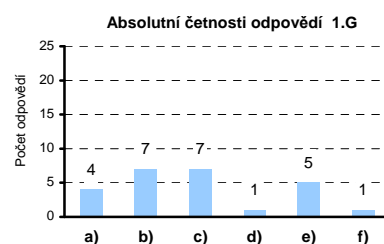
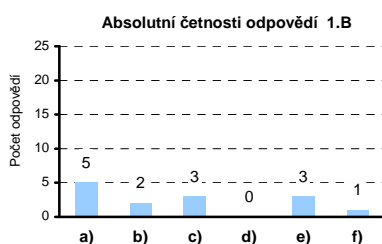
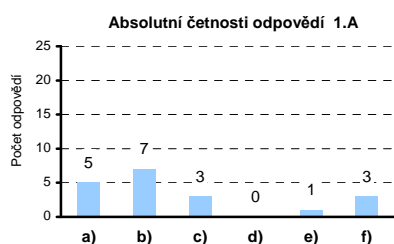
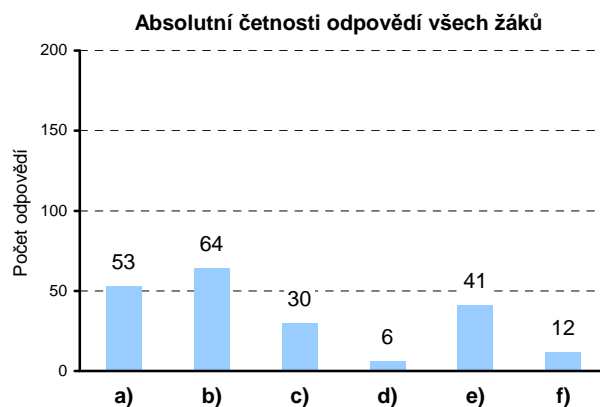


Příloha B6: Grafy vyhodnocení odpovědí na otázku číslo 6

6. Amplitudu výchylky kmitání zdvojnásobíme. Která veličina se podle Vás také zdvojnásobí?

- | | | |
|--------------------|--|-----------------------|
| a) výška zvuku | c) rychlost kmitání elementů prostředí | e) intenzita zvuku |
| b) hlasitost zvuku | d) tlakové změny v místě měření | f) výkon zdroje zvuku |

Otázka 6						
Třída	a)	b)	c)	d)	e)	f)
1.A	5	7	3		1	3
1.B	5	2	3		3	1
1.G	4	7	7	1	5	1
2.H	6	12	3		2	1
2.I	10	6	2	1	5	1
2.L	9	8	3		6	1
3.A	6	10		3	2	3
3.I	3	9	4	1	9	
3.K	5	3	5		8	1
celkem	53	64	30	6	41	12
%	25%	30%	14%	3%	19%	6%

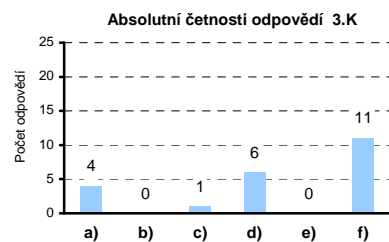
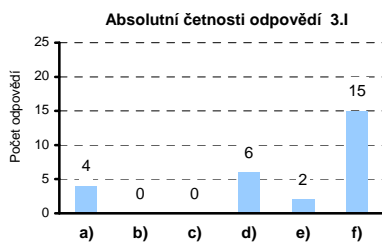
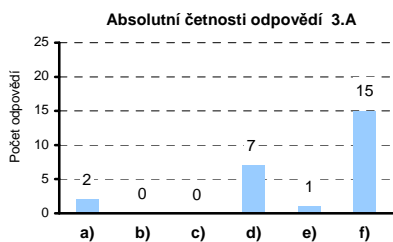
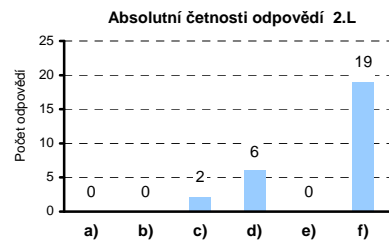
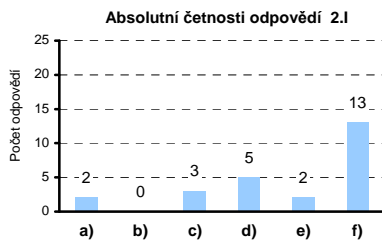
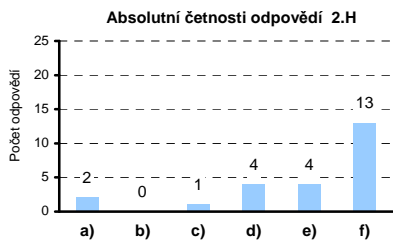
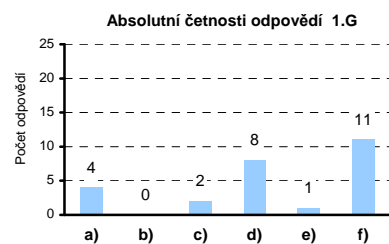
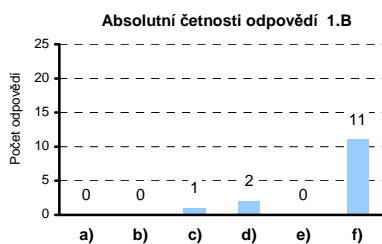
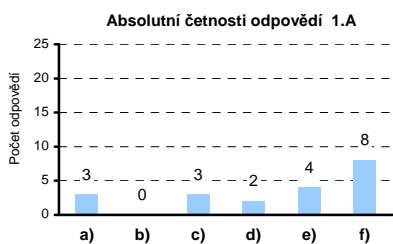
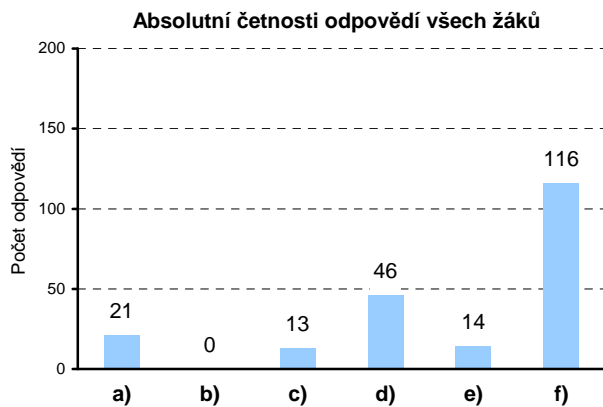


Příloha B7: Grafy vyhodnocení odpovědí na otázku číslo 7

7. Když tlesknete, na kterém z následující míst bude zvuk tlesknutí nejdéle doznívat?

- a) v koupelně
- b) v ložnici
- c) venku na louce
- d) na schodišti domu
- e) v kině
- f) v tělocvičně

Otázka 7						
Třída	a)	b)	c)	d)	e)	f)
1.A	3		3	2	4	8
1.B			1	2		11
1.G	4		2	8	1	11
2.H	2		1	4	4	13
2.I	2		3	5	2	13
2.L			2	6		19
3.A	2			7	1	15
3.I	4			6	2	15
3.K	4		1	6		11
celkem	21		13	46	14	116
%	10%		6%	22%	7%	55%

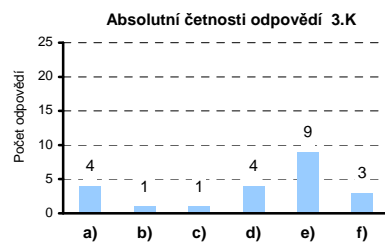
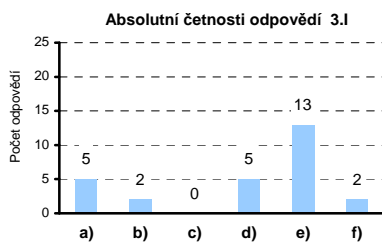
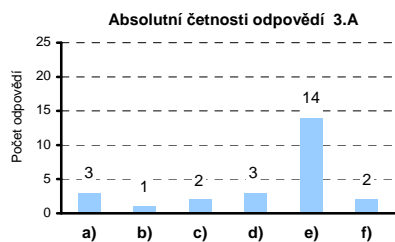
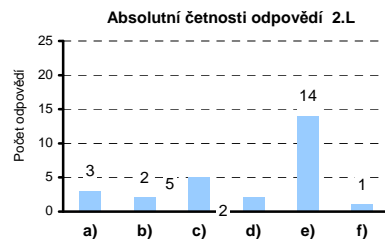
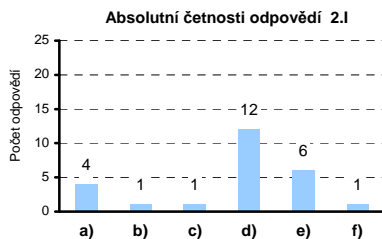
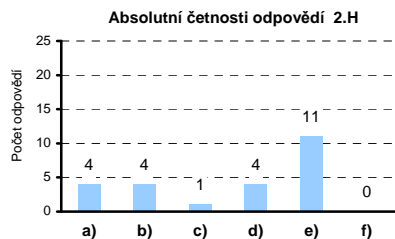
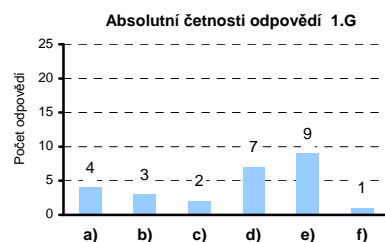
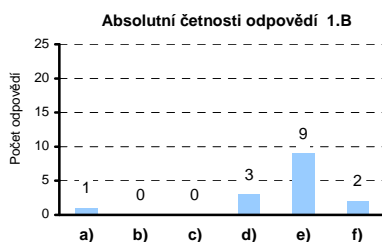
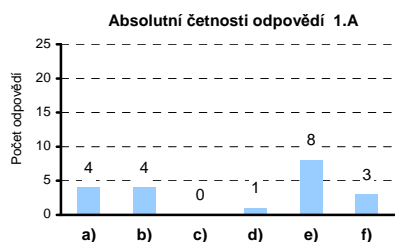
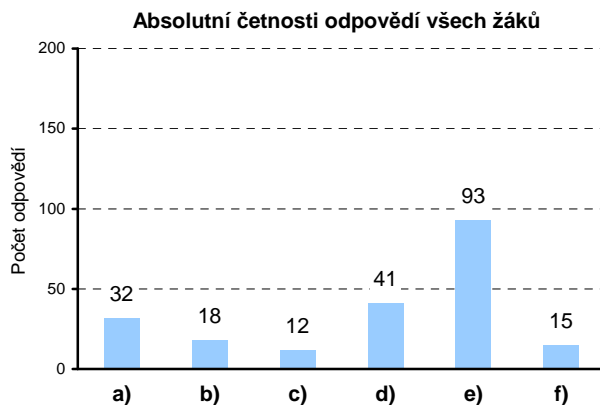


Příloha B8: Grafy vyhodnocení odpovědí na otázku číslo 8

8. Který z následujících materiálů podle Vás pohltí při stejné ploše a tloušťce nejvíce zvuku?

- | | | |
|----------------------|------------------------------|--------------------------------|
| a) pěnový polystyren | c) smrkové dřevo (masiv) | e) pěnový polyuretan (molitan) |
| b) beton | d) polyesterové rouno (vata) | f) ocel |

Otázka 8							
Třída	a)	b)	c)	d)	e)	f)	
1.A	4	4		1	8	3	
1.B	1			3	9	2	
1.G	4	3	2	7	9	1	
2.H	4	4	1	4	11		
2.I	4	1	1	12	6	1	
2.L	3	2	5	2	14	1	
3.A	3	1	2	3	14	2	
3.I	5	2		5	13	2	
3.K	4	1	1	4	9	3	
celkem	32	18	12	41	93	15	
	%	15%	8%	6%	19%	44%	7%



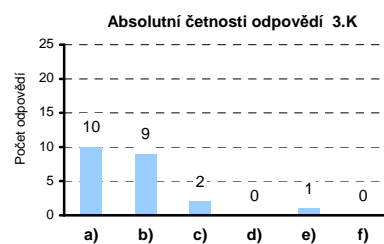
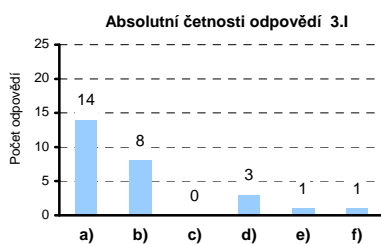
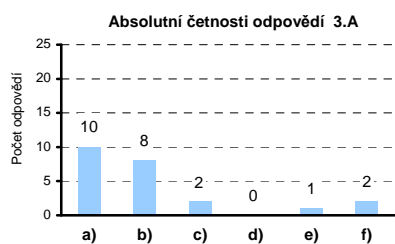
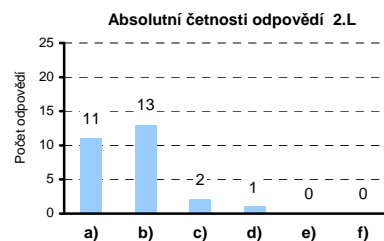
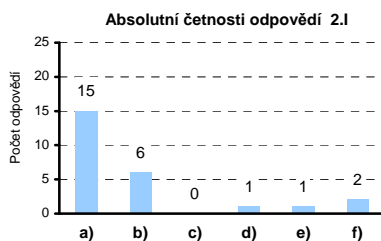
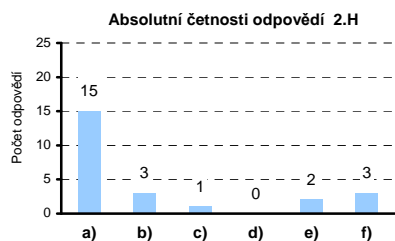
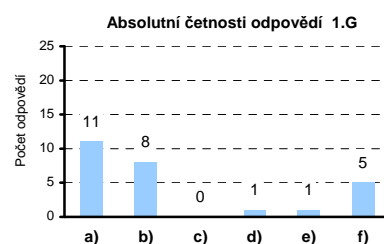
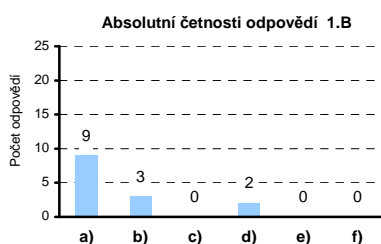
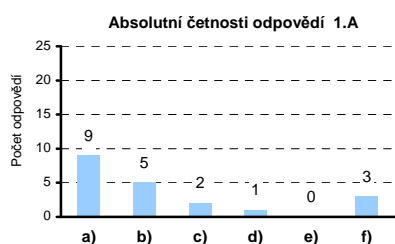
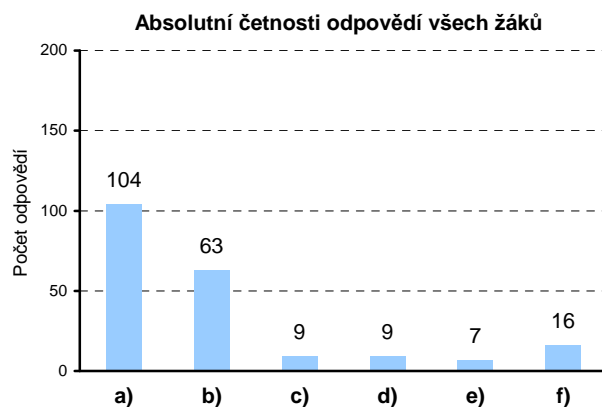
Příloha B9: Grafy vyhodnocení odpovědí na otázku číslo 9

9. Kterou fyzikální veličinu snímá přístroj pro měření zvuku, takzvaný zvukoměr?



- a) hlasitost zvuku
- b) intenzitu zvuku
- c) akustický výkon zdroje zvuku
- d) rychlost kmitání elementů prostředí
- e) výchylku kmitání elementů prostředí
- f) tlakové rozdíly v místě měření

Otázka 9						
Třída	a)	b)	c)	d)	e)	f)
1.A	9	5	2	1		3
1.B	9	3		2		
1.G	11	8		1	1	5
2.H	15	3	1		2	3
2.I	15	6		1	1	2
2.L	11	13	2	1		
3.A	10	8	2		1	2
3.I	14	8		3	1	1
3.K	10	9	2		1	
celkem	104	63	9	9	7	16
%	49%	30%	4%	4%	3%	8%

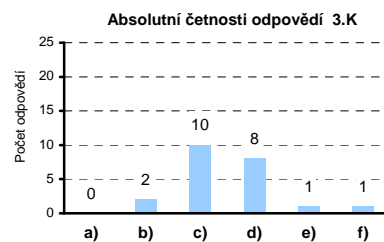
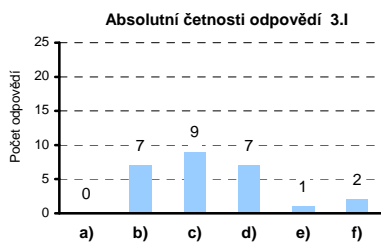
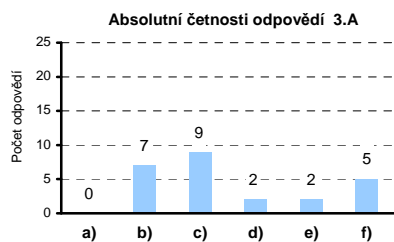
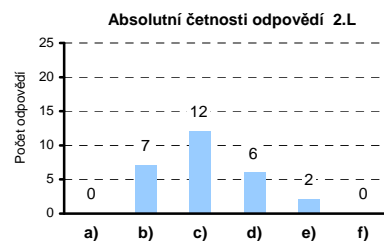
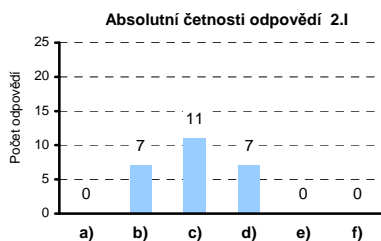
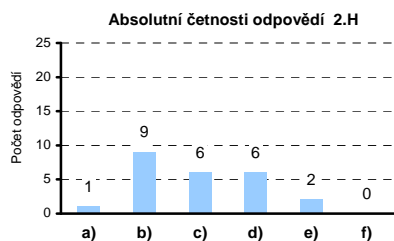
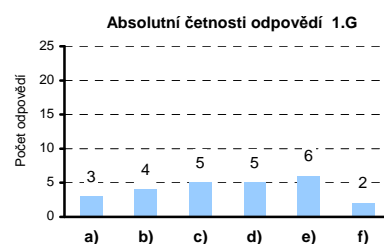
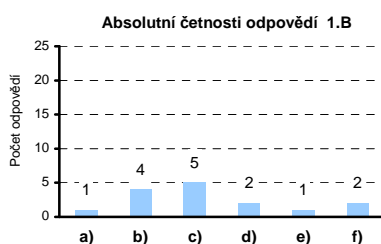
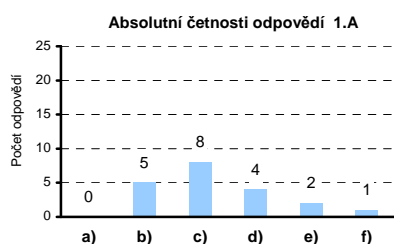
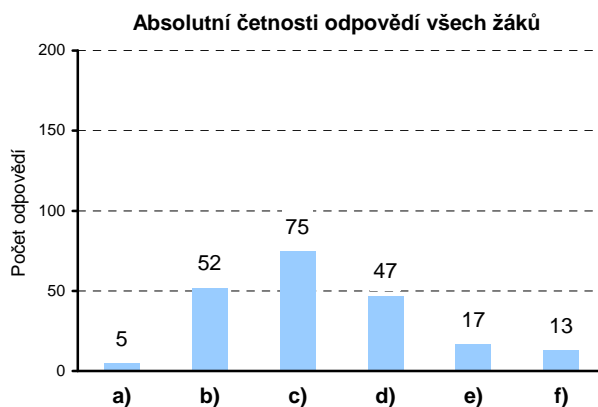


Příloha B10: Grafy vyhodnocení odpovědí na otázku číslo 10

10. S jakým časovým odstupem lidský sluch rozliší dva po sobě následující zvuky? Jsou to řadově:

- a) sekundy
- b) desetiny sekundy
- c) setiny sekundy
- d) tisíciny sekundy
- e) desetitisíciny sekundy
- f) stotitisíciny sekundy

Otázka 10						
Třída	a)	b)	c)	d)	e)	f)
1.A		5	8	4	2	1
1.B	1	4	5	2	1	2
1.G	3	4	5	5	6	2
2.H	1	9	6	6	2	
2.I		7	11	7		
2.L		7	12	6	2	
3.A		7	9	2	2	5
3.I		7	9	7	1	2
3.K		2	10	8	1	1
celkem	5	52	75	47	17	13
%	2%	25%	35%	22%	8%	6%

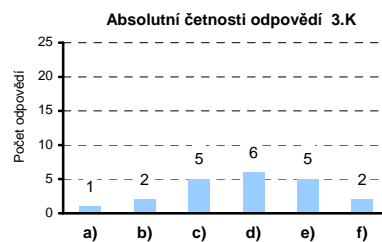
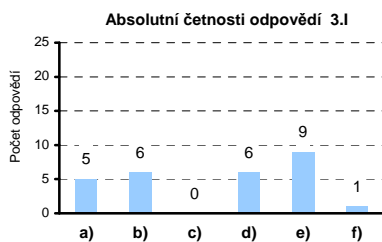
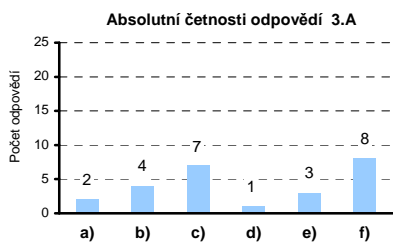
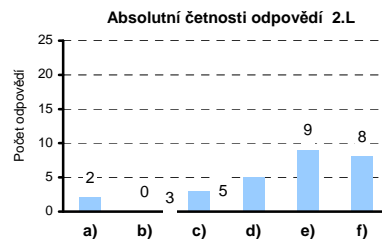
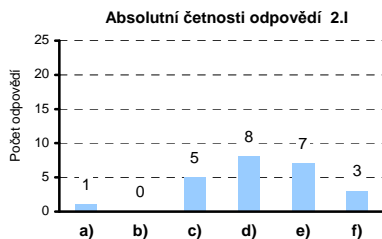
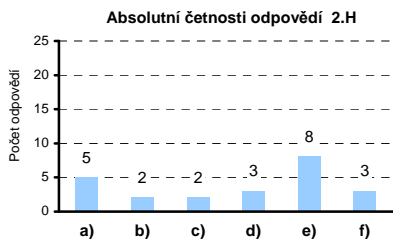
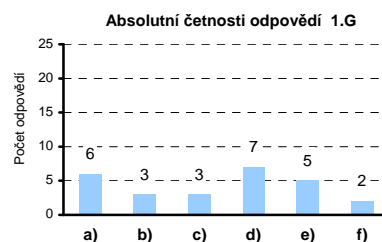
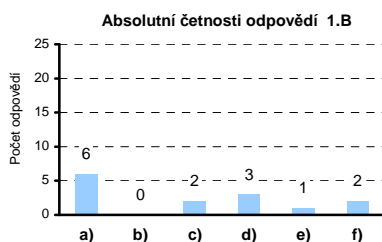
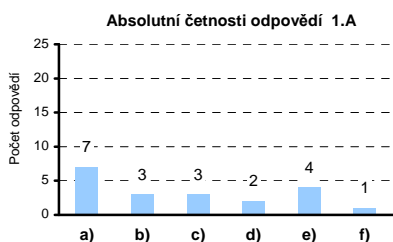
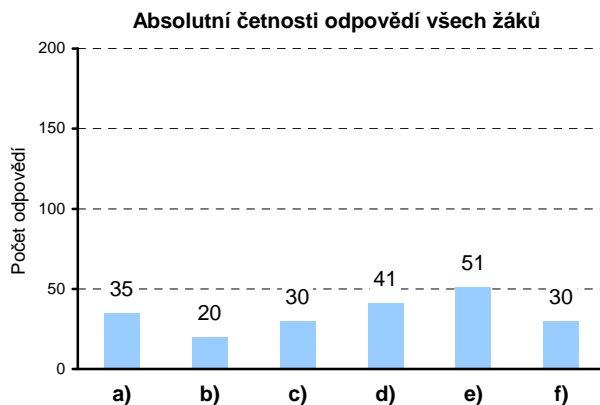


Příloha B11: Grafy vyhodnocení odpovědí na otázku číslo 11

11. V jaké frekvenční oblasti je sluch zdravého člověka nejcitlivější?

- a) 250 Hz až 1 kHz
- b) 1 kHz až 3 kHz
- c) 3 kHz až 5 kHz
- d) 5 kHz až 10 kHz
- e) 10 kHz až 20 kHz
- f) Je to silně individuální.

Otázka 11						
Třída	a)	b)	c)	d)	e)	f)
1.A	7	3	3	2	4	1
1.B	6		2	3	1	2
1.G	6	3	3	7	5	2
2.H	5	2	2	3	8	3
2.I	1		5	8	7	3
2.L	2		3	5	9	8
3.A	2	4	7	1	3	8
3.I	5	6		6	9	1
3.K	1	2	5	6	5	2
celkem	35	20	30	41	51	30
%	17%	9%	14%	19%	24%	14%

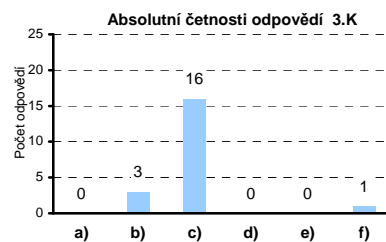
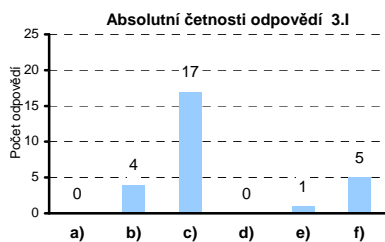
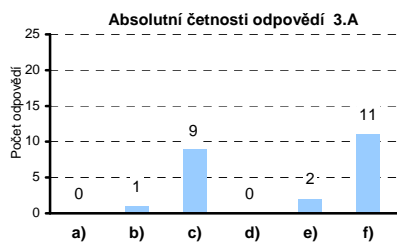
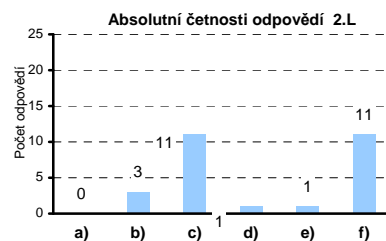
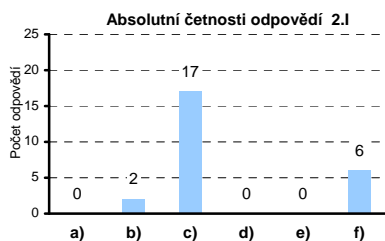
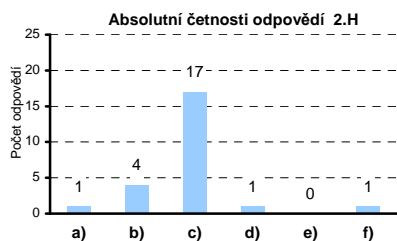
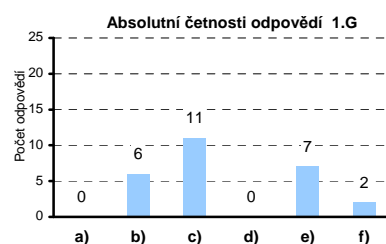
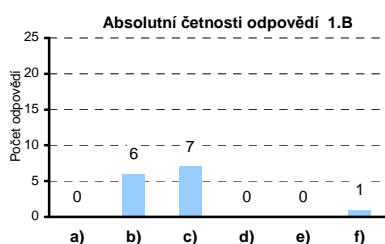
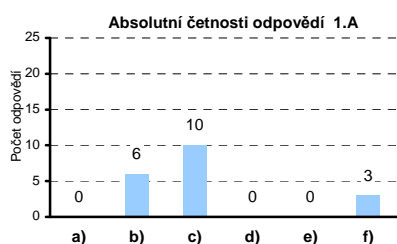
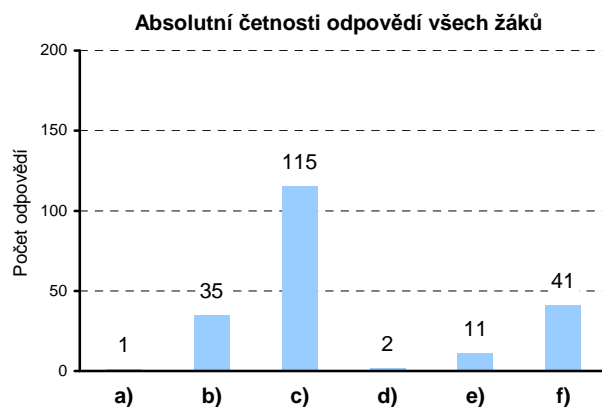


Příloha B12: Grafy vyhodnocení odpovědí na otázku číslo 12

12. Decibel (zkratka dB) je:

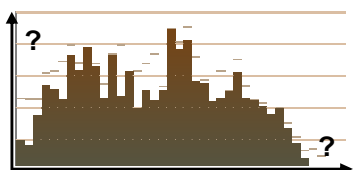
- a) jednotka výchylky kmitání c) jednotka hlasitosti zvuku e) relativní vyjádřením nějaké veličiny
 b) míra síly zvuku d) stupeň škodlivosti hluku f) jednotka intenzity zvuku

Otázka 12						
Třída	a)	b)	c)	d)	e)	f)
1.A		6	10			3
1.B		6	7			1
1.G		6	11		7	2
2.H	1	4	17	1		1
2.I		2	17			6
2.L		3	11	1	1	11
3.A		1	9		2	11
3.I		4	17		1	5
3.K		3	16			1
celkem	1	35	115	2	11	41
%	0%	17%	54%	1%	5%	19%



Příloha B13.1: Grafy vyhodnocení odpovědí na otázku číslo 13.1

13. Na displeji MP3-přehrávače se zobrazuje graf spektrální analýzy. Závislost kterých dvou veličin znázorňuje?



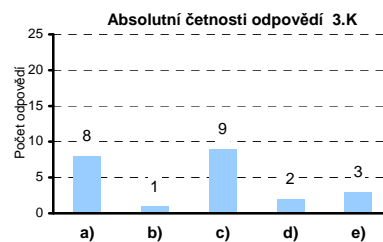
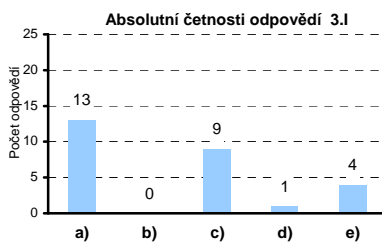
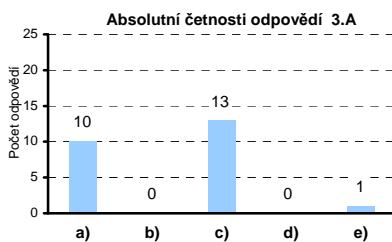
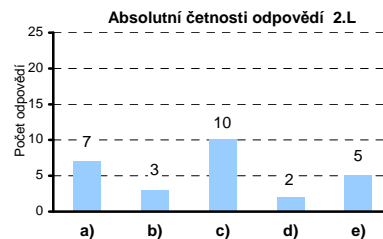
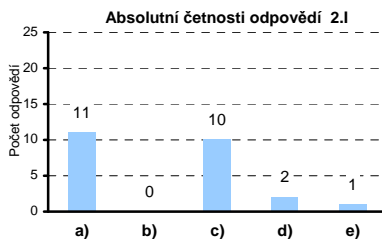
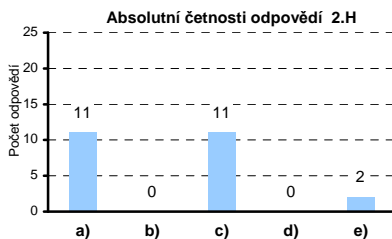
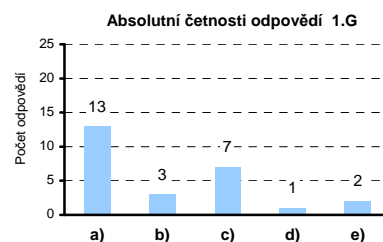
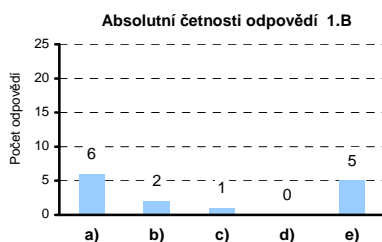
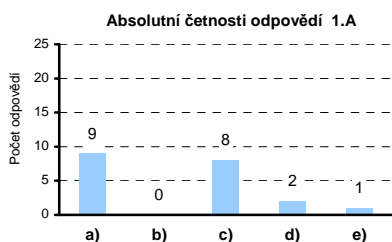
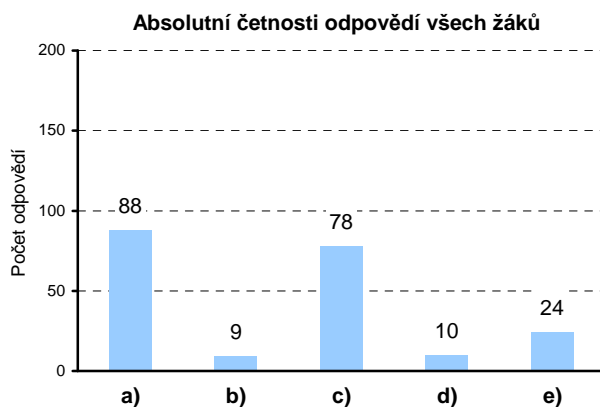
13.1 Na vodorovné ose: (zleva doprava)

- a) čas
- b) vzdálenost
- c) frekvence
- d) výkon
- e) barva zvuku

13.2 Na svislé ose: (směrem zdola nahoru)

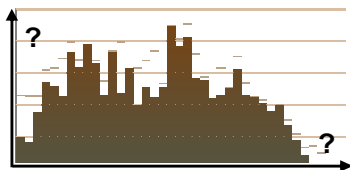
- a) intenzita
- b) hlasitost
- c) mechanická výchylka
- d) relativní četnost
- e) tlak

Otázka 13.1					
Třída	a)	b)	c)	d)	e)
1.A	9		8	2	1
1.B	6	2	1		5
1.G	13	3	7	1	2
2.H	11		11		2
2.I	11		10	2	1
2.L	7	3	10	2	5
3.A	10		13		1
3.I	13		9	1	4
3.K	8	1	9	2	3
celkem	88	9	78	10	24
%	42%	4%	37%	5%	11%



Příloha B13.2: Grafy vyhodnocení odpovědí na otázku číslo 13.2

13. Na displeji MP3-přehrávače se zobrazuje graf spektrální analýzy. Závislost kterých dvou veličin znázorňuje?



13.1 Na vodorovné ose: (zleva doprava)

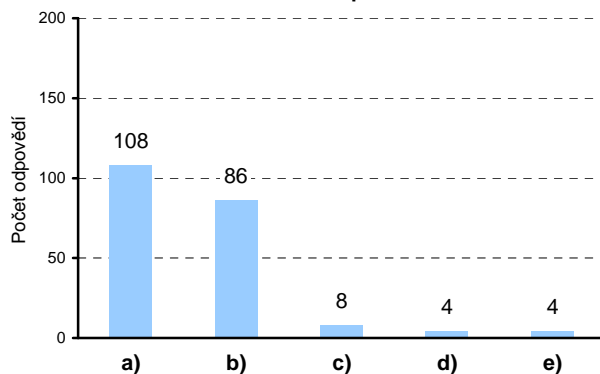
- a) čas
- b) vzdálenost
- c) frekvence
- d) výkon
- e) barva zvuku

13.2 Na svislé ose: (směrem zdola nahoru)

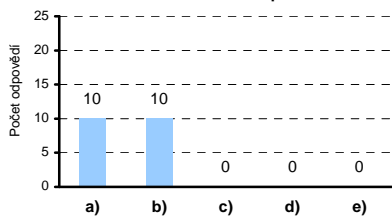
- a) intenzita
- b) hlasitost
- c) mechanická výchylka
- d) relativní četnost
- e) tlak

Otázka 13.2					
Třída	a)	b)	c)	d)	e)
1.A	10	10			
1.B	8	7			
1.G	10	11	2		3
2.H	8	12	2	2	
2.I	13	11	1		
2.L	15	9	2	1	
3.A	17	5		1	1
3.I	15	12			
3.K	12	9	1		
celkem	108	86	8	4	4
%	51%	41%	4%	2%	2%

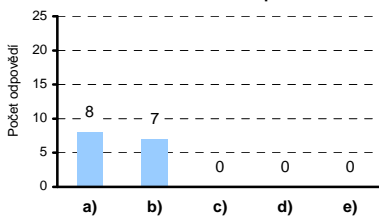
Absolutní četnosti odpovědí všech žáků



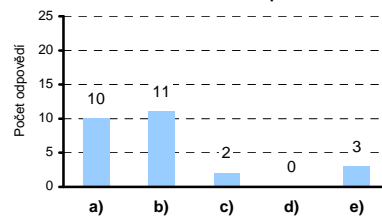
Absolutní četnosti odpovědí 1.A



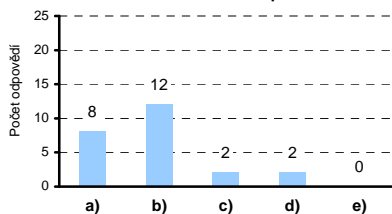
Absolutní četnosti odpovědí 1.B



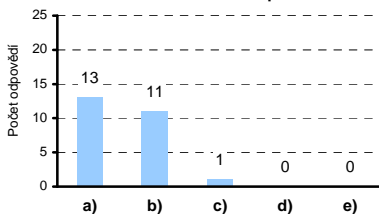
Absolutní četnosti odpovědí 1.G



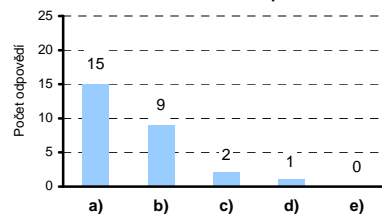
Absolutní četnosti odpovědí 2.H



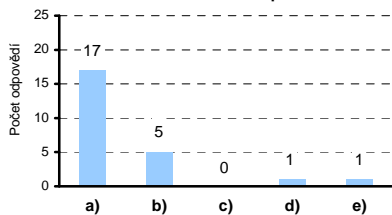
Absolutní četnosti odpovědí 2.I



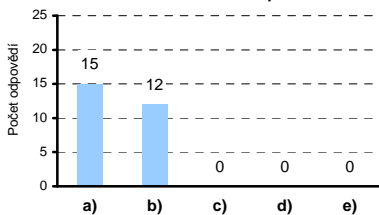
Absolutní četnosti odpovědí 2.L



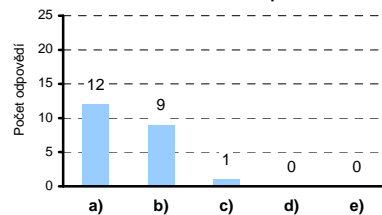
Absolutní četnosti odpovědí 3.A



Absolutní četnosti odpovědí 3.I



Absolutní četnosti odpovědí 3.K

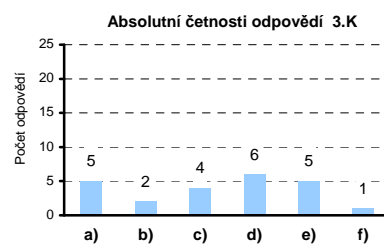
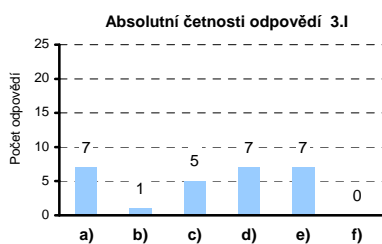
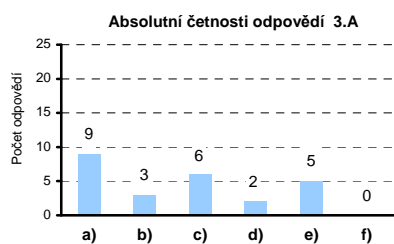
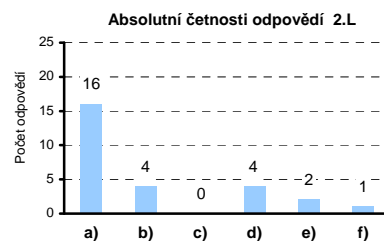
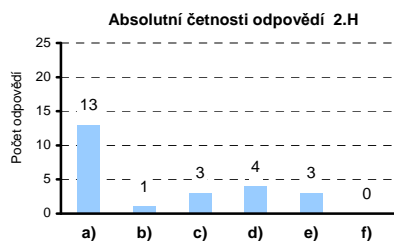
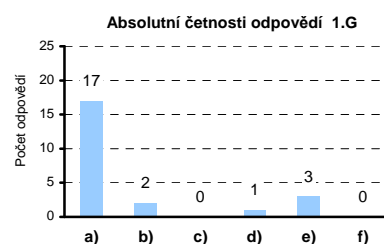
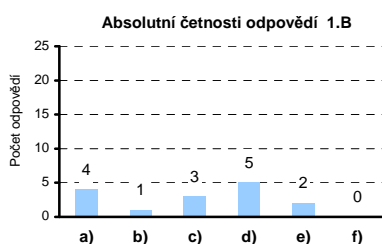
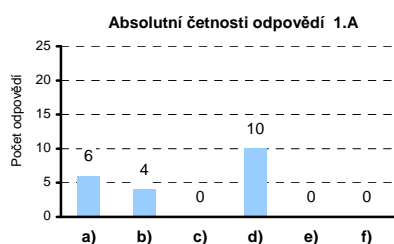
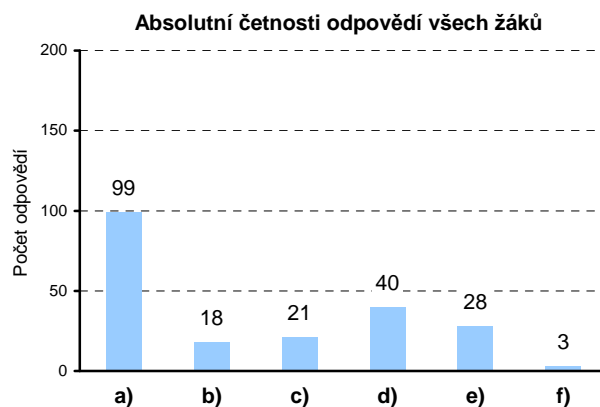


Příloha B14: Grafy vyhodnocení odpovědí na otázku číslo 14

14. V souborech MP3 lze na jedno CD uložit až 20krát více hudby. Jak to podle Vás kodér MP3 dělá?

- a) Odstraní neslyšitelné zvuky.
- b) Využívá, že se periodické zvuky opakují.
- c) Odebere vysoké frekvence.
- d) Uloží se jen frekvence, na kterých je nějaký zvuk.
- e) Popisuje zvuk méně přesně tam, kde to není slyšet.
- f) Uloženy jsou jen hlasité zvuky.

Otázka 14						
Třída	a)	b)	c)	d)	e)	f)
1.A	6	4		10		
1.B	4	1	3	5	2	
1.G	17	2		1	3	
2.H	13	1	3	4	3	
2.I	22			1	1	1
2.L	16	4		4	2	1
3.A	9	3	6	2	5	
3.I	7	1	5	7	7	
3.K	5	2	4	6	5	1
celkem	99	18	21	40	28	3
%	47%	8%	10%	19%	13%	1%



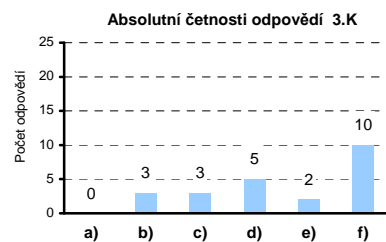
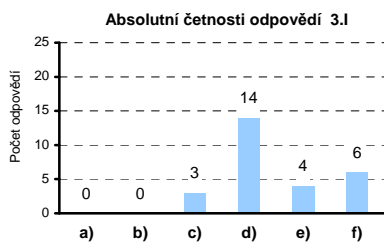
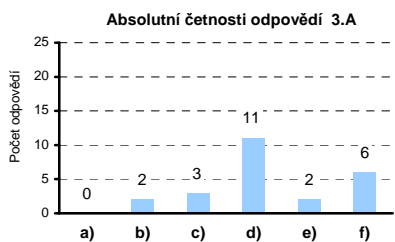
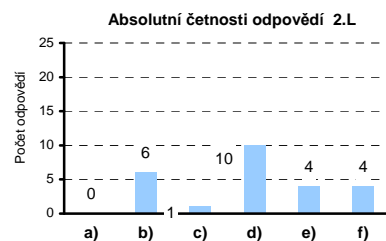
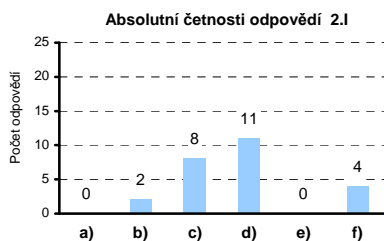
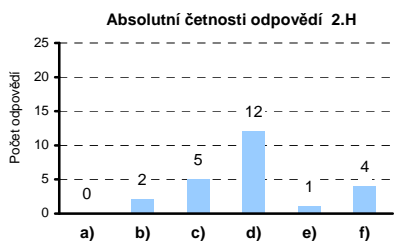
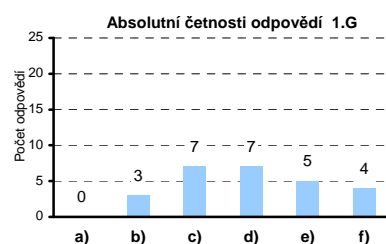
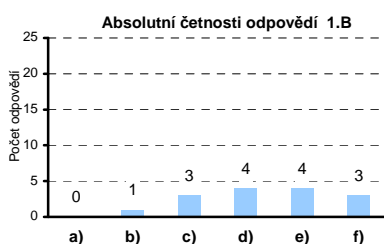
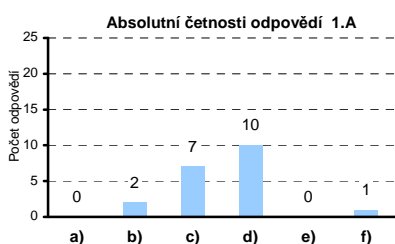
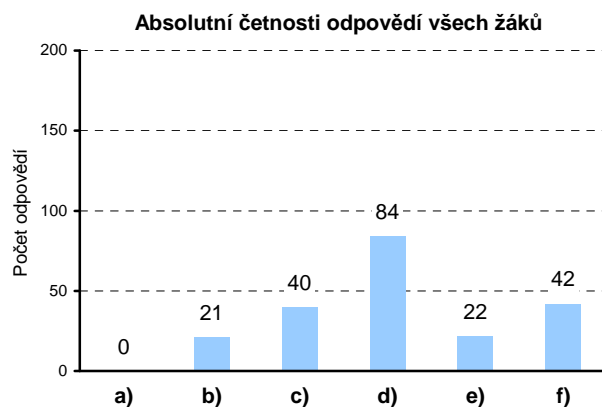
Příloha B15: Grafy vyhodnocení odpovědí na otázku číslo 15

15. Protihluková opatření mají snížit hluk o 2 decibely z 65 na 63 dB. Jak myslíte, že se sníží hlasitost hluku?

- a) Nebude slyšet už žádný hluk.
- b) Hluk bude asi desetkrát méně hlasitý.
- c) Hlasitost hluku se sníží asi na polovinu.
- d) Slyšitelný rozdíl bude jen nepatrný.
- e) Nebude to vůbec slyšitelný rozdíl.
- f) Každý člověk bude změnu hlasitosti vnímat jinak.

Otázka 15						
Třída	a)	b)	c)	d)	e)	f)
1.A		2	7	10		1
1.B		1	3	4	4	3
1.G		3	7	7	5	4
2.H		2	5	12	1	4
2.I		2	8	11		4
2.L		6	1	10	4	4
3.A		2	3	11	2	6
3.I			3	14	4	6
3.K		3	3	5	2	10
celkem		21	40	84	22	42

% 10% 19% 40% 10% 20%

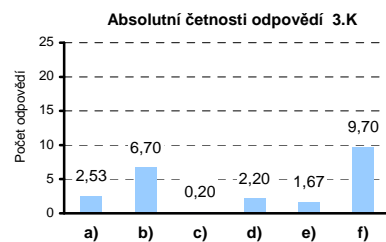
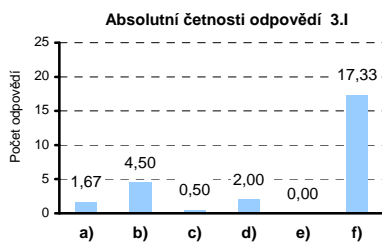
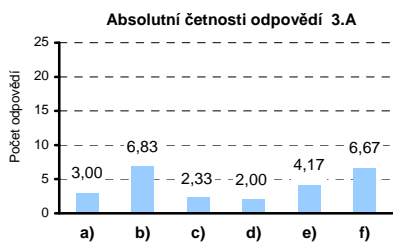
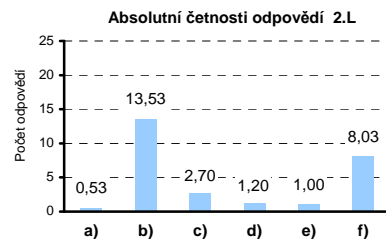
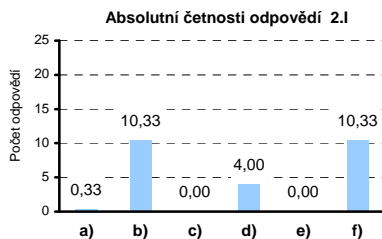
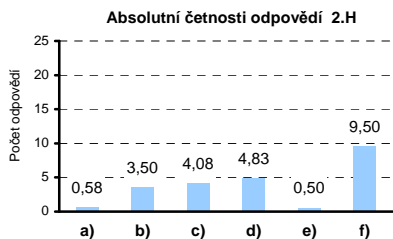
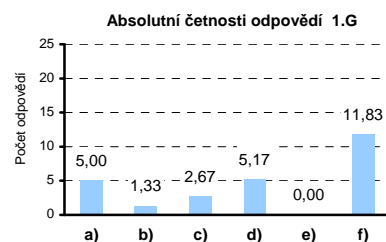
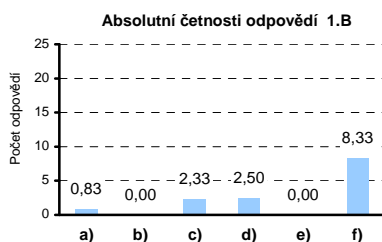
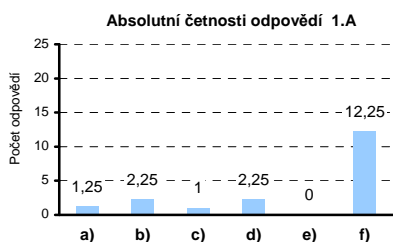
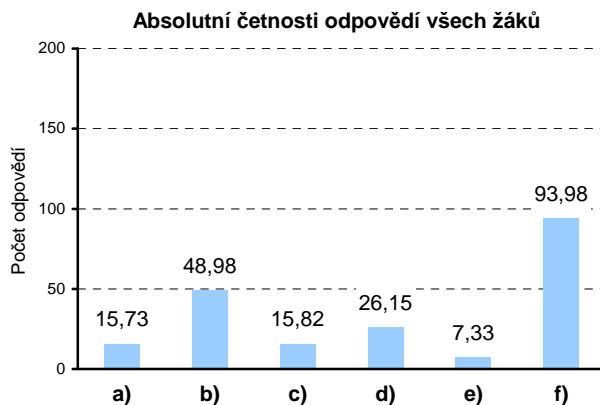


Příloha B16: Grafy vyhodnocení odpovědí na otázku číslo 16

16. Na základě čeho jste v dotazníku převážně volili odpovědi?

- a) Učili jsme se to na základní škole.
- b) Učili jsme se to na střední škole.
- c) Říkali mi to doma. (např. otec, děda)
- d) Informace mám z médií.
- e) Četl jsem odbornou literaturu.
- f) Odpovědi jsem pouze odhadoval / odhadovala.

Otázka 16							
Třída	a)	b)	c)	d)	e)	f)	
1.A	1,3	2,3	1	2,3		12	
1.B	0,8		2,3	2,5		8,3	
1.G	5	1,3	2,7	5,2		12	
2.H	0,6	3,5	4,1	4,8	0,5	9,5	
2.I	0,3	10		4		10	
2.L	0,5	14	2,7	1,2	1	8	
3.A	3	6,8	2,3	2	4,2	6,7	
3.I	1,7	4,5	0,5	2		17	
3.K	2,5	6,7	0,2	2,2	1,7	9,7	
celkem	16	49	16	26	7,3	94	
	%	7%	23%	7%	12%	3%	44%



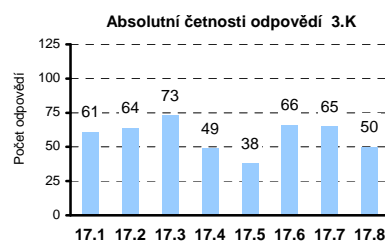
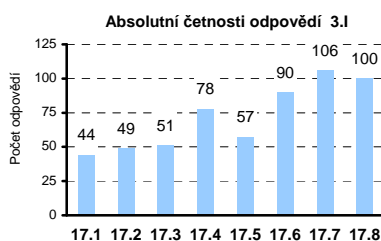
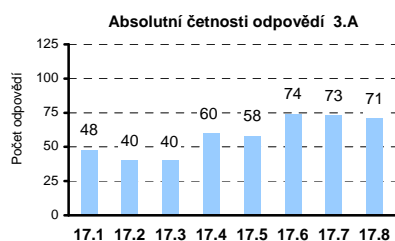
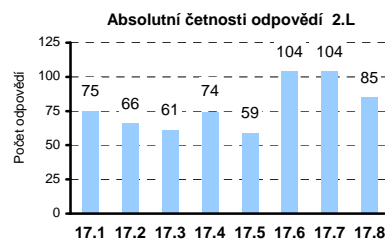
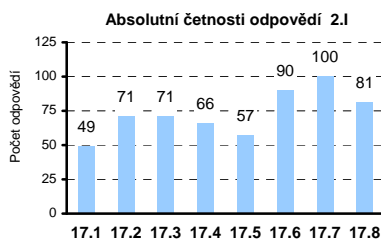
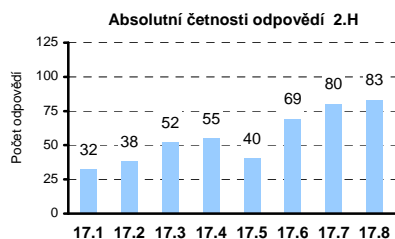
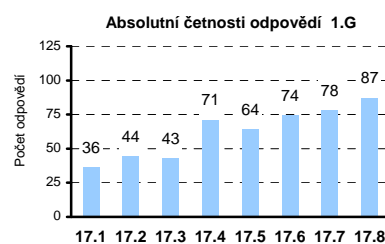
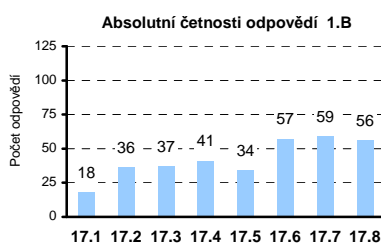
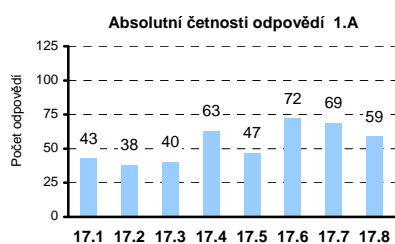
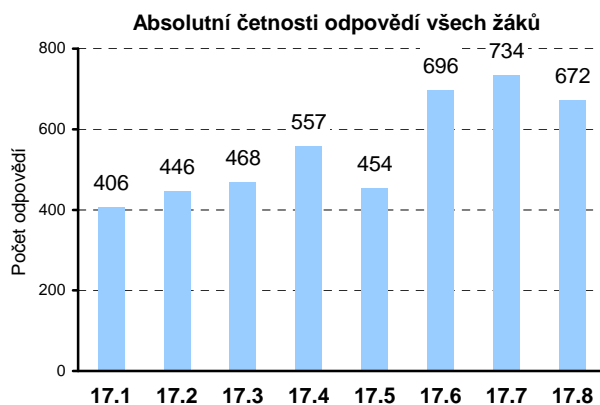
Příloha B17: Grafy vyhodnocení odpovědí na otázku číslo 17

17. Vyznačte zakroužkováním čísla na stupnici, o čem byste se chtěli ve škole učit: (0 pro vůbec ne, 5 je nejvíc)

Hudební nástroje 0 --- 1 --- 2 --- 3 --- 4 --- 5
 Lidský sluch 0 --- 1 --- 2 --- 3 --- 4 --- 5
 Lidský hlas a řeč 0 --- 1 --- 2 --- 3 --- 4 --- 5
 Využití ultrazvuku 0 --- 1 --- 2 --- 3 --- 4 --- 5

Hluk a jeho měření 0 --- 1 --- 2 --- 3 --- 4 --- 5
 Snímání a nahrávání zvuku 0 --- 1 --- 2 --- 3 --- 4 --- 5
 Digitální zpracování zvuku 0 --- 1 --- 2 --- 3 --- 4 --- 5
 Datová komprese MP3 0 --- 1 --- 2 --- 3 --- 4 --- 5

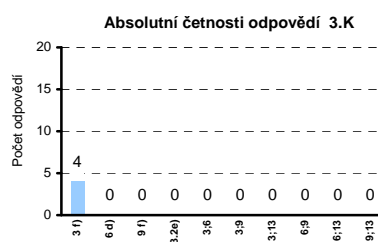
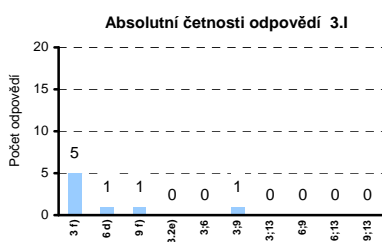
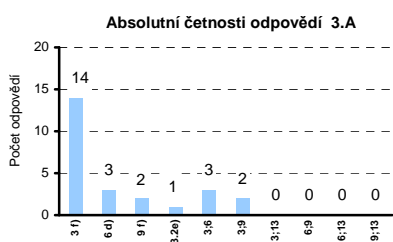
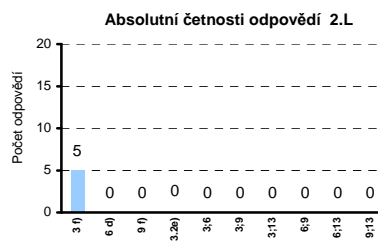
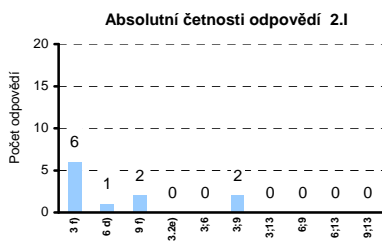
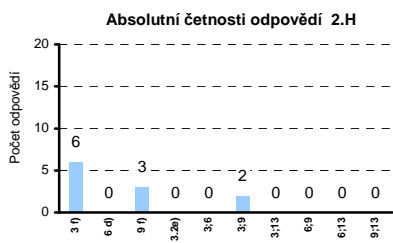
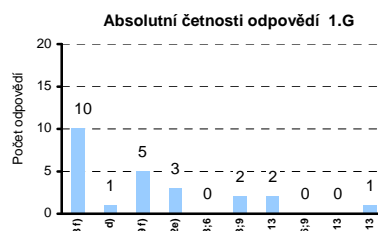
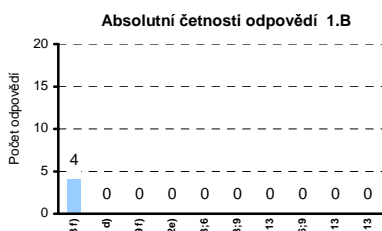
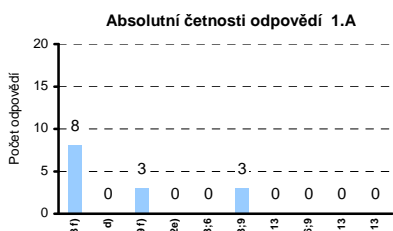
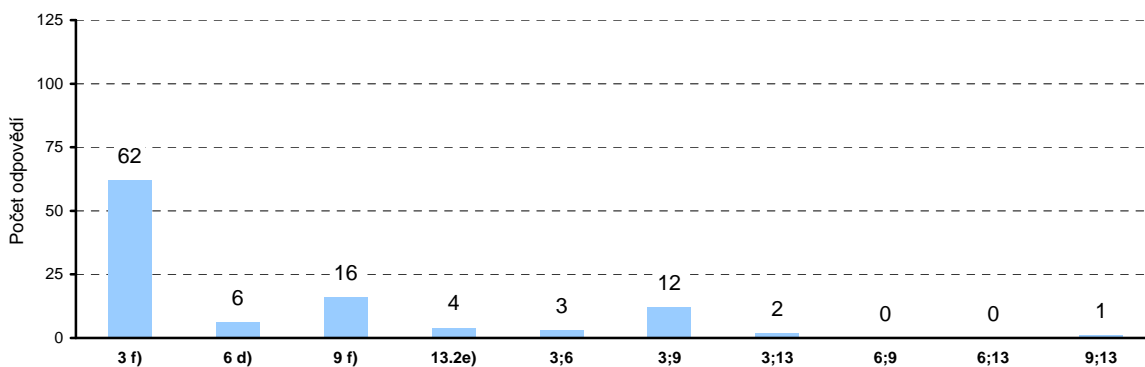
Otázka 17								
Třída	17.1	17.2	17.3	17.4	17.5	17.6	17.7	17.8
1.A	43	38	40	63	47	72	69	59
1.B	18	36	37	41	34	57	59	56
1.G	36	44	43	71	64	74	78	87
2.H	32	38	52	55	40	69	80	83
2.I	49	71	71	66	57	90	100	81
2.L	75	66	61	74	59	104	104	85
3.A	48	40	40	60	58	74	73	71
3.I	44	49	51	78	57	90	106	100
3.K	61	64	73	49	38	66	65	50
celkem	406	446	468	557	454	696	734	672



Příloha B18: Výskyt opakovaných odpovědí obsahujících veličinu tlak

Třída	3				3 3 3				3 3 3				3		
	3 f)	6 d)	9 f)	13.2e)	3;6	3;9	3;13	6;9	6;13	9;13	3;6;9	3;6;13	3;9;13	6;9;13	vše
1.A	8		3			3									
1.B	4														
1.G	10	1	5	3		2	2			1			1		
2.H	6		3			2									
2.I	6	1	2			2									
2.L	5														
3.A	14	3	2	1	3	2									
3.I	5	1	1			1									
3.K	4														
celkem	62	6	16	4	3	12	2			1			1		

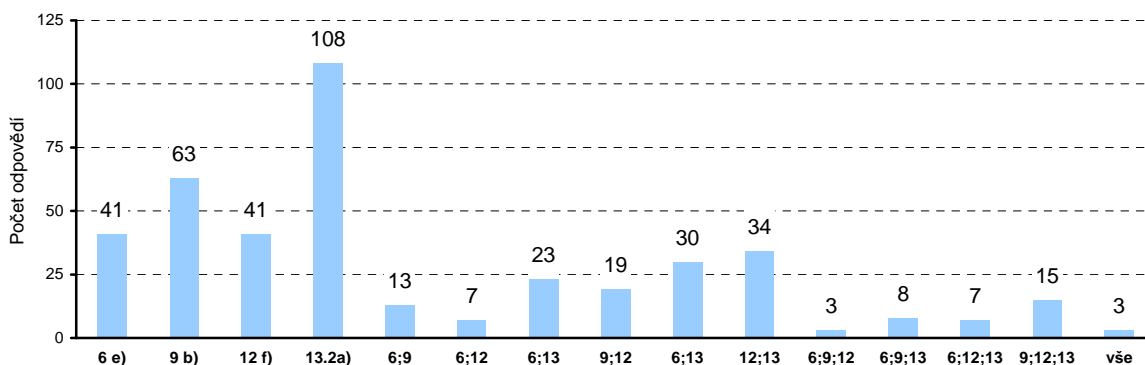
Absolutní četnost odpovědí všech žáků



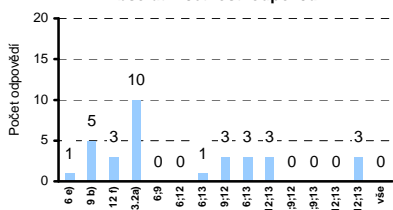
Příloha B19: Výskyt opakovaných odpovědí obsahujících veličinu intenzita

Třída	6				6 6 6				6 6 6				6		
	6 e)	9 b)	12 f)	13.2a)	6;9	6;12	6;13	9;12	6;13	12;13	6;9;12	6;9;13	6;12;13	9;12;13	vše
1.A	1	5	3	10			1	3	3	3				3	
1.B	3	3	1	8					2	1					
1.G	5	8	2	10	2			2	3	1				1	
2.H	2	3	1	8	1		2		2	1		1			
2.I	5	6	6	13			1	3	2	5				2	
2.L	6	13	11	15	1	4	5	4	5	9	1	1	4	4	1
3.A	2	8	11	17			2	4	3	8				2	
3.I	9	8	5	15	5	2	8	3	5	5	2	4	2	3	2
3.K	8	9	1	12	4	1	4		5	1		2	1		
celkem	41	63	41	108	13	7	23	19	30	34	3	8	7	15	3

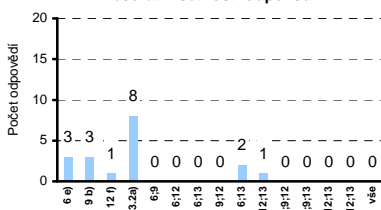
Absolutní četnost odpovědí všech žáků



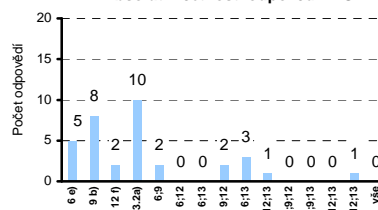
Absolutní četnosti odpovědí 1.A



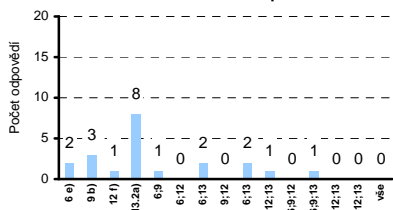
Absolutní četnosti odpovědí 1.B



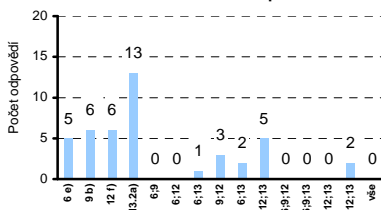
Absolutní četnosti odpovědí 1.G



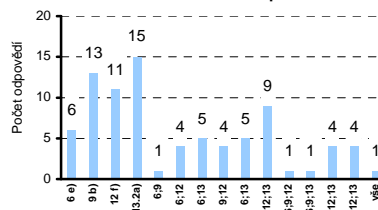
Absolutní četnosti odpovědí 2.H



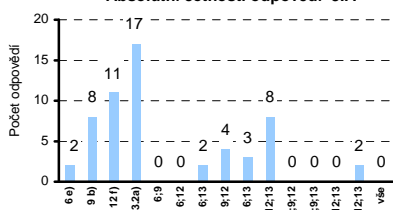
Absolutní četnosti odpovědí 2.I



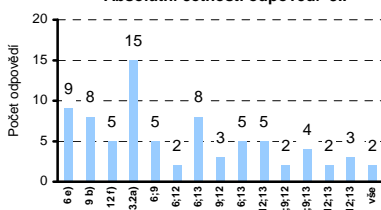
Absolutní četnosti odpovědí 2.L



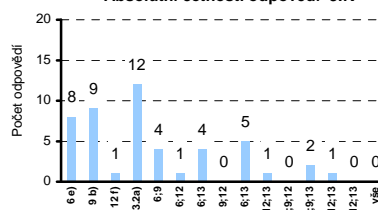
Absolutní četnosti odpovědí 3.A



Absolutní četnosti odpovědí 3.I



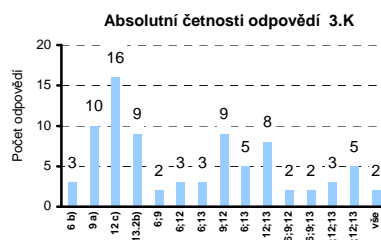
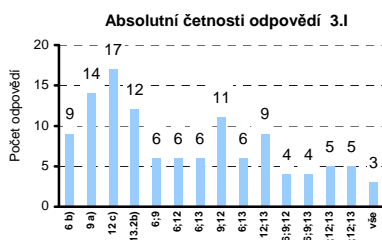
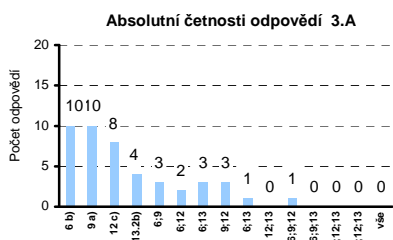
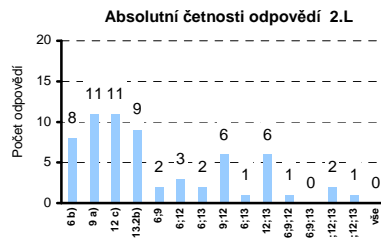
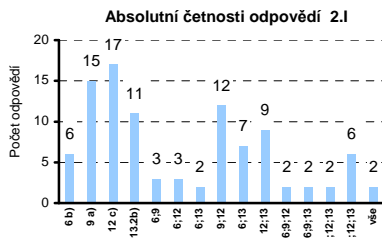
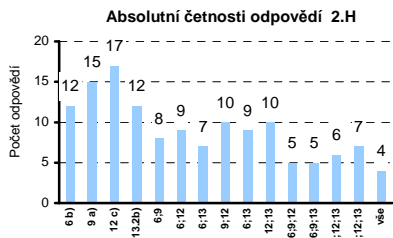
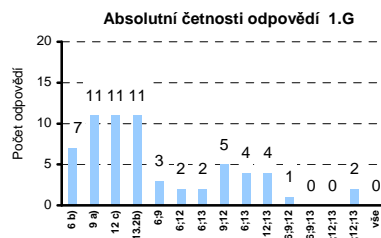
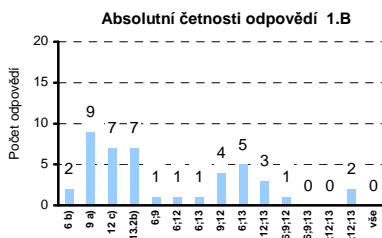
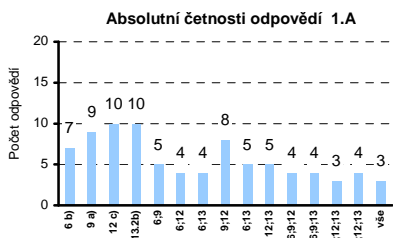
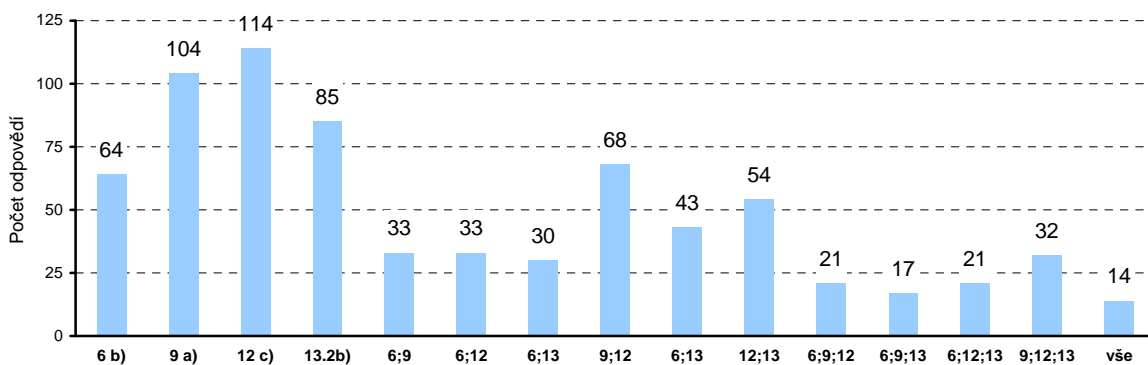
Absolutní četnosti odpovědí 3.K



Příloha B20: Výskyt opakovaných odpovědí obsahujících pojem hlasitost

Třída	6				6 6 6				6 6 6				6		
	6 b)	9 a)	12 c)	13.2b)	6;9	6;12	6;13	9;12	6;13	12;13	6;9;12	6;9;13	6;12;13	9;12;13	vše
1.A	7	9	10	10	5	4	4	8	5	5	4	4	3	4	3
1.B	2	9	7	7	1	1	1	4	5	3	1			2	
1.G	7	11	11	11	3	2	2	5	4	4	1			2	
2.H	12	15	17	12	8	9	7	10	9	10	5	5	6	7	4
2.I	6	15	17	11	3	3	2	12	7	9	2	2	2	6	2
2.L	8	11	11	9	2	3	2	6	1	6	1		2	1	
3.A	10	10	8	4	3	2	3	3	1		1				
3.I	9	14	17	12	6	6	6	11	6	9	4	4	5	5	3
3.K	3	10	16	9	2	3	3	9	5	8	2	2	3	5	2
celkem	64	104	114	85	33	33	30	68	43	54	21	17	21	32	14

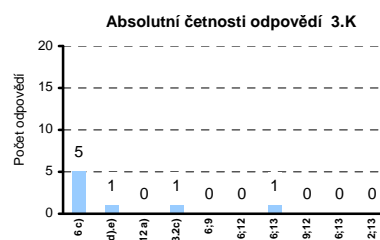
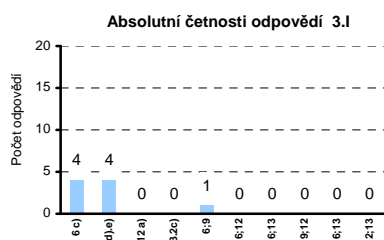
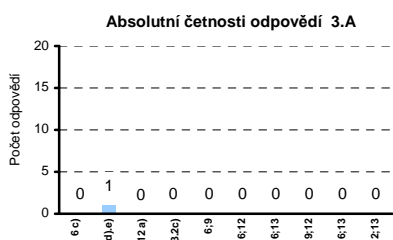
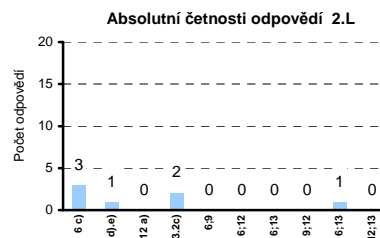
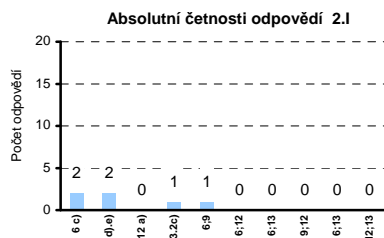
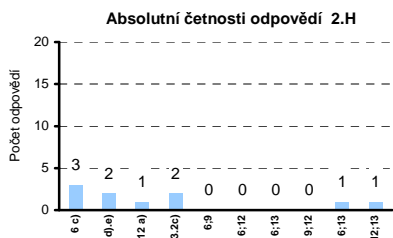
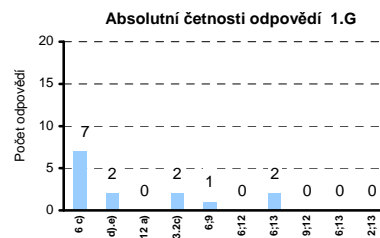
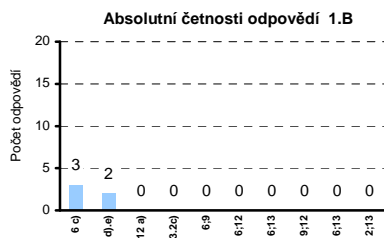
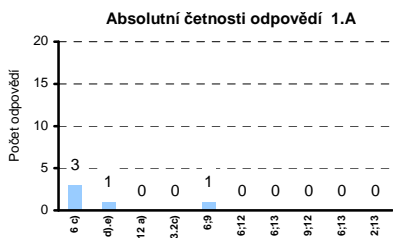
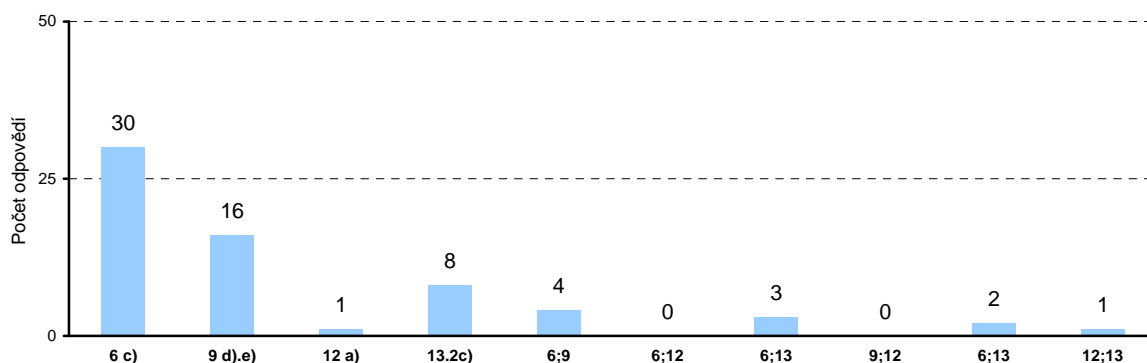
Absolutní četnost odpovědí všech žáků



Příloha B21: Výskyt opakovaných odpovědí obsahujících pojem kmitání

Třída	6				6 6 6				6 6 6				6		
	6 c)	9 d),e)	12 a)	13,2c)	6;9	6;12	6;13	9;12	6;13	12;13	6;9;12	6;9;13	6;12;13	9;12;13	vše
1.A	3	1			1										
1.B	3	2													
1.G	7	2		2	1		2								
2.H	3	2	1	2					1	1					
2.I	2	2		1	1										
2.L	3	1		2					1						
3.A		1													
3.I	4	4			1										
3.K	5	1		1			1								
celkem	30	16	1	8	4		3		2	1					

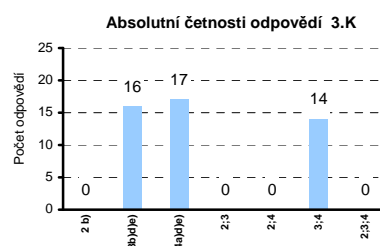
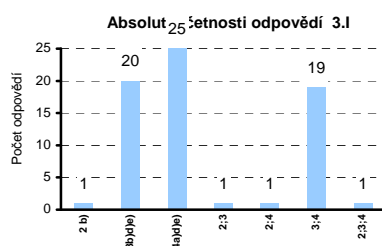
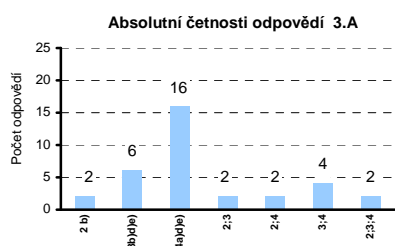
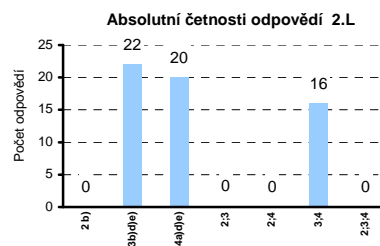
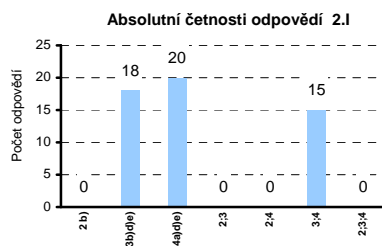
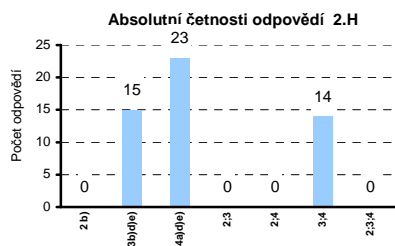
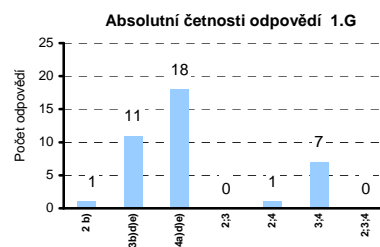
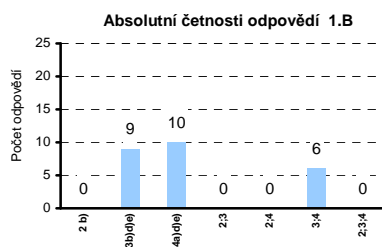
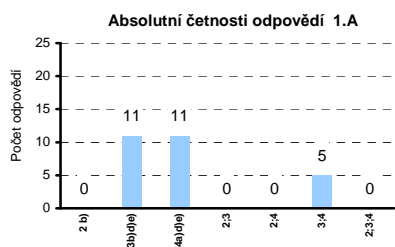
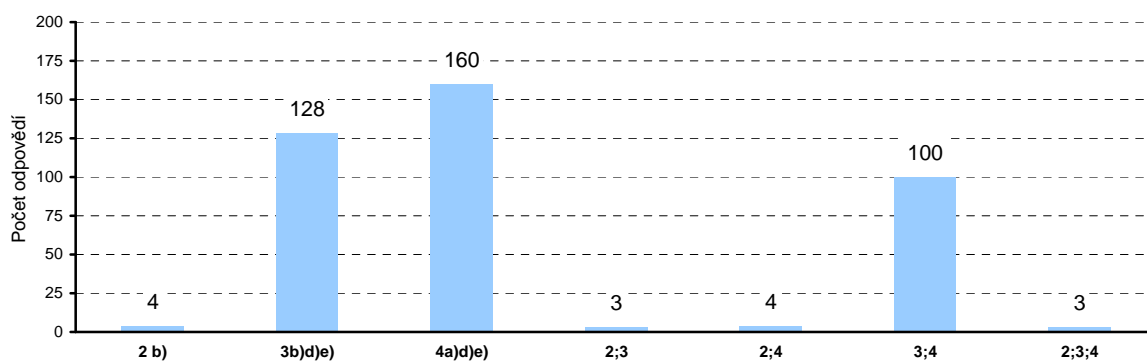
Absolutní četnost odpovědí všech žáků



Příloha B22: Výskyt opakovaných odpovědí obsahujících pojem částice

Třída	2			3			4		
	2 b)	3b)d)e)	4a)d)e)	2;3	2;4	3;4	2;3;4		
1.A		11	11			5			
1.B		9	10			6			
1.G	1	11	18		1	7			
2.H		15	23			14			
2.I		18	20			15			
2.L		22	20			16			
3.A	2	6	16	2	2	4	2		
3.I	1	20	25	1	1	19	1		
3.K		16	17			14			
celkem	4	128	160	3	4	100	3		

Absolutní četnost odpovědí všech žáků



Příloha C1: Zvukové vlnění z pohledu termodynamiky

Při rozpínání a stlačování plynu dochází v důsledku změn objemu a tlaku také k termodynamickým jevům. Zvuk je proto nutné modelovat nejen jako čistě mechanický, ale jako složitější mechanicko-termodynamický proces. Při jeho popisu se vrátím k modelovému hmotnostnímu elementu ideálního plynu zaujímajícího objem V . Z hlediska klasické termodynamiky podléhají objemové kmity elementu prvním termodynamickému zákonu popsanému rovnicí

$$\Delta U = \Delta Q + \Delta W, \quad (\text{C1.1})$$

kde ΔU představuje změnu vnitřní energie systému, ΔQ tepelnou energii dodanou systému a ΔW mechanickou práci vykonanou na systému vnějšími silami. Pro teplo odebrané systémem $\Delta Q'$ platí, že $\Delta Q' < 0$ a pro mechanickou práci $\Delta W'$ vykonanou systémem, že $\Delta W' < 0$. Dále v přiblížení platí stavová rovnice ideálního plynu

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T = N \cdot k \cdot T, \quad (\text{C1.2})$$

kde p je tlak plynu v uzavřené nádobě o objemu V , n je látkové množství plynu, N celkový počet částic IP v systému, R molární plynová konstanta o velikosti $R = 8,314 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$ a k Boltzmannova konstanta o velikosti $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$. Z toho pro uzavřené systémy při zachování počtu částic ($N = \text{konst.}$), respektive zachování látkového množství ($n = \text{konst.}$), plyne, že

$$\frac{p \cdot V}{T} = \text{konst.} \quad (\text{C1.3})$$

Termodynamické děje v podélné mechanické vlně probíhající rychleji než v řádu jednotek hertzů již není možné považovat za izotermické, protože za tak krátkou dobu nestihne dojít k vyrovnání teplot mezi elementy a ustavení teplotní rovnováhy v celém objemu plynu. Jestliže nenastává výměna částic ani tepelné energie s okolím, platí obecnější adiabatická stavová rovnice ideálního plynu (IP). Pro $\Delta Q = 0$ se pak první termodynamický zákon zjednoduší na tvar $\Delta U = \Delta W$ a stavová rovnice IP přejde na Poissonův zákon vyjádřený rovnicí

$$p \cdot V^\chi = \text{konst.}, \quad (\text{C1.4})$$

kde exponent χ představuje Poissonovu konstantu definovanou jako poměr měrné tepelné kapacity plynu při stálém tlaku c_p a jeho měrné tepelné kapacity při stálém objemu c_v

$$\chi = \frac{c_p}{c_v}. \quad (\text{C1.5})$$

Za předpokladu, že při změnách objemu elementu V zůstává zachována hmotnost elementu m , platí pro odpovídající hustotu plynu ρ v každém časovém okamžiku, že

$$m = V \cdot \rho = V_- \cdot \rho_- , \quad (\text{C1.6})$$

kde ρ a V značí klidové hodnoty bez přítomnosti vlnění, a z toho po úpravě též rovnost

$$\left(\frac{V_-}{V} \right)^\chi = \left(\frac{\rho}{\rho_-} \right)^\chi . \quad (\text{C1.7})$$

Spolu s Poissonovým zákonem ve tvaru $p \cdot V^\chi = p_- \cdot V_-^\chi = \text{konst.}$ upraveným na

$$\left(\frac{V_-}{V} \right)^\chi = \frac{p}{p_-} \quad (\text{C1.8})$$

pak při libovolném objemu elementu V platí mezi hustotou plynu ρ a tlakem plynu p vztah

$$\frac{p}{p_-} = \left(\frac{\rho}{\rho_-} \right)^\chi . \quad (\text{C1.9})$$

Když okamžitou hodnotu tlaku plynu p v elementu za přítomnosti vlnění vyjádříme jako součet klidového tlaku plynu p_- a zvukem vyvolané střídavé složky tlaku $p_~$

$$p = p_- + p_~ , \quad (\text{C1.10})$$

dostaneme vztah mezi okamžitou hodnotou střídavé složkou tlaku $p_~$, klidovým tlakem p_- , okamžitou hodnotou střídavé složky hustoty $\rho_~$ a klidovou hustotou ρ_- ve tvaru

$$1 + \frac{p_~}{p_-} = \left(1 + \frac{\rho_~}{\rho_-} \right)^\chi . \quad (\text{C1.11})$$

V rámci lineární akustiky platí, že velikost zvukem vyvolané střídavé složky tlaku $p_~$ (10^{-5} až 10 Pa) je řádově menší než velikost stejnosměrné složky p_- , kterou představuje atmosférický tlak (cca. 10^5 Pa). Rozvoj pravé strany rovnice C1.11 v mocninnou řadu pak pro

$$|p_~| \ll |p_-| \quad \text{a} \quad |\rho_~| \ll |\rho_-| \quad (\text{C1.12})$$

při zanedbání kvadratického členu vede ke vztahu

$$\left(1 + \frac{\rho_~}{\rho_-} \right)^\chi \cong 1 + \chi \frac{\rho_~}{\rho_-} \quad (\text{C1.13})$$

a tím k výslednému tvaru linearizované stavové rovnice ideálního plynu pro adiabatický tepelný děj

$$\boxed{\frac{p_~}{\rho_~} = \chi \frac{p_-}{\rho_-}} . \quad (\text{C1.14})$$

Příloha C2: Teoretické odvození velikosti rychlosti šíření zvuku ve vzduchu z modelu ideálního plynu

Rychlost šíření zvuku je v akustice jednou z nejdůležitějších veličin charakterizujících látkové prostředí. Velikost rychlosti šíření zvuku vlněním plynného prostředí lze teoreticky odvodit z linearizované stavové rovnice ideálního plynu pro adiabatický tepelný děj C1.14 rozměrovou analýzou poměru tlaku a hustoty plynu

$$\left[\frac{p}{\rho} \right] = \frac{\frac{N}{m^2}}{\frac{kg}{m^3}} = \frac{kg \cdot m}{s^2} \cdot \frac{1}{m^2} \cdot \frac{m^3}{kg} = \frac{m^2}{s^2} = [c^2]. \quad (C2.1)$$

Platí tudíž odpovídající doplnění stavové rovnice ideálního plynu C1.14 na tvar

$$\frac{p_{\sim}}{\rho_{\sim}} = \chi \cdot \frac{p_{-}}{\rho_{-}} = c^2. \quad (C2.2)$$

Po úpravě z něj lze získat jednoduchý vzorec pro výpočet rychlosti šíření zvuku c vlněním plynné látky s klidovou hustotou ρ_{-} při klidovém tlaku plynu p_{-} .

$$c = \sqrt{\chi \cdot \frac{p_{-}}{\rho_{-}}}, \quad (C2.3)$$

z něž lze dále teoreticky odvodit velikost rychlosti šíření zvuku vlněním vzduchu. Pro běžné podmínky, tedy normální atmosférický tlak vzduchu $p_{-} = 101\,325$ Pa, hustotu vzduchu při 0°C $\rho_{-} = 1,294$ kg·m⁻³ a adiabatický exponent vzduchu $\chi = 1,402$ [6, 72] vychází rychlost zvuku

$$c_{0^{\circ}\text{C}} = \sqrt{1,402 \cdot \frac{1,013 \cdot 10^5}{1,294}} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} = 331,3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}. \quad (C2.4)$$

Podle konkrétních dosažených číselných hodnot jsou pak v literatuře uváděny hodnoty teoreticky odvozené rychlosti zvuku v rozmezí mezi $331,2$ m·s⁻¹ a $331,5$ m·s⁻¹. Hustota vzduchu závisí na atmosférickém tlaku a teplotě vzduchu. Její hodnoty pro běžné podmínky lze dohledat v matematických a fyzikálních tabulkách [44]. Například vzduch o teplotě 25°C při tlaku vzduchu $p_{-} = 1,020 \cdot 10^5$ Pa má tabelovanou hustotu $\rho_{-} = 1,192$ kg·m⁻³ a rychlost šíření zvuku vlněním vzduchu podle vzorce C2.4 vychází

$$c_{25^{\circ}\text{C}} = \sqrt{1,402 \cdot \frac{1,020 \cdot 10^5}{1,192}} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} = 346,4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}. \quad (C2.5)$$

Velikost rychlosti šíření zvuku vlněním plynného látkového prostředí pro plyn libovolného chemického složení je možné odvodit opět přímo ze stavové rovnice ideálního plynu [25, 37]. Za předpokladu, že p_- je klidový tlak plynu v elementu s klidovým objemem V_- (rozměry elementu \ll vlnová délka λ) a T je termodynamická teplota v kelvinech, vyplývá ze stavové rovnice ve tvaru C1.2 vztah mezi termodynamickými a mechanickými veličinami

$$R \cdot T = p_- \frac{V_-}{n} = p_- \frac{\frac{m}{\rho_-}}{\frac{M_{mol}}{n}} = p_- \frac{M_{mol}}{\rho_-} = \frac{p_-}{\rho_-} M_r \cdot N_A \cdot m_u = \frac{p_-}{\rho_-} \cdot M_r \cdot 10^{-3}. \quad (C2.6)$$

V klidovém stavu představuje poměr $\frac{V_-}{n}$ molární objem a $M_{mol} = \frac{m}{n}$ molární hmotnost.

M_r je relativní molekulová hmotnost daná součtem relativních atomových hmotností A_r . Součin Avogadrovy konstanty N_A s atomovou hmotnostní konstantou m_u má hodnotu $N_A \cdot m_u = 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{mol}^{-1}$. Molární plynová konstanta R má hodnotu $R = 8,314 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$.

Dosazením za poměr rovnovážného tlaku a hustoty $\frac{p_-}{\rho_-} = \frac{c^2}{\chi}$ přejde rovnice C2.6 na tvar

$$R \cdot T = \frac{c^2}{\chi} \cdot M_r \cdot 10^{-3}. \quad (C2.7)$$

Pro výpočet velikosti rychlosti šíření zvuku v libovolném plynném prostředí je pak možno použít obecnější vztah

$$c = \sqrt{R \cdot 10^3 \cdot \frac{\chi}{M_r} \cdot T}. \quad (C2.8)$$

Z něj je na první pohled zřejmé, že podle teoretického modelu IP závisí rychlost šíření zvuku vlněním ideálního plynu pouze na termodynamické teplotě plynu. Podle linearizovaného modelu ideálního plynu pro adiabatický děj tedy rychlost šíření vlnění c nezávisí na stejnosměrné složce tlaku plynu p_- . Poměr tlaku vzduchu p_- vůči hustotě vzduchu ρ_- totiž za všech okolností zůstává konstantní. V praktických aplikacích proto rychlost zvuku ve vzduchu nezávisí na atmosférickém tlaku vzduchu. Změna rychlosti zvuku s nadmořskou výškou je tak dána pouze odpovídající změnou teploty [72]. Rychlost zvuku nezávisí ani na hladině akustického tlaku p_{-ef} , frekvenci zvukového vlnění, respektive na vlnové délce zvuku v plynu a je určena pouze mechanickými a termodynamickými vlastnostmi plynného látkového prostředí.

Hodnota adiabatického exponentu χ závisí na celkovém počtu stupňů volnosti molekul plynu (rotace, translace a kmitání molekuly), který je dán počtem atomů v molekule. Pro jednoatomové molekuly je $\chi_1 \approx 1,7$ (argon), pro dvouatomové molekuly $\chi_2 \approx 1,4$ (kyslík, dusík) a pro víceatomové molekuly $\chi \approx 1,3$ (oxid uhličitý). Velikost adiabatického exponentu vzduchu složeného z 99% ze dvouatomových molekul je proto $\chi_{\text{vzduch}} \approx 1,4$. Přesnější tabulková hodnota je $\chi_{\text{vzduch}} = 1,402$ [72].

Tab. C2.1: Základní chemické složení suchého vzduchu, 4 hlavní složky podle [6, 43, 44, 72]

	Objemová koncentrace	Hmotnostní koncentrace	Molek. rel. hmotnost M_r	Adiab. exponent χ
N ₂	78,084 %	75,51 %	28,02	1,404
O ₂	20,946 %	23,16 %	32,00	1,401
Ar	0,934 %	1,28 %	39,95	1,668
CO ₂	0,033 %	0,05 %	44,01	1,304

Při termodynamické teplotě $T = 273,15$ K dává výpočet ze vzorce C2.8 pro chemicky čistý plynný dusík rychlost šíření zvuku $c_{\text{N}_2} \approx 337$ m·s⁻¹. Pro plynné látkové prostředí tvořené pouze dvouatomovými molekulami kyslíku pak vychází rychlost zvuku $c_{\text{O}_2} \approx 315$ m·s⁻¹. Průměrná molekulová hmotnost M_r suchého vzduchu tvořeného 75,51% dusíku N₂, 23,16% kyslíku O₂, 1,28% argonu a 0,05 % oxidu uhličitého pak odpovídá $M_{r \text{ vzduch}} = 29,10$ a rychlost šíření zvuku podélný mechanický vlnění vzduchu při teplotě 0°C podle vzorce C2.8 vychází opět zhruba $c_{\text{vzduch } 0^\circ\text{C}} \approx 331$ m·s⁻¹.

Nezávislá měření potvrzují teoreticky předpovězenou hodnotu $c_{\text{vzduch } 0^\circ\text{C}} = 331,3 \pm 0,1$ m·s⁻¹ [6, 72]. Historicky nejčastěji citovaná experimentálně zjištěná hodnota rychlosti zvuku ve vzduchu pro slyšitelné frekvence (adiabatická komprese a dekomprese pro $f > 20$ Hz), suchý vzduch (0% molekul H₂O), objemovou koncentrací CO₂ 0,03%, $T = 273,15$ K a atmosférický tlak $p. = 1,013 \cdot 10^5$ Pa je $c_{\text{vzduch } 0^\circ\text{C}} = 331,45 \pm 0,05$ m·s⁻¹ [6].

Ve skutečných podmínkách rychlost šíření zvuku vlněním vzduchu závisí také na vlhkosti vzduchu, tedy obsahu vodní páry ve vzduchu. Relativní vlhkost má však na velikost rychlosti šíření zvuku vzduchem překvapivě malý vliv v řádu jednotek procent (maximálně 1,2% nárůst c pro relativní vlhkost 100% při 40°C [6]). Vlhkost vzduchu má však značný vliv na útlum zvukového vlnění vzduchu. Nejvýznamnější je tak právě závislost rychlosti zvuku na teplotě vzduchu.

Dále budu pro zjednodušení místo termodynamické teploty v kelvinech používat teplotu v Celsiových stupních značenou ϑ (theta), aby se předešlo záměně s veličinou čas značenou v tomto konceptu konzistentně t . Přepočtení termodynamické teploty T v kelvinech (složené závorky značí číselnou hodnotu) na teplotu v celsiových stupních ϑ se řídí vztahem

$$\vartheta = \{ T - 273,15 \} ^\circ\text{C}. \quad (\text{C2.9})$$

Výše odvozená závislost rychlosti šíření mechanického vlnění plynu na teplotě plynu C2.8 ostatně vyplývá i z objemové roztažnosti plynu. Pro objem plynu V_ϑ uzavřený při teplotě ϑ v idealizované nádobě s posuvným pístem (nehmotný dokonale těsnící píst pohybující se bez tření) platí

$$V_\vartheta = V_{273,15\text{K}} (1 + \gamma_p \cdot \Delta T) = V_{0^\circ\text{C}} \cdot \{ 1 + \gamma_p \cdot \vartheta \}, \quad (\text{C2.10})$$

a pro závislost hustoty plynu ρ_ϑ na teplotě ϑ ve $^\circ\text{C}$ pak platí vztah

$$\rho_\vartheta = \frac{\rho_{273,15\text{K}}}{(1 + \gamma_p \cdot \Delta T)} = \frac{\rho_{0^\circ\text{C}}}{\{ 1 + \gamma_p \cdot \vartheta \}}, \quad (\text{C2.11})$$

v nichž $V_{273,15\text{K}} = V_{0^\circ\text{C}}$ značí objem plynu a $\rho_{273,15\text{K}} = \rho_{0^\circ\text{C}}$ hustotu plynu při teplotě 0°C a γ_p je koeficient objemové roztažnosti ideálního plynu při konstantním tlaku [6]

$$\gamma = \gamma_p = \frac{1}{273,15} \text{K}^{-1} = 0,003661 \text{K}^{-1}. \quad (\text{C2.12})$$

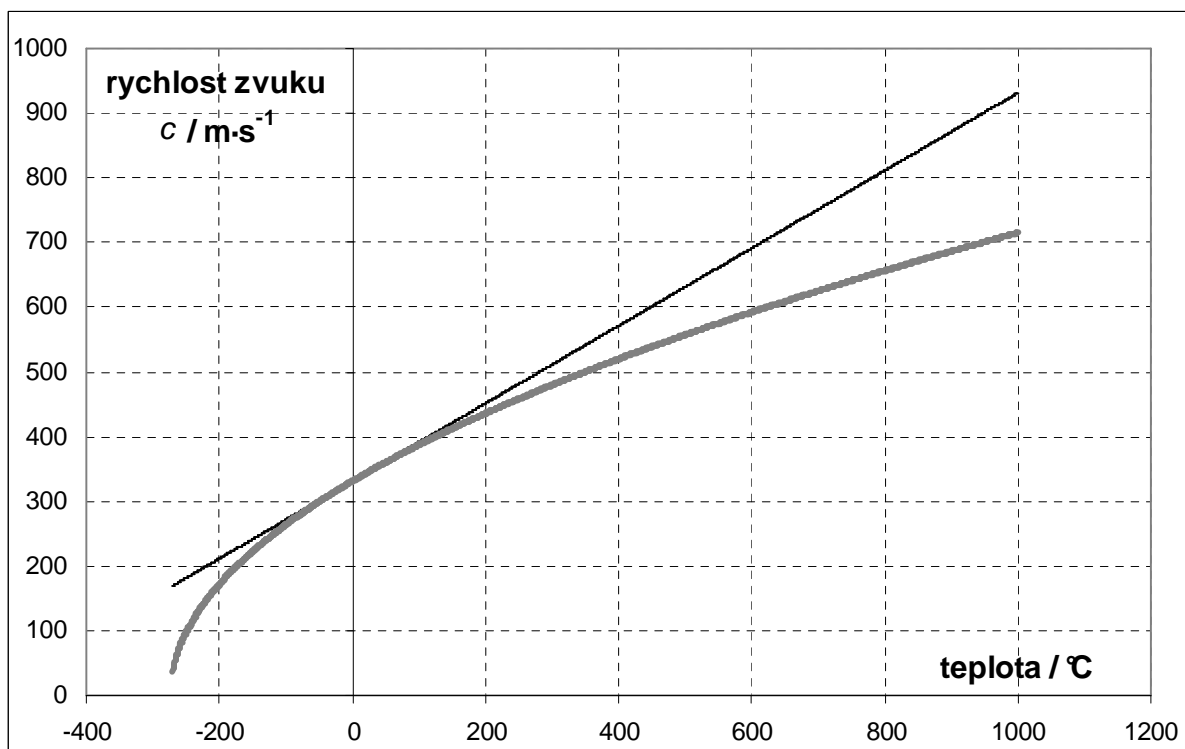
Vzorec pro výpočet velikosti rychlosti zvuku c_ϑ v závislosti na teplotě ϑ má pak tvar

$$c_\vartheta = \sqrt{\chi \cdot \frac{p_-}{\rho_-} \cdot \{ 1 + \gamma \cdot \vartheta \}} = c_{0^\circ\text{C}} \cdot \sqrt{\{ 1 + \gamma \cdot \vartheta \}}. \quad (\text{C2.13})$$

Po číselném dosazení za $c_{0^\circ\text{C}}$ z (C2.4) a za γ z (C2.12) lze získat teoretický vztah pro výpočet rychlosti šíření zvuku vlněním vzduchu

$$c_\vartheta \cong 331,3 \cdot \sqrt{1 + \frac{\{ \vartheta \}}{273,15}} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1} \quad \cong 331,3 \cdot \sqrt{1 + 0,003661 \cdot \{ \vartheta \}} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}. \quad (\text{C2.14})$$

Teplotní závislost rychlosti šíření zvuku vlněním vzduchu je přehledně znázorněna v grafu na obrázku C2.1 a v tabulce C2.1.



Obr. C2.1: Graf závislosti rychlosti zvuku c_ϑ na teplotě ϑ podle vztahu C2.14 (šedá křivka) a pro porovnání podle aproximativního vztahu C2.15 (černá úsečka).

Tab. C2.2: Teoretické hodnoty rychlosti zvuku c_ϑ v závislosti na teplotě ϑ podle vztahu C2.14

$\vartheta / ^\circ\text{C}$	$c / \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$\vartheta / ^\circ\text{C}$	$c / \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$\vartheta / ^\circ\text{C}$	$c / \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$\vartheta / ^\circ\text{C}$	$c / \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$\vartheta / ^\circ\text{C}$	$c / \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$\vartheta / ^\circ\text{C}$	$c / \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$\vartheta / ^\circ\text{C}$	$c / \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
-10	325,2	0	331,3	0	331,3	10	337,3	20	343,2	30	349,0	40	354,7
-11	324,6	-1	330,7	1	331,9	11	337,9	21	343,8	31	349,6	41	355,3
-12	323,9	-2	330,1	2	332,5	12	338,5	22	344,4	32	350,2	42	355,9
-13	323,3	-3	329,5	3	333,1	13	339,1	23	345,0	33	350,7	43	356,4
-14	322,7	-4	328,9	4	333,7	14	339,7	24	345,5	34	351,3	44	357,0
-15	322,1	-5	328,3	5	334,3	15	340,3	25	346,1	35	351,9	45	357,6
-16	321,5	-6	327,6	6	334,9	16	340,9	26	346,7	36	352,5	46	358,1
-17	320,8	-7	327,0	7	335,5	17	341,5	27	347,3	37	353,0	47	358,7
-18	320,2	-8	326,4	8	336,1	18	342,0	28	347,9	38	353,6	48	359,2
-19	319,6	-9	325,8	9	336,7	19	342,6	29	348,4	39	354,2	49	359,8
-20	318,9	-10	325,2	10	337,3	20	343,2	30	349,0	40	354,7	50	360,3

V rozsahu teplot od -30°C do $+40^\circ\text{C}$ běžných v našich klimatických podmínkách je možné nahradit závislost c na ϑ lineární aproximací při zachování přesnosti výsledku výpočtu na jednotky metru za sekundu. Proto pro odhad velikosti rychlosti zvukového vlnění ve vzduchu často postačuje přibližný vztah [6]

$$c \approx (331,3 + 0,6 \cdot \{\vartheta\}) \text{m}\cdot\text{s}^{-1}, \quad (\text{C2.15})$$

kde ϑ je číselná hodnota teploty vzduchu ve stupních Celsia. V běžných podmínkách tedy změna teploty o 1°C znamená zvýšení rychlosti zvuku ve vzduchu zhruba o $0,6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, což přehledně shrnuje následující jednoduchá tabulka.

Tab. C2.3: Teoretické hodnoty rychlosti zvuku ve vzduchu v závislosti na teplotě ϑ podle vztahu C2.15

$\vartheta / ^\circ\text{C}$	-30	-25	-20	-15	-10	-5	0	+5	+10	+15	+20	+25	+30	+35	+40	+45
$c / \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	313	316	319	322	325	328	331	334	337	340	343	346	349	352	355	358

V grafu na obrázku C2.1 je průběh závislosti rychlosti šíření zvuku c na teplotě ϑ podle vztahu C2.15 znázorněn přímkovou závislostí. V grafickém znázornění závislosti podle vzorců C2.14 a C2.15 je dobře vidět, že použití přibližného vztahu C2.15 mimo omezený interval teplot má za následek značnou nepřesnost teoretického určení rychlosti zvuku. Je tedy nutné tento jednoduchý vzorec používat obezřetně.

Výpočtem podle vzorce C2.14 je možné zjistit, že při teplotě vzduchu $\vartheta = 819,5^\circ\text{C}$ teoreticky dosáhne rychlost zvuku hodnoty $662,6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, tedy dvojnásobku hodnoty rychlosti zvuku pro teplotu 0°C , což je názorně vidět i v grafu na obrázku C2.1. Takové teploty se zprvu mohou zdát být pro běžnou akustickou praxi nereálně vysoké. Například ve spalinových cestách a výfukových systémech automobilů jsou však teploty v řádu stovek stupňů celsia a tudíž i vysoká rychlost šíření zvukového vlnění zcela běžné. Pro předpověď velikosti rychlosti zvuku v horkých směsích výfukových plynů je pak samozřejmě nutné vyjít ze vzorce C2.14 a zohlednit v něm i jejich konkrétní chemické složení.

Již děti na základní škole se učí nazpaměť, že velikost rychlosti zvuku ve vzduchu při pokojové teplotě je zhruba $c_{20^\circ\text{C}} \cong 340\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. V běžném životě je ovšem zvykem udávat rychlost translačního pohybu spíše v kilometrech za hodinu než v metrech za sekundu. I při zapamatování správné číselné hodnoty pak může u žáků záměnou jednotek rychlosti snadno dojít ke vzniku mylné představy o velikosti rychlosti šíření zvuku vlněním vzduchu. Pro úplnost je proto na místě zopakovat jednoduchý vztah pro přepočtení rychlosti translačního pohybu z metrů za sekundu na kilometry za hodinu

$$c = \{c\} \cdot [\text{m}\cdot\text{s}^{-1}] = 3,6 \cdot \{c\} \cdot [\text{km}\cdot\text{hodina}^{-1}]. \quad (\text{C2.16})$$

Pro základní odhad velikosti rychlosti šíření zvuku si pak lze snadno zapamatovat, že

$$c_{20^\circ\text{C}} \cong 340\text{ m}\cdot\text{s}^{-1} \quad \cong 1224\text{ km}\cdot\text{hodina}^{-1}. \quad (\text{C2.17})$$

Příloha C3: Totální odraz na rozhraní v akustice

Pro totální odraz vlnění platí obecně (v akustice i v optice) Snellův zákon lomu

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{c_1}{c_2}, \quad (\text{C3.1})$$

kde α je úhel dopadu a β úhel lomu. Na rovinném rozhraní mezi vzduchem s typickou hodnotou rychlosti šíření zvuku $340 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a tělesem pevného látkového skupenství (rozměr $\gg \lambda$), v němž se podélné mechanické vlnění šíří rychlostí řádově desetkrát vyšší však dochází vždy k lomu mechanického vlnění směrem od kolmice. Pozor: Světlo se v pevných látkách a kapalinách šíří pomaleji než ve vzduchu. Při dopadu světelného vlnění na rozhraní s transparentním kapalným nebo pevným látkovým prostředím tak dochází k lomu světla ke kolmici. V akustice je tomu tedy v případě lomu opačně než v optice!

Pro úhel lomu $\beta = 90^\circ = \frac{\pi}{2}$ radiánů k lomu zvukového vlnění do prostředí s vyšší hodnotou rychlosti šíření vlnění již prakticky vůbec nedojde. Protože $\sin 90^\circ = 1$, přejde Snellův zákon na tvar

$$\sin \alpha_m = \frac{c_1}{c_2}. \quad (\text{C3.2})$$

Tomuto stavu odpovídá úhel dopadu α_m , což je takzvaný mezní úhel definovaný jako

$$\alpha_m = \arg\left(\sin \frac{c_1}{c_2}\right) \quad (\text{C3.3})$$

Například na rozhraní vzduch-voda je podle vzorce (1.9) mezní úhel zhruba 13° , na rozhraní mezi vzduchem a tvrdým dřevem (dub, buk) zhruba 6° a pro dopad zvukového vlnění na sklo, ocel nebo hliník zhruba 4° . Znamená to, že pouze pokud zvukové vlnění dopadá na rozhraní s kapalinou nebo pevnou látkou téměř kolmo (vlnoplochy téměř rovnoběžné s rozhraním) může vstupovat do tělesa pevného látkového skupenství jako podélné zvukové vlnění. Pro větší úhly dopadu se mechanické vlnění odráží od rovinného rozhraní úplným odrazem. Zde ovšem předpokládáme, že se jedná o dopad vlnění na nehybně upevněné dokonale tuhé těleso. Ve skutečnosti za určitých podmínek může dojít též k rozkmitání tělesa jako celku, jeho příčnému rozvlnění či vzniku povrchové vlny na rozhraní.

Příloha D1: Vyhodnocení měření rychlosti zvuku metodou hřebenového filtru

k	$2k$	$2k-1$	$L / (\lambda/2)$	$f_{MAX p}/\text{Hz}$	$f_{MIN p}/\text{Hz}$	$c_{MAX p} / \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$c_{MIN p} / \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
0	0			0			
1		1	1		630,3		315,2
	2		2				
2		3	3		2077		346,2
	4		4	2723		340,4	
3		5	5		3389		338,9
	6		6				
4		7	7		4796		342,6
	8		8	5298		331,1	
5		9	9		6091		338,4
	10		10	7000		350,0	
6		11	11		7450		338,6
	12		12	7935		330,6	
7		13	13		8725		335,6
	14		14	9303		332,3	
8		15	15		10140		338,0
	16		16	10850		339,1	
9		17	17		11590		340,9
	18		18				
10		19	19		12910		339,7
	20		20	13550		338,8	
11		21	21		14210		338,3
	22		22				

směrnice regresní přímky

$a =$

678,62	675,18
--------	--------

 Hz

vzdálenost senzorů

$\Delta s =$

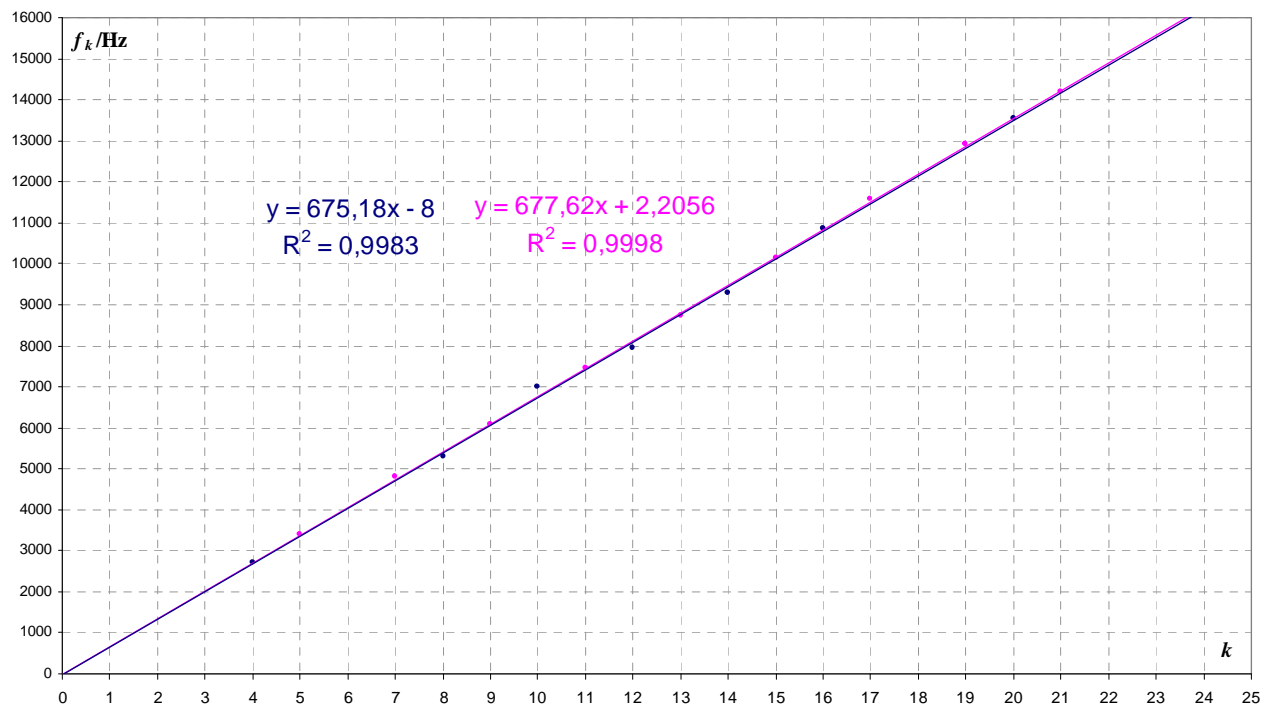
0,25

 m

rychlost zvuku ze směrnice lineární regrese

$c_{MAX p} / \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$c_{MIN p} / \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
339,3	337,6

teplota vzduchu $18^\circ\text{C} < t < 19^\circ\text{C}$



Příloha D2: Vyhodnocení měření rychlosti zvuku v jednostranně uzavřené trubici

k	$2k$	$2k-1$	$L / (\lambda/4)$	$f_{MAX p}/\text{Hz}$	$f_{MIN p}/\text{Hz}$	$f_{MIN grad p}/\text{Hz}$	$f_{MAX grad p}/\text{Hz}$	$c_{MAX p} / \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$c_{MIN p} / \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$c_{MIN grad p} / \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$c_{MAX grad p} / \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
0	0			0		0					
1		1	1	69,09		65,4	69,58	345,5		327,0	347,9
		2	2								
2		3	3	207,4	211,8	195,4	208	345,7	353,0	325,7	346,7
		4	4								
3		5	5	346,9	353,6	331	347,7	346,9	353,6	331,0	347,7
		6	6								
4		7	7	485,2	492		486,2	346,6	351,4		347,3
		8	8								
5		9	9	624,9	634	596,3	626,5	347,2	352,2	331,3	348,1
		10	10								
6		11	11	763,1	772,5	730,5	764,5	346,9	351,1	332,0	347,5
		12	12								
7		13	13	901,8	911,9	857	904,5	346,8	350,7	329,6	347,9
		14	14								
8		15	15	1041,1	1053,7	989,5	1044,2	347,0	351,2	329,8	348,1
		16	16								
9		17	17	1180	1193,8		1181,8	347,1	351,1		347,6
		18	18								
10		19	19	1316,8	1332,4	1267,9	1321,4	346,5	350,6	333,7	347,7
		20	20								
11		21	21	1450,2	1472,7	1388,2	1459,9	345,3	350,6	330,5	347,6
		22	22								
12		23	23	1590,8	1611,9	1512,7	1601,9	345,8	350,4	328,8	348,2
		24	24								
13		25	25	1739	1751,9	1662,3	1744	347,8	350,4	332,5	348,8
		26	26								
14		27	27		1893,1	1822,5	1878		350,6	337,5	347,8
		28	28								

směrnice regresní přímky

$a =$

69,32	69,99	66,80	69,64
-------	-------	-------	-------

rychlost zvuku ze směrnice lineární regrese

$c_{MAX p} / \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$c_{MIN p} / \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$c_{MIN grad p} / \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$c_{MAX grad p} / \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
346,6	350,0	334,0	348,2

délka trubice $L =$

1,25

 m

průměr trubice $D =$ 0,0628 m

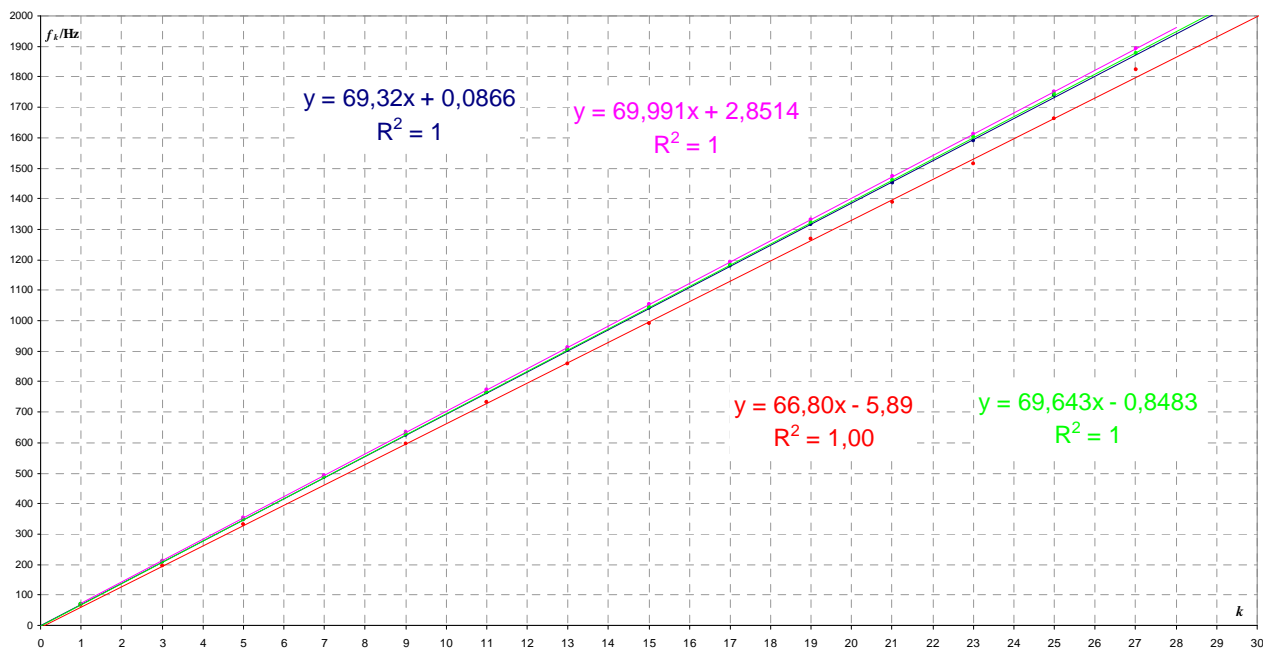
korekce délky $0,6 \cdot D =$ 0,04 m

korigovaná délka vzduchového sloupce
 $L + 0,6D =$ 1,29 m

s korekcí délky:

$c_{MAX p} / \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$c_{MIN p} / \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$c_{MIN grad p} / \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$c_{MAX grad p} / \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
357,0	360,5	344,1	358,7

teplota vzduchu $27^\circ\text{C} < t < 28^\circ\text{C}$



Příloha D3: Vyhodnocení měření rychlosti zvuku v oboustranně otevřené trubici

k	$f_{MAX p}/\text{Hz}$	$f_{MIN p}/\text{Hz}$	$f_{MIN grad p}/\text{Hz}$	$f_{MAX grad p}/\text{Hz}$	$c_{MAX p} / \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$c_{MIN p} / \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$c_{MIN grad p} / \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$c_{MAX grad p} / \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
1	69,21		67,62	69,21	341,9		334,0	341,9
2	136,5	138,7	137	138,8	337,2	342,6	338,4	342,8
3	207,5	209,5	203,8	208	341,7	345,0	335,6	342,5
4	276,9	279,4	274,1	277,5	342,0	345,1	338,5	342,7
5	345,9	349,1	337,6	346,9	341,7	344,9	333,5	342,7
6		417,3		416,9		343,6		343,2
7	484,8	489,8	483,8	489,2	342,1	345,7	341,4	345,2
8	552,7	558,4		556,2	341,3	344,8		343,5
9	623,6	628,7		626	342,3	345,1		343,6
10	690,9	697,3		695,9	341,3	344,5		343,8
11	760,9	766,3		764,6	341,7	344,1		343,4
12		835,8		834,9		344,1		343,7
13		905		904,2		343,9		343,6
14		975,7		973,7		344,3		343,6
15		1046		1043		344,5		343,5
16		1114		1112		343,9		343,3
17		1185		1181		344,3		343,2
18		1253		1254		343,9		344,2
19		1322		1323		343,7		344,0
20								
21		1463		1461		344,2		343,7
22		1533		1535		344,2		344,7
23		1602				344,1		
24		1675		1675		344,8		344,8
25		1746		1743		345,0		344,4
26		1812		1810		344,3		343,9
27		1882		1877		344,3		343,4
28		1952		1951		344,4		344,2

směrnice regresní přímky

$a =$

69,23	69,70	68,99	69,69
-------	-------	-------	-------

rychlost zvuku ze směrnice lineární regrese

$c_{MAX p} / \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$c_{MIN p} / \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$c_{MIN grad p} / \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$c_{MAX grad p} / \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
342,0	344,3	340,8	344,3

délka trubice $L =$

2,47

 m

průměr trubice $D =$ 0,0628 m

korekce délky $0,6 \cdot D =$ 0,04 m

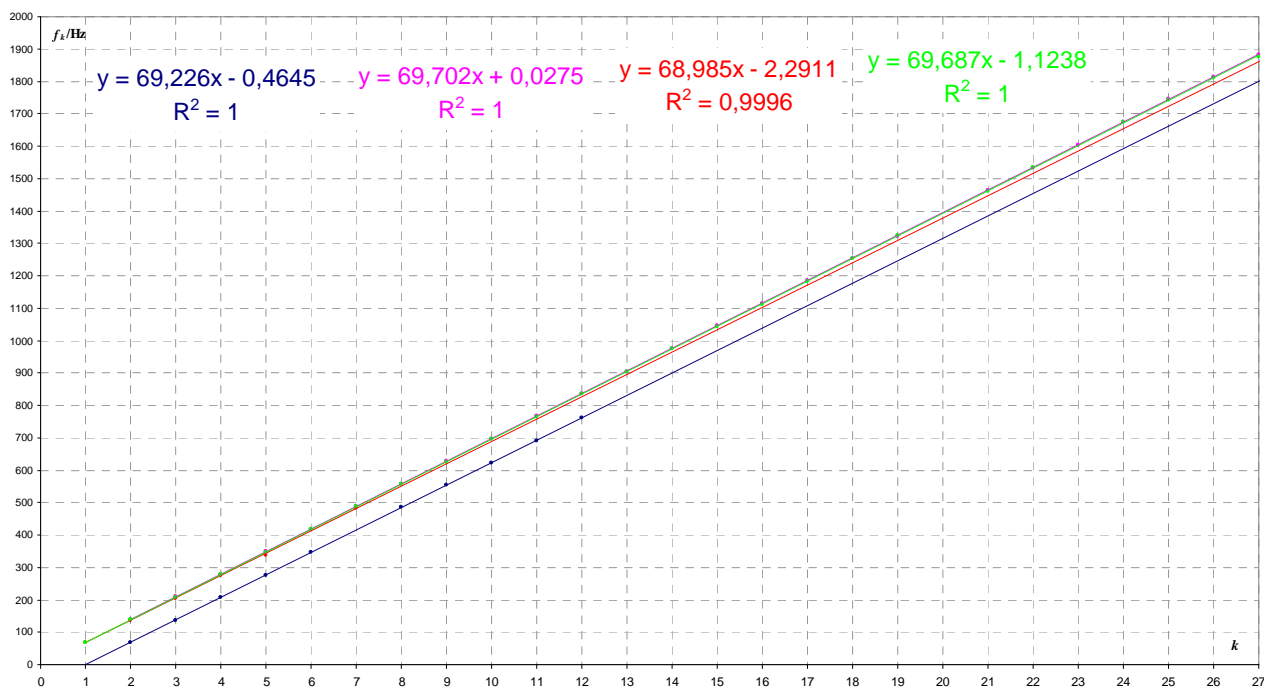
s korekcí délky:

korigovaná délka vzduchového sloupce

$L + 0,6D =$ 2,55 m

$c_{MAX p} / \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$c_{MIN p} / \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$c_{MIN grad p} / \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$c_{MAX grad p} / \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
352,4	354,8	351,2	354,8

teplota vzduchu $21^\circ\text{C} < t < 22^\circ\text{C}$



Příloha E1: Realizovaná projektová výuka akustiky na ESFZ FAU

Představený výukový koncept završuje projektová výuka, při které žáci prakticky uplatní a dále rozvíjejí vědomosti a dovednosti práce se zvukem osvojené ve workshopech. Výzkum projektové výuky v akustice probíhal jako série případových studií žákovských experimentů realizovaných v období od dubna roku 2009 do dubna 2015 v rámci žákovského výzkumného centra Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, takzvaného ErlangerSchülerForschungs-Zentrum für Bayern, zkráceně ESFZ [3]. To vzniklo z iniciativy fyzikálního institutu a oddělení didaktiky fyziky FAU v únoru roku 2009 a od té doby pořádá pro žáky gymnázií a odborných středních škol ve věku 14 až 19 let čtyřikrát ročně v období bavorských školních týdenní soustředění, takzvaný výzkumný kemp. Během tohoto pětidenního soustředění v celkovém rozsahu 40 hodin mají žáci k dispozici místnosti a přístrojové vybavení projektového fyzikálního praktika fyzikálního institutu FAU a po domluvě i laboratorní vybavení dalších oddělení fyzikálního institutu, univerzitní knihovnu a technické zázemí univerzitních dílen. Odbornou pomoc při realizaci projektů žákům poskytují vysokoškolští pedagogové, výzkumní pracovníci, doktorandi a studenti vyšších ročníků fyzikálního inženýrství a učitelství fyziky. Tito tutoři s žáky konzultují jejich výzkumný záměr, pomáhají při realizaci experimentu, výběru vhodných měřicích přístrojů, zadávání výroby v dílnách, při technických problémech i v krizových situacích, kdy citlivým pedagogickým působením žáky motivují při překonávání dílčích neúspěchů jejich projektu. Za uplynulých 6 a půl roku trvání projektu tak bylo v rámci výzkumného centra ESFZ realizováno již 26 týdenních kempů a celkově podpořeno aktuálně již více než 200 originálních žákovských projektů z nejrůznějších přírodovědných a technických oborů.

Realizované žákovské projekty z akustiky 2009-2015:

- 1) Zkoumání zvučících sklenek na víno
- 2) Analýza zvuku různých technik houslové hry
- 3) Vliv konstrukce kytary na barvu zvuku
- 4) Spektrální analýza zvuku dechových hudebních nástrojů
- 5) Parkovací senzory pro osobní automobily na principu sonaru
- 6) Zjišťování, zda je vařené vajíčko, pomocí ultrazvuku
- 7) Systém pro zaměření místa úderu na desku stolu pomocí piezosnímačů
- 8) Ultrazvuková sonoluminiscence ve stojaté zvukové vlně ve vodě
- 9) Ultrazvuková levitace ve stojaté zvukové vlně ve vzduchu
- 10) Velkoplošné akusticko-elektrické měniče pro výrobu elektrické energie
- 11) Výroba jednoduchých elektro-dynamických reproduktorů a mikrofonů
- 12) Počítačová simulace prostorové akustiky
- 13) Návrh výhybky pro subwoofer
- 14) Stroboskop řízený hudbou
- 15) Frekvenční analyzátor s LED zobrazením

Příloha E2: Návrhy SOČ a maturitních prací pro střední školy

Fakulta	Pedagogická fakulta Západočeské univerzity v Plzni
katedra	Katedra matematiky, fyziky a technické výchovy
kontaktní osoba	Daniel Aichinger
email	dann@kmt.zcu.cz

Název:	Měření hluku a ochrana lidského zdraví před hlukem	ZADÁNO	Měření hluku v budově školy pomocí ručního hlukoměru i počítačem řízeného a vyhodnocovaného měření. Fyzikální principy měření hluku, kalibrace, vyhodnocování měření, identifikace zdroje hluku, platné hlukové normy v ČR a EU, návrh protihlukových úprav.
Název:	Ozvučení a akustické úpravy poslechového prostoru	Anotace:	Fyzikální principy ozvučení poslechového prostoru, umístění reprosoustav pro stereofonní a vícekanálovou reprodukci, instalace a měření vlivu umístění zvukové pohltivých panelů a difuzorů, poslechové testy a jejich souvislost s naměřenými hodnotami.
Název:	Objektivní analýza zvuku hudebních nástrojů a lidského hlasu	Anotace:	Hodnocení zvuku různých druhů hudebních nástrojů, lidského hlasu a zpěvu pomocí objektivních metod v časové i frekvenční oblasti a pomocí dlouhodobých statistik výchylky. Záznam, analýza a vizualizace výsledků pomocí počítačem řízeného měření.
Název:	Měření akustických parametrů místnosti	Anotace:	Měření frekvenční závislosti doby dozvuku pomocí počítačem řízeného a vyhodnocovaného experimentu v místnostech různého tvaru a velikosti, ověření souvislosti subjektivního vnímání prostoru s naměřenými akustickými parametry místnosti a polohou zdrojů zvuku.
Název:	Jak zvukem rozbít sklenku na víno	ZADÁNO	Stavba a optimalizace experimentu pro destrukci tenkostěnných sklenek na víno různé velikosti a tvaru za pomoci stojaté zvukové vlny. Měření rezonančních vlastností sklenek, teoretické vysvětlení daného jevu a praktické ověření jevu pro různé sklenky.
Název:	Měření rychlosti zvuku ve vzduchu	Anotace:	Ověření rychlosti zvuku ve vzduchu v závislosti na teplotě vzduchu přímou metodou a nepřímou metodou analýzy stojatého vlnění ve vzduchem naplněných trubcích. Teoretické základy, stavba experimentu, měření a vyhodnocování s pomocí počítače.
Název:	Metody hodnocení zvukové kvality kompresních algoritmů	Anotace:	Metody objektivního a subjektivního hodnocení kvality ztrátových audio-kódérů pro MPEG I Layer 2 a 3, WMA a dalších. Teoretické principy hodnocení zvukové kvality, zásady návrhu poslechových testů, praktický design testu, tvorba metodiky, provedení a vyhodnocení.
Název:	Fyzikální principy funkce různých typů mikrofonů	Anotace:	Praktická stavba jednoduchých funkčních modelů akusticko-elektrických měničů pro senzory akustického tlaku a gradientu akustického tlaku. Teorie využívaných fyzikálních jevů, stavba prototypů, počítačem řízené a vyhodnocované měření jejich parametrů.
Název:	Objektivní srovnávací test přenosných audiopřehrávačů	Anotace:	Měření parametrů D/A převodníku a obvodů sluchátkového zesilovače, poslechové testy a korelace výsledků s objektivně měřitelnými parametry jako zkreslení, výstupní impedance a její vliv na frekvenční charakteristiku.
Název:	Akustická levitace	Anotace:	Levitace drobných objektů ve stojaté zvukové vlně vytvořené pomocí ultrazvukových zdrojů. Stavba experimentu, optimalizace parametrů pro dané typy ultrazvukových aktorů a levitujících objektů.
Název:	Měření parametrů reproduktorů a reproduktorových soustav	Anotace:	Měření parametrů vícepásmových reprosoustav, jednotlivých elektroakustických měničů, frekvenční výhybky a konstrukce ozvučnice. Fyzikální principy, měření, provedení a vyhodnocení poslechových testů a formulace souvislosti naměřených hodnot s výsledky poslechových testů.
Název:	Fyzika hudebních nástrojů	Anotace:	Základní fyzikální princip funkce klasických a elektronických hudebních nástrojů pro běžně užívané nástroje strunné, dechové a perkusní. Počítač jako hudební nástroj, hardwarové i softwarové syntetizátory, samplery a sekvencery.
Název:	Prostorový zvuku pro domácí kino	Anotace:	Fyzikální a psychoakustické jevy využívané ve vícekanálových systémech prostorového zvuku (např. Dolby Digital, DTS, MP3 Surround). Teorie prostorového slyšení, návrh hardwarového řešení, testovací signály pro nastavení domácího kina.
Název:	Akustický laser	Anotace:	Využití termoakustického jevu pro generování zvuku zesílené čtvrtvlnovým rezonátorem analogicky k principu funkce optického laseru. Návrh a optimalizace experimentu, měření teploty zdroje, frekvence a hladiny akustického tlaku generovaného zvuku.