

TEMATICKÁ PŘÍLOHA č. 2/2021

Akustika

# METROLOGIE

VĚDECKÁ  
LEGÁLNÍ  
PRAKTICKÁ



**AKUSTIKA****Ing. Marek Blabla***Český metrologický institut*

<b>1. OBECNĚ O AKUSTICE, HISTORIE</b> .....	<b>1</b>
1.1 Pojem akustika .....	1
1.2 Historie .....	1
<b>2. POJMY A VELIČINY</b> .....	<b>7</b>
2.1 Oscilátor, periodický, harmonický pohyb .....	8
2.2 Složený signál .....	8
2.3 Analýza signálu .....	9
2.4 Výška tónu .....	12
2.5 Barva tónu .....	12
2.6 Hlasitost zvuku .....	13
2.7 Šíření zvuku .....	14
2.8 Dopplerův jev .....	15
2.9 Druhy vlnění .....	15
2.10 Odraz a pohlcení zvuku .....	16
<b>3. FYZIKÁLNÍ AKUSTIKA</b> .....	<b>17</b>
3.1 Akustická výchylka .....	17
3.2 Akustická rychlost .....	17
3.3 Akustický tlak .....	18
3.4 Efektivní hodnota akustické rychlosti a akustického tlaku .....	18
3.5 Akustický výkon .....	18
3.6 Intenzita zvuku .....	18
3.7 Hladina akustické intenzity a akustického tlaku .....	19
3.8 Práh slyšitelnosti .....	19
3.9 Akustické vážení – váhová křivka A .....	19
3.10 Práh bolesti .....	20
3.11 Akustická impedance .....	20
<b>4. FYZIOLOGICKÁ AKUSTIKA</b> .....	<b>21</b>
4.1 Sluchový orgán člověka .....	21
4.2 Hlasový orgán člověka .....	23
4.3 Subjektivní vjem zvuku .....	24
4.4 Fauna .....	26
<b>5. STAVEBNÍ AKUSTIKA</b> .....	<b>27</b>
5.1 Obecné pojmy .....	27
5.2 Prostory se speciální akustikou .....	29
<b>6. ZÁVĚR</b> .....	<b>31</b>
<b>7. LITERATURA</b> .....	<b>32</b>

**ACOUSTICS****Ing. Marek Blabla***Czech metrology institute*

<b>1. ABOUT ACOUSTICS IN GENERAL, HISTORY</b> .....	<b>1</b>
1.1 Concept of acoustics .....	1
1.2 History .....	1
<b>2. TERMS AND QUANTITIES</b> .....	<b>7</b>
2.1 Oscillator, periodic, harmonic movement .....	8
2.2 Composite signal .....	8
2.3 Signal analysis .....	9
2.4 Tone pitch .....	12
2.5 Tone timbre .....	12
2.6 Sound volume .....	13
2.7 Sound propagation .....	14
2.8 Doppler effect .....	15
2.9 Types of waves .....	15
2.10 Sound reflection and absorption .....	16
<b>3. PHYSICAL ACOUSTICS</b> .....	<b>17</b>
3.1 Sound particle displacement .....	17
3.2 Sound speed .....	17
3.3 Sound pressure .....	18
3.4 Effective value of sound speed and sound pressure .....	18
3.5 Sound power .....	18
3.6 Sound intensity .....	18
3.7 Sound intensity and sound pressure level .....	19
3.8 Hearing threshold .....	19
3.9 A-weighting - A-weighting curve .....	19
3.10 Pain threshold .....	20
3.11 Acoustic impedance .....	20
<b>4. PHYSIOLOGICAL ACOUSTICS</b> .....	<b>21</b>
4.1 Human hearing organ .....	21
4.2 Human voice organ .....	23
4.3 Subjective sound perception .....	24
4.4 Fauna .....	26
<b>5. BUILDING ACOUSTICS</b> .....	<b>27</b>
5.1 General terms .....	27
5.2 Spaces with special acoustics .....	29
<b>6. CONCLUSION</b> .....	<b>31</b>
<b>7. LITERATURE</b> .....	<b>32</b>

## 1. OBECNĚ O AKUSTICE, HISTORIE

### 1.1 Pojem akustika

Pojem *akustika* je výraz, jehož slovní základ je odvozen z řeckého "ακουστικός". Význam slova je popisován jako "vše slyšitelné". Popisuje vědní obor, zabývající se vznikem, šířením a příjmem akustického vlnění, tedy signálu, šířícího se pružným, obvykle plynným prostředím. Smyslem tohoto článku je shrnout obory, příčiny, průběh i důsledky takových signálů, které jsou člověk a někteří živočichové schopni vnímat (až na výjimky) sluchem a možná poněkud netradičně zmínit některé vazby současného života s fyzikálními nebo historickými prvky tohoto oboru.

### 1.2 Historie

#### 1.2.1 Akustika ve starověku

Původ vědy o akustice je obecně připisován řeckému filozofovi Pythagorovi (6. století před Kristem), jehož experimenty s vlastnostmi vibrujících strun, které vytvářejí příjemné hudební intervaly, byly tak zásadní, že vedly k systému ladění, který nese jeho jméno – „Pythagorejské ladění“. Aristoteles (4. století před Kristem) vyslovil hypotézu, že se zvuková vlna šíří ve vzduchu pohybem vzduchu. Jeho domněnka byla založená více na filozofii než na experimentální fyzice, jiná jeho domněnka, která se později ukázala jako chybná, říkala, že vysoké frekvence se šíří rychleji než nízké frekvence. Tento omyl přetrvával po mnoho staletí. Vitruvius, římský architektonický inženýr (1. století před Kristem), určil správný mechanismus pro přenos zvukových vln a podstatně přispěl k akustickému návrhu divadel. V 6. století římský filozof Boethius dokumentoval několik nápadů, vztahujících se k hudbě, včetně názoru, že lidské vnímání ladění tónu je závislé na fyzikálních parametrech kmitočtu kmitání.

Odvození názvu oboru z řečtiny je pravděpodobně historickým odrazem skutečnosti, že se už ve starověku stala akustika důležitým parametrem při stavbě římských i řeckých amfiteátrů a antických chrámů. Při jejich výstavbě se používalo množství amfor, které plnily funkci dutinového rezonátoru a značnou měrou tak přispívaly k vytvoření vynikající akustiky těchto prostor. Jedním z nejdokonalějších a zároveň akusticky nejdokonalejších amfiteátrů je římské divadlo na břehu antické řeky Eurymedon v jižním Turecku (**obr. 101**), 40 km východně od Antalye, pozůstatek dnes už v ruiny proměněného antického města, původně vnitrozemského přístavu Aspendos v Pamfýlii. Amfiteátr pochází z 2. století po Kristu mezi roky 138 až 161 a jeho architektura se liší od řeckých amfiteátrů především jevištní stěnou, která přispívá k vynikající akustice divadla, jehož průměr je téměř 100 m a které pojalo až 10 000 diváků. I přes erozi tohoto architektonického díla, kvůli které byla kapacita omezena na 2500 diváků, jsou zde dnes pořádány koncerty, operní a baletní festivaly. Obdobným dochovaným řeckým amfiteátre, který je v současnosti využíván pro divadelní festivaly, je amfiteátr v peloponésském městě Epidauros (**obr. 102**).



Obr. 101: Římské divadlo na břehu antické řeky Eurymedon v jižním Turecku



Obr. 102: Amfiteátr v peloponésském městě Epidauros

Do hlediště se vejde až 15 000 diváků. Na základě vypracované studie Americké asociace pro akustiku se zdá, že základním důvodem srozumitelnosti v tomto objektu je vhodná volba velikosti a uspořádání hlediště a jeho kamenných stupňů, které fungují jako akustický filtr pro nižší kmitočty, které bývají pro srozumitelnost zvuku v otevřené krajině nejrušivější. Tedy obdoba amfor, coby akustických rezonátorů v některých jiných amfiteátrech.

Je pravděpodobné, že si člověk v pravěku uvědomoval zvuk především při bouřce. Reálné stopy o akustice ale známe z té doby díky hudebním nástrojům. Flétny z mamutiho



Obr. 103: Flétna z mamutiho klu

klu, nalezené v německém pohoří Švábská Alba a jejichž stáří se odhaduje na 43 tis. let, jsou považovány za nejstarší dochované hudební nástroje. Ve starověku se teoretickou akustikou zabývali Pythagoras (definice tónových relací při použití monochordu, tedy strunného nástroje, umožňujícího ladění tónu definovaným dělením struny), Euklides a Aristoteles (výška tónu píšťal, časové parametry



šíření zvuku v prostoru), Aristoxenos (otázky spojené s vnímáním zvuku), Anicius Boëthius (spojitost hudební akustiky s fyzikální akustikou), ve středověku pak především Leonardo da Vinci (závislost rychlosti zvuku na vlastnostech prostředí, interference a rezonance akustických vln) na přelomu 15. a 16. století a Marino Mersenne (vztah kmitočtu a výšky tónu) na přelomu 16. a 17. století. Z českých a moravských zemí přispěla k rozvoji matematiky a fyziky Jezuitská univerzita v Olomouci, a to především díky prof. Jiřímu Behmovi (1621-1666) a jeho spisu *Propositiones Mathematico Musurgicae*, ve kterém se zabývá matematickými závislostmi v hudbě.



Obr. 104: Spis prof. J. Behma *Propositiones Mathematico Musurgicae*

zkoumá rytiny s pravděpodobně hudební tematikou a určuje, zda nalezené kosti byly perforovány proto, aby sloužily jako hudební nástroje. Mnohé nálezy a studie krasových jeskyní, především ve Španělsku (Nerja poblíž Malagy), ve Francii (Roucadour, Cougnac) ale i na Yucatanu ukazují, že zde byly provozovány zvukové (hudební?) produkce. Dokladem jsou např. litofony – záměrně olámané a délkově upravené krápníky, vydávající při úderu tón. U těchto litofonů byly také objeveny vrypy, které pravděpodobně sloužily jako jednoduchý notový zápis. Dalším objektem zkoumání jsou megalitické, dolmenové mohyly s chodbami a pohřebními komorami např. v Loughcrew Cairns v Irsku. Mohyly pochází z období 5. až 3. tisíciletí před Kristem a jsou vyzdobeny spirálovitými motivy, o nichž se odborníci domnívají, že znázorňují představy spojené se zvukem, tak jako se objevují popisy představ vyvolané určitými halucinogeny při některých indiánských obřadech.

Jiné teorie zase vysvětlují některé jeskynní malby jako důsledek vnímání jeskynních ozvěn pračlověkem a jeho představy kopyt stád nebo zvuků duchů pod hlasy ozvěny.

Jiné studie odhalují, že se jeskynní malby vyskytují právě v místech, kde je v jeskyni nejlepší akustika.

O několik tisíciletí později, kolem 9. století př. Kr., vznikla na území Peru předindická kultura Chavín, ze které se dochoval mohutný chrám *Chavín de Huantar* s množstvím

spletitých podzemních chodeb, o nichž se předpokládá, že měly fungovat jako obří akustické generátory produkující vlnění o velmi nízkých kmitočtech, které tímto způsobem působily na psychiku věřících.



Obr. 105: Chrám Chavín de Huantar

### 1.2.2 Akustika jako věda

Počátek moderní vědy o vlnách a akustice je připisován Galileo Galilei (1564–1642), který povýšil na úroveň vědy studium vibrací a vztahu mezi laděním tónu a frekvencí zdroje zvuku. Jeho zájem o zvuk byl částečně inspirován jeho otcem, který byl matematikem, hudebníkem a skladatelem. Po uveřejnění Galileových prací došlo v oblasti akustiky poměrně rychle k rozvíjení tohoto oboru. Francouzský matematik Marin Mersenne studoval vibrace napnutých strun. Výsledky těchto studií byly shrnuty do tří Mersennových zákonů. „*Harmonicorum Libri Mersenne*“ (1636) poskytl základ pro moderní hudební akustiku. O něco později Robert Hooke, anglický fyzik, generoval zvukovou vlnu známé frekvence použitím rotujícího ozubeného kola. Toto zařízení, které francouzský fyzik Félix Savart dále vyvinul v 19. století a nyní se běžně nazývá Savartův disk, se dnes často používá k demonstracím během přednášek fyziky. Takový princip pak dal vzniknout i akustickým a elektroakustickým strojům, jako je např. velikonoční řehtačka nebo elektrofonické varhany. Na konci 17. a počátku 18. století provedl francouzský fyzik Joseph Sauveur podrobné studium vztahu mezi barvou tónu a složitostí vlnění struny, nebo jiného chvějícího se tělesa.

Ve středověku byl pojem akustiky nejvýrazněji spjat s církevními stavbami. Tehdejší architektura souvisela se změnou liturgie pozdního středověku, která vytvářela jazykovou, prostorovou a akustickou bariéru. Změny souvisely s ustanovením latiny jako univerzálního liturgického jazyka, s umístěním oltáře a kněze dál od věřících. Akustická bariéra vznikala jako důsledek tiché liturgie. Veškerá slova byla pronášena potichu, šeptem, a to až na výjimky při slavnostních bohoslužbách. V českých zemích byla rozvinuta tradice lidových písní, ale například ve Francii bylo při bohoslužbě ticho rušené pouze světským ruchem okolí. Věřící byli odkázáni na jiné vjemy než sluchové.



Význam akustiky vzrostl v době rozvoje liturgické hudby v období baroka a souvisel s nástrojovým obsazením, rozvojem varhanářství a také s vývojem duchovní hudby, inspirované na počátku 18. století neapolskou operní školou a množstvím skladatelů duchovní hudby té doby. S tím vším souvisel i vývoj architektury a přizpůsobení chrámů akustickým potřebám.

Řada studií poukazuje na význam vysokých stropů staveb. Dávají lidem pocit svobody a vedou ke kreativnějšímu uvažování a stavům spokojenosti než místnosti s nízkými stropy. Na druhou stranu, pokud je místnost mnohem vyšší než širší, může to vyvolávat negativní, stísněné pocity nebo pocity nicoty. U sluchového vjemu je to obdobné. Vzdušný, široký a vysoký pokoj, který nemá ozvěnu, když se v něm mluví, se nutně bude lišit od místnosti úzké a vysoké, kde je velká ozvěna, nebo od asymetrického pokoje. Studie ukazují, že lidé dokáží přiřadit zvukové nahrávky z místností k fotografiím těchto prostor.

Spojení gotické architektury s hudbou lze nalézt např. v Praze v chrámu Panny Marie před Týnem (**obr. 106**) na Staroměstském náměstí s varhanami z dílny Hanse Heinricha Mundta z roku 1673, které jsou v Praze nejstarší a mají naprosto charakteristický zvuk daný také členěním vysokého gotického chrámu.



**Obr. 106:** Nejstarší pražské varhany v chrámu Panny Marie před Týnem

Impozantní spojení barokní architektury s hudbou se podoblo např. v dómu sv. Štěpána v Pasově (**obr. 107**), kde jsou největší chrámové varhany světa. Mají téměř 18 tisíc píšťal a 233 rejstříků.

Jednou z mnoha dalších akusticky zajímavých staveb je např. kostel sv. Gotharda na hradě Bouzov.

### 1.2.3 Soudobá akustika

V 19. a 20. století se už objevuje také řada staveb a sálů, určených pro prezentaci světové hudby. Jsou to koncertní sály, jejichž hlavním kritériem je vyvážená, kvalitní akustika prostoru s odpovídajícími parametry dozvuku. Příkladem může být Palau de la Música Catalana (**obr. 108**), koncertní sál v Barceloně, postavený na začátku 20. století podle návrhu katalánského architekta Lluís Domènech i Montanera ve stylu katalánského modernismu.



**Obr. 107:** Největší chrámové varhany světa – Passau, dóm sv. Štěpána



**Obr. 108:** koncertní sál Palau de la Música Catalana



**Obr. 109:** Dvořákova síň pražského Domu umělců

Z českých koncertních sálů je pro svou výbornou akustiku nejznámější Dvořákova síň novorenesančního Domu umělců v Praze (tzv. Rudolfinum) z roku 1885 (**obr. 109**).

Na první pohled patrný rozdíl v architektonickém pojetí Dvořákovy síně Domu umělců a Smetanovy síně Obecního domu (**obr. 110**) je dán původním určením prostoru. Na rozdíl od Dvořákovy síně byla Smetanova síň původně určena pro plesy, a s tím souvisí také její akustické možnosti.





Obr. 110: Smetanova síň pražského Obecního domu

Architektonickým počinem poslední doby, souvisejícím s akustikou, je stavba 110metrové víceúčelové reprezentační budovy v hamburských docích, ve které byly za stavebně komplikovaných podmínek vybudovány tři koncertní sály. Mimo části určené pro hotel, restauraci, garáže, promenádu, luxusní byty, konferenční sály a komerční prostory zde sídlí Labská filharmonie (obr. 111, 112, 113). Akustika sálů je řešena především s ohledem na blízký říční provoz a z toho důvodu byla horní část stavby, ve které se nachází všechny tři koncertní sály, řešena nezávisle na původní, spodní budově. Navíc komplex sálů je v nástavbě řešen obdobně jako se konstruuje tzv. mrtvé (bezodrazové, anechoické, tiché...) komory, tedy měřicí místnosti co nejdokonalěji akusticky izolované od okolního prostředí. Soubor sálů je tedy nezávislý prostor, mechanicky co nejlépe izolovaný od vnějšího obalu budovy. Tím je zaručena bohatě dostačující akustická izolace především od přístavního lodního provozu. Další důraz při návrhu hlavního koncertního sálu byl dán na to, aby každé sedadlo nabídlo posluchači v sále stejný a co nejlepší zvukový zážitek. Tak byla navržena struktura sálu, ve kterém i ten nejvzdálenější posluchač – divák není od hudebního tělesa vzdálen více než 30 metrů. I přes toto kritérium sál pojme 2100 diváků. Kvůli technologické náročnosti celé stavby, akustickým parametrům sálů, jejich speciálnímu akustickému obložení, složenému z jednoho milionu vláknokeramických lastur, i speciální skleněné fasádě komplexu, se původně odhadované náklady ve výši 300 mil. EUR vyšplhaly až na 800 mil. EUR a termín dokončení stavby se prodloužil o 7 let.



Obr. 111: Komplex Labské filharmonie v Hamburku



Obr. 112: Hlavní sál Labské filharmonie v Hamburku



Obr. 113: Hlavní sál Labské filharmonie v Hamburku

#### 1.2.4 Historie měření rychlosti zvuku

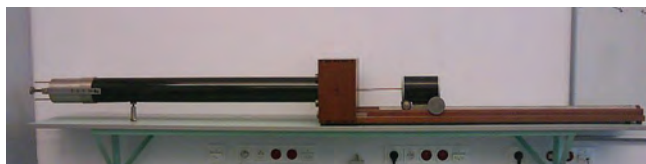
V 17. století provedl francouzský vědec a filozof Pierre Gassendi první známý pokus o měření rychlosti zvuku ve vzduchu. Vycházel z předpokladu, že rychlost světla je „nekonečná“ ve srovnání s rychlostí zvuku, a proto provedl měření časového rozdílu mezi zábleskem výstřelu pušky a jeho zvukovým vjemem na velkou vzdálenost. I když hodnota, kterou získal, byla příliš velká (Gassendi naměřil 478,4 metrů – 1569,6 stop za sekundu), došel ke správnému závěru, že rychlost zvuku je nezávislá na jeho frekvenci. V 50. letech 17. století italští fyzici Giovanni Alfonso Borelli a Vincenzo Viviani získali stejnou technikou mnohem lepší hodnotu 350 metrů za sekundu. Jejich krajan G. L. Bianconi v roce 1740 prokázal, že rychlost zvuku ve vzduchu se zvyšuje s teplotou. Nejčasnější přesná experimentální hodnota pro rychlost zvuku, která byla získána na Akademii věd v Paříži v roce 1738, byla 332 metry za sekundu, tedy vzhledem k technické úrovni tehdejších měřicích zařízení neuvěřitelně blízko aktuálně akceptované hodnotě. Rychlost zvuku byla v roce 1942 stanovena na 331,45 metru (1 087,4 stop) za sekundu, v roce 1986 pak byl chybný výpočet z roku 1942 opraven na 331,29 metru za sekundu při 0 °C a atmosférickém tlaku 101,325 kPa.

Rychlost zvuku ve vodě byla poprvé změřena švýcarským fyzikem Danielem Colladonem v roce 1826. Kupodivu jeho primárním zájmem nebylo měření rychlosti zvuku ve vodě, ale výpočet stlačitelnosti vody (vztah mezi rychlostí zvuku v materiálu a stlačitelností materiálu byl

stanoven již dříve). Colladon vypočítal rychlost 1435 m za sekundu při 8 °C, tedy velmi blízko k dnes přijímané hodnotě 1439 metrů za sekundu (interpolované hodnotě pro stejnou teplotu prostředí).

Ke stanovení rychlosti zvuku v pevných látkách byly použity dva postupy. V roce 1808 francouzský fyzik Jean-Baptiste Biot provedl přímé měření rychlosti zvuku v 1000 metrech železné roury porovnáním s rychlostí zvuku ve vzduchu. Lepší měření dřívě provedl Němec Ernst Florenz Friedrich Chladni pomocí analýzy uzlového vzoru ve vibracích stojatých vln u dlouhých prutů.

Současně s těmito ranými studiemi v akustice rozvíjeli teoretici matematickou teorii vln potřebnou pro vývoj moderní fyziky, včetně akustiky. Na počátku 18. století anglický matematik Brook Taylor vyvinul matematickou teorii vibračních strun, která souhlasila s předchozími experimentálními pozorováními. Matematickou podporu mu pro jeho bádání poskytli Isaac Newton a německý matematik Gottfried Wilhelm Leibniz, kteří při sledování jiných zájmů nezávisle vyvinuli teorii výpočtu, která zase umožnila odvození obecné vlnové rovnice francouzským matematikem a vědcem Jean-Baptiste Le Rondem d'Alembert ve 40. letech 18. století. Švýcarští matematici Daniel Bernoulli a Leonhard Euler i italsko-francouzský matematik Joseph-Louis Lagrange dále aplikovali nové rovnice na vlny ve strunách a ve vzduchu. V 19. století francouzský Siméon-Denis Poisson rozšířil tento vývoj na natažené membrány a německý matematik Rudolf Friedrich Alfred Clebsch dokončil Poissonovy dřívější studie. Německý experimentální fyzik August Kundt vyvinul řadu důležitých technik pro zkoumání vlastností zvukových vln, především tzv. Kundtovu trubici (1866).



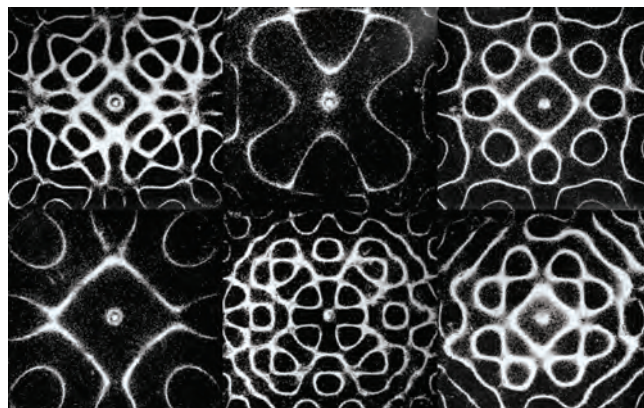
Obr. 114: Kundtova trubice

Kundtova trubice je přístroj pro určování rychlosti zvuku ve vzduchu nebo jiných plynech. Je to skleněná trubice o délce přibližně 1 metr, upevněná vodorovně v rámu. Z obou stran jsou do ní vsunuty písty, které se ale nedotýkají stěn. Jeden z pístů je upevněn posuvně, druhý je na tyči, která je připevněna přesně v polovině k podstavci. Vnitřek trubice je vyplněn lehkou drtí (korek, prášek z plavuní apod.). Měření se provádí tak, že se volný konec tyče pevně uchyceného pístu tře látkou namočenou v lihu nebo octu. Tyč se rozkmitá tónem, který uvnitř trubice vytvoří stojaté vlny. Posunem druhého pístu je možno nastavit co nejlépe rezonanční délku. Lehký prášek se seřadí podle stojatých vln a tím je zviditelní. Délku vlny  $\lambda$  je možné změřit a z kmitočtu  $f$  se vypočte rychlost šíření zvuku podle vzorce

$$v = f \cdot \lambda \quad (1)$$

kde  $v$  je rychlost šíření,  $f$  je kmitočet,  $\lambda$  je délka vlny.

Jedním z nejdůležitějších pokroků v akustice v 19. století byla Chladniho teorie vibračních desek. Kromě práce na rychlosti zvuku v kovech Chladni dřívě představil techniku pozorování vzorů stojatých vln na vibračních deskách posypáním písku na desky (obr. 115). Takové demonstrace se běžně používají dodnes. Snad nejvýznamnější krok v teoretickém vysvětlení těchto vibrací poskytla v roce 1816 francouzská matematická Sophie Germain, jejíž vysvětlení bylo takové elegance a sofistikovanosti, že chyby v jejím řešení byly rozpoznány až o 35 let později německým fyzikem Gustavem Robertem Kirchhoffem.



Obr. 115: Příklady Chladniho obrazců

Analýza složité periodické vlny a její rozklad na jednotlivé spektrální složky byly teoreticky zavedeny počátkem 19. století Jean-Baptiste-Josephem Fourierem a nyní se běžně označují jako Fourierova věta. Německý fyzik Georg Simon Ohm nejprve objevil, že ucho rozezná tyto jednotlivé spektrální složky, jejich amplitudy, ale ne fázi těchto jednotlivých harmonických tónů. Tento princip je známý jako Ohmův zákon sluchu (nikoliv Ohmův zákon elektrického odporu).

Hermann von Helmholtz významně přispěl k pochopení mechanismů sluchu a psychofyziky zvuku a hudby. Jeho kniha „O pocitech tónu jako fyziologickém základu pro teorii hudby“ (1863) je jednou ze základních prací o akustice. Helmholtz také zkonstruoval sadu rezonátorů pokrývajících většinu zvukového spektra, které byly použity při spektrální analýze hudebních tónů. Pruský fyzik Karl Rudolph Koenig, velmi kreativní experimentátor, navrhl řadu nástrojů používaných pro výzkum sluchu a hudby, včetně standardu kmitočtu a manometrického plamene (obr. 117).

Zařízení s plamenovou trubicí, používané k tomu, aby byly zvukové vlny „viditelné“, je stále jednou z fascinujících demonstrací ve fyzice. Anglický fyzikální vědec John William Strutt, 3. baron Rayleigh, provedl velkou řadu akustických experimentů. Velké množství výsledků jeho výzkumu bylo zahrnuto v jeho dvoudílném pojednání Theory of Sound, jehož publikace v letech 1877–1878 se nyní považuje za začátek moderní akustiky. Hodně z Rayleighovy práce je stále přímo citováno v učebnicích současné fyziky.

Studii ultrazvuku zahájil americký vědec John LeConte, který v 50. letech 20. století vyvinul techniku pro pozorování existence ultrazvukových vln pomocí plynového





Obr. 116: Zvukový, osmirezonátorový analyzátor



Obr. 117: Manometrický, plamínek vizualizér

plamene (obr. 117). Tuto techniku později použil britský fyzik John Tyndall pro podrobné studium vlastností zvukových vln. Piezoelektrický efekt, primární prostředek k produkci a snímání ultrazvukových vln, objevili francouzský fyzik Pierre Curie a jeho bratr Jacques v roce 1880. Použití ultrazvuku však ne-

bylo možné, dokud nebyla na počátku 20. století vyvinuta potřebná piezo technologie – elektronický oscilátor a zesilovač, které byly použity k pohonu piezoelektrického prvku.

Mezi inovátory 20. století patří americký fyzik Wallace Sabine, považovaný za původce moderní architektonické akustiky, a maďarský rodák, americký fyzik Georg von Békésy, který provedl experimenty v oblasti fyziologie sluchového orgánu a potvrdil obecně přijímanou Helmholtzovu teorii v rámci této problematiky. Kniha Békésyho „Experimenty v slyšení“, publikovaná v roce 1960, je magnum opus moderní teorie ucha.

### 1.2.5 Historie záznamu, reprodukce

První známý pokus o zesílení zvukové vlny provedl jezuitský učenec, orientalista, geolog i lékař Athanasius Kircher pomocí parabolického rohu, který lze použít buď jako naslouchátko nebo jako hlasový zesilovač. Kircher je autorem díla „Musurgia universalis“ z roku 1650. Kniha obsahuje množství notových ukázek tehdejších skladatelů a Kircher v ní vysvětluje své názory na hudbu, afektovou teorii, zabývá se v ní stavbou varhan, rozebírá rozdíly mezi sluchovým

ústrojem člověka a několika druhů zvířat a dokonce v ní popisuje základy algoritmů pro automatizované komponování hudby (obr. 118).



Obr. 118: Ukázky z knihy "Musurgia universalis"

Zesílení zvuků těla se stalo důležitým cílem medicíny. První stetoskop vynalezl francouzský lékař René Laënnec na počátku 19. století.

Pokusy o záznam a reprodukci zvukových vln prováděl roku 1857 pozdější vynálezce mechanického zařízení pro záznam zvuku zvaného fonograf Édouard-Léon Scott de Martinville (obr. 119).





Obr. 119: První zařízení pro záznam zvuku – fonautograf

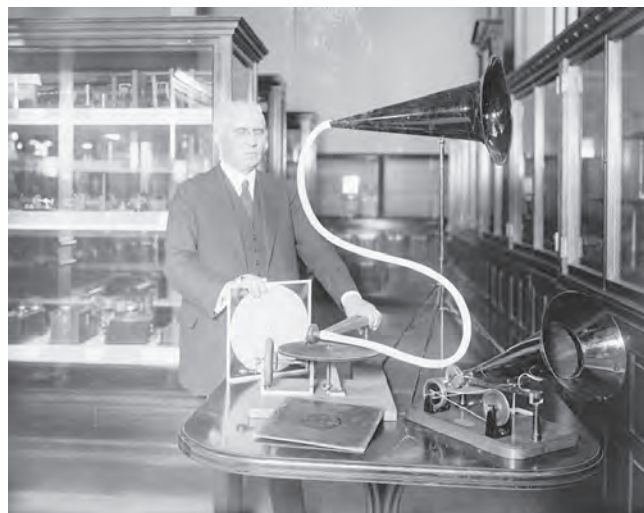


Obr. 120: Edisonův fonograf

První zařízení, které mohlo skutečně nahrávat a přehrávat zvuky, bylo vyvinuto americkým vynálezcem Thomasem Alvou Edisonem v roce 1877. Edisonův fonograf (obr. 120) používal drážky různé hloubky v záznamovém válečku.

Spirálová drážka na plochem rotujícím disku byla zavedena o deset let později americkým vynálezcem německého původu Emilem Berlinerem ve vynálezu, který nazval gramofon (obr. 121).

V první polovině 20. století bylo dosaženo významného pokroku v technikách záznamu a reprodukce s vývojem vysoce kvalitních elektromechanických převodníků



Obr. 121: Emil Berliner a první gramofon

a lineárních elektronických obvodů. Nejdůležitějším vylepšením standardního fonografického záznamu ve druhé polovině 20. století byl kompaktní disk, který využívá digitální techniky. Tato technologie podstatně snížila šum a zvýšila věrnost a trvanlivost záznamu.



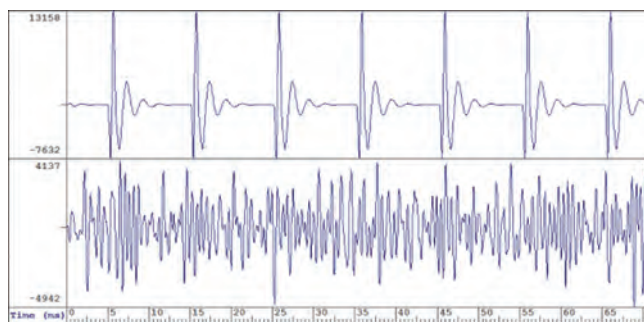
## 2. POJMY A VELIČINY

**Akustika** je vědní obor, zabývající se fyzikálními ději při vzniku, šíření a vnímání zvukového vlnění. Pokud takové vlnění vyvolá sluchový vjem, pak hovoříme o zvuku. Z toho je zřejmé, že se zvuk nevyskytuje ve vakuu, případně v materiálech, které neumožňují, aby molekuly takového materiálu kmitaly (ideální akustický izolant). Zároveň tedy platí, že každý mechanický pohyb v akusticky vodivém prostředí generuje akustické vlnění.

Mluvíme-li o zvuku, pak se jedná zpravidla o kmitání vzduchu v rozsahu kmitočtů, které je schopen vnímat člověk, tedy přibližně od 20 Hz do 20 kHz. Pokud je kmitočet zvuku nižší (0 Hz až 20 Hz), pak mluvíme o **infrazvuku**. Pokud je kmitočet vyšší (20 kHz až 100 kHz i výše), jedná se o **ultrazvuk**. Někdy se uvádí rozsah kmitočtů slyšitelných člověkem 16 Hz až 16 kHz. Tyto hranice jsou pro každého člověka individuální a jsou závislé také na stáří člověka, na prostředí, ve kterém se člověk většinu svého života pohybuje, případně na výjimečných situacích, např. velmi silných akustických expozicích nebo nemocích sluchového orgánu, které člověk během svého života prodělal (prasklý ušní bubínek při zánětu středního ucha apod.). Někteří živočichové vnímají, na rozdíl od člověka, i zvuky z oblasti infrazvuku (slon – od 5 Hz, žaby – od 12 Hz, medúzy, velryby...) nebo ultrazvuku (pes – do 22 kHz, sysel – do 48 kHz, netopýr – do 100 kHz, delfin a sled' – do 180 kHz...). Infrazvuk může na člověka působit negativně i přesto, že ho nevnímá sluchovým orgánem. Kmitočet okolo 7 Hz odpovídá frekvenci  $\alpha$ -vln mozkové

aktivity a může způsobit, že se člověk nemůže uvést do stavu duševního klidu – pohody.

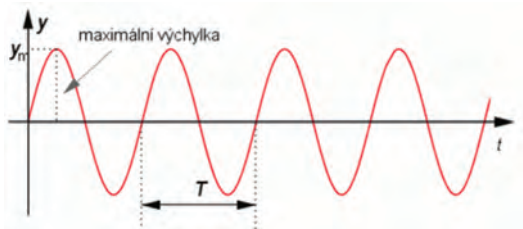
Zvukové vlny se řídí fyzikálními principy, které lze aplikovat na studium všech druhů vlnění. Mechanické kmitání je jedním ze základních typů pohybu. Při takovém pohybu se těleso vrací do rovnovážné polohy. Tento pohyb se nazývá periodický. Jako periodický děj je možné označit každý děj, u něhož se pravidelně opakuje změna libovolné fyzikální veličiny (teplota, tlak, el. proud). Periodický akustický signál se označuje jako tón a může být generován hudebním nástrojem nebo řečí – samohláskami. Naopak tóny neperiodické jsou šумы, praskoty, skřípání nebo jiné ruchy. Neperiodickým akustickým signálem jsou také souhlásky lidské řeči. Rozdíl mezi periodickým a neperiodickým signálem ukazuje obr. 201.



Obr. 201: Periodický a neperiodický signál

## 2.1 Oscilátor, periodický, harmonický pohyb

Stroj, který volně kmitá bez vnějšího působení, se nazývá mechanický oscilátor. Např. vychýlíme-li z rovnovážné polohy a následně pustíme kuličku volně zavěšenou na niti, představující kyvadlo, vrací se do rovnovážné polohy a pokračuje v kyvu, až dosáhne maximální výchylky. Tam se zastaví a vrací se přes rovnovážnou polohu do maxima na opačné straně vychýlení. Pokud takový pohyb při malých výchylkách rozvineme na časovou osu, získáme křivku – sinusovku (resp. považujeme-li  $T = 0$  v okamžiku puštění kuličky, pak kosinusovku).



Obr. 202: Periodický, harmonický signál

Při pohybu kuličky můžeme sledovat tři veličiny: výchylku, okamžitou rychlost a okamžité zrychlení. Pro tyto tři veličiny je charakteristická závislost podle vztahů:

$$v = \frac{dy}{dt}, \quad (2)$$

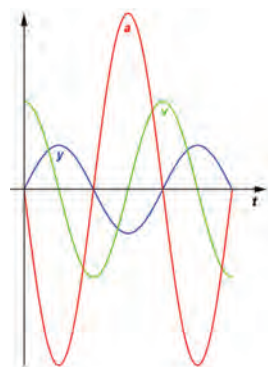
kde  $v$  je okamžitá rychlost,  
 $y$  je výchylka,  
 $t$  je čas.

Analogicky platí pro okamžité zrychlení:

$$a = \frac{dv}{dt}, \quad (3)$$

kde  $a$  je okamžité zrychlení,  
 $v$  je okamžitá rychlost,  
 $t$  je čas.

Vztah těchto tří veličin je patrný z obrázku:



Obr. 203: Vzájemný vztah výchylky, rychlosti a zrychlení periodického, harmonického pohybu

Pro periodický pohyb platí, že nejkratší doba, za kterou dojde k jeho opakování, se nazývá perioda. Počet period za jednotku času odpovídá kmitočtu základní harmonické. Platí:

$$f = \frac{1}{T}, \quad (4)$$

kde  $f$  je kmitočet (Hz),  
 $T$  je perioda (s).

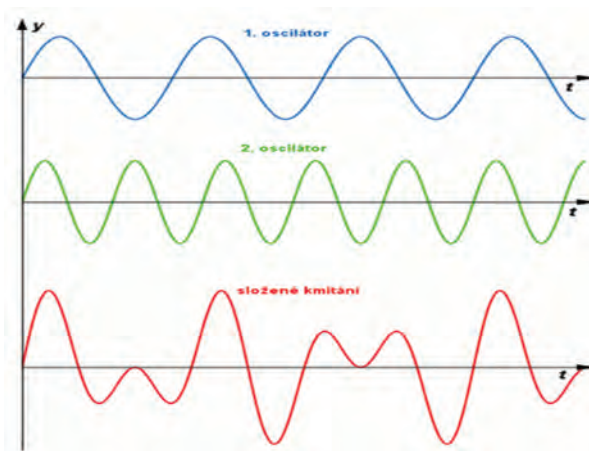
S kmitočtem  $f$  akustického vlnění souvisí i jeho vlnová délka  $\lambda$  a rychlost šíření  $v$ , pro které platí vztah

$$v = f \cdot \lambda, \quad (5)$$

kde  $v$  je okamžitá rychlost,  
 $f$  je kmitočet (Hz),  
 $\lambda$  je vlnová délka (m).

## 2.2 Složený signál

Pokud složíme dva periodické pohyby, tedy sečteme dvě sinusovky jako znázornění periodického průběhu kmitání, dostaneme složený pohyb – signál podle obrázku:



Obr. 204: Složený signál dvou harmonických signálů

Takovému průběhu se říká neharmonický signál. Pro jeho matematické vyjádření již nelze použít obecný vzorec pro harmonický signál, který je

$$y(t) = A_1 \cdot \cos(\omega_1 t + \varphi_1), \quad (6)$$

kde  $y$  je výchylka,  
 $A$  je amplituda,  
 $\omega$  je úhlová rychlost,  
 $\varphi$  je fáze signálu,  
 $t$  je čas.

Pro stanovení okamžité výchylky takového složeného kmitání je nutné znát nejen amplitudu a kmitočet jednotlivých složek, ale také fázi.

$$y = y_1 + y_2 + y_3 + \dots, \quad (7)$$

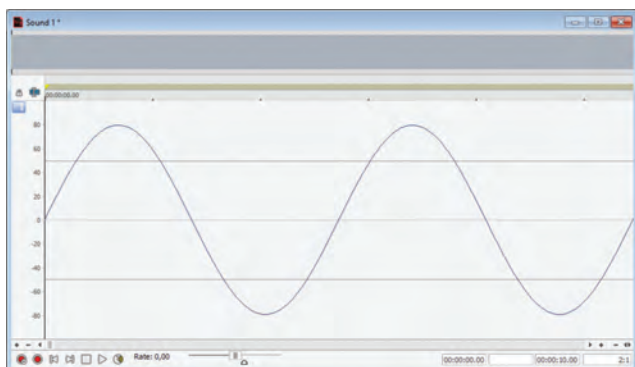
kde  $y$  je výchylka složeného signálu.

Příkladem signálu složeného z lichých harmonických složek (tedy lichých násobků základního kmitočtu) je signál obdélníkového tvaru. Vztah pro jeho okamžitou výchylku je dán vzorcem

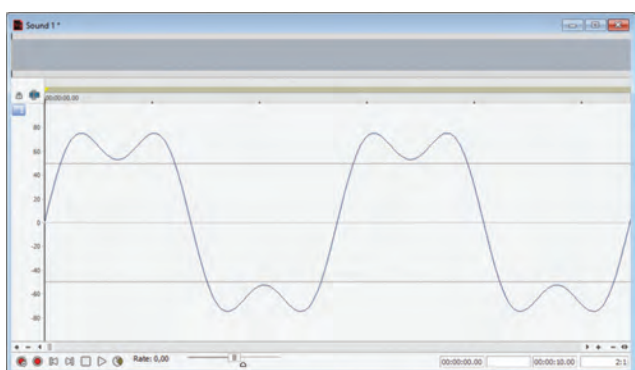
$$y = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A}{2n-1} \cdot \sin(2\pi \cdot (2n-1) \cdot ft). \quad (8)$$



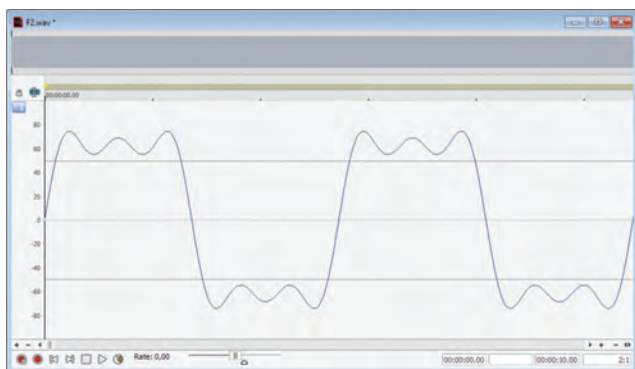
Postupnou změnu tvaru signálu přičítáním vyšších harmonických ukazují následující obrázky:



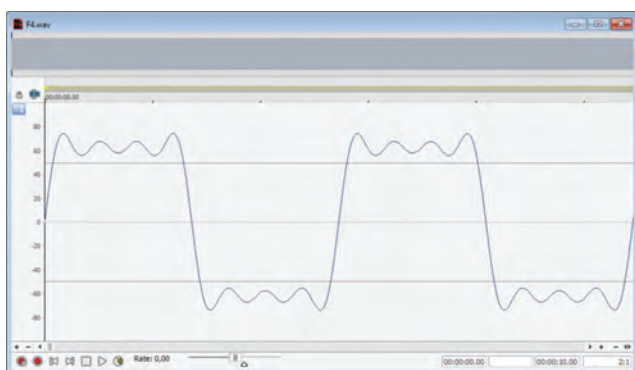
Obr. 205: Základní harmonická F1



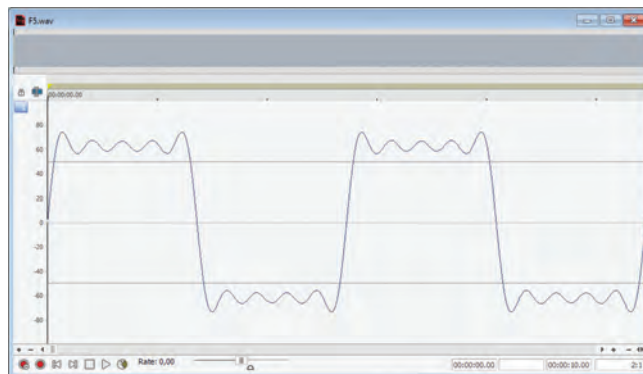
Obr. 206: F1 + F3 (3. harmonická)



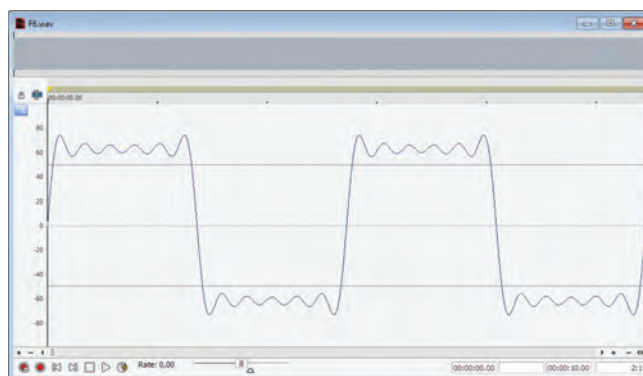
Obr. 207: F1 + F3 + F5



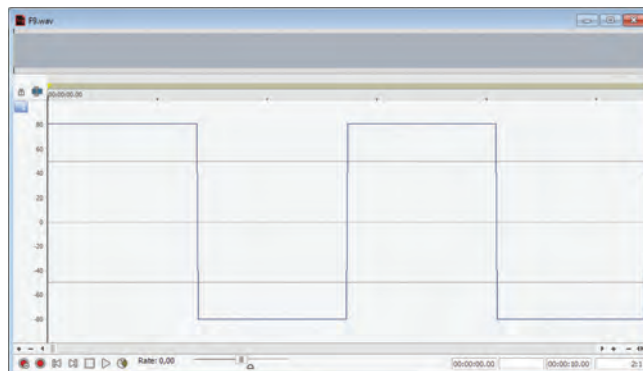
Obr. 208: F1 + F3 + F5 + F7



Obr. 209: F1 + F3 + F5 + F7 + F9



Obr. 210: F1 + F3 + F5 + F7 + F9 + F11



Obr. 211: Obdélníkový průběh jako součet nekonečného množství lichých harmonických - dle výrazu (8)

### 2.3 Analýza signálu

Libovolný obecný periodický průběh signálu lze převést na řadu harmonických průběhů. Tato řada je obecně nekonečná a může mít tvar

$$f(t) = A_0 + A_1 \cdot \sin(\omega t + \varphi_1) + A_2 \cdot \sin(2\omega t + \varphi_2) + A_3 \cdot \sin(3\omega t + \varphi_3) + \dots, \quad (9)$$

kde  $A_0$  je stejnosměrná složka,  
 $A_n$  je amplituda  $n$ -té harmonické,  
 $\varphi_n$  je fáze  $n$ -té harmonické.

Výraz je možné zapsat také

$$f(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot \sin(n \cdot \omega t + \varphi_n). \quad (10)$$

Jean-Baptiste Joseph Fourier (1768–1830) určil matematickou metodu pro stanovení jednotlivých koeficientů periodické funkce tzv. Fourierovým integrálem. Pro výpočet se tedy tato řada převádí na standardní tvar Fourierovy řady, v níž jsou jednotlivé harmonické určeny sinovými a kosinovými složkami. Pak je tedy možné průběh funkce zapsat nekonečnou trigonometrickou Fourierovou řadou:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + a_1 \cdot \cos \omega t + b_1 \cdot \sin \omega t + a_2 \cdot \cos 2\omega t + \quad (11)$$

+  $b_2 \cdot \sin 2\omega t + \dots$

resp.

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cdot \cos n \cdot \omega t + b_n \sin n \cdot \omega t). \quad (12)$$

Jednotlivé koeficienty  $a$  a  $b$  pak lze vyjádřit tvarem

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) dt, \quad (13)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cdot \cos n\omega t dt, \quad (14)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cdot \sin n\omega t dt. \quad (15)$$

Tyto výrazy je možné pro zjednodušení převést na funkce úhlu, kde  $x = \omega t$

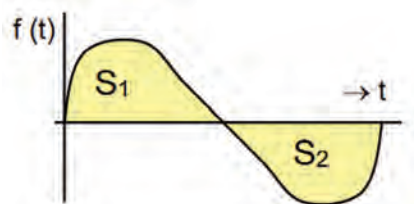
$$a_0 = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) dx, \quad (16)$$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \cdot \cos nx dx, \quad (17)$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \cdot \sin nx dx. \quad (18)$$

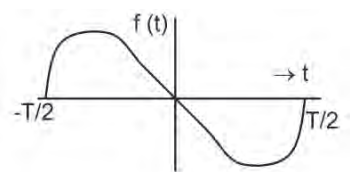
Takové použití ale předpokládá, že je funkce vyjádřena matematicky. Při výpočtu je vhodné předem nalézt případné nulové koeficienty. Pro jejich stanovení jsou známa některá zjednodušení:

- A) Pokud platí pro jednu periodu signálu, že plocha signálu nad osou  $X$  je rovna ploše signálu pod osou, pak je stejnosměrná složka  $a_0 = 0$ .



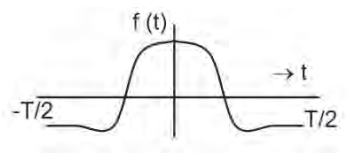
Obr. 212: Rovnost ploch nad a pod osou

- B) Pokud je perioda funkce středově souměrná podle počátku (středu periody), tedy platí  $-f(-t) = f(t)$ , pak všechny kosinové složky jsou nulové.



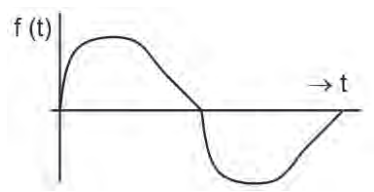
Obr. 213: Středová souměrnost

- C) Pokud je perioda funkce osově souměrná podle počátku (středu periody), tedy platí  $f(-t) = f(t)$ , pak všechny sinusové složky jsou nulové.



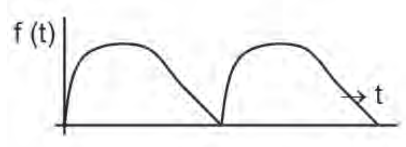
Obr. 214: Osová souměrnost

- D) Pokud se první půlperiody funkce opakuje v druhé půlperiodě s opačným znaménkem, pak obsahuje pouze liché harmonické (viz příklad složeného signálu obdélníkového tvaru).



Obr. 215: Opakování s opačným znaménkem

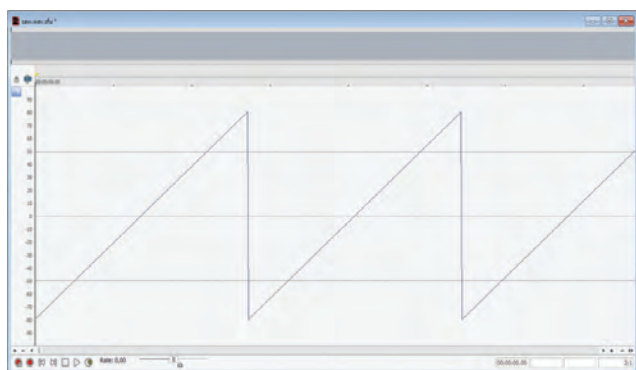
- E) Pokud se první půlperiody funkce opakuje v druhé půlperiodě se stejným znaménkem, pak obsahuje pouze sudé harmonické.



Obr. 216: Opakování se stejným znaménkem



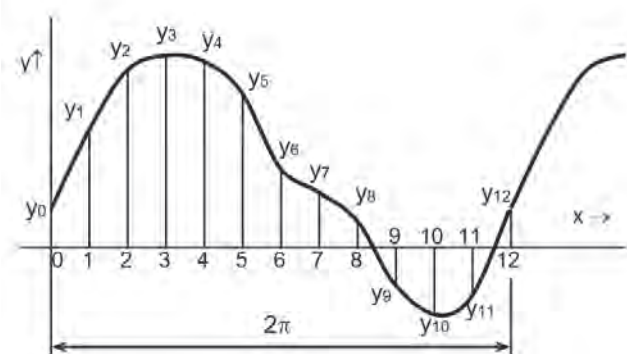
Příkladem takové funkce, obsahující pouze sudé harmonické, je pila.



Obr. 217: Pilovitý průběh signálu

Při analýze signálu – funkce je možné použít numerickou nebo grafickou metodu výpočtu koeficientů Fourierovy řady nebo rychlou Fourierovu transformaci (FFT).

Při analýze signálu získaného např. měřením nebo záznamem je obtížné převést jej na analytickou funkci. V takovém případě je snazší provést analýzu numericky definováním periody signálu a jeho rozdělením na stejné úseky (tzv. obdélníkovou metodou).



Obr. 218: Obdélníková metoda analýzy

Výpočet se provádí modifikovanou sadou výpočtů koeficientů  $a_0$ ,  $a_n$  a  $b_n$  podle úhlu ve tvaru:

$$a_0 = \frac{2}{c} \sum_{k=1}^c y_k, \tag{19}$$

kde  $c$  je počet úseků v jedné periodě signálu,

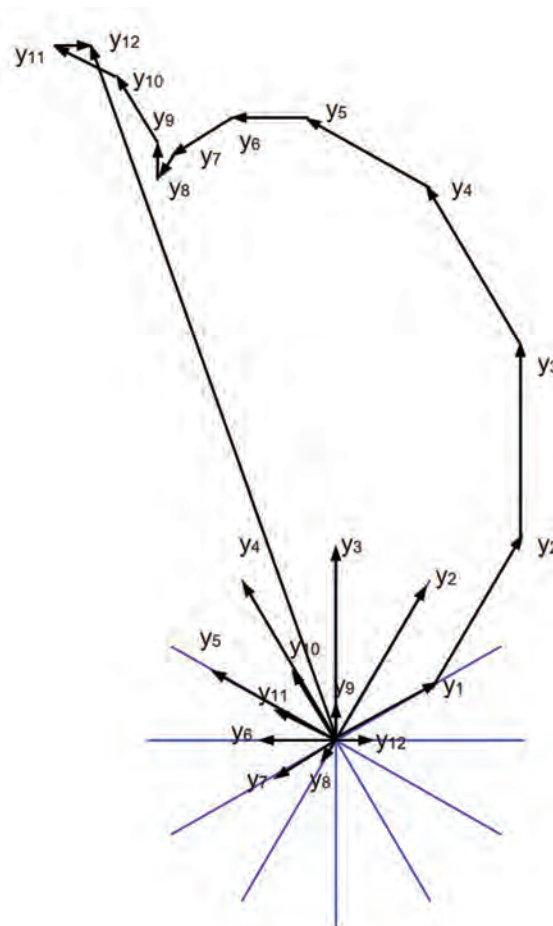
$$a_n = \frac{2}{c} \sum_{k=1}^c y_k \cdot \cos nx_k dx, \tag{20}$$

$$b_n = \frac{2}{c} \sum_{k=1}^c y_k \cdot \sin nx_k dx. \tag{21}$$

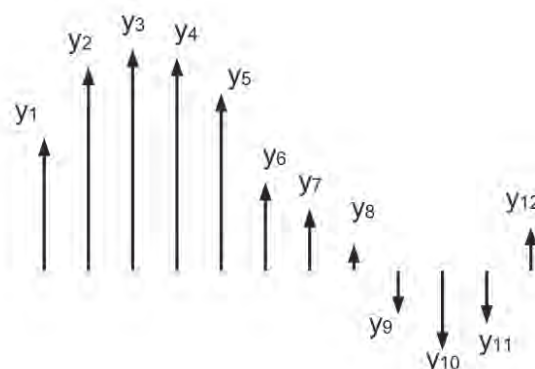
Důležitým parametrem pro smysluplnost výpočtu je stanovení minimálního počtu úseků  $c$ . Pro stanovení  $n$ -harmonických platí vztah

$$c \geq 2n + 2.$$

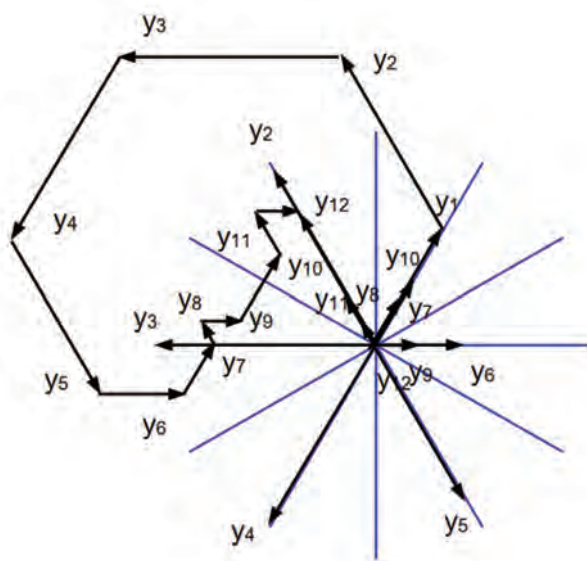
Orientační metodou pro určení koeficientů Fourierovy řady je metoda grafická. Její přesnost je velmi malá, ale může sloužit jako nástroj pro snazší pochopení obecného postupu při výpočtu.



Obr. 219: Grafická metoda



Obr. 220: Vektorové složky



Obr. 221: Grafická metoda Fourierovy analýzy

Jednotlivé amplitudy dílčích úseků obdélníkové metody se při grafické metodě vynášejí jako vektory v úhlu, odpovídajícímu přírůstku daného úseku vzhledem k celé periodě. Pro vyšší harmonické se tyto úhly násobí  $n$ , tedy pořadovým číslem harmonické.

Jednotlivé složky pak představují příslušné vektorové součty odpovídajících harmonických.

Rychlá Fourierova transformace (FFT) nemusí odpovídat periodě signálu, ale může být prováděna pouze na jeho určitém úseku. Pokud proměřovaný úsek odpovídá periodě signálu, je výsledkem Fourierova řada jako speciální případ Fourierovy transformace.

Diskrétní Fourierova transformace (DFT) je obdobou numerického výpočtu koeficientů Fourierovy řady. Transformovaný časový úsek  $T$  se rozdělí na  $N$  úseků, hodnoty funkce v koncových bodech těchto úseků se použijí pro výpočet amplitud příslušných složek. Frekvence těchto složek se však nevztahují k periodě signálu, ale k použitému časovému úseku  $T$ .

Rychlá Fourierova transformace (FFT) je algoritmus výpočtu diskrétní Fourierovy transformace (DFT), který umožňuje snížit počet jednotlivých kroků výpočtu, a tím celý výpočet značně zrychlit. Jeho úspornost je obzvláště zřetelná u velkého počtu vzorků. Pro dosažení optimálního času výpočtu se měřený úsek dělí na stejné úseky, jejichž počet je roven mocnině 2 (např. 256, 2048, 4098...). Výsledkem transformace bude počet harmonických (odvozených od daného intervalu), který je polovinou počtu úseků (vzorků). Získané spektrum bude obsahovat nultou harmonickou (stejnou směrou složku), frekvence první harmonické bude převrácenou hodnotou transformovaného intervalu a frekvence dalších harmonických budou celistvými násobky základní harmonické až do frekvence  $N/2T$ . Například při vyšetřování 1 s úseku, rozděleného na 512 dílů, lze určit až 256 harmonických v rozsahu od 1 Hz do 255 Hz.

Výpočet komplexních kmitočtových složek  $G(k)$  se provádí podle vzorce

$$G(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N-1} g(n) e^{-j \frac{2\pi kn}{N}}, \quad (22)$$

kde komplexní exponent představuje komplexní číslo s absolutní hodnotou = 1 odpovídající příslušnému úhlu. Čtvercová matice pro 8 vzorků pak vypadá takto:

$$\begin{bmatrix} G_0 \\ G_1 \\ G_2 \\ G_3 \\ G_4 \\ G_5 \\ G_6 \\ G_7 \end{bmatrix} = \frac{1}{8} \begin{bmatrix} \uparrow & \uparrow & \uparrow & \uparrow & \uparrow & \uparrow & \uparrow & \uparrow \\ \uparrow & \nearrow & \rightarrow & \searrow & \downarrow & \swarrow & \leftarrow & \nwarrow \\ \uparrow & \rightarrow & \downarrow & \leftarrow & \uparrow & \rightarrow & \downarrow & \leftarrow \\ \uparrow & \searrow & \leftarrow & \nearrow & \downarrow & \swarrow & \rightarrow & \nwarrow \\ \uparrow & \downarrow & \uparrow & \downarrow & \uparrow & \downarrow & \uparrow & \downarrow \\ \uparrow & \swarrow & \rightarrow & \nwarrow & \downarrow & \nearrow & \leftarrow & \searrow \\ \uparrow & \leftarrow & \downarrow & \rightarrow & \uparrow & \leftarrow & \downarrow & \rightarrow \\ \uparrow & \nwarrow & \leftarrow & \swarrow & \downarrow & \searrow & \rightarrow & \nearrow \end{bmatrix} \begin{bmatrix} g_0 \\ g_1 \\ g_2 \\ g_3 \\ g_4 \\ g_5 \\ g_6 \\ g_7 \end{bmatrix}$$

Obr. 222: Čtvercová matice pro výpočet komplexních složek

Podle charakteristiky a směru otáčení šipky se výsledky takové transformace znázorňují jako symetrické spektrum se spektrálními složkami  $G_5$  až  $G_7$  v záporné části osy jako záporné kmitočty. Oproti standardnímu způsobu výpočtu je při maticovém výpočtu typu „butterfly“ redukován počet komplexních násobení z  $N^2$  na  $N \cdot \log_2 N$ . U uvedeného příkladu se tedy sníží počet operací komplexního násobení z 64 na 24. Pro  $N = 1024$  se počet operací sníží 100 x.

U některých specifických vlastností zadání lze ještě dále krátit počty potřebných výpočtů.

Redukce počtu výpočtů může být pro některé jednodušší (méně výkonné) on-line aplikace: rozpoznání řeči, monitorování točivých strojů, video aplikace, řízení datového toku digitálních přenosů atd.

## 2.4 Výška tónu

Výška zvuku se určuje u periodických signálů – tónů a je vyjadřována kmitočtem. U složených tónů určuje obvykle absolutní výšku tónu základní kmitočť tónu. V akustické praxi se vyskytuje několik referenčních kmitočtů. V hudební akustice je to tzv. „komorní A“, odpovídající obvykle 440 Hz, v technické akustice je to 250 Hz nebo 1 kHz.

U neperiodických zvuků je obvykle obtížné určit výšku základního kmitočtu. U těchto druhů zvuků je možné stanovit kmitočtové pásmo, výkonové poměry v jednotlivých částech spektra apod.

## 2.5 Barva tónu

Charakteristický zvuk složeného tónu je dán obsahem jeho harmonických složek a jejich vzájemným poměrem. Pro barvu tónu není důležitá fáze jednotlivých složek – harmonických. Časová změna některých dalších parametrů tónu, které mají vliv na dynamickou změnu fáze jednotlivých složek, ovšem na barvu tónu vliv mít může.



## 2.6 Hlasitost zvuku

Hlasitost je veličina subjektivní a záleží na citlivosti sluchu na základě akustického tlaku. Pro objektivní hodnocení byla zavedena jednotka intenzity zvuku  $I$ , pro kterou platí:

$$I = \frac{P}{S}, \quad (23)$$

kde  $P$  je výkon,  
 $S$  je plocha.

Velikost intenzity je přímo úměrná energii kmitání, které zvukové vlny v daném místě vybudí. V souvislosti s intenzitou byly zavedeny její dvě hodnoty, práh slyšitelnosti a práh bolesti.

Práh slyšitelnosti je hodnota intenzity zvuku, při které začíná u člověka docházet k sluchovému vjemu. Její hodnota je

$$I_0 = 10^{-12} \text{ W m}^{-2} \quad (24)$$

a odpovídá akustickému tlaku  $20 \mu\text{Pa}$  ( $2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$ ).

Práh bolesti je hodnota intenzity zvuku, při které začíná u lidského sluchu docházet k pocitu bolesti. Její hodnota je

$$I_m = 1 \text{ W m}^{-2} \quad (25)$$

a odpovídá akustickému tlaku  $130 \text{ Pa}$ . Někdy je uváděno až  $10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ . Práh slyšení i práh bolesti jsou však pro každého člověka značně individuální.

Z těchto dvou hodnot je zřejmý obrovský dynamický rozsah lidského sluchu v rozsahu sedmi řádů. Pro snazší vyjadřování takového velkého rozsahu byla zavedena hladina akustického tlaku  $L$ , pro kterou platí:

$$L = 10 \log \left( \frac{p}{p_0} \right)^2 = 20 \log \left( \frac{p}{p_0} \right) \text{ (dB)}, \quad (26)$$

kde  $p$  je akustický tlak zvuku,  
 $p_0$  je akustický tlak prahu sluchu.

Jednotka hladiny zvuku je bezrozměrná (dB), protože vyjadřuje poměr veličiny k referenční hodnotě, v tomto případě k prahu sluchu. Příklady některých přibližných hodnot hladiny zvuku ukazuje následující tabulka:

Typ zvuku	Intenzita zvuku ( $\text{W m}^{-2}$ )	Hladina intenzity (dB)
Práh slyšitelnosti	$10^{-12}$	0
Šelest listí	$10^{-11}$	10
Šum listí	$10^{-10}$	20
Pouliční šum v tichém místě	$10^{-9}$	30
Tichý rozhovor	$10^{-8}$	40
Normální pouliční hluk	$10^{-7}$	50
Normální rozhovor	$10^{-6}$	60
Hluk na frekventovaných ulicích, vysavač	$10^{-5}$	70

Typ zvuku	Intenzita zvuku ( $\text{W m}^{-2}$ )	Hladina intenzity (dB)
Hluk v tunelu	$10^{-4}$	80
Hluk motorových vozidel	$10^{-3}$	90
Pneumatická vrtačka	$10^{-2}$	100
Hlasité stroje, symfonický orchestr, rocková kapela (jak která :-)	$10^{-1}$	110
Startující letadlo, lepší rocková kapela	$10^{-0}$	120
Práh bolesti	$10^{-1}$	130

Tab. 223: Hladiny vybraných zvuků

Pokud na přijímač (sluchový orgán, mikrofon, akustický snímač...) dopadá současně několik zvukových vln, jejich výsledná hladina se nerovná součtu hladin ale součtu veličin, kterými byly jednotlivé hladiny určeny.

Platí tedy

$$L = 10 \log \frac{\sum_{i=1}^n I_i}{I_0} = 10 \log \sum_{i=1}^n \frac{I_i}{I_0} \text{ (dB)}. \quad (27)$$

Pokud např. přičteme k původnímu zvuku další zvuk o stejné hladině (tedy i intenzitě), zvýší se celková hladina zvuku „pouze“ o 3 dB.

Hladina zvuku je dále závislá na vzdálenosti zdroje. Se zvětšující se vzdáleností zdroje zvuku od přijímače klesá intenzita „se čtvercem vzdálenosti“, tedy podle vztahu

$$I = \frac{\Delta P}{\Delta S} = \frac{P}{4\pi r^2}, \quad (28)$$

kde  $P$  je akustický výkon zdroje,  
 $S$  je plocha.

Výraz platí pro zdroj 0. řádu - akustický monopól. Pro hladinu zvuku pak platí:

$$L = 10 \log \frac{I}{I_0} = 10 \log \frac{P}{4\pi r^2 I_0} \text{ (dB)}. \quad (29)$$

Akustický tlak tedy klesá se vzdáleností lineárně. Platí tedy vzájemný vztah:

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{r_1}{r_2}, \quad (30)$$

kde  $p$  je akustický tlak,  
 $r$  vzdálenost od zdroje.

Sluchový vjem odpovídá okamžitému stavu objemové hustoty akustické energie ve zvukovodu vnějšího ucha. Působí-li současně několik akustických vln, jejich objemová hustota akustické energie se počítá podle

$$w_{sum} = \sum_{i=1}^n w_i. \quad (31)$$

Tento vztah, vyjadřující sčítání jednotlivých objemových hustot akustické energie, ovšem nemusí platit v případě, kdy dochází k interferenci vlnění a kdy např. dochází ke sčítání dvou signálů s opačnou fází.

Na takovém principu jsou založeny systémy pro potlačení zvuku nebo pro úpravu jeho kmitočtové charakteristiky.

## 2.7 Šíření zvuku

V případě, kdy akustické vlnění přechází z jednoho [1] prostředí do jiného [2], zůstává zachován kmitočet vlnění, ale změní se vlnová délka  $\lambda_1$  resp.  $\lambda_2$  a tedy i rychlost šíření vlnění  $v_1$  resp.  $v_2$  podle vztahu

$$\frac{v_1}{\lambda_1} = \frac{v_2}{\lambda_2}. \quad (32)$$

Pro rychlost  $v$  šíření akustického vlnění v plynech platí Laplaceův vztah

$$v = \sqrt{\kappa \cdot \frac{p}{\rho}}, \quad (33)$$

kde  $\kappa$  je Poissonova konstanta,  
 $p$  je tlak plynu,  
 $\rho$  je hustota plynu.

V případě ideálního plynu můžeme do vztahu dosadit

$$v = \sqrt{\kappa \cdot \frac{RT}{\mu}}, \quad (34)$$

kde  $R$  je molární plynová konstanta,  
 $T$  je teplota v jednotkách Kelvin,  
 $\mu$  je molární hmotnost plynu,

a tedy

$$\kappa = v^2 \cdot \frac{\mu}{RT}, \quad (35)$$

případně

$$v = \sqrt{\kappa \frac{p_0}{\rho_0} \left(1 + \frac{1}{2}\right) \gamma t}, \quad (36)$$

kde  $p_0$  je tlak plynu při 0 °C,  
 $\rho_0$  je hustota plynu při 0 °C,  
 $\gamma$  je teplotní rozpínavost pro daný plyn,  
 $t$  je teplota.

Rychlost šíření zvuku v některých vybraných plynech ukazuje tabulka:

Plyn	Rychlost (m/s)
Argon (20 °C)	319
Čpavek (0 °C)	415
Dusík (25 °C)	334
Helium (25 °C)	965

Plyn	Rychlost (m/s)
Kyslík (25 °C)	316
Methan (25 °C)	430
Neon (25 °C)	435
Oxid uhelnatý (25 °C)	338
Oxid uhličitý (25 °C)	259
Svítiplyn (20 °C) [3]	453
Vodík (25 °C)	1284
Vodní pára (100 °C)	404,8
Vzduch suchý (0 °C)	331,4
Vzduch suchý (25 °C)	346,3

Tab. 224: Rychlost šíření zvuku v některých plynech

Rychlost šíření zvuku v některých vybraných kapalinách ukazuje tabulka:

Kapalina	Rychlost (m/s)
Aceton (25 °C)	1174
Benzín (20 °C)	1170
Ethanol (25 °C)	1207
Methanol (25 °C)	1103
Rtuť (25 °C)	1450
Voda destilovaná (20 °C)	1481
Voda destilovaná (25 °C)	1497
Voda sladkovodní	1450
Voda mořská (13 °C)	1500

Tab. 225: Rychlost šíření zvuku v některých kapalinách

Pro rychlost  $v$  šíření podélné vlny akustického vlnění v tyči nebo struně platí vztah

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (37)$$

kde  $E$  je modul pružnosti v tahu,  
 $\rho$  je hustota materiálu.

Rychlost šíření zvuku v některých vybraných pevných látkách ukazuje tabulka:

Pevná látka	Rychlost (m/s)
ABS desky - termoplast	2230
Bakelit	1590
Beton	1700
Cihly	3600
Dřevo bukové, dubové	3400
Ebonit - kaučuk vulkanizovaný sírou	1570
Hliník	5100
Kaučuk	40
Korek	500



Pevná látka	Rychlost (m/s)
Led	3200
Měď	3500
Mosaz	3400
Nylon	2600
Ocel	5000
Olovo	1300
Platina	2800
Polyetylén	1950
Polyetylén s vysokou hustotou	2430
Polypropylen	2740
Polystyrén	2320
Polyuretan	1700
PVC	2380
Rtuť	1400
Sklo	5200
Stříbro	2700

Tab. 226: Rychlost šíření zvuku v některých materiálech

Z uvedených vzorců a především z tabulárních hodnot rychlosti akustického vlnění v plynech, kapalinách a pevných látkách je patrné, že lze zobecnit: čím je silnější vliv vzájemného působení molekul látky, tím je vyšší rychlost šíření vlnění. U pevných látek pak hraje značnou roli i fakt, že zatímco v plynech a kapalinách nejsou molekuly spojeny v pevné prostorové struktuře a vlnění se tedy přenáší téměř výhradně podélným vlněním, v pevných látkách se díky pevné prostorové struktuře šíří vlnění také příčným kmitáním.

## 2.8 Dopplerův jev

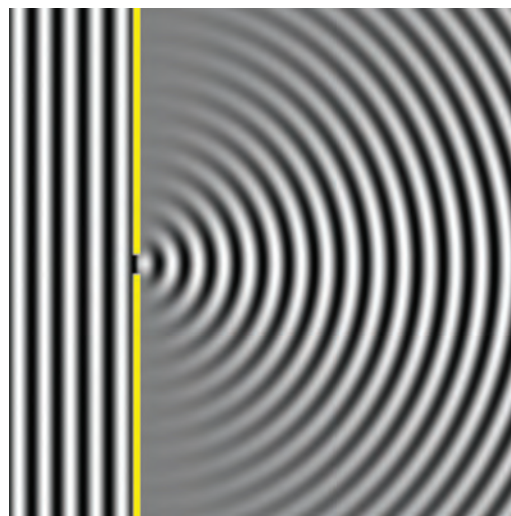
Tak, jako u jiných druhů vlnění, dochází také u akustického vlnění k tzv. Dopplerovu jevu, vznikajícímu v případě vzájemného pohybu mezi vysílačem vlnění a přijímačem. Jeho objevitelem, resp. autorem jeho vysvětlení, je rakouský fyzik a matematik Christian Doppler (1803–1853), kterému se v roce 1842 podařilo tento jev vysvětlit. Pro kmitočet, který přijímá příjemce, platí:

$$f_p = f_0 \cdot \left(1 + \frac{v_0}{v}\right), \quad (38)$$

kde  $f_0$  je kmitočet, vysílající vysílač,  
 $v_0$  je relativní rychlost přijímače vůči vysílači,  
 $v$  je rychlost zvuku v daném prostředí.

Dále se budeme v článku zabývat šířením akustického vlnění převážně v plynném prostředí – ve vzduchu. Ve vzduchu a ve volném prostředí se zvuk šíří všemi směry od zdroje zvuku. Podle Huygensova principu se takovým zdrojem vlnění stává každý bod vlnoplochy, do kterého dospěl vzruch,

tedy který byl vybuzen sousedními kmitajícími molekulami k mechanické reakci. Takový stav ukazuje obr. 227:



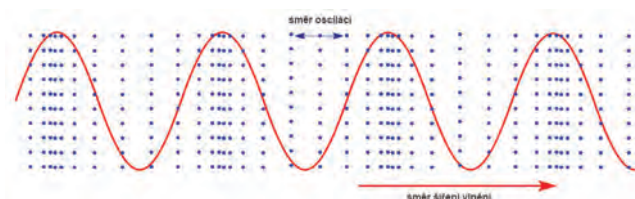
Obr. 227: Každý bod vlnoplochy je dalším zdrojem vlnění

Vybuzený bod vlnoplochy, tedy množiny molekul, kmitajících se stejnou fází, se opět stává bodovým zdrojem vlnění a okolním molekulám předává toto vlnění a to do všech směrů. Pokud je zdroj vlnění malý, šíří se vzruch prostřednictvím kulovitých vlnoploch.

## 2.9 Druhy vlnění

Nekonečným médiem se může šířit několik typů vln: podélné, příčné a povrchové. Každá z těchto vln se od sebe liší fluktuací a rychlostí šíření.

Podélné vlny – jsou akustické vlny, ve kterých částice média oscilují ve směru šíření vlny. Tím materiál podléhá stlačování a deformaci tahem. Vlny se mohou šířit ve všech materiálech (kromě vakua). Nejvyšší rychlost šíření je v ocelích  $C_l = 5950$  m/s.

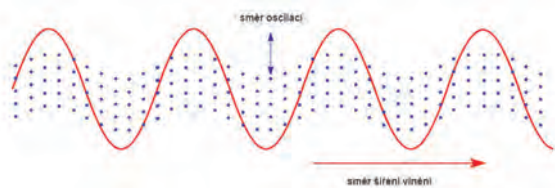


Obr. 228: Princip podélného vlnění

Příčné vlny – jsou akustické vlny, ve kterých částice média vibrují kolmo ke směru šíření vlny. Vlivem vln materiál podléhá smykové deformaci. Tento typ vln se může šířit pouze v pevných látkách. Rychlost příčných (transverzálních) vln ( $C_t$ ) v materiálu je vždy menší než rychlost podélných (longitudinálních) vln ( $C_l$ ) podle vztahu:

$$C_t \approx 0,6 \cdot C_l, \quad (39)$$

kde  $C_t$  je rychlost příčných vln,  
 $C_l$  je rychlost podélných vln.

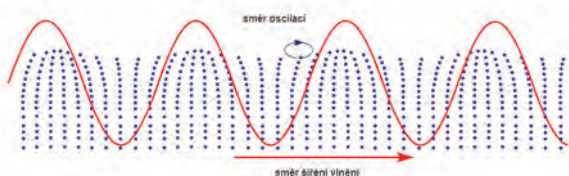


Obr. 229: Princip příčného vlnění

Povrchové vlny (Rayleighovy vlny) – jsou akustické vlny, které se šíří podél hranice mezi dvěma médii, ve vrstvě s typickou tloušťkou 1,5 až 2 vlnové délky  $(1,5-2) \cdot \lambda$ . Fluktuační střední částice vlny kombinují podélné a příčné vibrace, částice se pohybují podél uzavřených eliptických trajektorií. Rychlost ( $C\pi$ ) takových vln je nejnižší, u oceli zhruba funguje vztah:

$$C\pi \approx 0,96 \cdot Ct, \quad (40)$$

kde  $C\pi$  je rychlost povrchových vln,  
 $Ct$  je rychlost příčných vln.



Obr. 230: Princip povrchového vlnění

Obecně tedy platí pro daný materiál následující vztah:

$$Cl > Ct > C\pi. \quad (41)$$

Tyto typy vlnění jsou využívány především v ultrazvukové defektoskopii.

## 2.10 Odraz a pohlcení zvuku

Odraz zvuku probíhá podle zákona odrazu – „úhel dopadu se rovná úhlu odrazu“. Tento zákon je platný pro všechny druhy vlnění, pro světlo stejně jako pro kulečnickovou kouli (rotující pouze ve směru pohybu, tedy bez "falše"). Odražené vlny mohou rušit dopadající vlny a vytvářet konstruktivní i destruktivní rušení průběhu vlny. V uzavřeném prostoru může být u akustického vlnění takovým projevem konstruktivního rušení vznik stojaté vlny. To je způsobeno součtem dopadající a odražené vlny. Tím roste amplituda tlaku, který je v tenké „tlakové zóně“ poblíž povrchu dvojnásobný. Takový princip se používá např. u tzv. tlakových mikrofonů ke zvýšení jejich citlivosti. Zdvojnásobení tlaku způsobí zvýšení signálu zaznamenaného mikrofonem o 6 dB.

Stojaté vlnění může také vzniknout při kmitání vzduchu ve varhanní píšťale nebo kmitáním na kytarové struně.

Protože při dopadu zvukového vlnění na jakoukoliv překážku část zvukové energie proniká do druhého prostředí – je pohlcována (absorpce), a zbylá část se od překážky odráží (reflexe) podle zákona odrazu, je intenzita odraženého vlnění

vždy menší než intenzita vlnění dopadajícího na stěnu. Část zvukové energie se převede na jinou energii (pohybovou, tepelnou...) nebo projde stěnou mimo měřený prostor (obvykle je obsažen ve složce absorbované intenzity). Pro takový stav platí následující vztah:

$$I_0 = I_r + I_a, \quad (42)$$

kde  $I_0$  je celková intenzita vlnění,  
 $I_r$  je intenzita odraženého vlnění,  
 $I_a$  je intenzita absorbovaného vlnění.

Intenzita absorbovaného vlnění se skládá ze složky  $I_q$ , která se přemění na teplo nebo mechanickou energii a složky  $I_t$ , která pronikne stěnou mimo měřený prostor.

$$I_a = I_q + I_t, \quad (43)$$

kde  $I_q$  je složka intenzity přeměněná na jiný druh energie,  
 $I_t$  je složka intenzity transferovaná mimo měřený prostor.

Tomu odpovídají koeficienty odrazivosti  $r$  a pohltivosti  $\alpha$ :

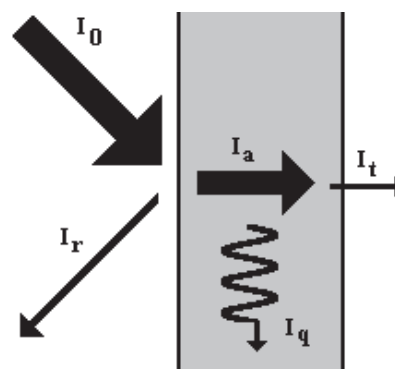
$$r = \frac{I_r}{I_0}, \quad (44)$$

kde  $r$  je koeficient odrazivosti (reflexe).

$$\alpha = \frac{I_a}{I_0}, \quad (45)$$

kde  $\alpha$  je koeficient pohltivosti (absorpce).

Z uvedeného tedy platí, že  $r + \alpha = 1$



Obr. 231: Vektorové rozložení celkové intenzity vlnění na jednotlivé složky

Důležitou vlastností materiálů pohlcujících vlnění je jejich pohltivost. Tato vlastnost bývá velmi závislá na kmitočtu vlnění. Větší pohltivost mají látky pórovité, textilie, perforované panely. Naopak malou pohltivost mají hladké, kompaktní materiály (kovové desky, keramika, dlaždice, okna). Materiály s vyšší pohltivostí se používají pro „dolaďování“ akustických prostor, koncertních sálů a hudebních a zvukových studií. Eliminují se tím odrazy vlnění, které by způsobovaly zkreslení zvukového vjemu nebo jeho nesrozumitelnost.



Pohlčená akustická energie závisí nejen na koeficientu absorpce  $\alpha$ , ale také na velikosti absorbující plochy  $S$ . Pro celkovou pohltivost takového prvku platí:

$$A = \alpha \cdot S \quad (\text{m}^2 \text{ sabin}), \quad (46)$$

kde  $S$  je plocha absorpčního prvku.

Pro celkovou pohltivost prostoru  $A_c$  platí:

$$A_c = \sum a_i S_i. \quad (47)$$

Při zjišťování akustických parametrů místnosti je někdy vhodné znát střední hodnotu koeficientu pohltivosti  $\alpha_s$ , tedy parametr určující průměrnou hodnotu koeficientu.

Pro ten platí:

$$\alpha_s = \frac{A}{S} = \frac{\sum a_i S_i}{\sum S_i}, \quad (48)$$

kde  $S$  je plocha absorpčního prvku.

Jednotkou absorpce materiálu je 1 sabin. Absorpční koeficient otevřeného okna místnosti je roven 1, protože vlnění „dopadající“ do prostoru plochy okna se zpět do místnosti neodráží. Proto se jednotka celkové absorpce nazývá „otevřené okno“.

Při výpočtu celkové absorpce prostoru je důležitou součástí výpočtu absorpce posluchačů, vybavení interiéru, sedadel, osvětlení, tedy veškerého vybavení místnosti. Přítomnost osob v místnosti obvykle velmi výrazně ovlivní akustické parametry místnosti.

Na jednoho sedícího posluchače připadá přibližně 0,42 m<sup>2</sup> (resp. „otevřeného okna“), pro dřevěnou židli 0,01 m<sup>2</sup>, čalouněné křeslo (0,1 až 0,3) m<sup>2</sup> a pod.



Obdobným způsobem jako pro absorpci platí vztahy pro průzvučnost stěny  $B$ :

$$B = \tau \cdot S \quad (\text{m}^2), \quad (49)$$

kde  $\tau$  je koeficient průzvučnosti.

Celková průzvučnost ani střední hodnota průzvučnosti celé místnosti se z důvodů komplikovanosti stanovení jednotlivých částí obvykle nezjišťují.

Pokud je zapotřebí snížit hladinu intenzity zvuku v prostoru, je nutno zvýšit celkovou pohltivost zvuku. To lze udělat buď obkládáním stěn hmotami s velkým koeficientem nebo pomocí speciálních konstrukcí (divadelní sály, koncertní sály, ...). Při návrhu a stavbě prostoru se vychází z poznatku, že vznikne-li v prostoru stojaté vlnění (byť i jen na přechodnou dobu), bude mít při odrazu na stěně vždy uzel, v němž je amplituda kmitání (a tedy i energie) nulová. Maximální energie je naopak v kmitně, která je od povrchu stěny vzdálená čtvrtinu vlnové délky. Umístíme-li do této vzdálenosti nějakou pohlcující látku (látkový závěs, překážku z porézního materiálu apod.), dosáhneme velmi dobré pohltivosti pro žádanou frekvenci. Podobným způsobem fungují i absorpční rezonátory v děrovaných panelech.

Při definování útlumu vlnění procházejícího stěnou bývá útlum vyjádřen v decibelech (dB). Pro ideálně tlumící stěnu je útlum takový, který sníží průměrnou hlasitost vnějšího zvuku pod zvukový práh. Běžné hodnoty útlumu jsou pro zvukové rozhlasové nebo filmové ateliéry (6 až 10) dB, pro nemocnice (8 až 12) dB, pro školy, kostely, knihovny a divadla (10 až 20) dB a pro kanceláře (20 až 30) dB.

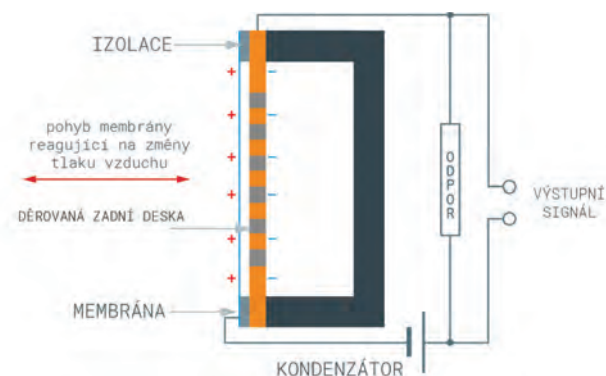
## 3. FYZIKÁLNÍ AKUSTIKA

### 3.1 Akustická výchylka

Akustická výchylka je vychýlení objemového elementu ze střední, rovnovážné polohy, které zprostředkuje akustické vlnění. Vzniká mechanickým kmitáním pružného prostředí; plynů, kapalin nebo i pevných materiálů, které kmitají kolem své rovnovážné polohy. Příkladem akustické výchylky kmitající pevné látky může být kmitání membrány mikrofonu. Její výchylka závisí (mimo jejich fyzikálních parametrů) na rozdílu velikosti okamžitého akustického tlaku před membránou a za ní. Výchylka tedy odpovídá derivaci akustického tlaku podle směru šíření. Výstupní napětí mikrofonu je tak přímo úměrné této výchylce.

### 3.2 Akustická rychlost

S akustickou výchylkou souvisí akustická rychlost. Je to okamžitá rychlost objemových elementů prostředí, se kterou se tyto částice pohybují působením akustického tlaku kolem své rovnovážné polohy. Pro slyšitelné pásmo se rychlosti pohybují v rozsahu  $5 \cdot 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  (odpovídající prahu slyšitelnosti) až  $1,6 \cdot 10^{-1} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  (což odpovídá prahu bolestivosti).



Obr. 301: Principiální schéma kondenzátorového mikrofonu

Pro okamžitou rychlost harmonického signálu platí vztah:

$$v(x, t) = \frac{\delta u}{\delta t} = u_0 \omega \cos \left[ \omega \left( t - \frac{x}{c} \right) \right], \quad (50)$$

kde  $u_0$  je amplituda akustické výchylky,  
 $v_0$  je amplituda akustické rychlosti.

### 3.3 Akustický tlak

V prostředí, kde se šíří akustický vzruch, existuje mimo statického (např. atmosférického) tlaku ještě dynamický tlak, odpovídající aktuálnímu zhuštění nebo naopak zředění objemových elementů zprostředkujících akustický vzruch. Vznikají tak místa podtlaku a přetlaku, a tak vzniká celková změna statického tlaku. Celkový tlak je tedy součet atmosférického tlaku  $p_b$  a dynamického tlaku  $p$ . Barometrický tlak dosahuje hodnoty cca  $10^5$  Pa, zatímco akustický tlak lidské ucho vnímá už od hodnoty  $2 \cdot 10^{-5}$  Pa. Průběh akustického tlaku odpovídá průběhu akustické výchylky nebo akustické rychlosti. Pro harmonický signál lze akustický tlak vyjádřit rovnicí:

$$p = p_0 \cdot \omega \cos \left[ \omega \left( t - \frac{x}{c} \right) \right], \quad (51)$$

kde  $p_0$  je amplituda akustického tlaku.

Z výrazu je zřejmé, že akustický tlak je funkcí úhlové frekvence  $\omega$ , resp. kmitočtu  $f$ . Reálné zvuky v našem životním prostředí ale nejsou akustické signály o jednom kmitočtu, ale skládají se z řady dílčích signálů. Z tohoto důvodu je třeba u akustických veličin (jako je např. akustický tlak, akustická rychlost nebo akustický výkon) vyjadřovat jejich hodnoty v závislosti na kmitočtu, tedy formou kmitočtových spekter.

### 3.4 Efektivní hodnota akustické rychlosti a akustického tlaku

Při některých výpočtech je nutné nahradit okamžité hodnoty efektivními hodnotami, pro které v případě harmonického pohybu platí:

$$v_{ef} = \frac{v_{max}}{\sqrt{2}} \cong 0,707 \cdot v_{max}, \quad (52)$$

$$p_{ef} = \frac{p_{max}}{\sqrt{2}} \cong 0,707 \cdot p_{max}. \quad (53)$$

Pro případ neharmonického pohybu platí definice střední hodnoty periodického signálu s periodou  $T$ :

$$p_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T p^2(t) \cdot \delta t}. \quad (54)$$

V případě rovinné akustické vlny jsou akustický tlak a akustická rychlost provázány následujícím vztahem:

$$p_{ef} = \rho \cdot c \cdot v_{ef}, \quad (55)$$

kde  $\rho$  je hustota prostředí je rychlost šíření vlnění.

### 3.5 Akustický výkon

Akustický výkon je akustická energie vyzářená zdrojem a přenesená prostředím za jednotku času. Platí tedy:

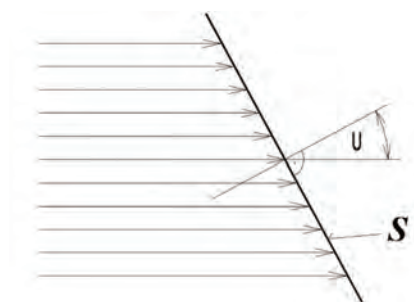
$$P = \frac{dE}{dt}, \quad (56)$$

kde  $E$  je akustická energie.

Pokud je akustický výkon vztažen k jednotce plochy, mluvíme o tzv. měrném akustickém výkonu  $N$  ( $W \cdot m^{-2}$ ), pro který platí:

$$N = \frac{\delta P}{\delta S \cdot \cos u}, \quad (57)$$

kde  $u$  je úhel mezi směrem šíření akustického výkonu a osou plochy, na kterou vlnění dopadá.



Obr. 302: Dopad akustického výkonu na šikmou plochu

Pro výkon obecně platí výraz:

$$P = F \cdot v = p \cdot S \cdot v, \quad (58)$$

kde  $F$  je působící síla.

V případě, že je plocha kolmá na směr dopadajících akustických vln, pak lze měrný akustický výkon vyjádřit výrazem:

$$N = p \cdot v. \quad (59)$$

### 3.6 Intenzita zvuku

Intenzita zvuku  $I$  ( $W \cdot m^{-2}$ ) je plošná hustota akustického výkonu a je mírou účinku mechanického vlnění vzduchu a jím přenášeného zvuku. Její prahovou hodnotou je  $10^{-12} W \cdot m^{-2}$ . Intenzita zvuku je definována podílem výkonu zvukového vlnění a plochy, kterou vlnění prochází. Je přímo úměrná energii kmitání, které zvukové vlnění v daném bodě vzbuzuje. Tato energie pak závisí na druhé mocnině amplitudy výchylky a na druhé mocnině frekvence. Proto hladina akustického tlaku odpovídá akustické intenzitě v případě, kdy plocha, na které měříme intenzitu, je kolmá ke směru šíření zvuku. Sluchový orgán člověka je schopen přijímat zvuk z jakéhokoli směru. Sluchový vjem tedy souvisí spíše s tlakem než s intenzitou. To je hlavní důvod, proč se v praxi při popisu subjektivní hlasitosti používá hladina akustického tlaku. Hladina akustické intenzity je používána spíše pro teoretické aplikace. Následující tabulka příkladů hodnot akustického tlaku a intenzity ukazuje jejich vzájemný vztah:



Tab. 303: Příklady hodnot akustického tlaku

Akustický tlak $p$ (Pa)	Akustická intenzita $I$ ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ )	Hladina akustického tlaku $L$ (dB)	Příklad prostředí, kde se vyskytuje
cca 60	cca 10	cca 130	práh bolesti
2	$10^{-2}$	100	diskotéka
0,2	$10^{-4}$	80	rušná ulice
0,02	$10^{-6}$	60	kancelář
0,002	$10^{-8}$	40	obývací pokoj
0,0002	$10^{-10}$	20	ložnice v noci
0,00002	$10^{-12}$	0	práh slyšitelnosti

Pro intenzitu zvuku rovinné vlny platí vztah:

$$I = \frac{1}{2} p \cdot \omega^2 \cdot u_0^2 = p_{ef} \cdot v_{ef}, \quad (60)$$

kde  $p_{ef}$  a  $v_{ef}$  jsou efektivní hodnoty akustického tlaku a akustické rychlosti.

V technické akustice lze reálně měřit akustický tlak. Technický problém ale představuje měření akustické rychlosti. Pro taková měření se využívá rovinná vlna, u které je poměr mezi akustickým tlakem a akustickou rychlostí konstantní a odpovídá vztahu:

$$I = \frac{P_{ef}^2}{p \cdot c}. \quad (61)$$

Pro šíření kulové vlny, kdy akustický tlak není ve fázi s akustickou rychlostí, platí:

$$I = p_{ef} \cdot v_{ef} \cdot \cos \varphi, \quad (62)$$

kde  $\varphi$  je fázový úhel mezi akustickým tlakem a akustickou rychlostí.

Citlivost lidského sluchu se s rostoucí intenzitou snižuje. Při zvyšování akustické intenzity sluchový orgán stále více snižuje svou citlivost. Výsledkem je logaritmická závislost mezi velikostí zvukového podnětu a velikostí sluchového vjemu, kterou objevil německý fyziolog Ernst Heinrich Weber (1795-1878) a kterou později zdůvodnil zakladatel psychofyziky Gustav Theodor Fechner (1801-1887). Weberův-Fechnerův psychofyzický zákon zní: Intenzita sluchového vjemu je úměrná logaritmu podnětu.

### 3.7 Hladina akustické intenzity a akustického tlaku

Uvedená vlastnost sluchu tak člověku umožňuje vnímat i velmi slabé zvukové signály a zároveň ho chrání před zvukem vysoké intenzity. Tato vlastnost sluchu byla důvodem k zavedení logaritmické míry (dB) při vyjadřování akustických veličin. Akustická intenzita  $I$  ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ) vyjádřená v decibelech se nazývá hladina akustické intenzity  $L_I$  (dB) a platí:

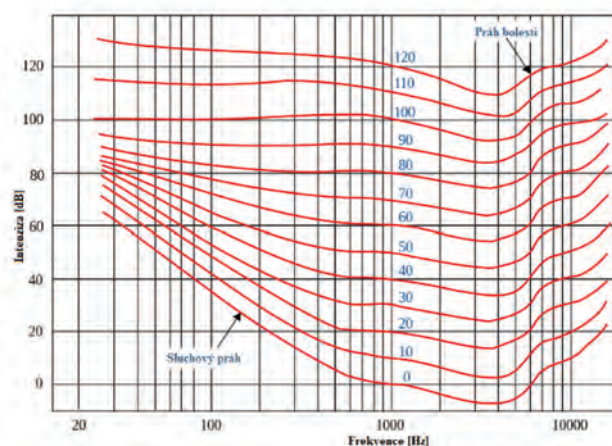
$$L_I = 10 \cdot \log \frac{I}{I_{ref}}, \quad (63)$$

$$\text{kde } I_{ref} = 10^{-12} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}. \quad (64)$$

Pomocí druhých mocnin akustického tlaku je tak vyjádřena hladina akustického tlaku  $L_p$  jako bezrozměrná veličina, vztahující se k referenční hodnotě, kterou je prahová hodnota akustického tlaku  $p_{ref} = 2 \cdot 10^{-5}$  Pa.

### 3.8 Práh slyšitelnosti

Spodní hranice slyšitelnosti lidského ucha je individuální parametr. Je to rozsah všech zvuků, které lidské ucho dokáže vnímat v celém slyšitelném pásmu, tedy přibližně 20 Hz až 20 kHz. Jeho hodnota byla stanovena na  $10^{-12} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  (pro 1 kHz), což odpovídá akustickému tlaku  $2 \cdot 10^{-5}$  Pa, tedy 20  $\mu\text{Pa}$ . Práh slyšitelnosti není pro různé kmitočty stejný. Na grafu 304 je vidět kmitočtová závislost prahu slyšitelnosti. Lidský sluch je nejcitlivější v oblasti 1 až 5 kHz. Směrem k nízkým i k vysokým kmitočtům pak práh slyšitelnosti stoupá.



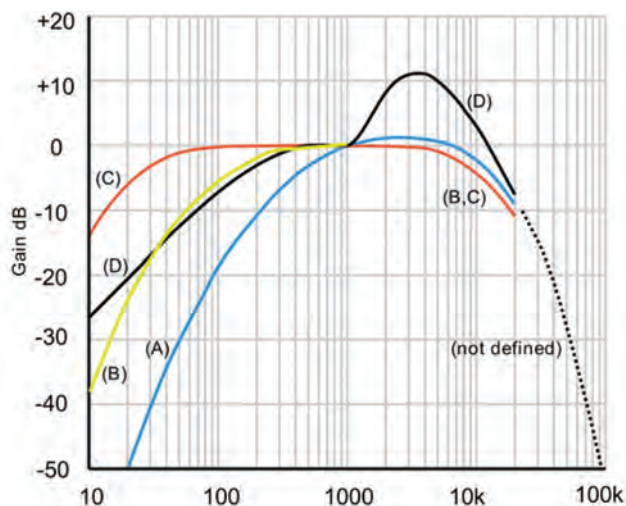
Graf 304: Práh slyšitelnosti a bolesti

V souvislosti s definováním a měřením prahu slyšitelnosti je používána jednotka 1 fon (Ph). Odpovídá hladině intenzity zvuku o kmitočtu 1 kHz v dB a je stejně jako hladina intenzity logaritmická, bezrozměrná a vztahována k referenční hodnotě akustického tlaku. Je ale kmitočtově závislá podle křivek grafu nazývajících se izofóny. Práh slyšitelnosti, tedy hlasitost = 0 Ph a pro kmitočtet 1 kHz, odpovídá intenzitě 0 dB. Např. ale při kmitočtu 90 Hz už 0 Ph odpovídá intenzitě 40 dB.

Pro určité provázání této subjektivní, nelineární vlastnosti lidského sluchu s objektivními měřicími metodami bylo zavedeno tzv. akustické vážení.

### 3.9 Akustické vážení – váhová křivka A

Akustické vážení typu A, reprezentované váhovou křivkou A, koriguje naměřené hodnoty hladiny akustického tlaku (resp. intenzity) tak, aby výsledná hodnota pro určitý kmitočtet odpovídala hlasitosti vjemu daného signálu. Průběh váhové křivky A tedy respektuje obecný průběh křivek stejné hlasitosti. Pro speciální použití byly navrženy i další váhové křivky B, C, G..., pro velmi nízké kmitočty v oblasti vibrací váhové křivky  $W_m$ ,  $W_k$ ,  $W_d$  a další.

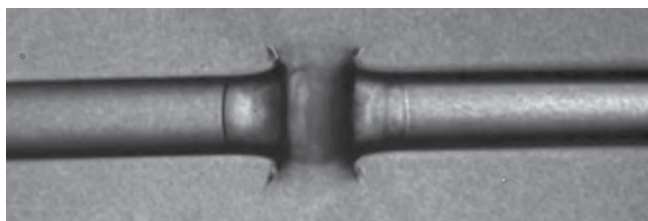


Graf. 305: Příklady váhových křivek

Použitím váhové křivky se korigují hodnoty akustického tlaku a nejsou tedy už dále závislé na kmitočtu. V souvislosti s použitím váhové křivky se můžeme setkat se zápisem akustického tlaku ve formě  $L_A$ , případně v zahraničních odkazech dB(A).

### 3.10 Práh bolesti

Na opačném konci škály hodnot akustické intenzity ve vztahu k lidskému sluchu je práh bolesti. Opět je to hodnota, která je individuální, a tak je její hodnota stanovena na 120 až 140 dB, tedy  $2 \cdot 10^2$  Pa. Zvuk o takové intenzitě, i když je stále ještě o tři řády nižší než je statický, atmosférický tlak, způsobuje posluchači bolestivé vjemy spojené s dočasnou nebo trvalou částečnou nebo úplnou ztrátou sluchu. Uvádí se, že takovou intenzitu dosahuje startující tryskové dopravní letadlo. V souvislosti s prahem bolesti je dobré zmínit také maximální dosažitelnou hlasitost. Zvuk je spojen se specifickým látkovým prostředím v němž se šíří, obvykle vzduchem. Z toho plyne, že maximální hlasitost je taková, při které se dané prostředí začne rozpadat. U vzduchu to odpovídá intenzitě 194 dB. Pro vodu je to však ještě mnohem víc. Při experimentu na Stanfordské univerzitě byl v roce 2019 prostřelen jedním z nejvýkonnějších roentgenových laserů světa několik mikrometrů tenký proud vody. Pulsem, trvajícím 40 ns byly vygenerovány rázové vlny o intenzitě 270 dB.



Obr. 306: Rázová vlna

Voda se po zásahu rentgenovým zářením okamžitě začala vypařovat, došlo tak k naplnění podmínek experimentu

– zvuk s maximální hlasitostí způsobil rozpad daného látkového prostředí, tedy vody. Zásah laserem vyvolal rázovou vlnu, kterou autoři nazvali „shockwave train“, tedy akustický třesk o uvedené intenzitě.



Obr. 307: Strašek paví

Obdobné efekty jsou známy u vysokorychlostních pohonů, ale také u koryše strážáka pavího, drobného hlubinného predátora, který představuje nejen nadějný diagnostický senzor při odhalování rakovinových buněk, ale také tvora, jehož přední končetiny dokážou vygenerovat tak silné a bleskově rychlé údery, že ve vodě dochází ke kavitaci, tedy ke vzniku dutin v kapalině vlivem vysokorychlostního pohybu a tím ke generování intenzivního zvuku.

### 3.11 Akustická impedance

Každé prostředí charakterizuje veličina, nazvaná akustická impedance. Ovlivňuje velikost odrazu akustické energie při dopadu zvukové vlny na rozhraní dvou prostředí s různou akustickou impedancí. Tím je tato veličina významná mimo jiné pro ultrazvukové vyšetřovací metody.

Při průchodu prostředím se může část energie zvukové vlny absorbovat (např. přeměnit v teplo), což se projeví zmenšením amplitudy a okamžité akustické rychlosti. Rychlost šíření vlny i kmitočet však zůstávají v daném prostředí stejné.

Při průchodu vlny přes rozhraní různých prostředí se zachovává kmitočet, ale podle prostředí se mění rychlost šíření vlny  $c$  a tedy i vlnová délka  $\lambda$ . Na rozhraní dvou prostředí se může část energie zvukové vlny odrazit, případně dojde i k lomu vlnění. Tyto jevy lze popsat na základě Huygensova principu, který platí v akustice podobně jako v optice. Odrazy i ohyb vlnění jsou rozhodující jevy při využití ultrazvuku v defektoskopii nebo v lékařství.

Akustická impedance je pro rovinnou zvukovou vlnu určena poměrem mezi efektivním akustickým tlakem a efektivní akustickou rychlostí v daném prostředí na plochu. Pokud nahradíme napětí akustickým tlakem a proud akustickou rychlostí, jsou vztahy analogické s Ohmovým zákonem.

$$Z = \frac{P_{ef}}{Sv_{ef}} = \rho \cdot \frac{c}{S} \quad (65)$$

Jednotkou akustické impedance  $Z$  je ( $\text{Pa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$ ), rozměr v SI soustavě ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ).

Příklady akustické impedance materiálů při zdravotnickém ultrazvukovém vyšetřování:

Tab. 308: Příklady akustické impedance

Tkáň	Akustická impedance $Z(10^6 \text{ kg/m}^2\cdot\text{s})$	Rychlost $c(\text{m/s})$
Krev	1,62	1580
Kost	3,75 – 7,38	3360
Mozek	1,55 – 1,66	1538
Játra	1,64	1570
Sval	1,65 – 1,74	1568
Voda	1,5	1500
Vzduch	0,0004	340

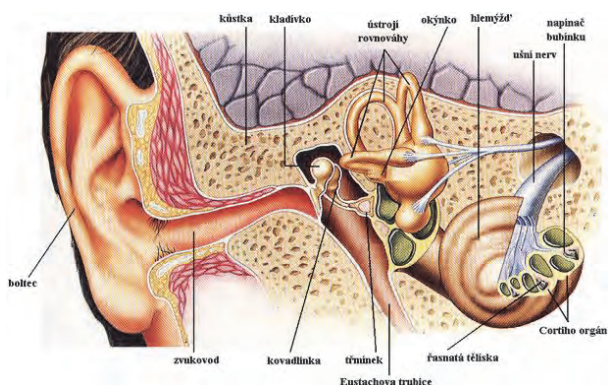


## 4. FYZIOLOGICKÁ AKUSTIKA

Fyziologická akustika se zabývá tvorbou a vnímáním zvuku generovaným hlasivkami, tedy hlasovým orgánem člověka, a jeho vnímáním v uchu, tedy ve sluchovém orgánu. Lékařská hygiena se také podrobně zabývá vlivem hluku (ale i vibrací) na lidské zdraví a fungování lidského organismu.

### 4.1 Sluchový orgán člověka

Sluch je, spolu se zrakem, chutí, čichem a hmatem, jedním z pěti základních lidských smyslů. Absence kteréhokoliv z nich působí člověku značný handicap. Zvuk člověk zachytává sluchovým ústrojím – uchem. V první fázi je zachycen vnějším ušním boltcem, postupuje zevním zvukovodem, dále rozkmitá bubínek, přes středoušní kůstky je přenesen na blánu oválného okénka a odtud do hlemýždě. Mezi stěnou hlemýždě, kostí skalní a také uvnitř hlemýždě je tekutina, která rozkmitá membránu s vláskovými buňkami. Tím dojde k jejich podráždění. Vzruch se tak přeneše na sluchový nerv a odtud ke zpracování do mozku.



Obr. 401: Sluchový orgán člověka

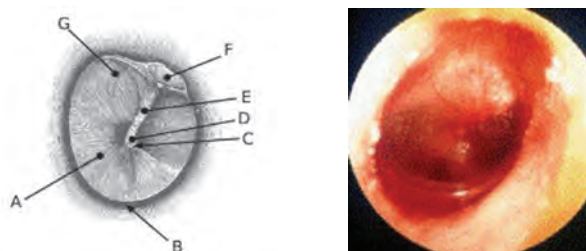
Měkké tkáně (s výjimkou plic) mají vzhledem k vysokému obsahu vody akustickou impedanci kolem 1,5 ( $\text{MPa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$ ).

Akustická impedance  $Z$  se při přechodu ze vzduchu do vody zvětší přibližně 3600x. Při stejné intenzitě  $I$  je akustický tlak ve vodě přibližně 60x vyšší než ve vzduchu, zatímco akustická rychlost i výchylka 60x menší. Tedy i akustický tlak odpovídající prahu slyšitelnosti je ve vodě asi 60x vyšší než ve vzduchu. Při přechodu z jednoho prostředí do druhého se mění akustická intenzita. Na rozhraní prostředí totiž obvykle dochází k částečnému odrazu, proto pouze část akustického výkonu projde z jednoho prostředí do druhého.

Ucho je vstupní periférií sluchového analyzátoru, v němž dochází k zachycení a zpracování zvukových signálů a jejich přeměně na nervové vzruchy. Skládá se z těchto částí:

- **Vnější ucho** se skládá z ušního boltce a zvukovodu o délce asi 25 mm a průměru cca 8 mm. Slouží k zachycení zvukových vln a jejich předání bubínku. Zvukovod je akustický rezonátor s plochou rezonanční křivkou, zesilující kmitočty okolo 3,5 kHz. Ušní boltce napomáhá směřování ke zdroji signálu. Zachycuje zvukové vlnění jako jakýsi trychtýř. Zakrytím jednoho nebo obou boltců se můžeme přesvědčit, že se hlasitost vjemu sníží, protože do ucha bude dopadat zvuk s menší intenzitou.

- **Střední ucho** se skládá z bubínku a tří sluchových kůstek. Bubínek je pružná vazivová blána kónického tvaru obrácená hrotem směrem dovnitř. Sluchové kůstky – kladívko, kovádlínka a ťmínek, pokračují Eustachovou tubicí, ústící do nosohltanu. Mají převodní funkci. Převádí akustické vlnění zachycené bubínkem do kapalného prostředí vnitřního ucha. Jedná se o hydrodynamický přenos, kterým se vyrovnávají rozdíly akustického tlaku mezi vnějším prostředím (vzduchem) a vnitřním tekutým prostředím kapaliny. Dochází tak k transformaci tlaků zvýšením tlaku zvukového vlnění při vstupu do vnitřního ucha. Podílí se na tom pohyb sluchových kůstek a rozdíl v ploše bubínku a oválného okénka.



Obr. 402: A – pars tensa, B – annulus fibrosa, C – umbo, D – stria mallearis, E – rukojeť kladívka spojená s bubínkem, F – pars flaccida, G – kovádlínka



Bubínek, který je na sluchové kůstky napojen, kmitá s velkým rozkmitem a malou silou. Naopak ploténky třmínku mají malý rozkmit a větší sílu. Jedná se tedy o jakýsi akustický imedanční převodník. Tlak kapaliny vnitřního ucha v oválném okénku se touto transformací zvýší oproti tlaku na bubínek asi dvacetinásobně. Střední ucho má také funkci ochrannou. Umožňuje útlum silného zvuku až o 15 dB během (15 až 20) ms. Tento reflex se nazývá Tympanický reflex. Na středoušních kůstkách jsou šlašinkami napojeny drobné svaly – m. tensor tympani a m. stapedius, ty se při hlasitém zvuku stáhnou a dochází k tomu, že se zvýší tuhost celého řetězce kůstek. Statický tlak v bubínkové dutině musí odpovídat atmosférickému tlaku okolí. K tomuto účelu slouží Eustachova trubice, která spojuje středoušní dutinu a nosohltan.

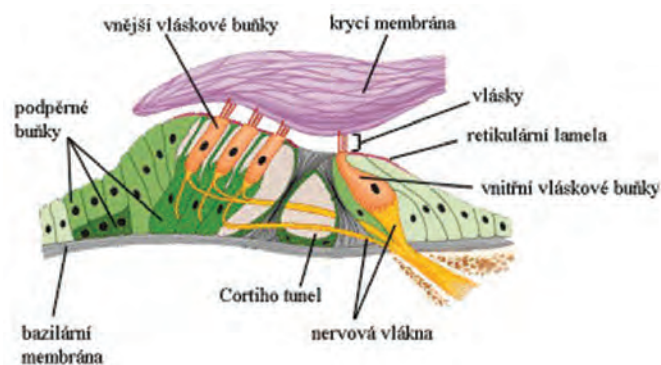


Obr. 403: Eustachova trubice

Při každém zívnutí a polknutí se trubice otevře a vyrovná tlaky. Jestliže trubice nefunguje správně, např. při rýmě, dochází ke špatné vibraci středoušních kůstek. Funkci Eustachovy trubice můžeme využít při letu letadlem, kdy se s měnící se výškou letu mění

i atmosférický tlak. Správným „profouknutím“ můžeme eliminovat někdy až bolestivý důsledek takové tlakové změny. Ze stejného důvodu měli dělostřelci a vojáci, pohybující se blízko kanónů, neustále otevřená ústa, aby jim při výstřelu děla případný tlakový rozdíl před a za ušním bubínkem nezpůsobil jeho destrukci, a tedy ztrátu sluchu.

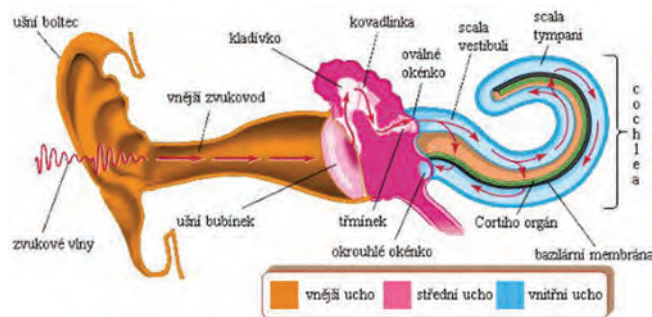
• **Vnitřní ucho** je tvořeno systémem chodbiček, který je sídlem dvou systémů – vestibulárního, poskytujícího informace o vnímání polohy a pohybu, a systému sluchového, tvořeného hlemýžděm. Pro vnímání zvuku hraje důležitou roli vlastní přijímací systém, tzv. Cortiho orgán, součást hlemýždě, složený z řady nepatrných řasnatých buněk. Tlakové vlny pohybují pružnou membránou, která deformuje řasnaté buňky v Cortiho orgánu.



Obr. 404: Cortiho orgán

Zde dochází k přeměně zvukového signálu na signál elektrický, který je veden do mozku a tam dále zpracován.

Ucho je velmi citlivý přijímač signálu. Akustický tlak o velikosti 20  $\mu\text{Pa}$ , tedy tlak, odpovídající sluchovému prahu, způsobí v uchu pohyb bubínku s rozkmitem řádově  $10^{-8}$  mm, tedy 10 pm. Ve vnitřním uchu je transformovaná výchylka smyslových buněk ještě o řád menší, tedy cca 1 pm, což je asi 50x menší rozměr, než je průměr atomu vodíku! Sluch je ale zároveň schopen zpracovat akustické tlaky až o sedm řádů vyšší.



Obr. 405: Části sluchového orgánu

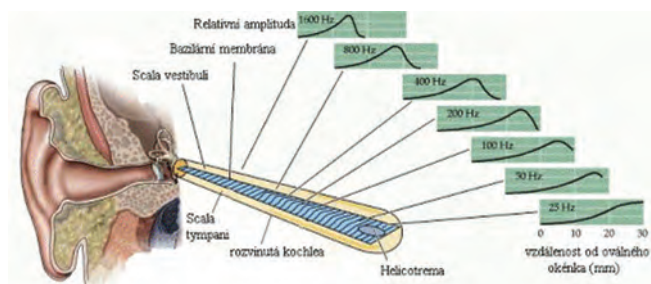
Zvukové vlny mohou dosáhnout receptory ve vnitřním uchu těmito způsoby:

- **Kůstkovým vedením** pomocí kůstek ve středním uchu využívající jejich převodní a transformační funkce. Je to hlavní způsob vedení zvuku u zdravého člověka.
- **Kostním vedením**, tedy přenosem akustických vibrací lebeční kostí přímo do tekutiny uvnitř ucha. Tento způsob přenosu se uplatňuje při poruše kůstkového vedení a při silných zvucích.
- **Vzduchovým vedením** přímo k oválnému okénku ve středním uchu. U zdravého člověka je vliv tohoto přenosu velmi nepatrný.

Pokud dojde k porušení sluchového nervu, je ztráta sluchového vnímání již nevratná. Pokud však došlo k poruše sluchového orgánu jiným způsobem, je v dnešní době medicína schopna problémy takto postižených lidí řešit. Jedním z řešení poškození sluchu je aplikace naslouchacího přístroje. O nedoslýchavosti a nápravě takového poškození aplikací sluchadla musí rozhodnout specialista na ušní choroby, který provede audiologické vyšetření. Toto vyšetření musí prokázat, že jakýkoliv jiný terapeutický postup nepřinese pacientovi efekt, a jde o stav trvalý a sluchová vada způsobuje postiženému komunikační nebo jiné traumatické obtíže.

K tomu, abychom dobře slyšeli, stačí člověku jedno správně fungující ucho. Pro určení směru původu zvuku a vzdálenosti jeho zdroje jsou ale zapotřebí uši dvě. Na bubínek vzdálenějšího ucha dopadne zvuk s nepatrným zpožděním. Toto zpoždění pak umožňuje lokalizovat zdroj a vzdálenost. Mozek je pak schopen toto zpoždění zpracovat už od hodnoty  $10^{-5}$  s.

Vlastní princip kmitočtově závislého sluchového vjemu není doposud zcela detailně objasněn. Existuje několik teorií o tom, jakým způsobem člověk rozlišuje příslušné kmitočty, resp. jejich kombinace.



Obr. 406: Kmitočtové rozlišení

Přes oválné okénko jsou vibrace postupně přeneseny na vlákna v hlemýždi stočené bazilární membrány, která se rozkmitá. Dojde k podráždění vláskových buněk a jejich vychýlení. Na bazilární membráně odpovídá vždy určitému místu příslušná zvuková frekvence. Tóny s nižší frekvencí rozkmitají bazilární membránu s amplitudou výkmitu dále od počátku, čím vyšší frekvence tónu, tím je místo amplitudy kmitu bazilární membrány blíže oválnému okénku. Mechanické vlnění je v Cortiho orgánu přeměněno na elektrické impulsy, které jsou vedeny sluchovým nervem v Heschlových závitěch. Tam dochází k dekódování. Impulsy jsou vnímány jako zvuk. Do mozku vede elektrické impulsy více než 30 000 nervových vláken.

Řada vědců se snažila zjistit princip vjemu lidským uchem, jakým způsobem vnímáme složité zvuky, jak dochází ke sluchové analýze a syntéze zvuků. Z toho důvodu vzniklo několik teorií, z nichž ty hlavní jsou: Helmholtzova rezonanční teorie, Békésyho teorie, frekvenční teorie, smíšené teorie.

- **Helmholtzova rezonanční teorie** vychází z představy, že Cortiho orgán je podobný postupné řadě rezonátorů. Zvukový podnět z vnějšího prostředí se dostane do vnitřního ucha, čímž se rozkmitá jeden nebo více rezonátorů naladěných na příslušné tóny a dojde k podráždění konce sluchového nervu dané tónové oblasti. Rezananční funkci plní vlákna bazilární membrány, tedy místa bazilární membrány, na nichž příslušně dlouhá vlna způsobí největší výchylku. Tím se určuje výška tónu, který vnímáme.

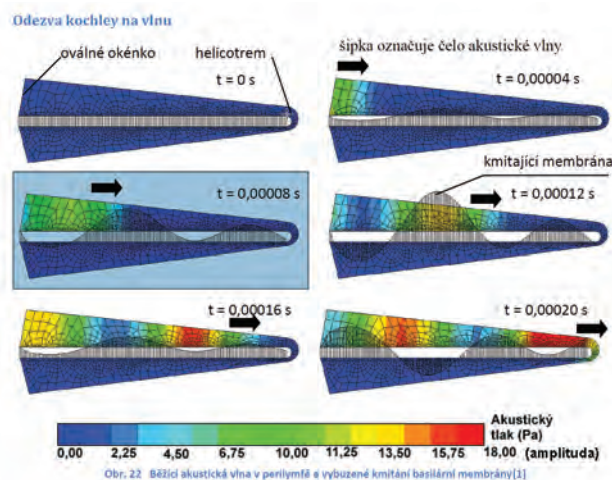
- **Békésyho hydromechanická teorie** vysvětluje kmitání v hlemýždi jako šíření vlny v trubici s pružnou stěnou – bazilární membránou, po které se šíří rozruch rychlostí poměrně malou. Proto je vlnová délka i při nižších frekvencích menší než délka bazilární membrány. To umožňuje vznik jakýchkoli rezonancí s maximem při určité frekvenci na určitém místě. Za své objevy v oblasti sluchu obdržel Georg von Békésy v roce 1961 Nobelovu cenu.

- Řada **frekvenčních teorií** předpokládá, že se tón nerozpozná podle místa podráždění, ale podle kmitočtu nervových impulsů. Centrální nervová soustava přímo vnímá periodu impulsu. Souhlas frekvence nervových vzruchů s frekvencí zvuku až do určité meze potvrdili Wever a Bray zápisem tzv. akčních potenciálů ve sluchovém nervu.

- **Smíšené teorie** předpokládají, že se oba principy kombinují.

Ani jedna z uvedených teorií však nedokáže detailně vysvětlit rozlišovací schopnosti lidského sluchu. Je prokázáno,

že hrubé rozlišení výšky tónu se děje na určitých místech bazilární membrány. Mechanické vysvětlení jemné rozlišovací schopnosti sluchu, kmitočtu a dynamiky ale zatím není zcela vysvětleno.

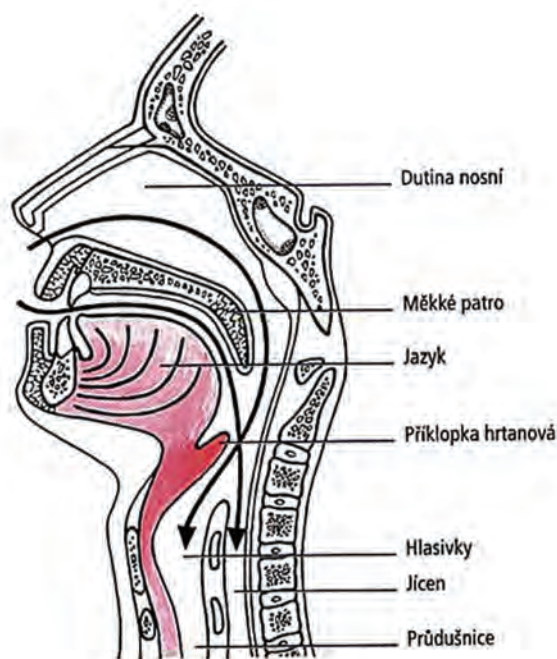


Obr. 407: Princip rozlišovacích schopností sluchu

## 4.2 Hlasový orgán člověka

Druhá strana fyziologie akustiky člověka je strana vysílací, tedy způsob, jakým člověk vytváří hlas. Hlasovým orgánem, který slouží pro vydávání zvuku (mimo sykavek) lidskými ústy, jsou hlasivky.

Hlasivky jsou uloženy v hrtanu. Samotné hlasivky jsou tvořeny párovým hlasivkovým svalem, hlasivkovým vazem a slizniční hlasivkovou řasou, napjatými mezi konvicitou a štítnou chrupavkou. Vzduch, který při výdechu prochází hlasivkovou šterbinou, mezi nimi může rozechvívat napjaté hlasivkové řasy a vzniká tak hlas nebo zpěv.



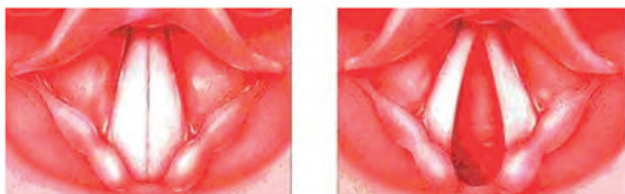
Obr. 408: Hlasový orgán člověk



Základní hlasivkový tón samohlásek a znělých souhlásek určuje kmitočet kmitání hlasivek v hlasové šterbině. Ostatní harmonické, které tvoří specifickou barvu hlasu, vznikají v rezonančních dutinách. Neznělé souhlásky nevznikají v hlasivkové šterbině, ale jsou způsobeny vkládáním překážek (zuby, rty, jazyk) vydechovanému vzduchu.

Hlasivková šterbina tvarem připomíná trojúhelník, dotýkající se vpředu klenby chrupavky štítné. Dvě třetiny tvoří blanitá část chrupavek (slizniční hlasivková řasa), zadní třetina je okrajem hlasivkových chrupavek, které jsou pokryty podobně jako hlasové vazy jemnou a lehce zranitelnou sliznicí – hlasivkovou řasou.

Hlasivky jsou klidně rozevřeny při dýchání a tvorbě hlásek *F, CH, S* a *Š*. Při lehkém přiblížení hlasivkových řas začnou hlasivky kmitat a vytvářejí znělé souhlásky *B, D, Ď, G, H, V, Z, Ž*. Při těsném sblížení hlasivkových řas, ale bez kmitů se vytváří hlásky *C, K, P, T, Ť*. Samohlásky *A, E, I, O, U* a *Y* vznikají těsným sblížením a kmitáním hlasivkových řas.



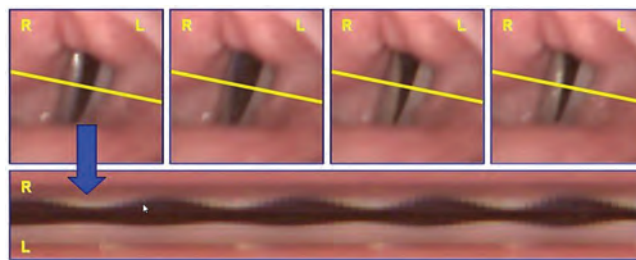
Obr. 409: Hlasivky

Specifický typ hlasového projevu – fonace – představuje např. šepot. Hlasivky nekmitají, a proto se nejedná o pravou fonaci. Vzadu jsou na úrovni hlasivkových chrupavek oddáleny, zatímco v přední blanité části sblíženy. Poté vzniká turbulence vzduchu, která je slyšitelná. Jiným zvláštním typem fonace je tzv. třepená (chruplavá) fonace. Vzniká nepravidelnými kmity hlasivek. Způsobuje ji větší napětí hrtanového svalstva, než je obvyklé.

Důležitým prvkem fonace je nasazení zvuku. Lze rozeznávat měkké nasazení, při němž hlas vzniká plynule, protože vzduchový proud se tak setkává s minimálním odporem. Podmínkou je ovšem správné zvládnutí dýchání. Při tvrdém nasazení vzniká fonace velice prudkým rozevřením právě semknutých hlasivek. Takové nasazení může mít pro hlasivky škodlivý účinek a je i neestetické. Posledním typem je nasazení dyšné. Hlasivkové vazy zůstanou rozevřeny, takže jimi nemůže při fonaci procházet tón. Tento typ nasazení dyšného se jinak nazývá „divoký dech“. Tón, který při tomto nasazení slyšíme, není rovný, čistý s výraznou šelestivou složkou, způsobenou proudícím dechem spolu s vlastním tónem.

Zvukový charakter hlasu záleží především na fyziologii hlasového aparátu. Fyziologie je u muže a u ženy odlišná. Důležitým parametrem je délka hlasivek, která je u žen v průměru (14 až 20) mm (soprán), u mužů (24 až 25,5) mm (bas). Čím jsou hlasivky kratší, tím rychleji kmitají (jejich rezonanční kmitočet je vyšší) a základní tón (výška) hlasu je vyšší. Rozsah hlasu, tedy celková schopnost výškové modulace, se u žen pohybuje od g (196 Hz) do d1 (294 Hz), u mužů od G (98 Hz) do d (147 Hz). U zpěváků je rozsah

samozejmě daleko větší. Rozsah hlasu se dá cvičit, lze jej rozšířit jak do spodních, tak do horních tónů. Dalším parametrem je intenzita kmitání hlasivek.



Obr. 410: Kmitání hlasivek

Rozdílná je u hlubokého (už od 50 Hz) a vysokého (až 480 Hz) hlasu. Při zpěvu je počet kmitů ještě mnohem větší.

Barva hlasu není většinou tvořena hlasivkovým aparátem, ale rezonančními vlastnostmi nadhrtanových partií, kde se tvoří vyšší harmonické a vytváří charakteristické hlasové zabarvení. I proto se při rýmě (zduřelé sliznice) barva hlasu změní. Pouze během mutace u dospívajících dochází ke změnám postavení hlasivkových chrupavek. Důležitým parametrem je ale i měnící se tlak vydechovaného vzduchu a posilování svalů hrtanu. Během mutace může hlas klesnout u chlapců o 8 půltónů a u děvčat o 5 půltónů.

V roce 2016 byly na FS ČVUT v Praze vyvinuty umělé hlasivky jako hlasivková náhrada.



Obr. 411: Umělé hlasivky

### 4.3 Subjektivní vjem zvuku

S pojmem subjektivní vnímání zvuku souvisí jak fyziologické parametry člověka, tak jeho psychika. Vnímání je neurobiologický a psychologický jev. Sluchové vzruchy jsou vedeny ze sluchových buněk pomocí nervových vláken do mozku, kde dochází k nové syntéze jednotlivých zvukových vjemů a jeho transformaci do jednoho signálu. Při některých poruchách CNS lze rozeznávat zvuky, ale nelze je spojit do jednoho celistvého vjemu. V takovém případě člověk slyší, ale nerozumí. Taková příčina bývá u dětí trpících poruchami percepce. Jedná se o dysfunkci, kdy děti neslyší, případně nerozeznají např. *di – dy*. Jiná dysfunkce se projevuje tak, že „člověk slyší, ale nevnímá“. Souvislostmi mezi objektivními podněty a subjektivními vjemy se zabývá psychometrie, kde platí několik základních vztahů.

Weberův vztah vyjadřuje závislost intenzity vjemu na intenzitě podnětu a říká, že relativní práh vnímání je konstantní

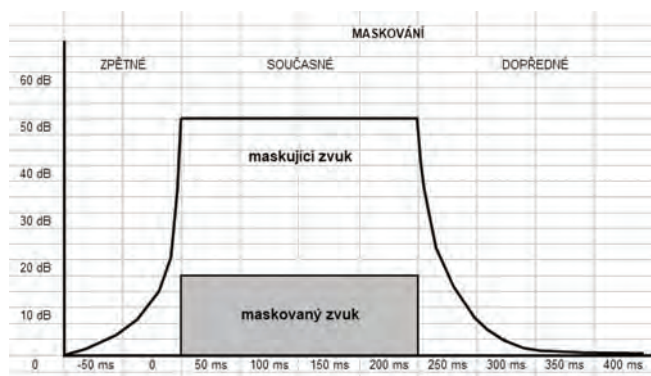


$$\frac{S_V}{S_R} = k, \tag{66}$$

kde  $S_V$  je velikost výchozího podnětu,  
 $S_R$  je velikost ještě rozeznatelného podnětu,  
 $k$  je konstanta.

Weberův vztah se dočkal postupných úprav ve formě Weberova zákona, Stevensova zákona, Beidlerova vztahu až k definici „organismus reaguje na časovou derivaci vnímaných počítků“. V praxi je možné si tuto platnost uvědomit na dvou extrémních příkladech. Na jedné straně člověk zareaguje na relativně slabý signál ve formě rázu, pulsu, např. vzdálený výstřel, pád tužky na podlahu, vzdálené zakašláni, na straně druhé člověku trvá poměrně dlouho zaregistrovat pomalu se zvyšující intenzitu nějakého kontinuálního signálu, např. postupně se zvyšující otáčky ventilátoru chladiče při práci s notebookem nebo občas používaný úvod živých vystoupení některých např. art rockových kapel, kdy je delší dobu (např. 30 minut) před začátkem vystoupení reprodukován hudební akord v minimální intenzitě a postupně je tento signál zesilován. Posлуhač pak hudbu zaregistruje (uvědomí si ji) až po delší době, kdy už je jeho intenzita poměrně vysoká (např. Roger Waters – Praha 2018).

Při rozpoznání určitého sluchového vjemu hraje důležitou roli to, zda je nebo není tento signál maskován jiným, rušivým signálem. Takovým rušivým signálem může být hlasitý hovor u vedlejšího stolu, šum řeky, parazitní brum nekvalitní nahrávky, zkreslení signálu a další. Takové rušivé maskování je tím rušivější, čím se jeho kmitočtové spektrum blíží spektru užitečného signálu, případně když se rušivý signál nachází ve stejném směru jako signál užitečný. Pro maskování slabého užitečného signálu může hrát významnou roli i případná expozice silným signálem, předcházející vjemu slabého signálu. Sluchové ústrojí je ještě ovlivněno tympanickým reflexem, a tak je pro určitou chvíli potlačen i vjem signálů slabších. Jedná se o tzv. zpětné maskování. Analogicky existuje také dopředné maskování, kdy maskující zvuk následuje po užitečném signálu.

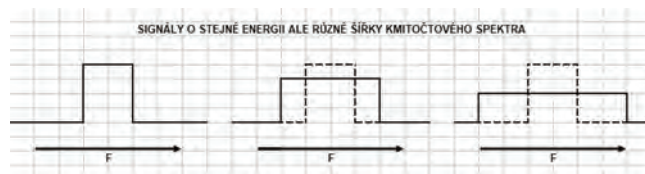


Graf. 412: Maskování zvuku

Při posuzování vjemu signálu je důležitá také délka expozice, tedy časový interval, po který je možné užitečný

signál vnímat. V závislosti na zkrácení doby expozice se ztrácí schopnost vjemu hlasitosti i vjemu výšky tónu. Subjektivní vjem závisí také na tvaru hlasitostní obálky.

Jinou deformaci subjektivního vjemu může způsobit kmitočtový rozsah užitečného signálu. Porovnáme-li signály o stejné energii, ale lišící se šířkou kmitočtového pásma, pak se od určité kritické šířky pásma jeví vjemy signálu jako hlasitější.



Obr. 413: Příklad deformace subjektivních vjemů

Citlivost lidského vjemu je označována jako JND (just noticeable difference), tedy „právě postřehnutelný rozdíl“. Pro hladinu akustického tlaku je to hodnota (1 až 2) dB a právě z této skutečnosti byla vybrána jednotka dB. Hodnota JND pro rozlišení kmitočtu jsou jednotky Hz.

Směrová citlivost lidského sluchového vjemu závisí také na některých časových parametrech. Pokud např. slyšíme dva signály ze dvou zdrojů, které začnou vysílat postupně v intervalu kratším než 30 ms, musí být druhý zdroj o (7 až 10) dB hlasitější, aby došlo ke správnému zaměření. Jedná se o tzv. Haasův jev.

Pokud shrneme všechny časové prahy slyšení, pak platí:

- Registrace změny – 2 ms
- Registrace maskování – 10 ms
- Uvědomění si signálu – 50 ms
- Vjem hlasitosti – 100 ms
- Vjem výšky tónu – (25 až 250) ms v závislosti na kmitočtu a platí:  $\Delta f \cdot \Delta t = konst.$  závisí na intenzitě a její obálce.

Tento vztah je označován jako princip akustické neurčitosti.

Pro vyjádření subjektivně vnímané hlasitosti se používá psychoakustická jednotka H (son). Jednotka je (na rozdíl od dB) lineární a je definována jako subjektivní hlasitost tónu o kmitočtu 1 kHz při hladině intenzity 40 dB. Pro jiné kmitočty je nutné hodnotu přepočítat v závislosti na kmitočtové závislosti citlivosti lidského sluchu. Nad hladinou hlasitosti 40 Ph odpovídá zdvojnásobení hlasitosti v sonech vzestup hladiny hlasitosti přibližně o 10 Ph. Pod isofonou 40 Ph je toto zvýšení o 5 Ph. Vztah jednotek fon a son vystihuje tabulka.

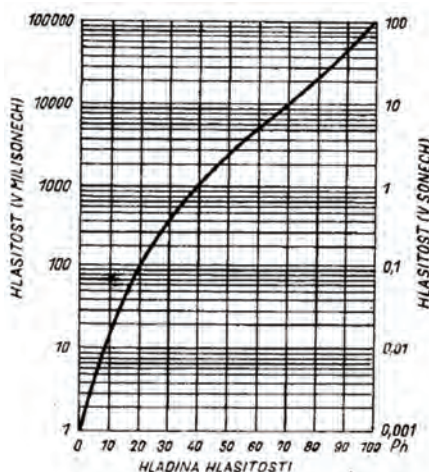
Tab. 414: Vztah jednotek son a fon

son	1	2	4	8	16	32	64
fon	40	50	60	70	80	90	100

Příklady některých zdrojů zvuku a závislost hodnot akustického tlaku, hladiny akustického tlaku a hlasitosti ukazují následující tabulka a graf.

Tab. 415: Příklady hlasitosti

Situace a zdroj zvuku	Akustický tlak $p$ pascal	Zvuková hladina $L_p$ dB re $\mu\text{Pa}$	Hlasitost son
Hranice bolesti	100 Pa	134 dB	~ 676 son
Poškození sluchu při krátkodobém působení	20 Pa	od 120 dB	~ 250 son
Proudové letadlo (vzdálené 100 m)	(6,3 – 200) Pa	(110 – 140) dB	~ (125 – 1024) son
Sbírka (1 m) / diskotéka	2 Pa	– 100 dB	~ 60 son
Poškození sluchu při dlouhodobém působení	0,63 Pa	od 90 dB	~ 32 son
Silnice se silným provozem (10 m)	(0,2 – 0,63) Pa	(80 – 90) dB	~ (18 – 32) son
Osobní auto (10 m)	(0,02 – 0,2) Pa	(60 – 80) dB	~ (4 – 32) son
Televizor (1 m) – pokojová hlasitost	0,02 Pa	cca 60 dB	~ 4 son
Nevzrušený hovor (1 m)	( $2 \times 10^{-3}$ – $6,3 \times 10^{-3}$ ) Pa	(40 – 50) dB	~ (1 – 2) son
Velmi tichá místnost	( $2 \times 10^{-4}$ – $6,3 \times 10^{-4}$ ) Pa	(20 – 30) dB	~ (0,15 – 0,4) son
Šum listí ve větru, klidný dech	( $6,3 \times 10^{-5}$ ) Pa	10 dB	~ 0,02 son
Hranice slyšitelnosti při 2 kHz	( $2 \times 10^{-5}$ ) Pa	0 dB	~ 0 son



Graf. 416: Vztah hlasitosti a hladiny hlasitosti

Vztah hlasitosti a hladiny hlasitosti vyjadřuje vztah:

$$H = 2^{(S-40)/10} \quad (67)$$

kde  $S$  je hladina hlasitosti,  
 $H$  je hlasitost.

Lidský sluch je i přes velký dynamický rozsah, který je schopný absorbovat, zranitelný. K poškození sluchu většinou dochází, pokud hladina akustického tlaku překročí 140 dB.

Sluch je ale také možné poškodit, pokud se člověk delší dobu pohybuje v prostředí s hlasitostí 85 dB. K částečné (nedoslýchavost) nebo celkové (hluchota) ztrátě sluchu může dojít buď trvale nebo pouze na nějaký čas. Poškození sluchu může být i vrozené, případně získané jako následek nemoci nebo úrazu. Lékařský obor zabývající se zdravím hlasivek a hlasu se nazývá foniatrie.

Kvalita sluchu je velmi individuální. Jako relativní sluch se nazývá schopnost rozeznat vzájemné vztahy tónů, tónové intervaly. Lidé se schopností určit absolutní výšku tónu mají tzv. absolutní sluch.

#### 4.4 Fauna

Na rozdíl od lidí mají některá zvířata v některých parametrech lepší sluch. Pes dokáže vnímat zvuky až do 46 kHz, kočka od 15 Hz do 50 kHz a netopýr od 100 Hz do 120 kHz. Takový kmitočet umožňuje netopýrům (ale i jiným zvířatům – ptáci, hmyz, velryby) schopnost echolokace, tedy orientace v prostoru vysíláním a následným přijímáním odražených zvuků. Je to dáno tím, že čím vyšší kmitočet, tím přesněji je možné určit směr zdroje.

Mnohá jiná zvířata ale mají také velmi dobrý sluch. Např. potkan nebo ježek. Některé ryby vnímají prostřednictvím tzv. postranní čáry naopak nižší kmitočty. Kaprovité ryby ke sluchu využívají plynový měchýř coby rezonátor. Některé mořské ryby spolu komunikují signály o kmitočtu 800 Hz až 1300 Hz. Dokonce i akvarijní rybky mohou reagovat na zvuk píšťalky. Některé žáby využívají ke komunikaci rozsah 200 Hz až 1500 Hz, gekoni a želvy využívají kmitočty okolo 100 Hz. Dobrý sluch mají také krokodýli, jejichž rozsah je až do 3 kHz. Naopak sloni se dorozumívají převážně infrazvuky o kmitočtech mezi 14 Hz až 24 Hz.

Tab. 417: Kmitočtový rozsah sluchu některých zvířat (Hz)

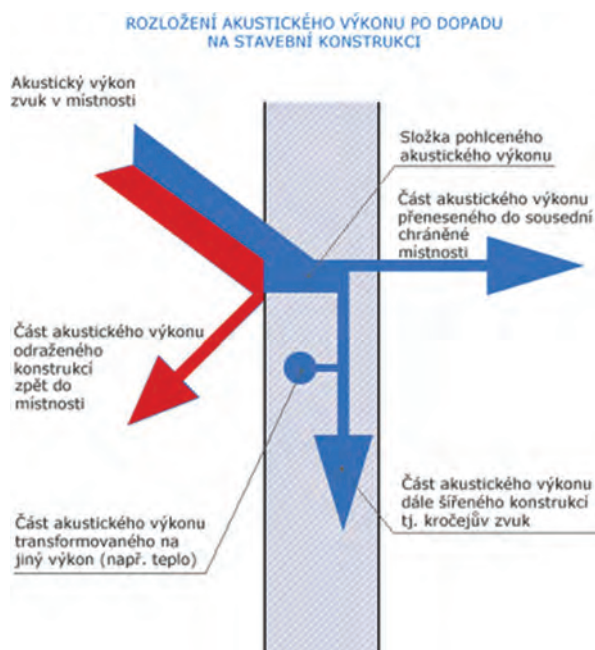
Rozsah slyšení (v Hz)	Od	Do
Hadi	hluší, vnímají jen otřesy	
Ještěři, želvy	okolo 110	
Mořské ryby	800	1 250
Žáby	200	1 500
Krokodýli		3000
Lidé	16	20 000
Ptáci	16	20 000
Primáti		30 000
Koně	30	40 000
Psi	40	50 000
Rejskové, ježci		60 000
Potkani		70 000
Kočky		70 000
Nepopýři		100 000

## 5. STAVEBNÍ AKUSTIKA

Stavební akustika je obor, zabývající se akustikou budov, jejich zvukovou izolací, ale i požadovaným šířením zvuku. Při řešení akustiky staveb se setkáme s řadou názvů parametrů a dalších termínů.

### 5.1 Obecné pojmy

**Vzduchová neprůzvučnost** je schopnost stavební konstrukce omezovat šíření hluku vzduchovou cestou. Při šíření zvuku vzduchem v uzavřeném protoru dochází ke generování vln. Jejich měřením ve vysílací a přijímací části budovy se zjišťuje schopnost stavební konstrukce omezovat přenos hluku vzduchovou cestou. Měření se provádí tak, že je do vysílací místnosti nainstalován umělý zdroj hluku, generující širokopásmový hluk. Ten dopadá na měřenou konstrukci a prostupuje přes ni do přijímací místnosti. Rozdílem zjištěných hodnot a korekcí na pohltivost v místě příjmu získáme váženou stavební neprůzvučnost  $R_w$  (dB), případně váženou neprůzvučnost  $R_w$ . Takové měření vyžaduje přístup z obou stran konstrukce.



Obr. 501: Rozložení akustického výkonu po dopadu na stavební konstrukci

Obr. 501 ukazuje rozložení akustického výkonu na jednotlivé složky; část odraženou od akustické překážky, část přenesenou za akustickou překážku a část, kterou akustická překážka pohltí.

Činitel průzvučnosti  $\tau$  [1] dané konstrukce

$$\tau = \frac{W_t}{W_i}, \quad (68)$$

kde  $W_t$  je akustický výkon v místnosti zdroje ( $W$ ),  
 $W_i$  je akustický výkon v místnosti přijímače ( $W$ ).

Následující tabulka udává vzduchovou neprůzvučnost několika vybraných materiálů.

Tab. 502: Příklady vzduchové neprůzvučnosti některých materiálů

Název	Kg/m <sup>3</sup>	Tloušťka	dB	Poznámka
Tvárnice z porobetonu	500	250	38	
Lehké příčně děrované cihly	800	250	45 – 53	dle typu
Plná cihla	1200	240	50	
Duté tvárnice z betonu	1800	240	56	
Litý beton	2400	250	61	
SDK příčka W112, diamant	550	150	63	

**Kročejová neprůzvučnost** je schopnost stavební konstrukce zamezit šíření hluku chvěním a vibracemi. Kročejový zvuk vzniká v konstrukci stavebního objektu nejčastěji působením mechanických impulzů způsobených chůzí, pádem nebo posuvem předmětu na nebo po podlaze. K posouzení ochrany proti kročejovému zvuku se využívá veličina hladina kročejového zvuku, pro kterou platí vztah

$$L_n = L_2 + 10 \log \frac{A}{A_0}, \quad (69)$$

kde  $L_n$  je hladina kročejového zvuku (dB).



Obr. 503: Generátor kročejových rázů

Měření kročejové neprůzvučnosti se provádí generováním rázů ve vysílací části stavby. K tomu se používají kročejové generátory – viz obr. 503.

Do vysílací místnosti se umístí kročejový generátor. Ten svými vibračními pohyby šíří vibrace do sledované konstrukce v místnosti. Z naměřených hodnot v přijímací místnosti získáme váženou normalizovanou hladinu kročejového zvuku  $L'_{nw}$  (dB).

**Doba dozvuku** stavebních prostor závisí na jejich členitosti a pohltivosti stěn a vnitřních předmětů. Měřením doby



dozvuku se zjišťuje kvalita daného prostoru po stránce šíření a absorpce zvuku. Cílem měření je ověřit, do jaké míry členitost ploch a předmětů v prostoru a jejich schopnost pohlcovat zvuk jsou v souladu s požadavky na dobrou distribuci slova a/nebo hudby. Měření se provádí zvukoměrem umístěným ve vybraných bodech prostoru. Zdrojem hluku je nahodilá hluková událost s vysokou intenzitou, např. výstřel.

Kritéria, určující akustickou kvalitu lze rozdělit do čtyř částí:

- časová,
- prostorová (míra prostorovosti, celkový vjem prostoru),
- dynamická (hlasitost, vyváženost jednotlivých zdrojů zvuku),
- spektrální.

Časové parametry určuje především míra přímého a odraženého zvuku. Pro hudebně akustické prostory platí, že pokud míra přímého zvuku činí přibližně 10 % až 15 % z celkové akustické energie, je i tak možné prostorově lokalizovat zdroj signálu. Pokud však dojde ke generování ozvěny, tedy dojde ke zpoždění většímu než asi 400 ms, pak dojde nejen k problému s lokalizací zdroje zvuku, ale může dojít i k jiným rušivým efektům. Jindy je ale naopak takový efekt žádoucí, např. zvuk varhan ve velké katedrále.



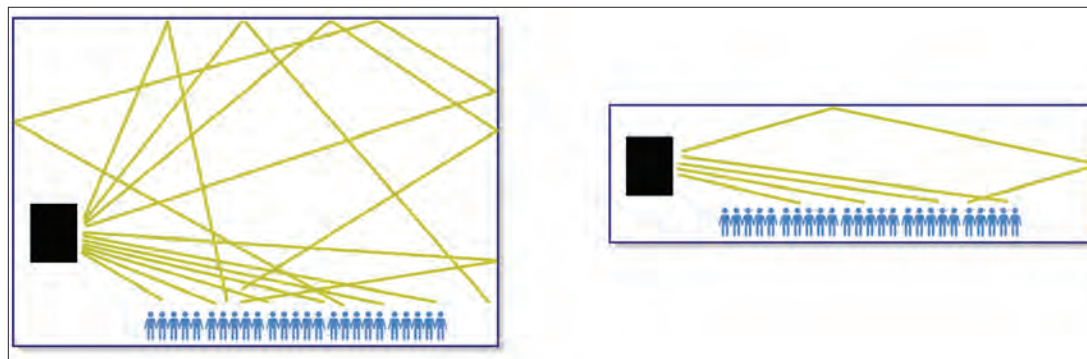
QR 504: Varhany bez ozvěny a dozvuku



QR 505: Varhany s dozvkem i ozvěnou

Z nákresu je zřejmý rozdíl mezi šířením signálu v širokém (vysokém) a úzkém (nízkém) prostoru (obr. 506). Zatímco široký prostor generuje velkou škálu odražených signálů s různou dobou odrazu, u úzkého (resp. nízkého) prostoru převažují odrazy s dlouhou dobou odrazu, danou délkou tohoto prostoru.

Odrazy, zpožděné od přímého signálu o méně než cca 50 ms, nejsou vnímány odděleně, ale posilují dojem celkové hlasitosti. Toto zpoždění, intenzita takto odražených signálů a směr, odkud přicházejí, tvoří akustiku prostoru,



Obr. 506: Závislost odrazů na proporcích prostoru

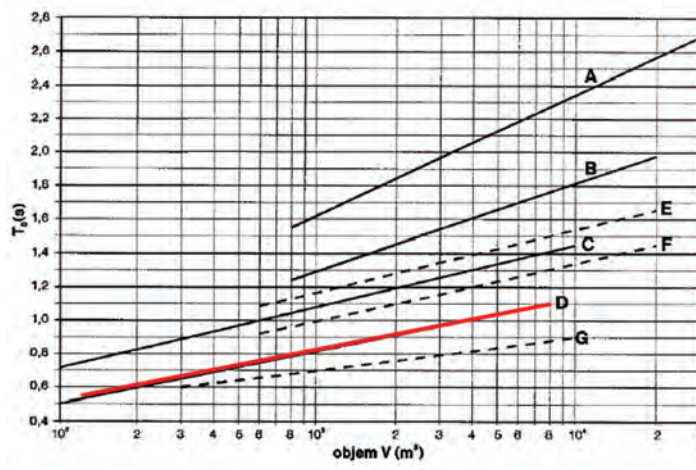
často v minulosti řešenou architekty a staviteli na základě citu, intuice a praktických zkušeností.

Dalším důležitým časovým parametrem je srozumitelnost. S rostoucí dobou dozvuku, velikostí (objemu) prostoru a nižším odstupem signálu od akustické hladiny zvukového pozadí srozumitelnost klesá. Ztráta srozumitelnosti je výraznější u souhlásek.

Mezi časové parametry patří i jasnost časová (udává rozlišitelnost mezi jednotlivými slovy, tóny – rychlá řeč nebo rychlý sled tónů jsou méně srozumitelné než řeč nebo sled tónů pomalejší) a jasnost rejstříková (současná řeč více osob nebo hra více nástrojů podobného spektrálního složení jsou méně srozumitelné než řeč, resp. tóny jedné osoby, resp. hudebního nástroje).

Nejdůležitějším parametrem sakrálních prostor z hlediska srozumitelnosti je počáteční doba dozvuku. Znamená dobu, po kterou klesne úroveň zvuku po vypnutí testovacího zdroje zvuku o 10 dB. Standardní doba dozvuku se určuje jako čas mezi úrovní -5 dB a -35 dB. Shoda těchto dvou hodnot se řadí mezi objektivní kritéria akustické kvality hudebních prostor.

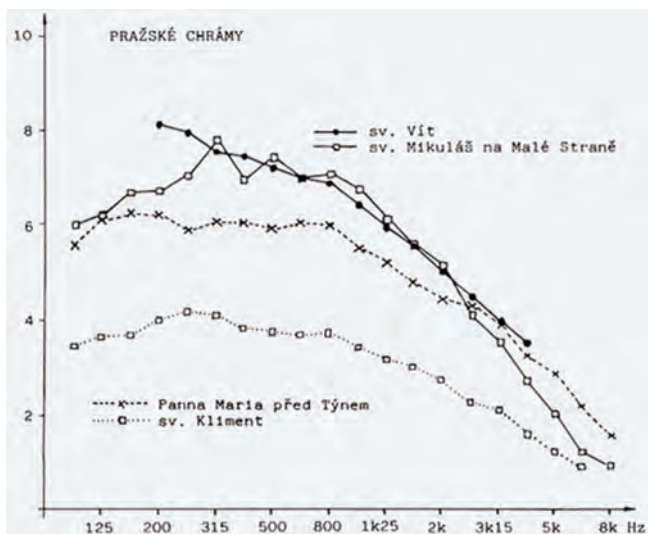
Optimální doba dozvuku v závislosti na užití a objemu prostoru:



- A – varhanní hudba
- B – orchestrální hudba
- C – komorní hudba
- D – řeč, činohra
- E – opera
- F – víceúčelový sál, zkušebna
- G – kino – jednonábový zvuk

Obr. 507: Optimální doba dozvuku v závislosti na užití a objemu prostoru

Spektrální parametry prostoru určuje, mimo zvukové barvy vlastního zdroje zvuku, především frekvenční průběh dozvuku. Ten je určen geometrií členění prostoru a materiálovým vybavením prostoru z hlediska činitele pohltivosti a jeho



Obr. 508: Kmitočtová závislost dozvuku některých pražských kostelů

kmitočtové závislosti. Materiály, které tlumí především vyšší kmitočty, jsou textilie, květiny, koberce a jiné měkké předměty, střední kmitočty tlumí materiál a prostory nábytku, obrazy a posluchači, a nejnižší kmitočty tlumí architektonické členění stavby, kaple a jiné objemnější dutiny stavby, velké obrazy a velká okna. Zajímavé srovnání kmitočtové závislosti doby dozvuku některých pražských kostelů ukazuje obr. 508.

Jako zajímavý a poměrně evidentní projev vlivu členitosti na kmitočtovou charakteristiku se tu jeví kmitočtová charakteristika chrámu sv. Mikuláše na Malé Straně s jeho výraznou, nejen sochařskou barokní vnitřní výzdobou a členěním prostoru s kopulí.

## 5.2 Prostory se speciální akustikou

### 5.2.1 Akustika sakrálních prostorů

Chrámů a další církevní stavby vždy představovaly vrchol architektury daného období a slohu. Shromáždění věřících a tedy společné prostory pro shromažďování totiž znamenaly a znamenají základ každé církve. Řecké „σε ενα μέρος“, vyskytující se v Novém zákoně totiž znamená „na jednom místě“. Důležité pro tyto prostory je navození atmosféry interiérového klidu a pohody. I proto byl u těchto staveb kladen takový důraz na důležité atributy, které člověk při návštěvě takových prostorů vnímá. Vedle tepelné pohody a optimálního prosvětlení prostoru je důležitým parametrem akustika prostoru.

Při řešení architektury sakrálních staveb se řeší nejenom vlastní akustika uvnitř stavby, ale také akustika vnějšího prostoru. Tedy vzájemná akustická provázanost s okolím stavby a to obzvláště u staveb v obcích, ve městech nebo na sídlišcích, s ohledem na hlukové zatížení okolí (doprava, dopravní uzly, sportoviště atd.), ale také opačně, projevy církevních obřadů (zvonů, hudba...). Tato hlediska byla vždy uplatňována při situování a dispozičním a konstrukčním řešení těchto objektů.

Geometrie církevních staveb je základním parametrem ovlivňujícím jejich akustické vlastnosti, a to jak pro mluvené slovo, tak i pro hudební projevy. Slavný římský architekt



Obr. 509: Marcus Pollio Vitruvius, Řím

a teoretik Marcus Pollio Vitruvius (obr. 509), žijící v 1. století př. Kristem, ve své desetidílné knize o architektuře „De architectura libri X.“, věnované římskému císaři Juliu Caesarovi, píše: „... jest přihlédnouti s velkou bedlivostí k tomu, aby byl objekt, ve kterém se hlas bude klidně šířit, řešen tak, aby se nevracel odrazem a nepřinášel uším pouze neurčité náznaky. Je totiž mnoho míst, která svým přirozeným položením pohyb zvuku ruší, jako místa desonanční, která se řecky jmenují katechúntes, místa cirkumsonanční (se zvukem rozptylujícím se vřkol), jež se u nich nazývají periechúntes, dále resonanční (ozvučná), zvaná antiechúntes a konsonanční (souzvučná), kterým říkají synechúntes. Věnuje-li se tedy stavbě bedlivá pozornost, dosáhne se touto rozmyslností, že hlas bude zníti v chrámech a divadlech kvalitně ve prospěch věci. Nákresey plánů se od sebe liší tím, že shromažďovací prostory obvyklé u Řeků se řeší na podkladě čtverců, latinské na podkladě stejnostranných trojúhelníků.“



Obr. 510: Leonardo da Vinci – „Vitruviiovský člověk“



Kdo tedy bude ochoten použít těchto předpisů, dosáhne bezvadného provedení divadelních staveb.

**Desonanční místa** jsou ta, v nichž první zvuk po svém vystoupení do výše je pevnými, výš položenými tělesy rušen a srážen nazpět: zůstává proto ležeti dole a ztěžuje vzlet zvuku následujícího za ním.

**Cirkumsonanční místa** jsou ta, kde zvuk, nucený bloudit kolem dokola, zaniká uprostřed, zní bez koncovek a ztrácí se tam v neurčitých náznacích slov.

**Resonanční** jsou ta, na nichž se zvuk vrací zpět, naraziv při dopadu na nějaký pevný předmět, budí ozvěnu a poslední slabiky na poslech zdvojuje.

**Konsonanční** jsou místa, na nichž se hlasu odspodu napomáhá, ten při stoupání do výše sílí a dospívá k uším s jasnou zřetelností.

U těchto staveb bylo vždy zapotřebí sloučit umělecké a technické možnosti k dosažení požadovaných akustických parametrů, které byly realizovány ještě dávno předtím, než byla akustika definována jako vědní obor, tedy především před obdobím funkcionalismu.

Pasáže z této knihy byly také inspirací pro Leonarda da Vinci a jeho známou skicu „Vitruviovský člověk“ – proporční schéma z roku 1485–1490 (obr. 510).

### 5.2.2 Akustika hudebních studií

Jiným specifickým typem hudebních prostor jsou hudební studia, určena pro nahrávání hudby, zpěvu nebo mluveného slova. Liší se velikostí a mohou se lišit i žánrovým zaměřením. Specifickým typem takových hudebních studií jsou domácí studia a související akustické úpravy, které mají za cíl řešit jednak zvukovou akustiku nahrávacího prostoru, akustiku poslechové místnosti a v neposlední řadě akustické oddělení od okolního světa. Pro akustické přizpůsobení místností – tedy eliminaci odrazu zvukových vln v co možná nejširším kmitočtovém spektru – tak i pro akustickou izolaci vůči okolním prostorům, se nabízí řada absorpčních materiálů, keramických akustických obložení, basových pastí, tlumících materiálů a speciálních akustických sádrokartonů nebo sádrovláknitých desek. S tím souvisí i míra stavebních zásahů do prostor spojená s mírou investice do takové úpravy (nežádoucí paralelní stěny z důvodu vzniku stojatého vlnění na nízkých kmitočtech, bezodrazné materiály stěn, geometrie režijního okna, vhodný poměr rozměrů prostoru atd.).

### 5.2.3 Akustika koncertních prostorů

#### Akustika architektury

Přestože architektonická akustika je nedílnou součástí navrhování staveb po dobu nejméně 2000 let, byl tento obor pevně zakotven ve vědeckém světě až na začátku 20. století americkým fyzikem Wallacem Clementem Sabine. Sabine poukázal na to, že nejdůležitějším parametrem při určování akustické vhodnosti místnosti nebo jiného architektonického prostoru je její doba dozvuku. Sabine poskytl vědecký základ, na němž lze dobu dozvuku určit nebo předpovědět.

Když zdroj zvuku vytvoří zvukovou vlnu v místnosti nebo hledišti, pozorovatelé uslyší nejen zvukovou vlnu šířící se přímo ze zdroje, ale také nesčetné odrazy od stěn, podlahy a stropu. Ty vytvářejí odraženou vlnu nebo ozvěnu. Jakmile zdroj přestane zvuk vydávat, ozvěna může ještě po nějakou dobu narůstat a pak doznívat. Čas mezi zastavením zdroje zvuku a poklesem absolutní intenzity dozvuku na úroveň  $10^{-6}$ , což odpovídá poklesu úrovně o 60 dB, je definován jako doba dozvuku (RT, někdy označována jako „doba dozvuku“ –  $RT_{60}$ ). Sabine popsal, že např. doba dozvuku hlediště souvisí s objemem hlediště a schopností stěn, stropu, podlahy a obsahu místnosti absorbovat zvuk. Na základě těchto předpokladů stanovil empirický vztah, prostřednictvím kterého je možné stanovit dobu dozvuku

$$RT = \frac{0,16V}{A} \quad (70)$$

kde  $RT$  je doba ozvěny (reverberation time) (s),  
 $V$  je objem místnosti ( $m^3$ ),  
 $A$  je celková absorpční plocha místnosti ( $m^2$ ).

Jednotka sabin je definována jako pohltivost 1 metru čtverečního (1 stopy čtvereční) materiálu stoprocentně pohltujícího zvuk.

Návrhy a analýzy akustiky místnosti začínají touto rovnicí. Pomocí rovnice a činitelů zvukové pohltivosti materiálů, z nichž mají být stěny konstruovány, lze získat aproximaci způsobu, jakým bude místnost akusticky fungovat. Absorbéry a reflektory nebo jejich kombinace mohou být použity k úpravě doby dozvuku a její frekvenční závislosti, čímž se dosáhne nejjednodušších charakteristik pro konkrétní použití. Příklady koeficientů absorpce, zobrazující zlomek vlny jako funkci frekvence, který je absorbován, když zvuk zasáhne různé materiály, jsou uvedeny v tabulce. Celková absorpce je součtem všech dílčích příspěvků jednotlivých materiálů.

Tab. 511: Příklady absorpčních koeficientů některých materiálů

Absorpční koeficienty materiálů						
Materiál	Kmitočet (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
Beton	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03
Sádrokarton	0,20	0,15	0,10	0,08	0,04	0,02
Akustická deska	0,25	0,45	0,80	0,90	0,90	0,90
Závěsy	0,05	0,12	0,25	0,35	0,40	0,45

Přesto, že neexistuje přesná hodnota doby dozvuku, kterou lze nazvat ideální, existuje řada hodnot považovaných za vhodné pro každou aplikaci. Ty se liší v závislosti na velikosti a způsobu užití místnosti. Prostory určené pro mluvené slovo by měly mít přiměřeně krátkou dobu dozvuku. Naopak pro hudební produkce mohutných orchestrů



(Wagnerovy opery, Mahlerovy symfonie apod.) je vyžadována dlouhá doba dozvuku. Pro barokní hudbu s rychlými, melodickými běhy děl Bacha nebo Mozarta jsou vhodné koncertní prostory se střední hodnotou doby dozvuku. Pro přehrávání nahrávek v audio systému by doba dozvuku měla být naopak krátká, aby nedošlo k záměně dozvuku nahrávky s dozvukem poslechové místnosti.

### Akustická kritéria

Mnoho akustických vlastností místností a koncertních síní lze přímo připsat konkrétním fyzikálně měřitelným vlastnostem. Často se stává, že se takové parametry, vlastnosti poslechových prostor akusticky přizpůsobují požadavkům lidí z řad nikoliv techniků, ale umělců, jejichž terminologie odpovídá jejich zaměření. Příklad takových popisných termínů je zde:

„**Živost**“ se vztahuje přímo na dobu dozvuku. Živý prostor má dlouhou dobu dozvuku a mrtvý prostor krátkou dobu dozvuku.

„**Intimita**“ se týká pocitu, že posluchači mají fyzickou blízkost k vystupující skupině. Prostor je obecně posuzován jako intimní, pokud první ozvučený zvuk dosáhne posluchače do asi 20 milisekund od přímého zvuku. Tato podmínka je snadno splnitelná v malé místnosti, ale může být dosažena i ve velkých sálech pomocí akustického materiálu, který částečně obklopuje účinkující. Dalším příkladem je textilní materiál umístěný nad reproduktorem ve velké místnosti, jako je např. katedrála, což vede k silné i rychlé první vlně dozvuku, a tedy k pocitu intimity s mluvící osobou.

Amplituda ozvučeného zvuku vzhledem k přímému zvuku se označuje jako „**plnost**“. „**Jasnost**“, opaku plnosti, je dosaženo snížením hodnoty dozvuku. Plnost obecně znamená dlouhou dobu dozvuku, zatímco jasnost znamená kratší dobu dozvuku. U romantické hudby nebo představení větších hudebních těles je obecně vyžadován plnější zvuk, zatímco při rychlých pasážích komorních orchestrů nebo sólistů a nebo při ústním projevu je žádoucí větší jasnost.

„**Teplota**“ a „**brilantnost**“ se vztahují k době dozvuku při nízkých frekvencích ve srovnání s dobou dozvuku u vyšší kmitočtu. Přibližně nad 500 Hz by doba dozvuku měla být stejná pro všechny frekvence. Ale při nízkých kmitočtech zvyšuje doba dozvuku teplý zvuk, zatímco pokud by se doba dozvuku při nízkých kmitočtech zvyšovala méně, byla by místnost charakterizována jako brilantnější.

„**Textura**“ označuje časový interval mezi příchodem přímého zvuku a příchodem několika prvních dozvuků. Pro získání dobré textury je nutné, aby prvních pět odrazů dorazilo k pozorovateli se zpožděním max. 60 ms od přímého zvuku. Intenzita odrazů by se měla monotónně snižovat; neměly by se vyskytovat žádné neobvykle velké pozdní odrazy.

„**Blend**“ označuje míchání zvuků od všech interpretů a jejich rovnoměrné rozesílání posluchačům. K dosažení

správného poměru je často nutné umístit na scénu několik reflektorů – odrazných ploch, které náhodně distribuují zvuk do všech bodů v publiku.

Výše uvedené rysy akustiky hlediště se vztahují k posluchačům. Aby mohli členové souboru, tedy účinkující, vystupovat soudržně, musí být schopni slyšet se dobře navzájem. Pokud je ale scéna příliš široká, má příliš vysoký strop nebo má příliš velkou absorpci zvuku po stranách, stává se, že vzájemná srozumitelnost je velmi špatná.

Určité akustické problémy často vyplývají z nesprávného návrhu nebo konstrukčních omezení prostoru. Je třeba se vyvarovat zaostření zvukové vlny. Hladké, zakřivené odrazné plochy, jako jsou kupole a zakřivené stěny, fungují jako zaostřovací prvky, vytvářejí velké ozvěny a vedou ke špatné struktuře zvuku. Špatným výsledkem je, pokud je zvuk z jedné části souboru zaměřen na jednu část publika. Kromě toho paralelní stěny v hledišti odrážejí zvuk tam a zpět a vytvářejí rychlé, opakující se pulsování zvuku známé jako flutterová ozvěna a dokonce vedou k destruktivnímu rušení zvukové vlny. Případným rezonancím při určitých frekvencích je také možné se vyhnout použitím šikmých stěn.

Akustické stíny, oblasti, ve kterých jsou některé kmitočtové oblasti zvuku utlumeny, mohou být způsobeny difrakčními efekty, kdy zvuková vlna prochází kolem velkých sloupů a rohů nebo pod nízkým balkónem. Velké reflektory zavěšené nad účinkujícími mohou mít takovou velikost, aby odrážely určité kmitočtové oblasti, zatímco ostatním umožňují průchod, čímž mohou být použity pro kmitočtovou korekci.

Vnější hluk může být vážným problémem hal v městských oblastech nebo v blízkosti letišť nebo dálnic. Častou technikou, která se používá k zamezení vnějšího hluku, je sestavení hlediště jako menší místnosti ve větší místnosti. Hluk např. vzduchotechniky nebo jiných mechanických vibrací lze snížit použitím technik zahrnujících odtlumení a izolování kompresorů vzduchu.

Dobrý akustický design musí zohledňovat všechny tyto možné problémy a současně zdůrazňovat požadované akustické vlastnosti. Jeden z problémů ve velkém hledišti bývá způsoben tím, že se do zadní části haly nedodá dostatečné množství zvuku. Intenzita sférické zvukové vlny se snižuje intenzitou rychlostí 6 dB pro dvojnásobnou vzdálenost od zdroje. Pokud je hlediště ploché, vytvoří se hemisférická vlna. Absorpce difrakční vlny podlahou nebo publikem poblíž dna polokoule bude mít za následek ještě větší absorpci, takže výsledná úroveň intenzity bude klesat dvojnásobkem teoretické rychlosti, tedy asi 12 dB pro dvojnásobnou vzdálenost. Z důvodu takové absorpce jsou podlahy hlediště obvykle skloněny vzhůru směrem dozadu.

## 6. Závěr

Obor akustika zasahuje do mnoha oblastí lidského života. Popsat detailněji všechny z nich je nad rámec této Tematické přílohy časopisu Metrologie. Proto se s některými dalšími oblastmi, včetně metrologie v akustice, setkáme v některém z příštích čísel časopisu Metrologie.

### 7. Literatura

- |     |  |      |  |
|-----|--|------|--|
| [1] | Brüel & Kjær - Architectural Acoustics   | [8]  | <a href="http://geo.mff.cuni.cz">geo.mff.cuni.cz</a>           |
| [2] | Jay Orear - Physik, Macmillan Pub. 1979  | [9]  | <a href="http://www.poznavaci.info">www.poznavaci.info</a>     |
| [3] | Němec; Ransdorf; Šnédrle - Hluk a jeho snižování<br>v technické praxi, SNTL 1970 | [10] | <a href="http://vltava.rozhlas.cz">vltava.rozhlas.cz</a>       |
| [4] | <a href="http://www.wikiskripta.eu">www.wikiskripta.eu</a>                       | [11] | <a href="http://www.archiweb.cz">www.archiweb.cz</a>           |
| [5] | <a href="http://www.salford.ac.uk">www.salford.ac.uk</a>                         | [12] | <a href="http://edu.techmania.cz">edu.techmania.cz</a>         |
| [6] | <a href="http://www.britannica.com">www.britannica.com</a>                       | [13] | <a href="http://www.researchgate.net">www.researchgate.net</a> |
| [7] | <a href="http://physics.uwo.ca">physics.uwo.ca</a>                               | [14] | <a href="http://www.vutbr.cz">www.vutbr.cz</a>                 |
|     |  | [15] | <a href="http://rdacoustic.cz">rdacoustic.cz</a>               |
|     |  | [16] | <a href="http://stavba.tzb-info.cz">stavba.tzb-info.cz</a>     |



---

**Redakční rada:**

Ing. Zdeňka Pohořelá (předsedkyně), Mgr. Kristýna Vančurová (místopředsedkyně), Ing. Milan Badal, Ing. Miroslav Čermák, Mgr. Václava Holušová, Doc. Ing. Jiří Horský, CSc., Ing. František Jelínek, CSc., Ing. Jiří Kazda, Mgr. Petra Krůčková, Ing. Petr Pánek, CSc., RNDr. Klára Popadičová, Ing. Pavel Rubáš, Ing. Radek Sedláček, Ph.D., doc. RNDr. Jiří Tesař, Ph.D., Ing. Josef Vojtíšek.

Řízení: PhDr. Bořivoj Kleník – šéfredaktor.

Časopis vychází 4 x ročně. Cena výtisku 80,- Kč, roční předplatné 320,- Kč + poštovné a balné + 10 % DPH. Vydavatel: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví (ÚNMZ) ve spolupráci s Českým metrologickým institutem, Českou metrologickou společností a Českým kalibračním sdružením. Sídlo vydavatele: ÚNMZ, Na Žertvách 132/24, 180 00 Praha 8. IČO: 48135267. Povolení tisku: registrace MK ČR 6111, MČ 46 676, ISSN 1210-3543.

Místo vydávání: Praha. Datum vydání: květen 2021. Nakladatelský servis, předplatné a inzerce: PhDr. Bořivoj Kleník, Bezdědice 19, 294 25 Katusice, mobil: 603 846 527, e-mail: klenik@q-art.cz. Nevyžádané materiály se nevracejí. Za původnost a správnost příspěvků odpovídají autoři.

Tato Tematická příloha je součástí č. 2/2021 časopisu Metrologie. © ÚNMZ

---

**Foto na obálce:**

QR 505: Varhany s dozvukem i ozvěnou

**Photo on the front page:**

QR 505: Organ with natural echo and reverberation



