

FYZIOLOGICKÁ A PSYCHOLOGICKÁ AKUSTIKA

MUNI
ARTS

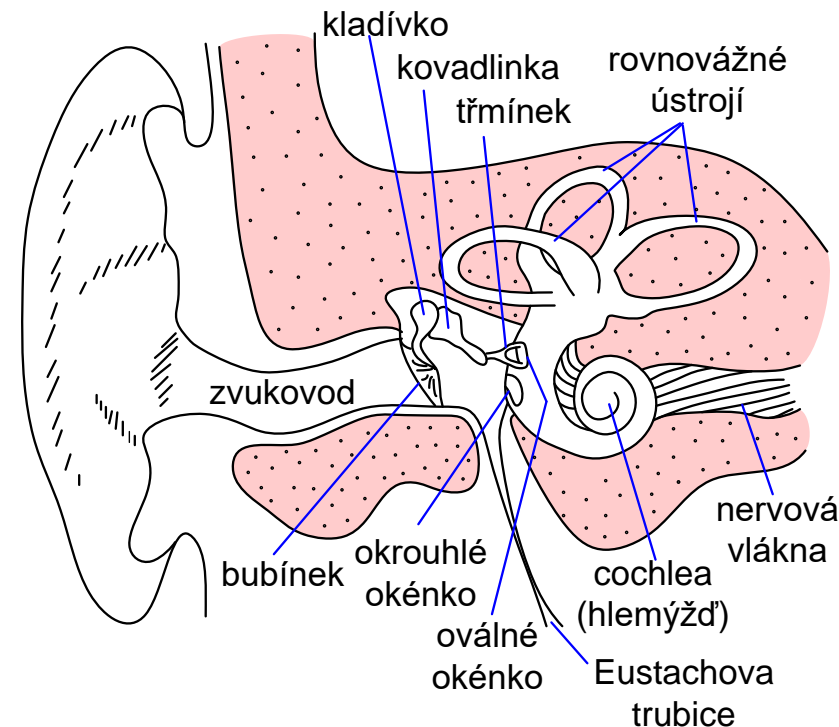
Kurz: **Studiová technika II**

Autor: Jiří Schimmel

Sluchový orgán

Sluchový orgán

- **zevní ucho:** zachycení a přivedení zvukového vlnění k bubínku
- **střední ucho:** převedení vlnění do tekutého prostředí vnitřního ucha
- **vnitřní ucho:** přeměna kmitů na nervový podnět, který je dále zpracováván mozkiem

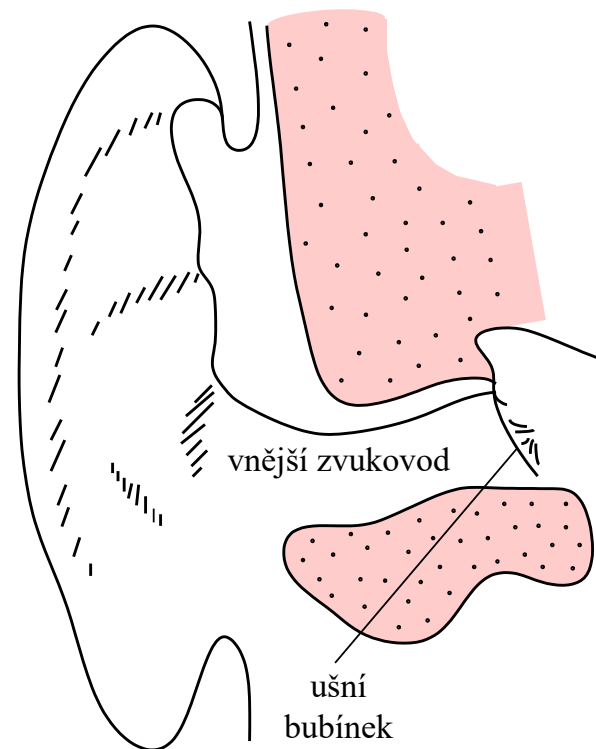


ZWICKER, Eberhard, FASTL, Hugo. *Psychoacoustics, Facts and Models*, 2nd ed. Springer, 1999. 416 s. ISBN 3-540-65063-6

<https://www.youtube.com/watch?v=PeTriGTENoc>

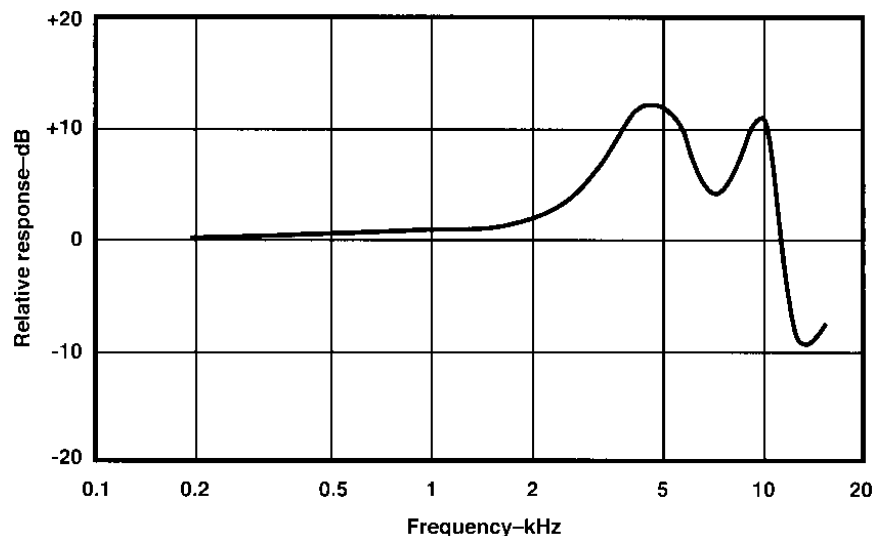
Zevní ucho

- **Boltec**: směrový nástavec, pro zachycení zvuku bubínkem,
- Zevní ucho a stín hlavy ovlivňují intenzitu podnětů přicházejících k bubínku z různých směrů. U zvuků kmitočtů 500 Hz a vyšších, zvláště 4000 až 5000 Hz, je již hlasitost vjemu velmi ovlivněna směrem zdroje zvuku.



Zevní ucho

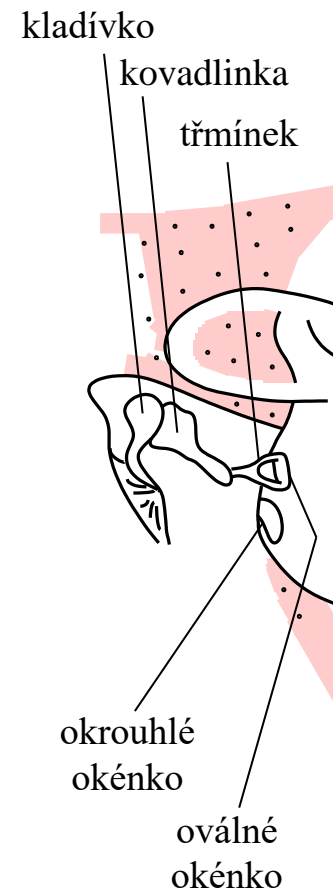
- **Zvukovod:** oválný průřez, délka 23 až 24 mm, osa je odkloněna lehce dozadu a dolů, objem 1,2 až 1,5 ml, rozhoduje o impedanci zevního ucha.
- Přenosová funkce zvukovodu má dvě rezonanční maxima na kmitočtech cca 5 a 10 kHz, která jsou důsledkem fyzikálních rozměrů zvukovodu.



Mehrgardt, S., Mellart, V. „Transformation characteristics of the external human ear“, *Journal of the Acoustical Society of America*, 61, 6/1977, s. 1567-1576.

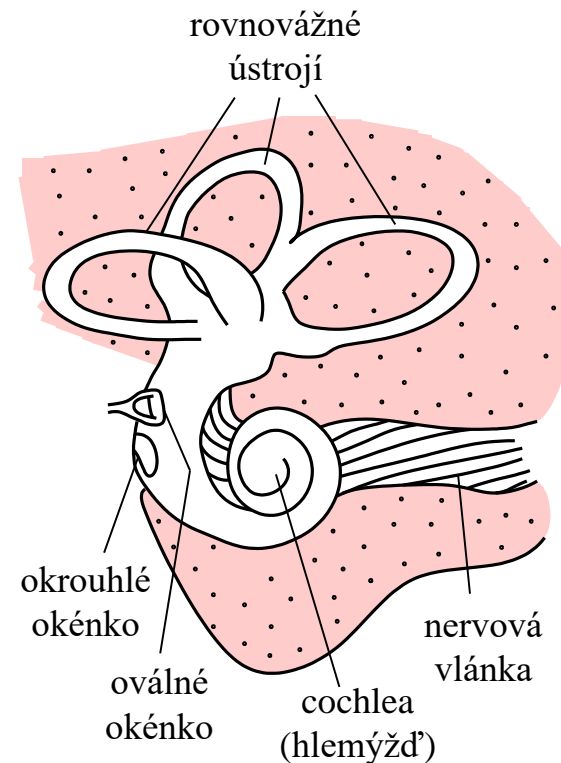
Střední ucho

- Od zevního ucha je odděleno bubínkem, vnitřní stěna kostěná, je v ní uloženo vnitřní ucho a dvě okénka – oválné a okrouhlé, vedoucí k hlemýždi.
- Z vnitřní stěny je k bubínku přirostlá rukojeť kladívka, jehož hlavička je spojena s kovadlinkou. Kovadlinka se spojuje s třmínkem, který srůstá s blankou oválného okénka.
- Řetěz kůstek tvoří pákový mechanismus působící jako impedanční transformátor, středoušní svaly se stahují se na silné zvukové podněty, tím snižují vnímanou hlasitost silných zvuků a chrání vnitřní ucho před poškozením.

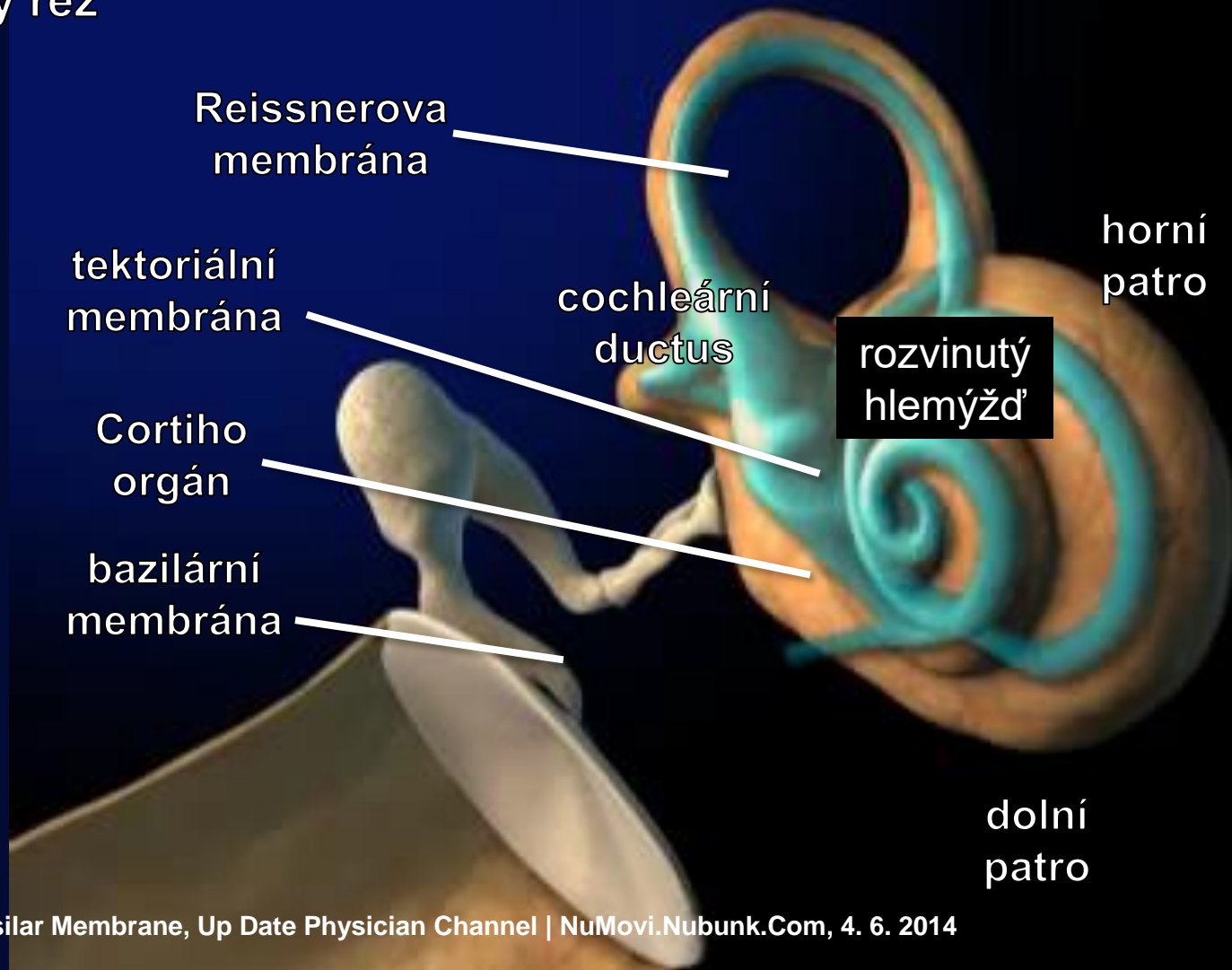


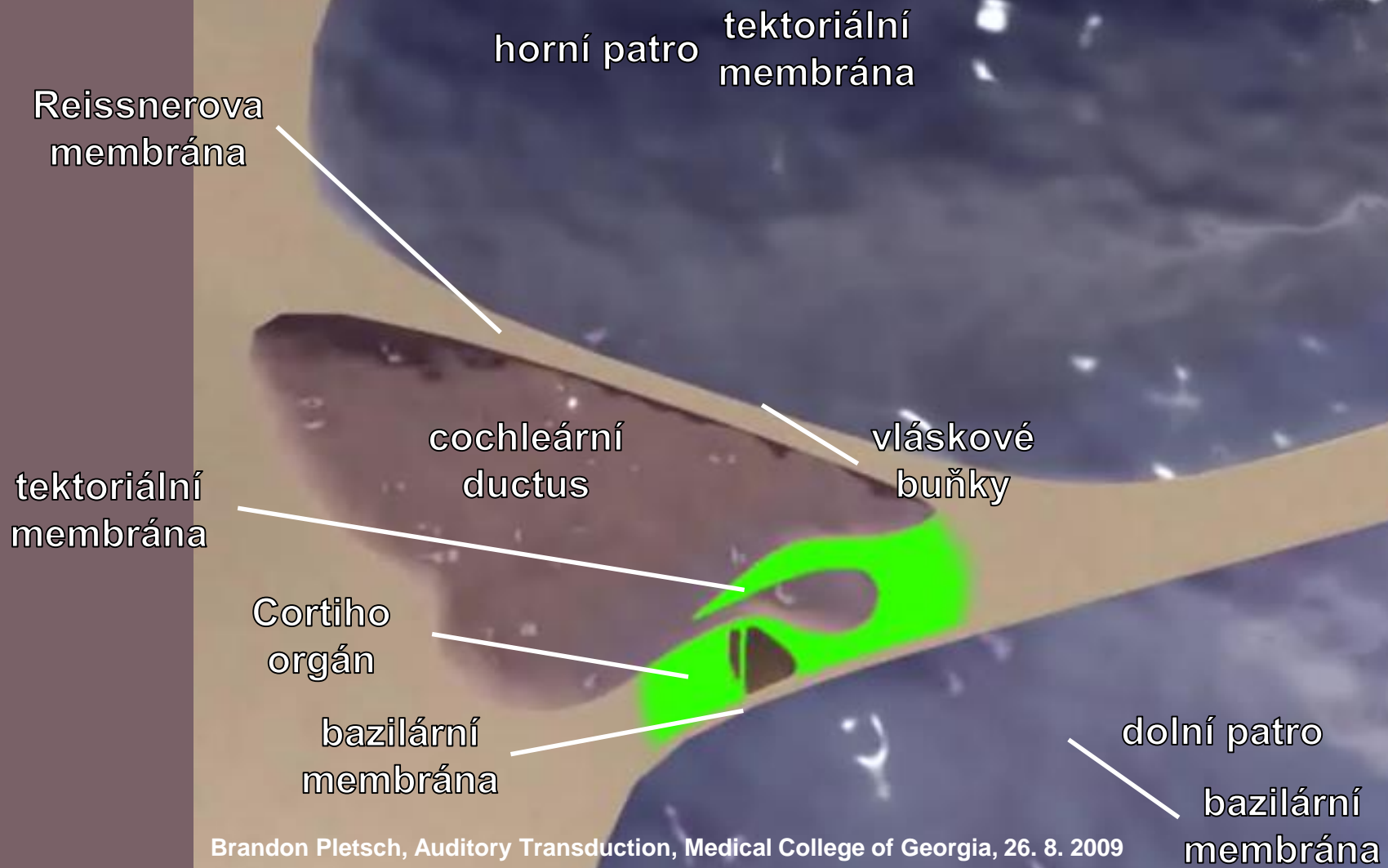
Vnitřní ucho

- **Rovnovážné (vestibulární) ústrojí:** vnímání polohy těla a pohybů v prostoru
- **Hlemýžď:** ústrojí pro vnímání zvuků, jeho prostor je rozdělen na dvě patra, dělicí část je tvořena vlastním smyslovým ústrojím, tzv. *Cortiho orgánem*, jehož dolní část je tvořena *bazilární membránou*, na které jsou smyslové vláskové buňky.
- Přenos zvukových kmitů je zprostředkován tekutinou, její pohyb při průchodu hlemýžděm vyvolá výchylku bazilární membrány a tím také smyslových buněk. Tento pohyb vede ke změně polohy vlásků vzhledem ke krycí membráně, která je vlastním impulsem pro smyslový vjem.



Cochlea: příčný řez

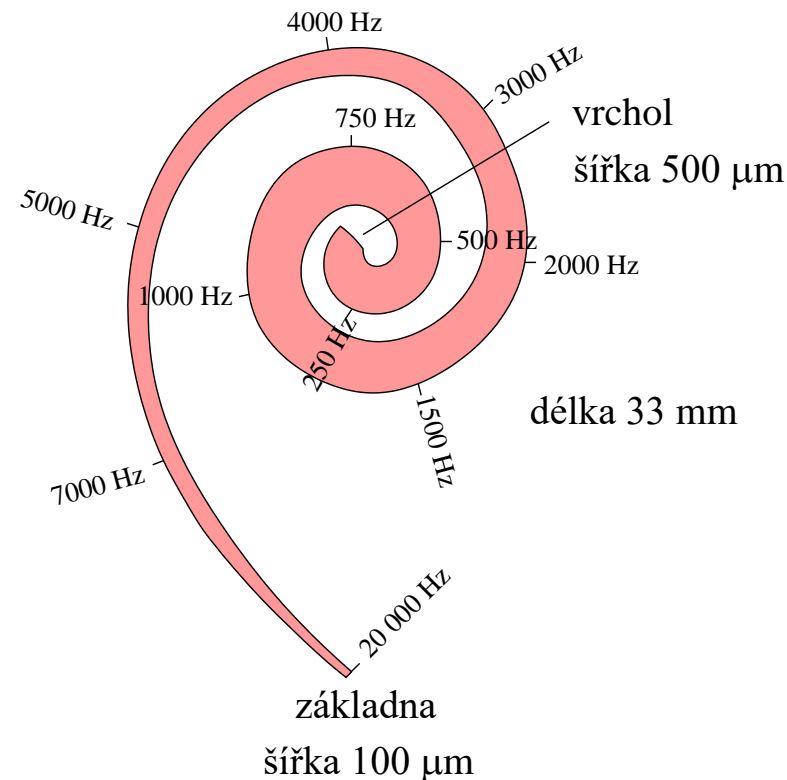




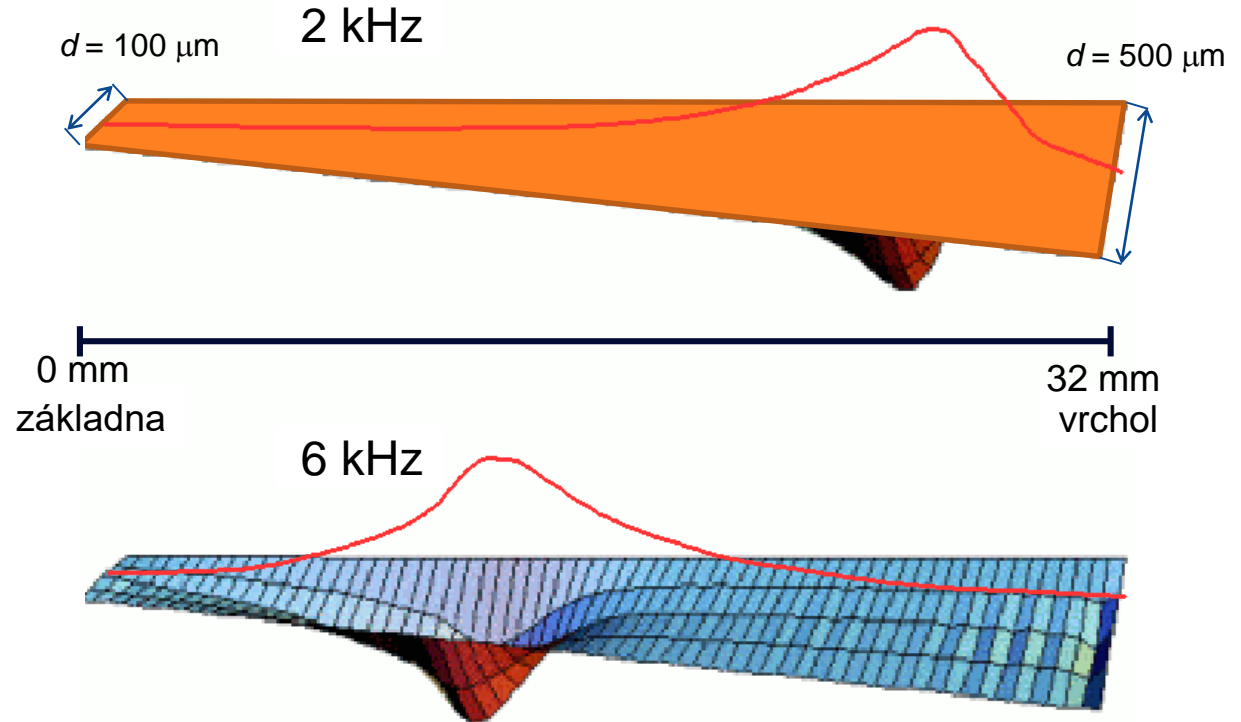
Brandon Pletsch, Auditory Transduction, Medical College of Georgia, 26. 8. 2009

Kmitočtová analýza zvuku ve vnitřním uchu

- **Vlnová teorie:** rychlost šíření vlny v hlemýždi se mění a tím dochází k místnímu zesílení vibrací bazilární membrány, výška tónu se rozlišuje podrážděním nervových zakončení na různých místech bazilární membrány
- Experimenty prováděné von Békésy ukázaly, že nízké kmitočty způsobují ve vnitřním uchu oscilace, které dosahují maxima na vrcholu bazilární membrány, vysoké kmitočty naopak na její základně.



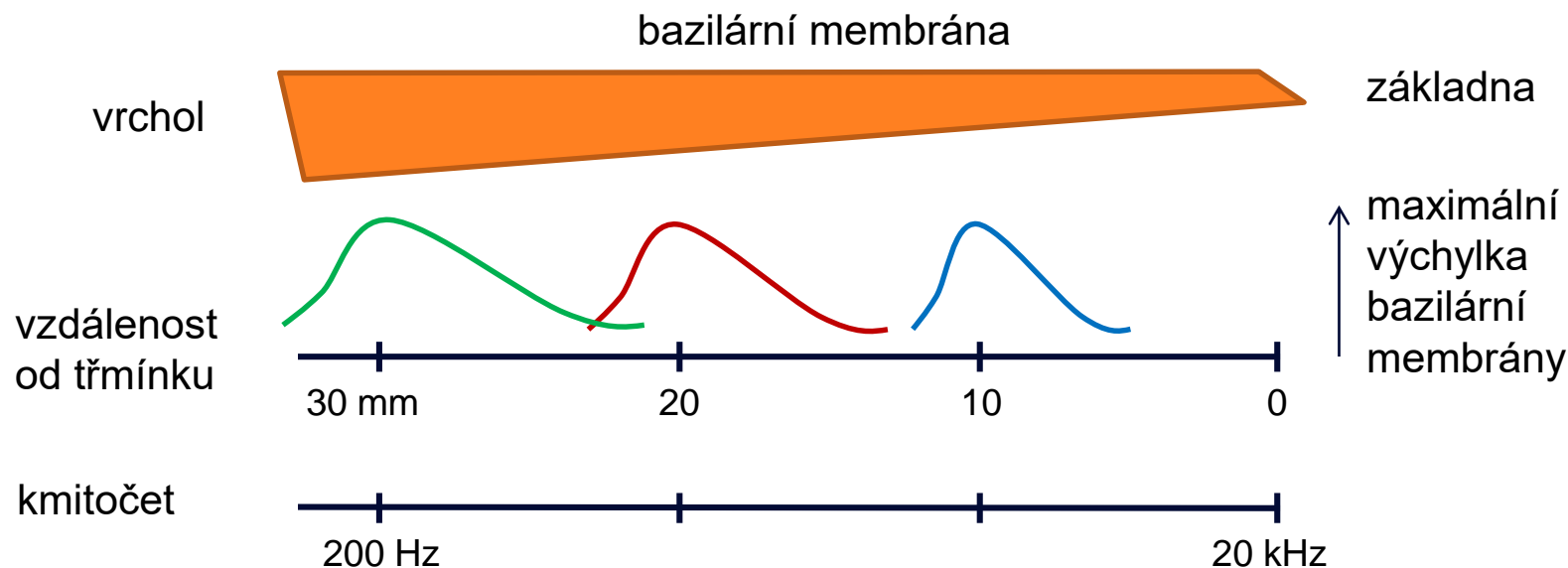
Kmitání bazilární membrány



WADA Laboratory, Dept. of Bioengineering and Robotics, Graduate School of Engineering, Tohoku University

Princip tonotopie

- každému kmitočtu zvukového vlnění odpovídá určité místo maxima výchylky kmitání bazilární membrány
- mozek vyhodnotí kmitočet tónu podle místa největšího podráždění



<https://auditoryneuroscience.com/ear/bm0-frequency-modulated-tone>

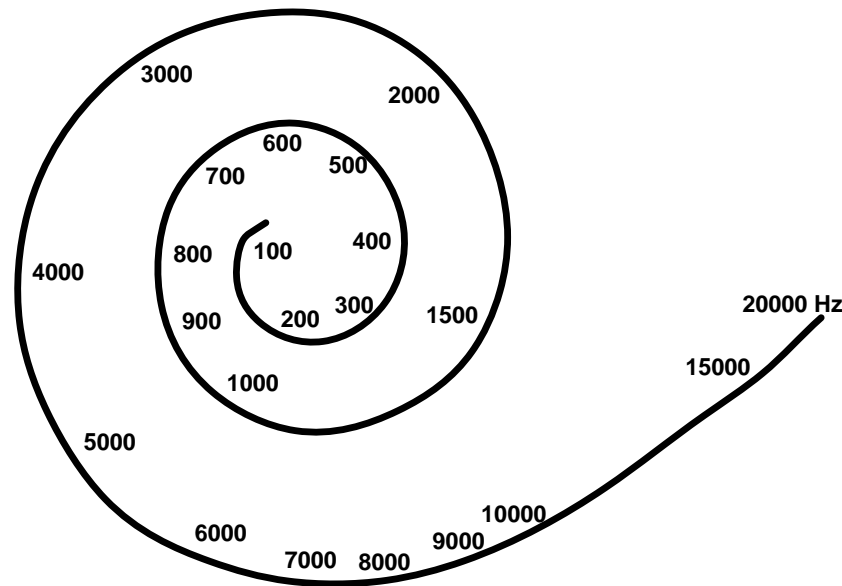
Tonotopická osa

- vzdálenost od třmínku převedená na charakteristický kmitočet
- tato závislost je logaritmická**

$$f(z) = 165(e^{az} - 1)$$

$$z(f) = \frac{1}{a} \ln\left(\frac{f}{165} + 1\right)$$

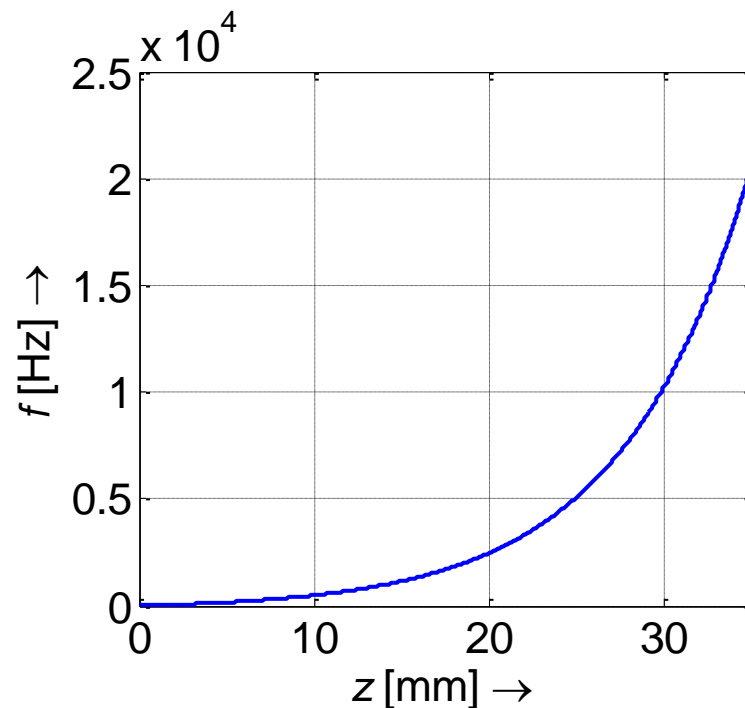
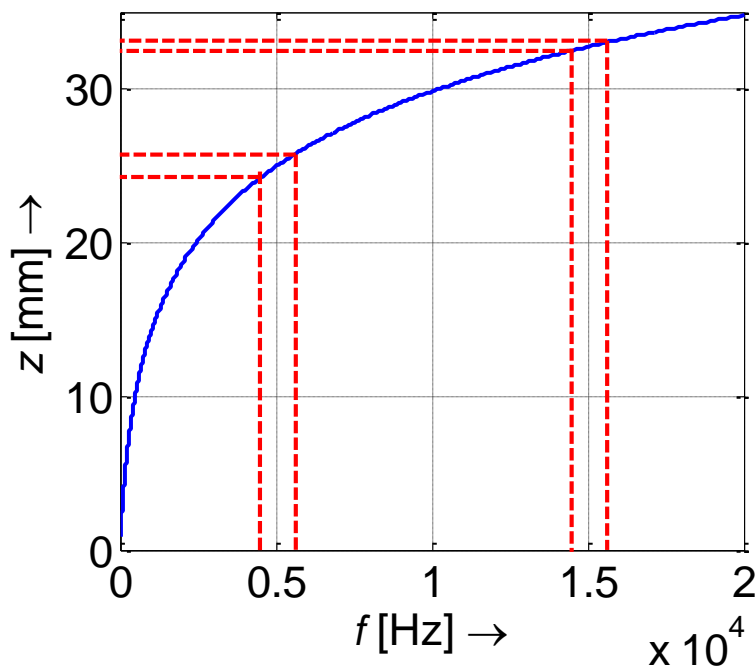
z – vzdálenost na bazilární membráně v mm, f – kmitočet, $a = 0,06\ln(10)$



FLETCHER, Harvey. „Auditory Patterns“, Rev. Mod. Phys., Vol.12, pp.47-55, Jan. 1940.

Tonotopická osa

- s rostoucím f se zkracuje úsek membrány odpovídající konstantní šířce pásma
- vláskové buňky jsou na membráně rozloženy rovnoměrně → s rostoucím f **logaritmicky klesá kmitočtové rozlišení**



Vlastnosti sluchového orgánu

Vztah mezi objektivními a subjektivními vlastnostmi zvuku

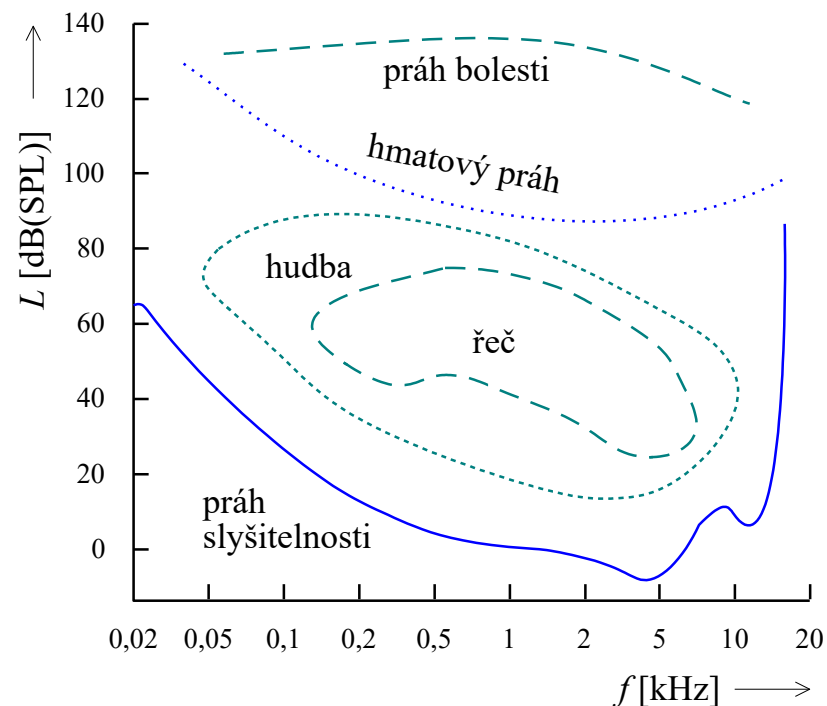
- Weberův-Fechnerův zákon: popisuje vnímání podnětů (nejen zvukových) člověkem – akustické veličiny, které se mění řadou geometrickou, vnímá lidské ucho řadou aritmetickou a násobky akustických veličin jsou uchem vnímány jako přírůstky:

$$R = c \log S + a \qquad \frac{dI}{I} = \text{konst.}$$

objektivní vlastnost zvukového vlnění	subjektivní vjem
intenzita	hlasitost
kmitočet	výška
doba trvání	subjektivní doba trvání
počáteční fáze	-

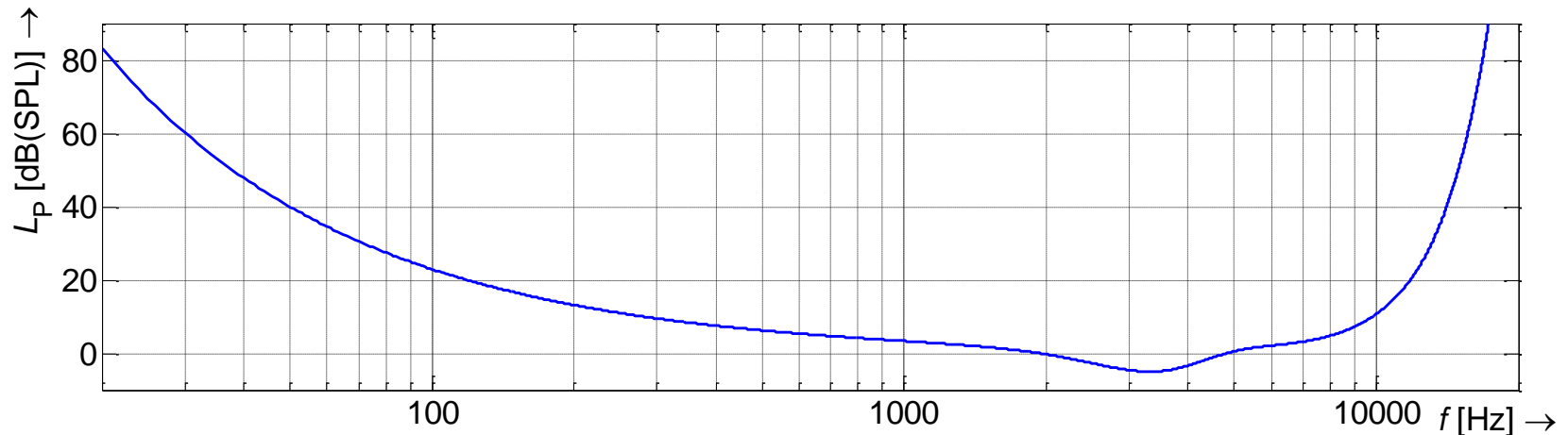
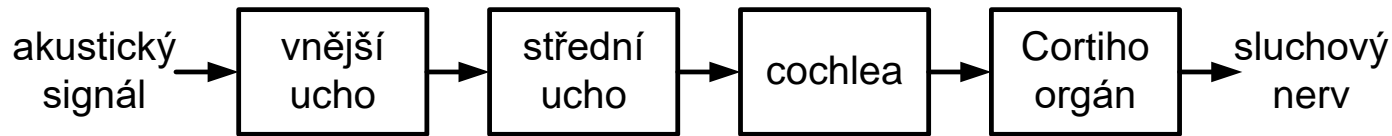
Oblast slyšitelnosti

- **Práh slyšitelnosti:** minimální průměrná hladina akustického tlaku, kterou je člověk s normálním sluchem schopný slyšet.
- **Hmatový práh:** podráždění hmatových tělísek ve sluchovém orgánu.
- **Práh bolesti:** pocit bolesti ve sluchovém orgánu.
- **Oblast slyšitelnosti:** oblast vymezená kmitočtovou závislostí prahu sluchu a hmatového prahu.



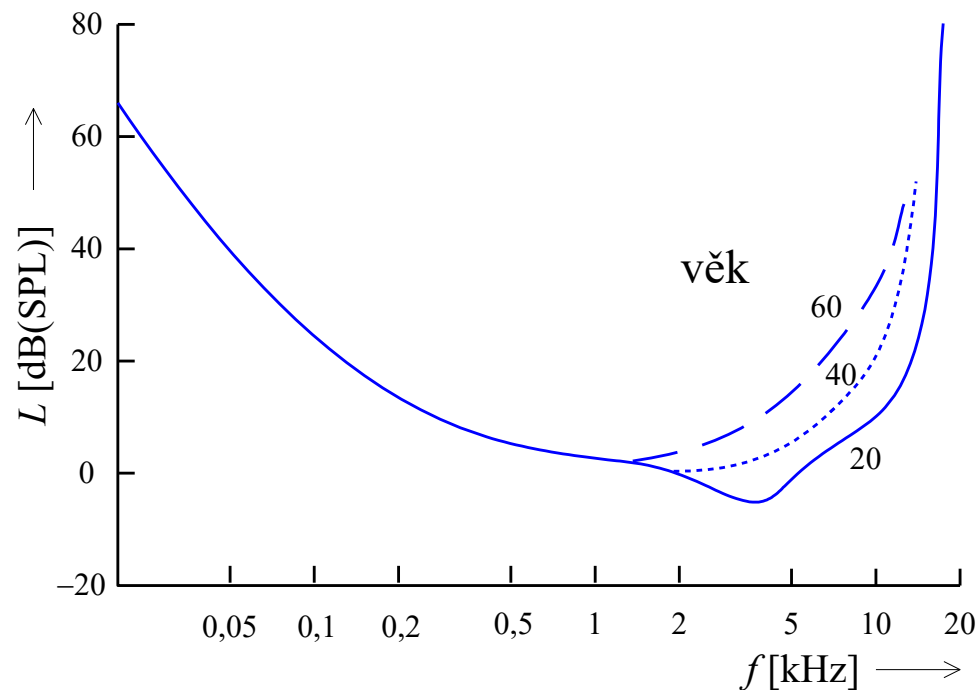
Práh slyšitelnosti

- Vztažná hodnota $2 \cdot 10^{-5}$ Pa pro výpočet hladiny akustického tlaku byla zvolena podle hodnoty prahu slyšitelnosti v okolí kmitočtu 1 kHz, ve skutečnosti je však vyšší než 0 dB(SPL).



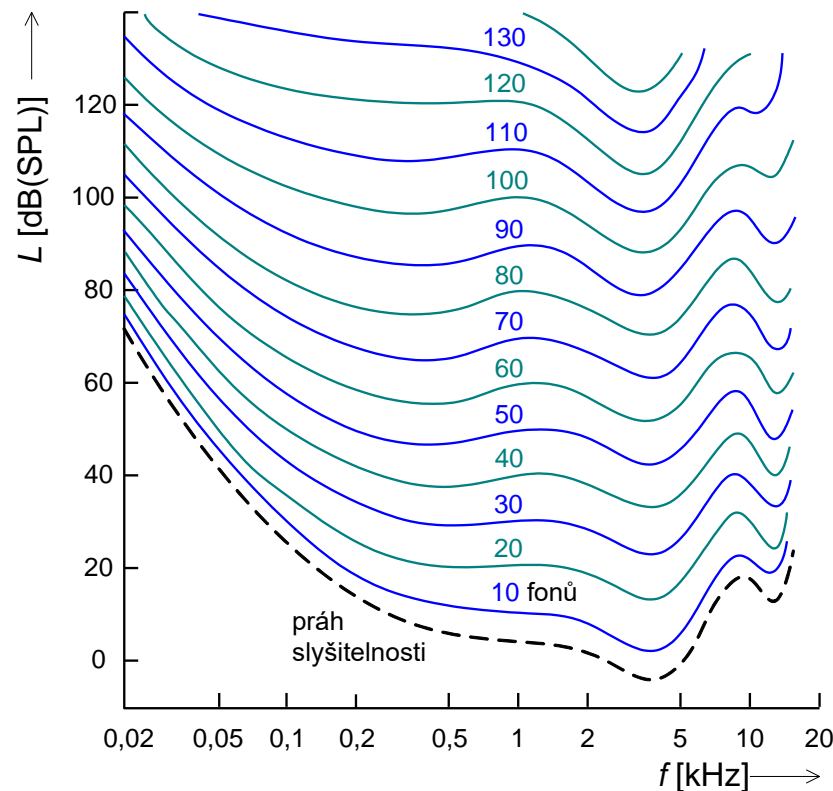
Práh slyšitelnosti

- **Audiogram:** udává, o kolik dB je sluchový práh posunut oproti normálnímu sluchovému prahu.



Hlasitost zvuku

- Vlastnost sluchového vnímání, podle které lze uspořádat zvuky na stupnici v rozsahu od tichých po hlasité.
- Přírůstek hlasitosti je úměrný relativní změně intenzity zvuku.
- Je závislá také na kmitočtu: *křivky stejné hlasitosti* udávají hladiny akustického tlaku sinusové rovinné postupné vlnou o kmitočtu 1000 Hz, která je posouzena jako stejně hlasitá jako daný zvuk.
- Jednotkou hladiny hlasitosti je fon (phon) [Ph].

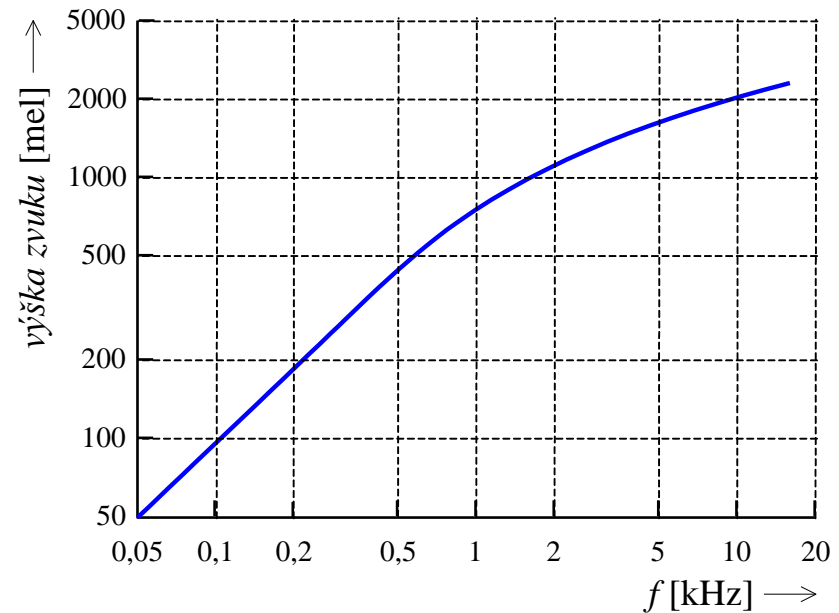


Subjektivní hlasitost

- Hladina hlasitosti ve fonech nevyjadřuje správně subjektivně vnímané změny hlasitosti.
- Výslednou hladinu zvuku složeného z několika čistých tónů nedostaneme sečtením dílčích hlasitostí jednotlivých tónů.
- **Subjektivní hlasitost** [son]: hlasitost 1 sonu mají tóny o hladině hlasitosti 40 fonů. Zvuk subjektivně vnímaný jako dvojnásobně silný bude mít v rozmezí hladin hlasitosti 20 až 120 Ph hladinu zvýšenou o 10 fonů. Aditivní veličina.
- Převod mezi hlasitostí N [son] a hladinou hlasitosti L_N [Ph]:
$$N = 2^{(L_N - 40)/10} \quad L_N = 33,22 \log N + 40$$
- Minimální postřehnutelná změna intenzity zvuku $\Delta I/I$ je nízká pro hladiny pod 50 dB(SPL).

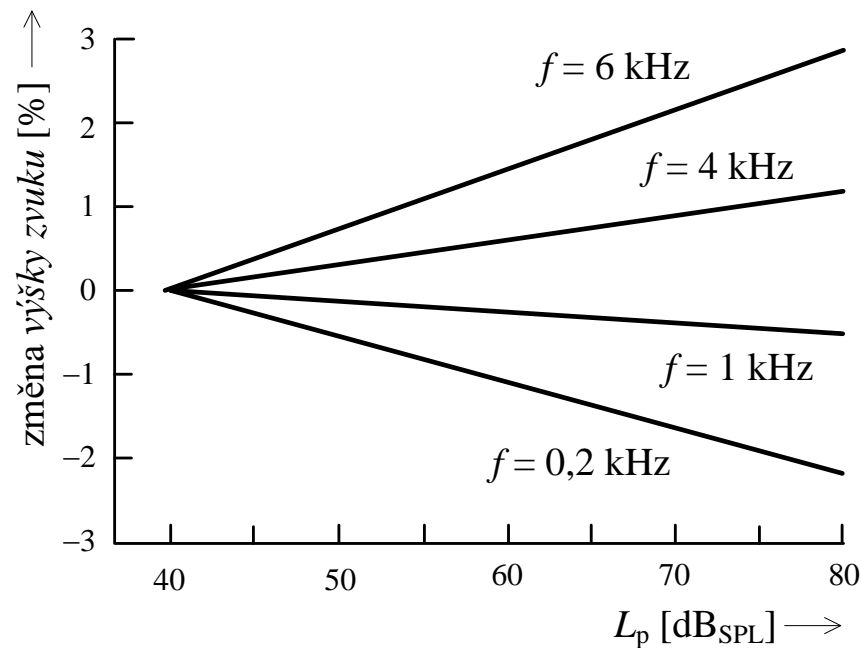
Výška zvuku

- Vlastnost zvukového vnímání umožňující uspořádat zvuky na stupnici v rozsahu od hlubokých po vysoké.
- Výška tónu je na kmitočku závislá, ale ne totožná, závisí také na hladině akustického tlaku zvuku.
- Jednotkou výšky zvuku je *mel*.
 - tón 1000 Hz na hladině akustického tlaku 40 dB_{SPL} má subjektivní výšku 1000 melů,
- Závislost výšky na kmitočku se liší pro čisté tóny a úzkopásmový šum.



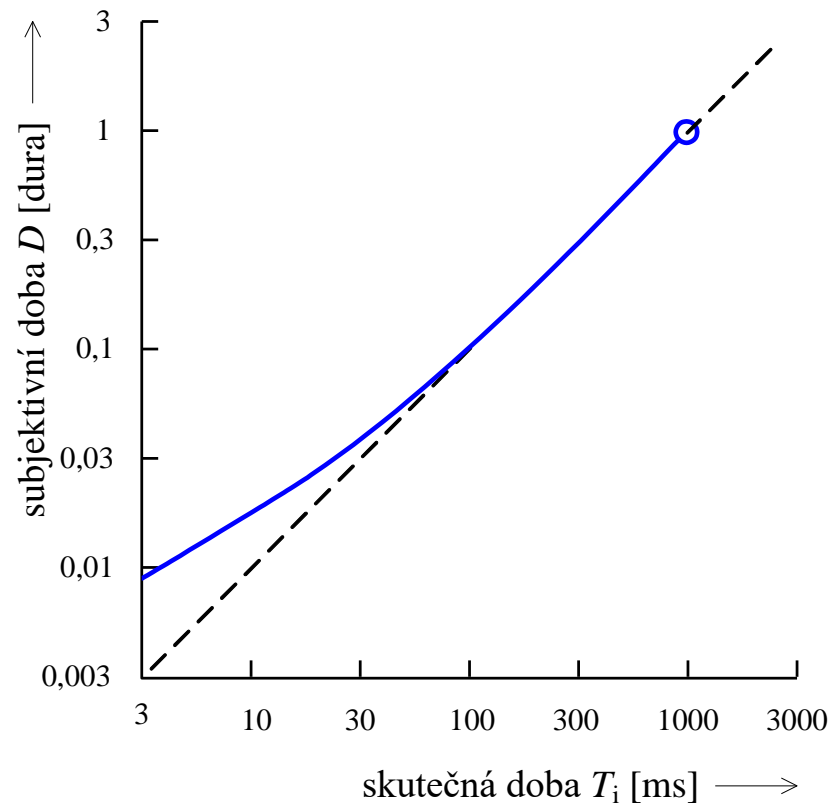
Výška zvuku

- Subjektivní výška tónu závisí také na jeho hlasitosti.
- Zvětšujeme-li hlasitost nízkých tónů, jejich subjektivní výška se zmenšuje.
- Minimální rozpoznatelná změna kmitočtu: závislá na kmitočtu a intenzitě tónu (při $f = 2000$ Hz je $\Delta f/f = 0,0017$).



Subjektivní doba trvání zvuku

- Vnímaná doba trvání velmi krátkých zvuků se neshoduje s jejich skutečnou dobou trvání. Jednotkou subjektivní doby trvání zvuku je *Dura*.
- U zvuků, jejichž doba trvání je kratší než jedna sekunda, je subjektivní doba trvání větší.
- Mezním časovým prahem, kdy lidský sluch postřehne změnu zvuku, jsou přibližně 2 ms.

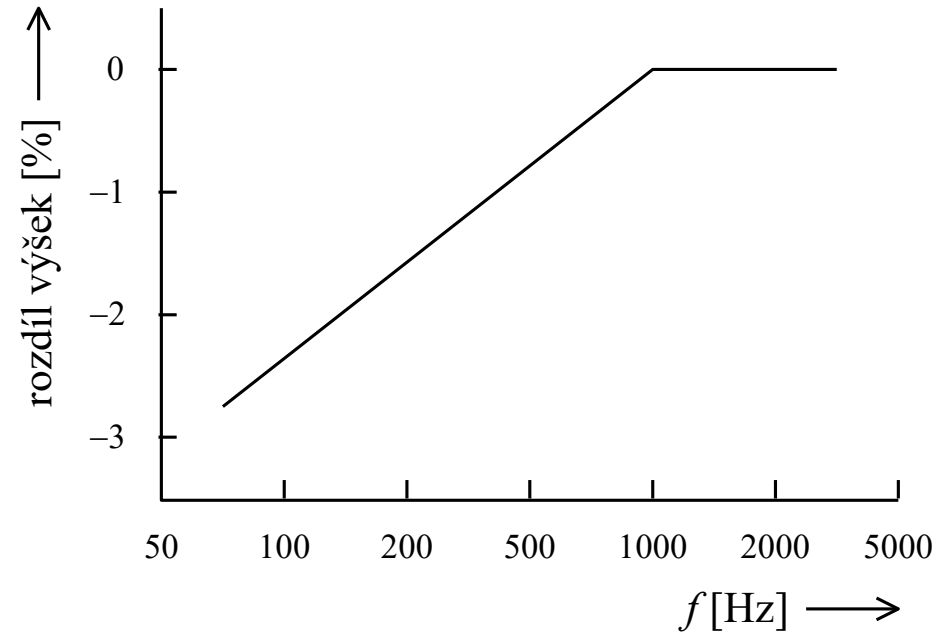


Vlastnosti složených zvuků

- **Výška:** Při poslechu složených zvuků s diskretním spektrem nevnímáme výšky jejich harmonických složek odděleně, ale splývají nám do jediného vjemu výšky. Ta je pro zvuky se základním kmitočtem menším než 1000 Hz o něco nižší než výška harmonického zvuku se stejným kmitočtem.
- **Hlasitost:** Při vytváření vjemu hlasitosti složeného zvuku se uplatňují dva rozdílné mechanismy sčítání:
 - Sčítání intenzit spektrálních složek zvuku ležících uvnitř určitých kmitočtových pásem, tzv. *kritických pásem slyšení*.
 - Sčítání příspěvků jednotlivých kritických pásem do výsledné *součtové hlasitosti*.
- **Barva:** vlastnost sluchového vnímání, která umožňuje posluchači usoudit, že dva neidentické zvuky mající stejnou hlasitost a stejnou výšku si nejsou podobné (předpokládá se stejný způsob prezentace obou zvuků).

Vlastnosti složených zvuků

- Výška zvuku s diskretním spektrem se základním kmitočtem menším než 1000 Hz je nižší než výška čistého tónu o stejném kmitočtu.

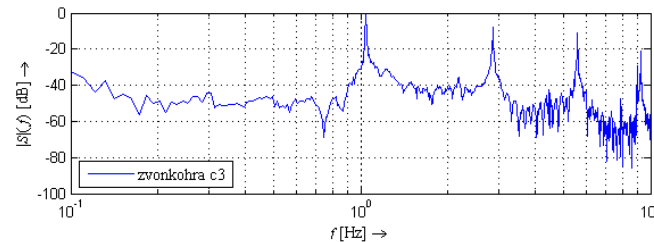
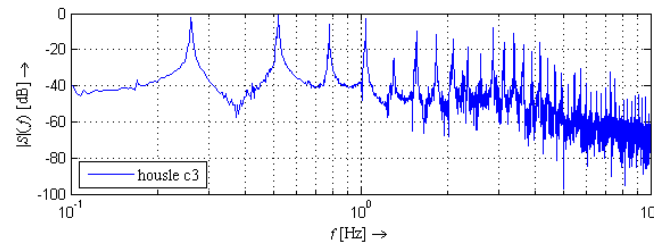
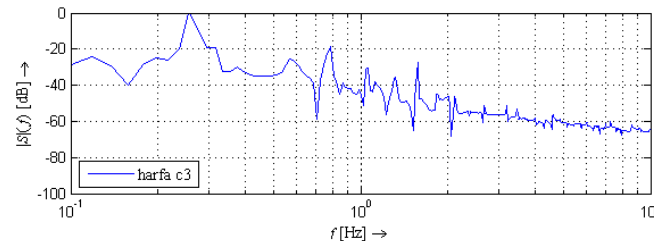
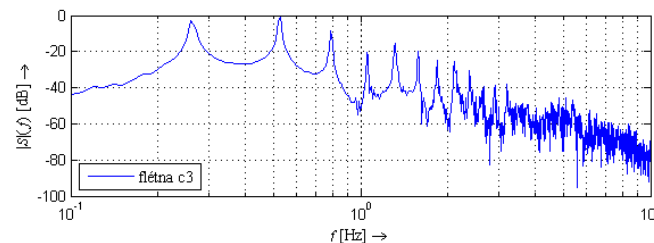


Vlastnosti složených zvuků

- **Hladina hlasitosti:** lze sčítat pouze hlasitosti dvou zvuků v sonech (pokud nedochází k jejich maskování).
- Vytváření vjemu hlasitosti složených zvuků:
 - Sčítání intenzit spektrálních složek zvuku ležících uvnitř tzv. *kritických pásem* slyšení. Celková intenzita kritického pásma pak vyvolá tzv. *specifickou hlasitost*.
 - Sčítání příspěvků jednotlivých kritických pásem do výsledné *součtové hlasitosti*. Při tomto sčítání ale k celkové hlasitosti přispívají pouze ty složky spektra, které nejsou maskovány jiným zvukem.

Vlastnosti složených zvuků

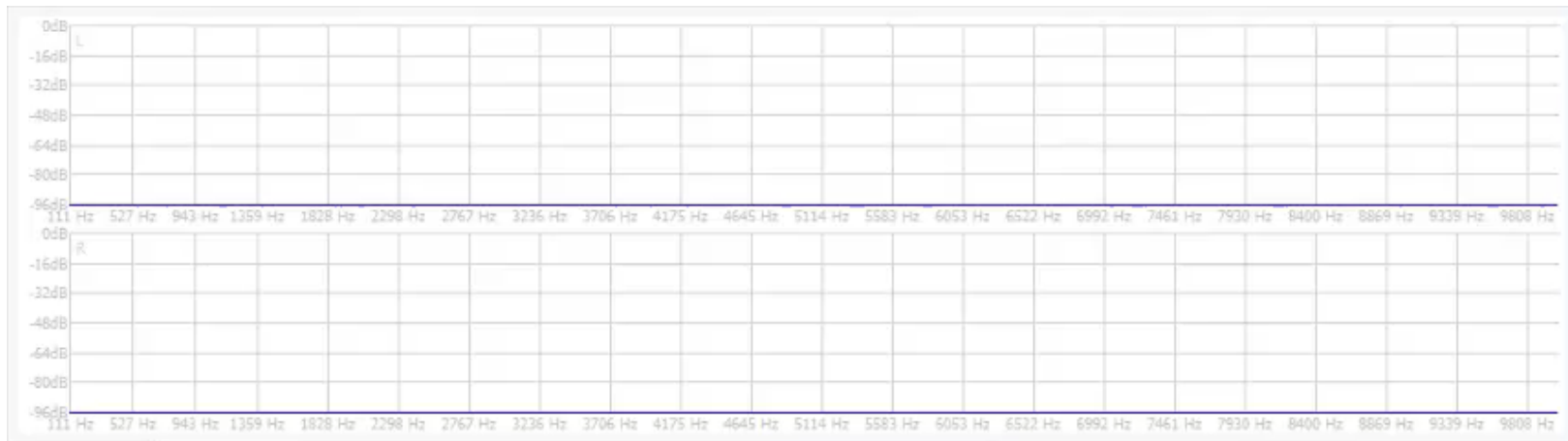
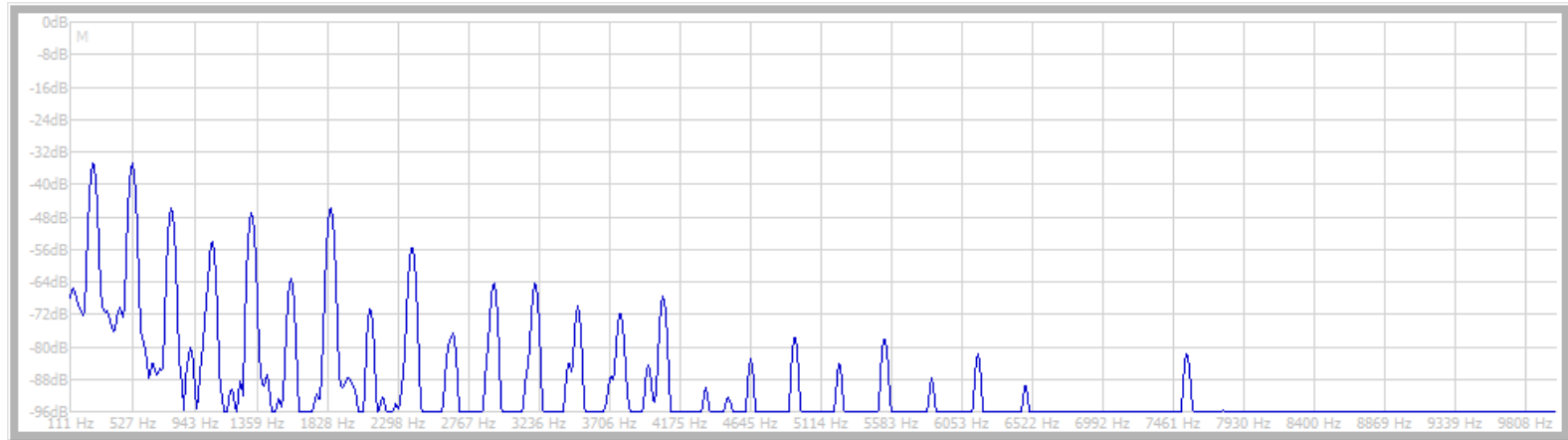
- **Barva zvuku:** vlastnost sluchového vnímání, která umožňuje posluchači usoudit, že dva neidentické zvuky mající stejnou hlasitost a stejnou výšku si nejsou podobné.



Časově proměnné vlastnosti zvukového signálu

- Pojetí spektra signálu z hlediska integrální Fourierovy transformace v teoretické podobě předpokládá nekonečnou délku signálu a stabilitu všech jeho vlastností. Takto chápané pojetí zvukového vlnění je **statické** a nevystihuje časovou závislost vlastností zvukového vlnění.
- Vlastnosti zvukového vlnění se časově mění (čas je nezávislou proměnnou zvukových veličin). Časová závislost vlastností zvuku souvisí s chováním vlastností zvuku v průběhu jeho trvání.
- Při analýze signálů, jejichž charakter se v čase rychle mění, se využívá krátkodobých spekter. Ta lze získat různými matematickými metodami (transformace, banky filtrů).

Časově proměnné vlastnosti zvukového signálu



Ohmův-Helmholzův psychoakustický zákon

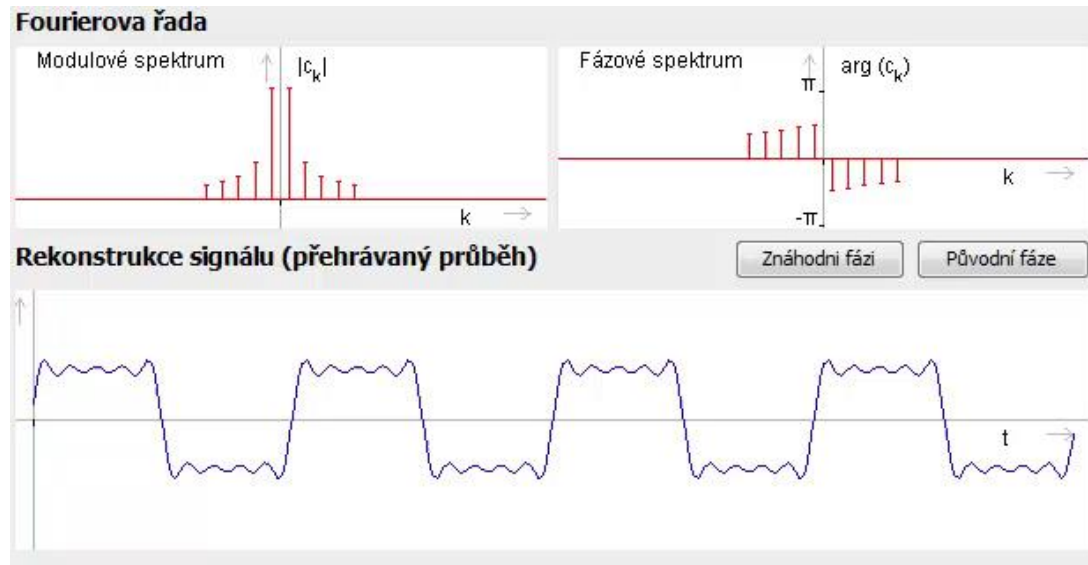
- Barva zvuku je zobecněna na souvislost se spektrem odpovídajícího zvukového signálu a jeho časovými změnami.
- Ohmův akustický zákon: lidské ucho vnímá kmitání částic vzduchu jako jednoduchý tón a každé jiné periodické kmitání těchto částic rozkládá v řadu pravidelných kmitů a vnímá k nim odpovídající řadu jednoduchých tónů.
- U periodických zvuků ucho pracuje jako kmitočtový analyzátor a vyhodnocuje kmitočet a amplitudu jednotlivých dílčích kmitů. Lidské ucho fázi zvukového signálu neregistruje.

Ohmův-Helmholzův psychoakustický zákon

- Teorie slyšení (H. von Helmholtz): dal Ohmovu teorii do souvislosti s Fourierovými řadami a transformací a rozdělil zvuky do tří kategorií:
 - harmonické signály,
 - složené periodické signály,
 - neperiodické signály.
- Definoval tři fáze časové existence zvuků:
 - nakmitávací pochody,
 - výdrž tónu (zakmitaný stav),
 - dokmitávací pochody.
- Hudební interpretaci barvy zvuku ztotožnil se zakmitaným stavem zvuku, tj. se stabilním kmitočtovým spektrem.

Fázové spektrum zvuku

- Ve vjemu barvy zvuku není podle Ohmova-Helmholzova psychoakustického zákona zastoupena fáze jednotlivých spektrálních složek.
- Vliv na barvu zvuku je dnes také přiznáván nakmitávacím a dokmitávacím pochodům.
- Fázové spektrum má vliv na tvar signálu i jeho amplitudu.



Fázové spektrum zvuku

- **Uspořádané:** závislost fáze na kmitočtu je lineární → konstantní skupinové zpoždění τ .

$$\tau = -d\phi/df,$$

tzn. nemění se časový průběh signálu.

- **Neuspořádané:** závislost fáze na kmitočtu není lineární → skupinové zpoždění τ není konstantní → mění se časový průběh signálu.
- Lidský sluch je schopen rozeznat i fázové zkreslení.

Jevy prvního řádu

- **Nelineární zkreslení ve sluchovém orgánu:** vzniká při větších intenzitách zvuku (od hladiny 40 dB nad prahem slyšení) – vznik kombinačních spektrálních složek.
- **Aurální tóny:** vjem výšky nejvyššího společného dělitele kmitočtově soudílných signálů.



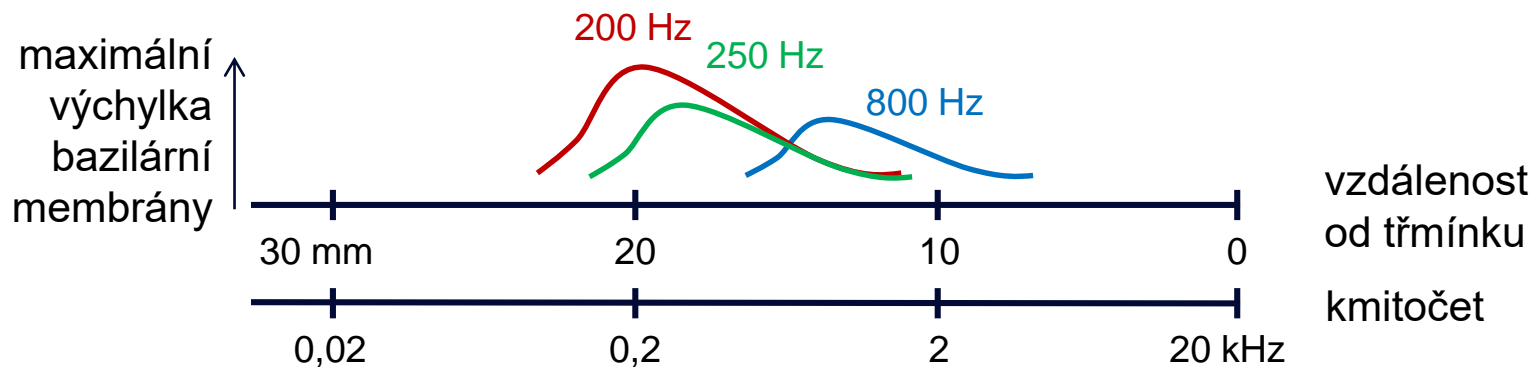
- **Rázy** (zázněje): pokud mají dva tóny kmitočty f_1 a f_2 , které jsou blízké, přestáváme je vnímat jako samostatné tóny, ale jako jediný tón s kmitočtem $(f_1 + f_2)/2$ amplitudově modulovaný harmonickým signálem s kmitočtem $f_1 - f_2$.



Maskování

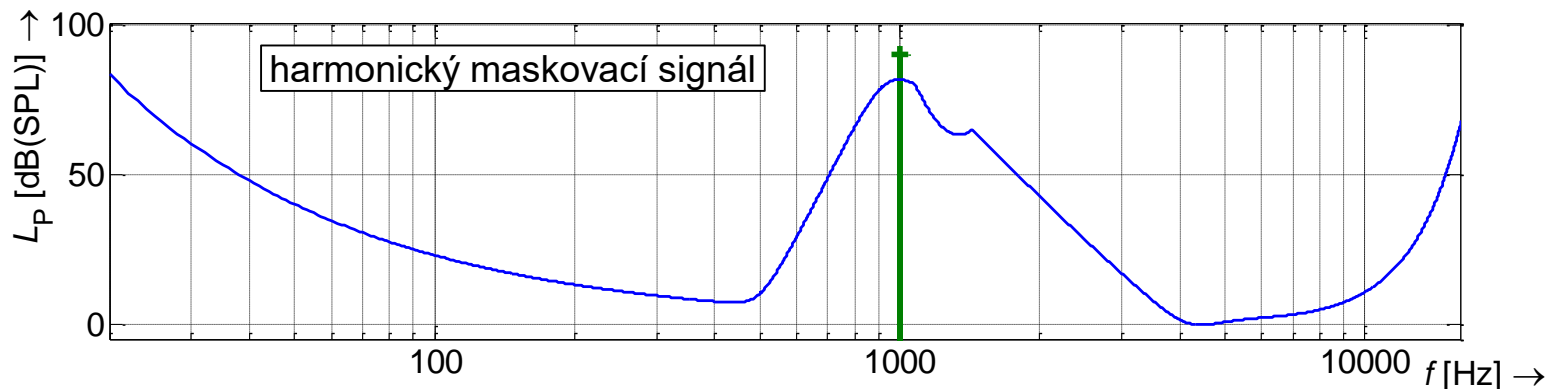
Definice maskování

1. přicházejí-li do sluchového orgánu dva zvuky, může sluchový vjem vyvolaný jedním z nich převládnout tak, že zeslabí nebo potlačí vjem zvuku druhého
2. přítomnost silnějšího zvuku vytvoří na bazilární membráně takové podráždění smyslových buněk, že nejsou schopny přijmout slabší podráždění
3. maskovány jsou zvuky, které dráždí tatáž místa na bazilární membráně jako maskující zvuk

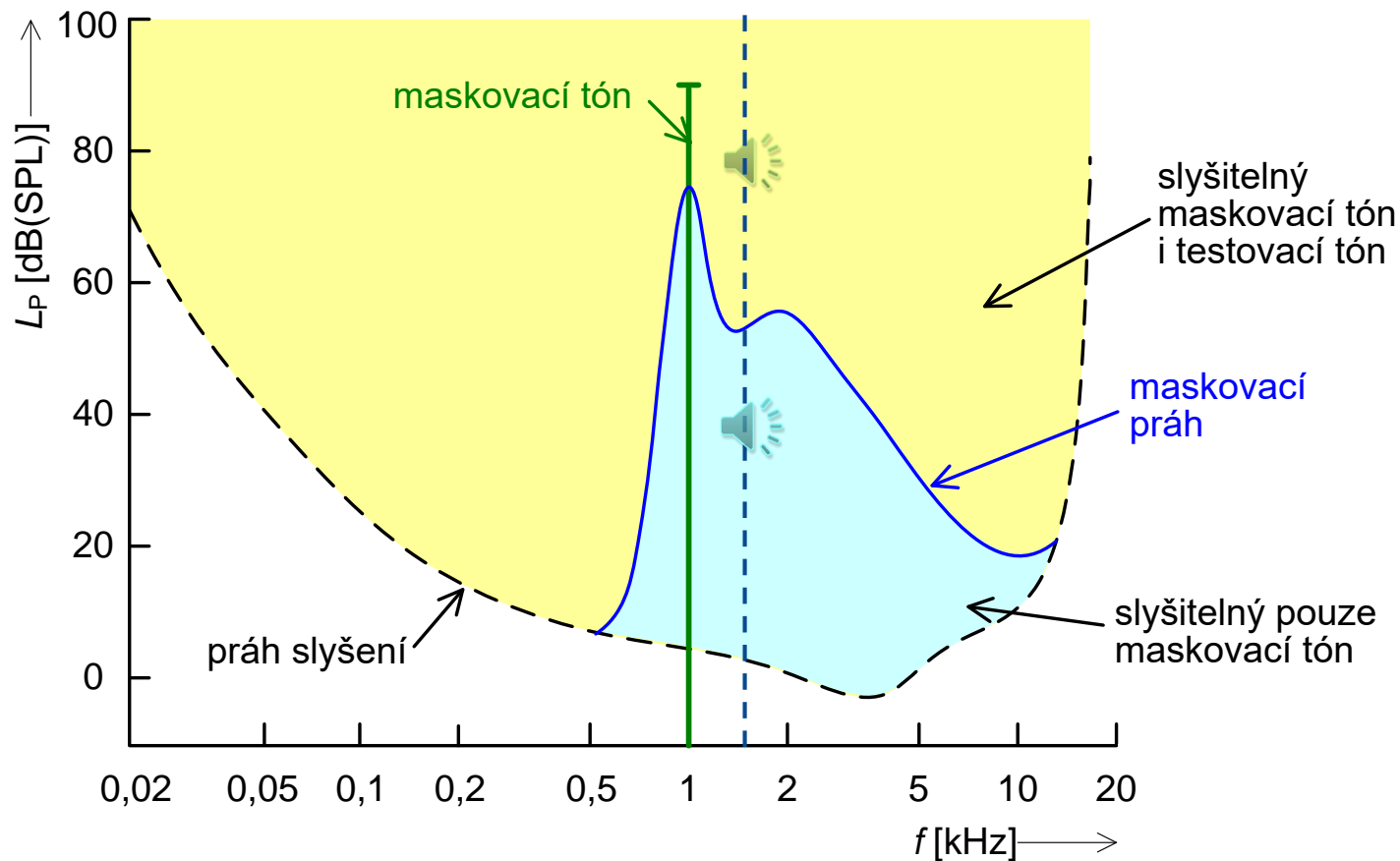


Definice pojmů

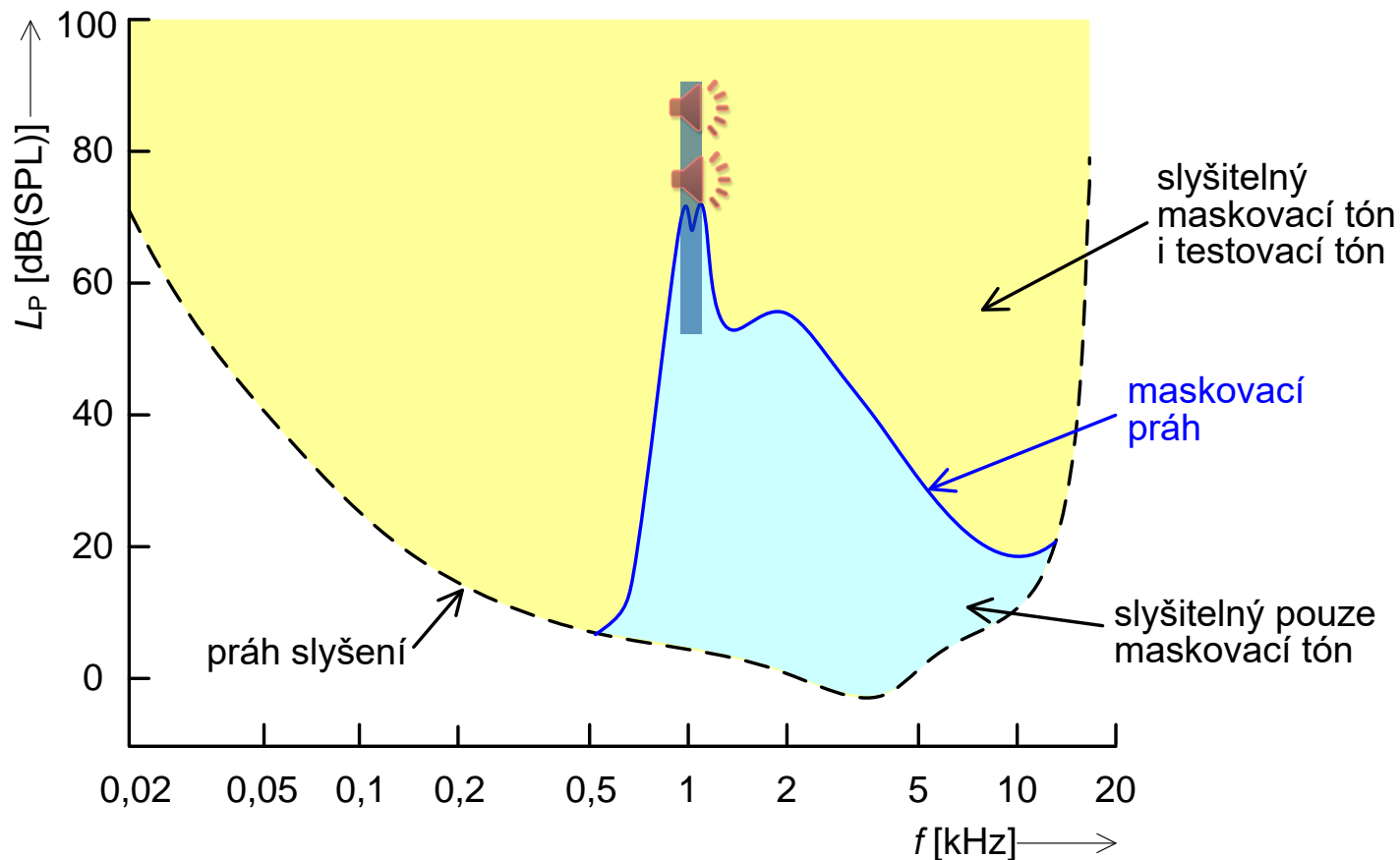
- **kmitočtové maskování:** maskování současně znějících zvuků
- **dočasné maskování:** maskování zvuku krátce před a po znění jiného zvuku
- **maskovací signál:** slyšitelný signál s vyšší hladinou akustického tlaku
- **maskovaný signál:** signál, který je díky maskování signálem s vyšší hladinou akustického tlaku neslyšitelný
- **maskovací křivka:** účinek maskovacího zvuku na posun prahu slyšení
- **maskovací práh:** práh slyšení při působení maskovacího signálu



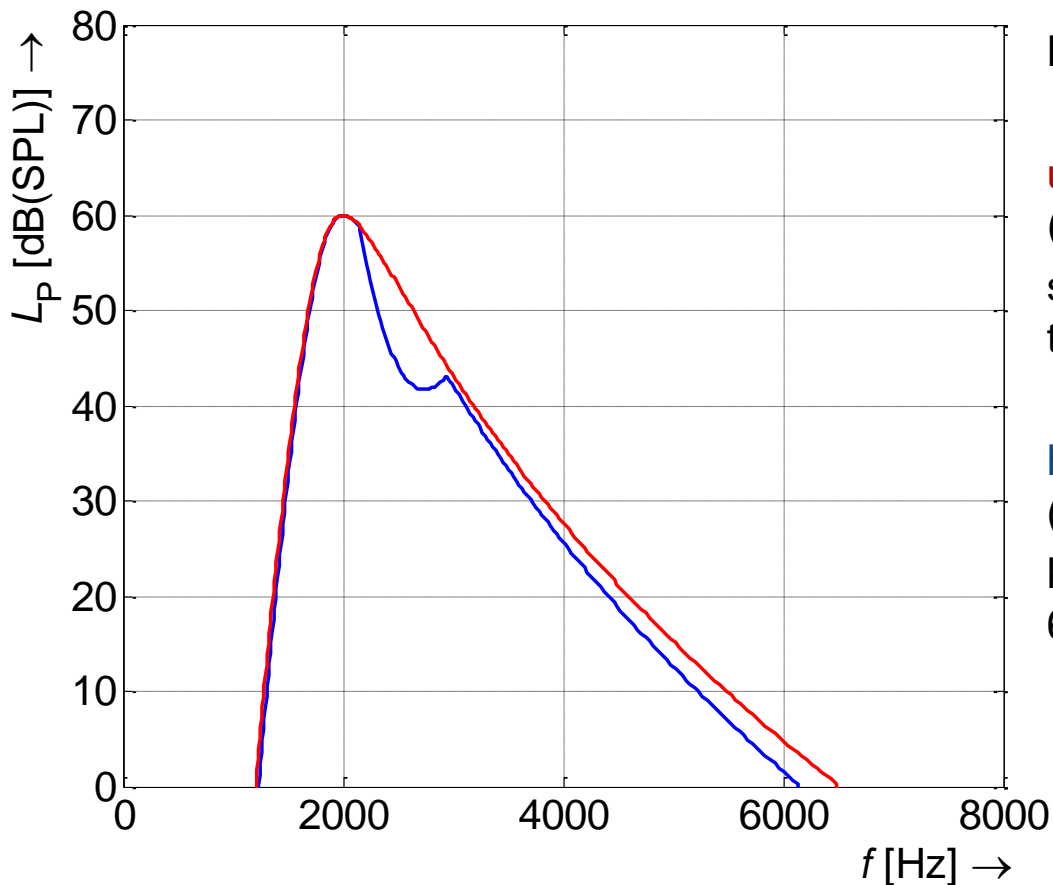
Maskovací křivka pro harmonický (tónový) signál



Maskovací křivka pro harmonický (tónový) signál



Závislost maskovací křivky na typu maskovacího signálu



Maskovací křivka pro:

úzkopásmový šum

(Schröderova aproximace)

střední kmitočet 2 kHz, hladina ak.
tlaku 60 dB(SPL)

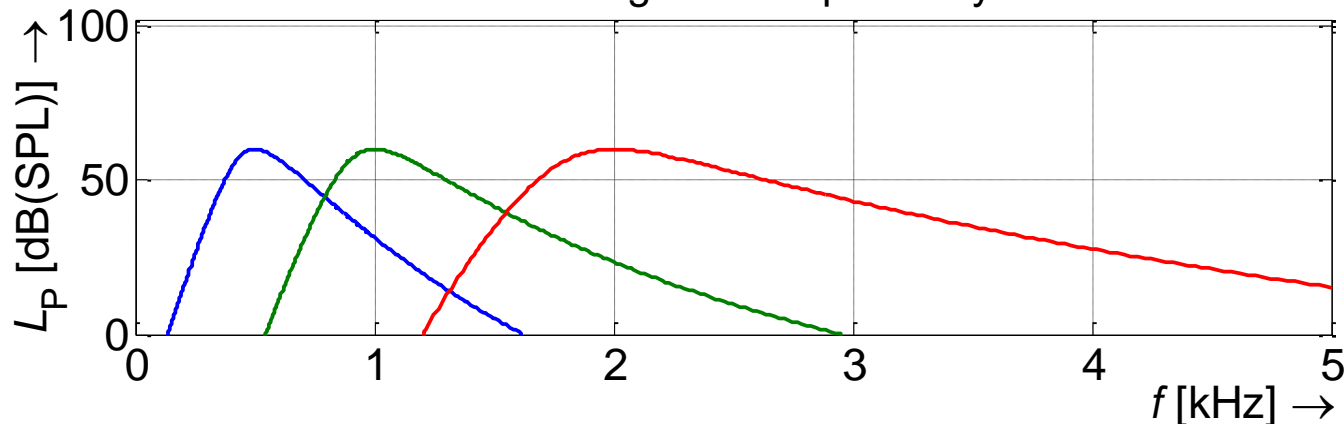
harmonický (tónový) signál

(MPEG psychoakustický model 2)

kmitočet 2 kHz, hladina ak. tlaku
60 dB(SPL)

Závislost maskovací křivky na kmitočtu a akustickém tlaku

maskovací signál: úzkopásmový šum



střední kmitočet

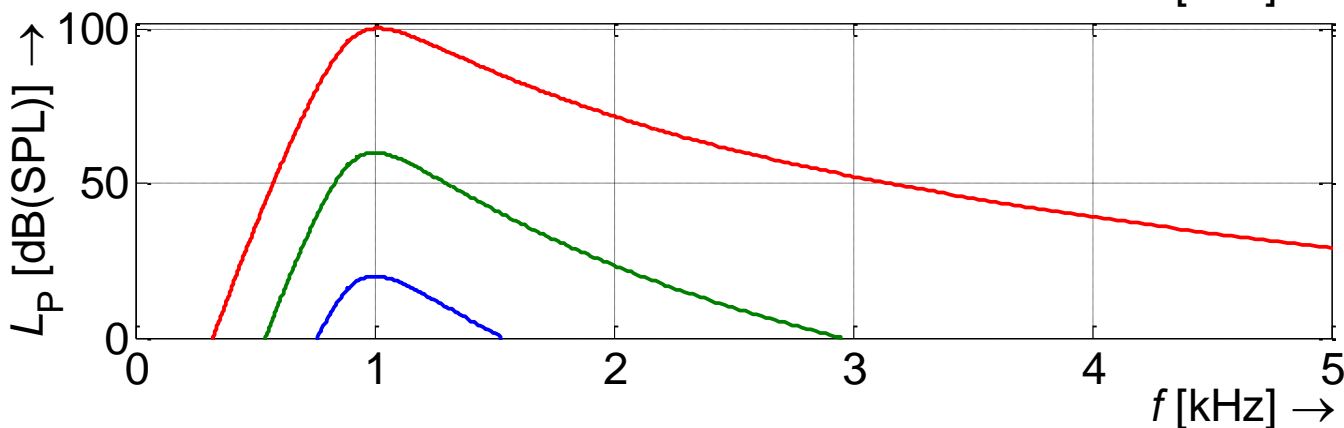
0,5 kHz

1 kHz

2 kHz

hladina ak. tlaku

60 dB(SPL)



střední kmitočet

1 kHz

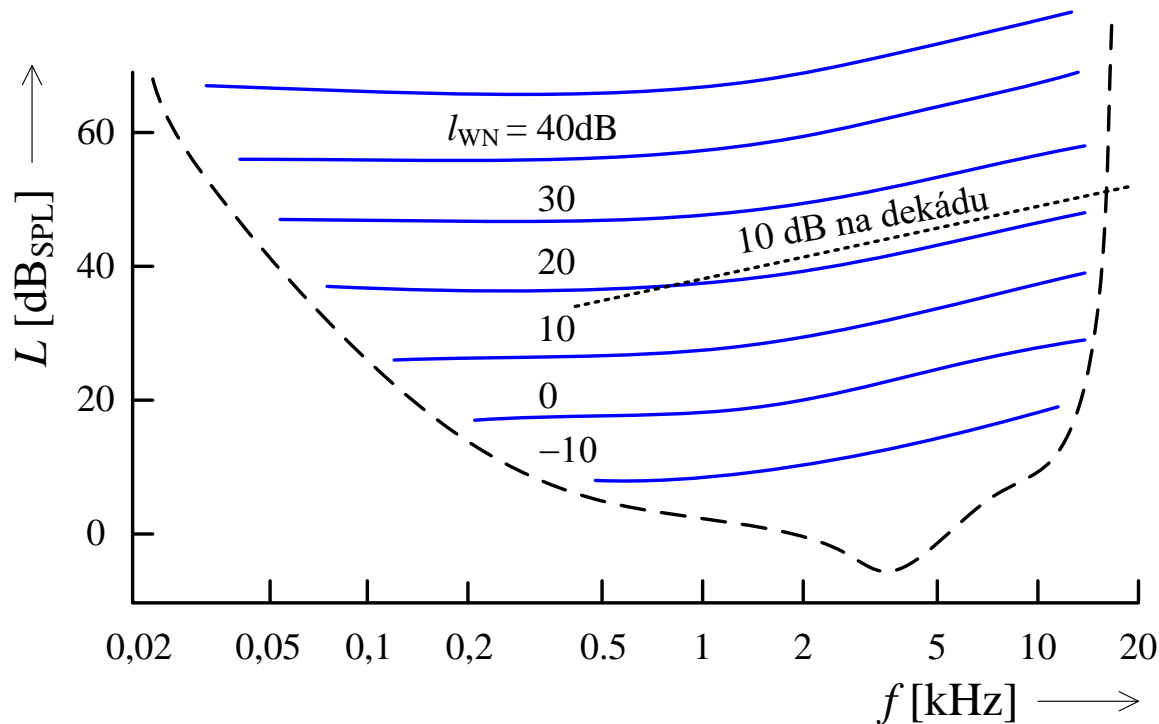
hladina ak. tlaku

100 dB(SPL)

60 dB(SPL)

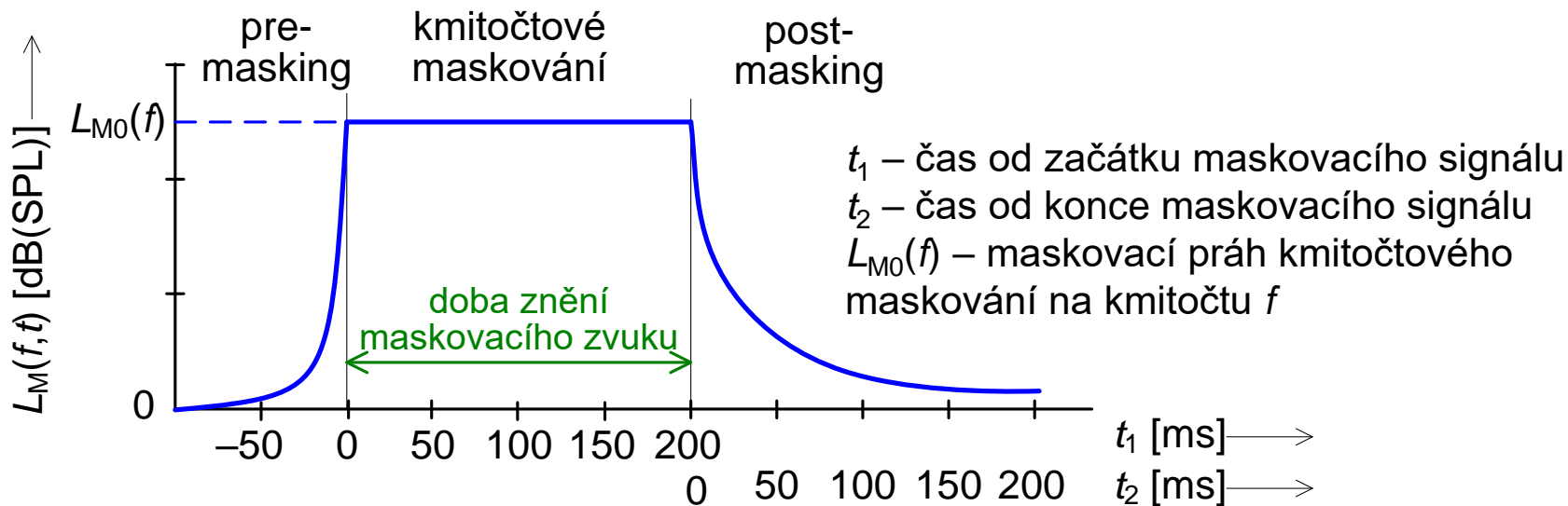
20 dB(SPL)

Kmitočtové maskování – širokopásmový šum



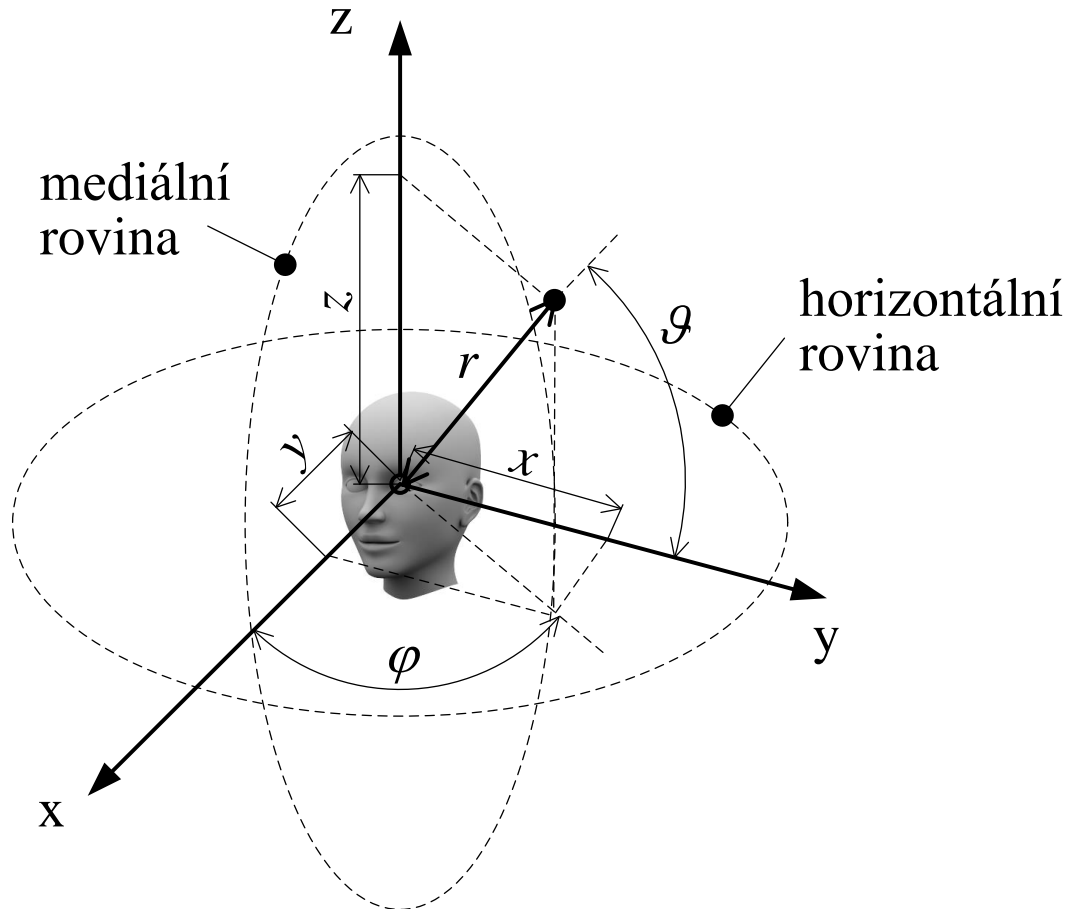
Dočasné maskování

- časově závislá změna maskovacího prahu kmitočtového maskování L_{M0}
 - post-masking*: maskovací jev po odeznění maskovacího zvuku
 - pre-masking*: maskovací jev před zazněním maskovacího zvuku



Lokalizace zdroje zvuku

Souřadnice podle hlavy posluchače

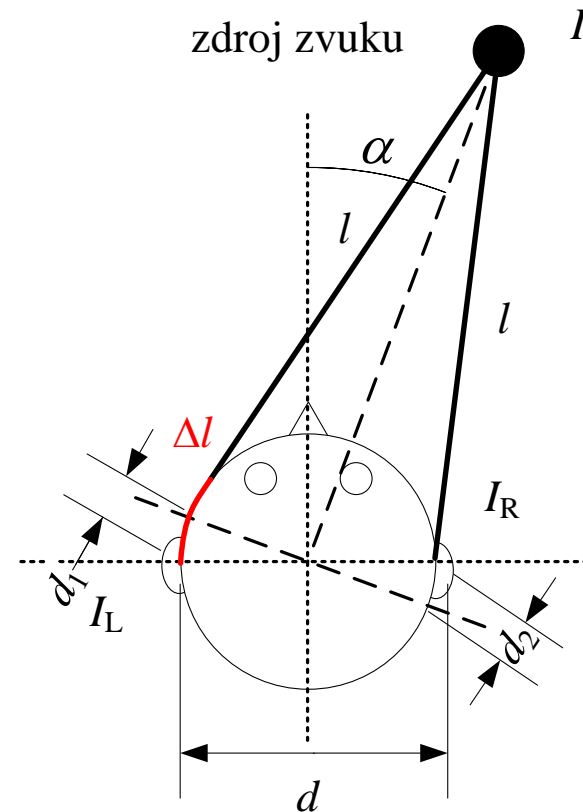


Interaurální diference

- Interaurální intenzitní diference (*Interaural Intensity/Level Difference, IID/ILD*).
- Interaurální časové diference (*Interaural Time Difference, ITD*).
- Binaurální rozdíl vzdáleností:

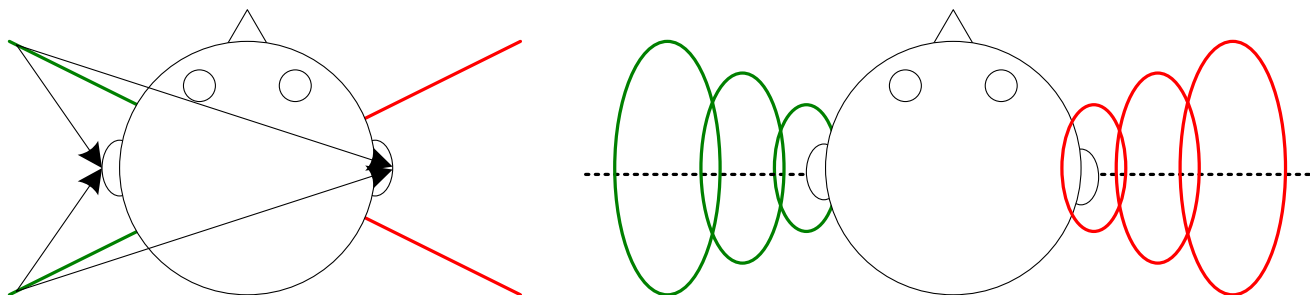
$$\Delta l = d_1 + d_2 = d \sin \alpha$$

- Zpoždění zvukového vlnění $29 \mu\text{s/cm}$.
- Rozdíl vzdáleností mezi ušima (15 cm) odpovídá vlnové délce zvukového signálu s kmitočtem asi 2300 Hz.



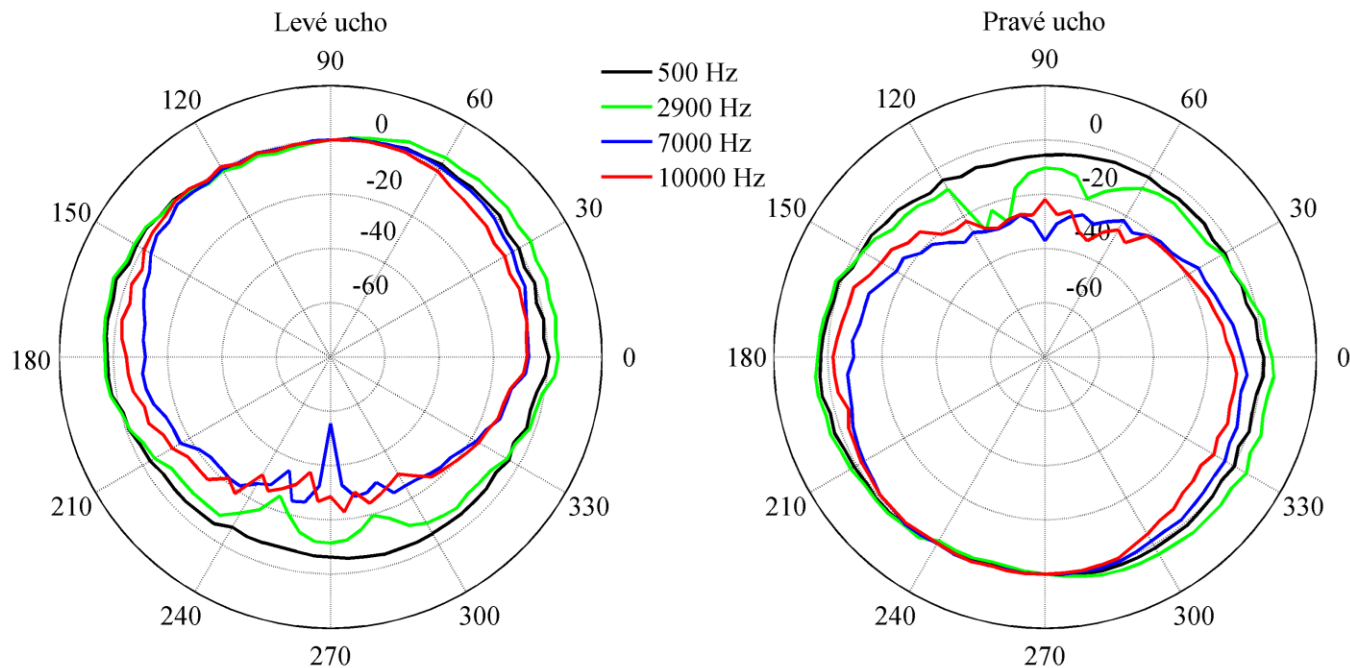
Kužel nejistoty

- Body se stejnou vzdáleností od obou uší leží na hyperbolách → pozice zdroje zvuku není pouze pomocí IID a ITD definována jednoznačně.
- Kužel nejistoty (*cone of confusion*): spojení bodů se stejným binaurálním rozdílem ve 3D prostoru.
- Pro určení pozice zdroje zvuku ve 3D prostoru jsou nutné další mechanismy analýzy sluchového vjemu.

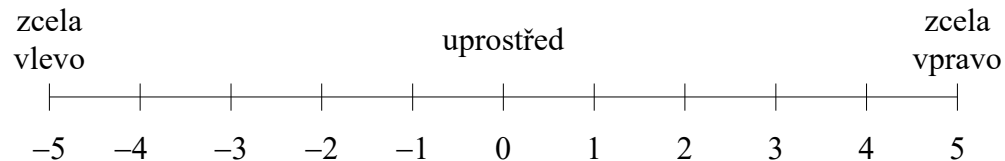
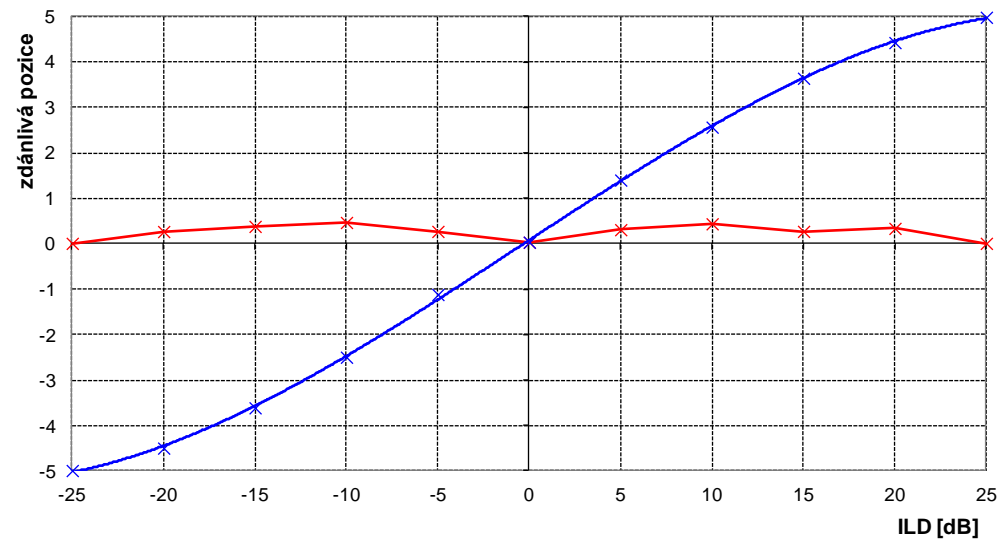
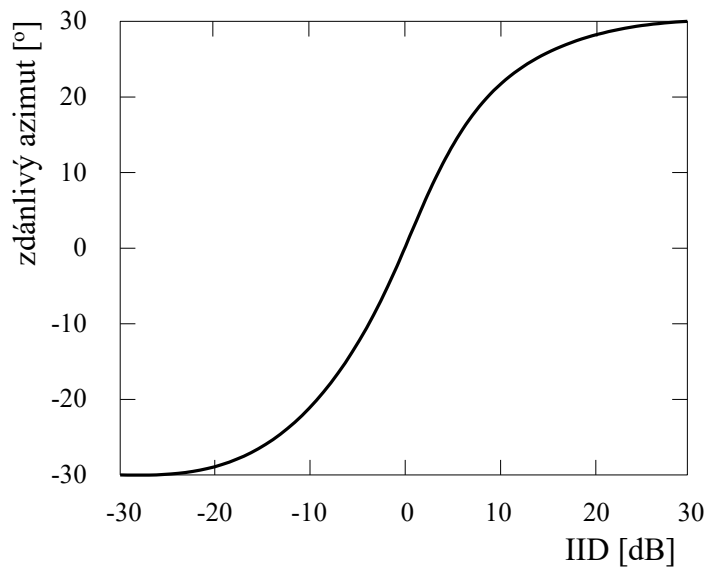


Interaurální intenzitní diference

- Kratší dráha zvukového vlnění = nižší útlum šířením (velmi blízké zdroje).
- **Akustický stín hlavy:** pro vyšší kmitočty, kde jsou rozměry hlavy větší než vlnová délka vlnění.

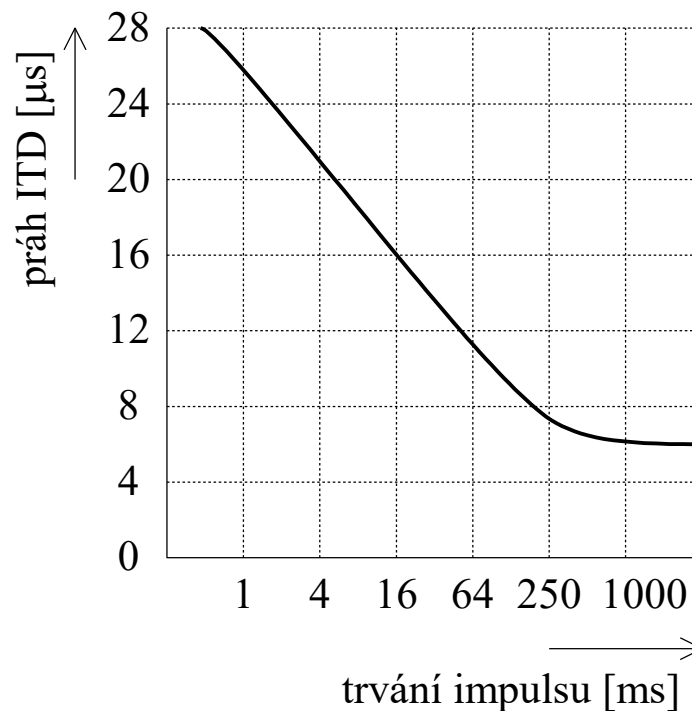


Interaurální intenzitní diference

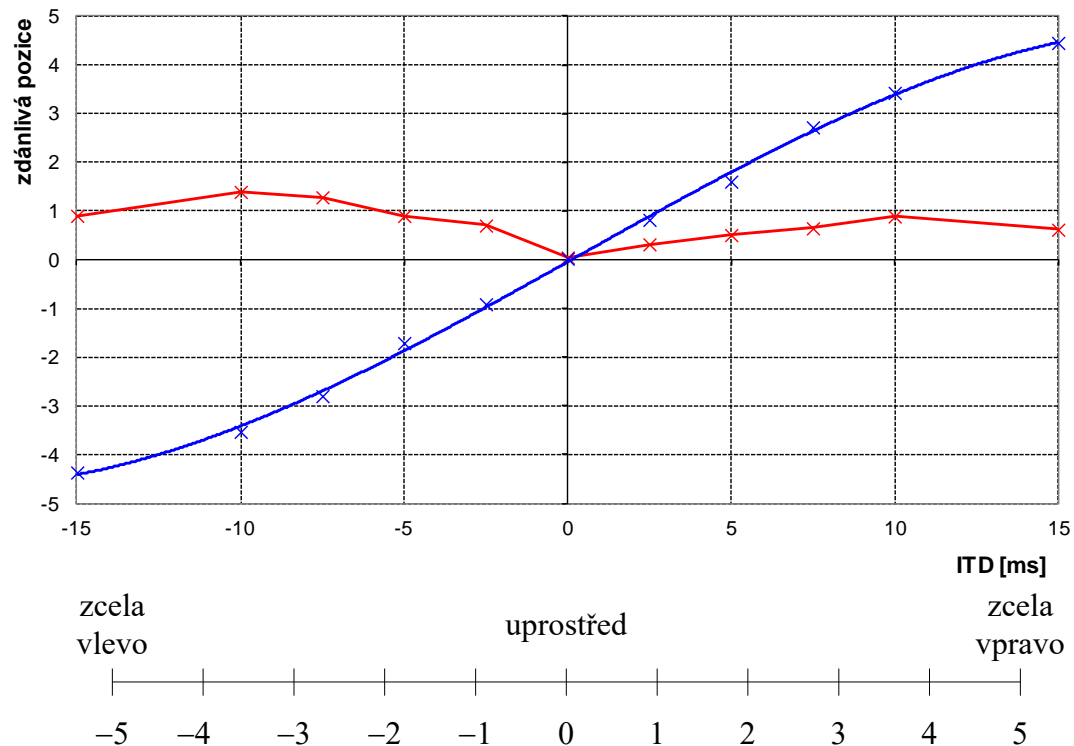
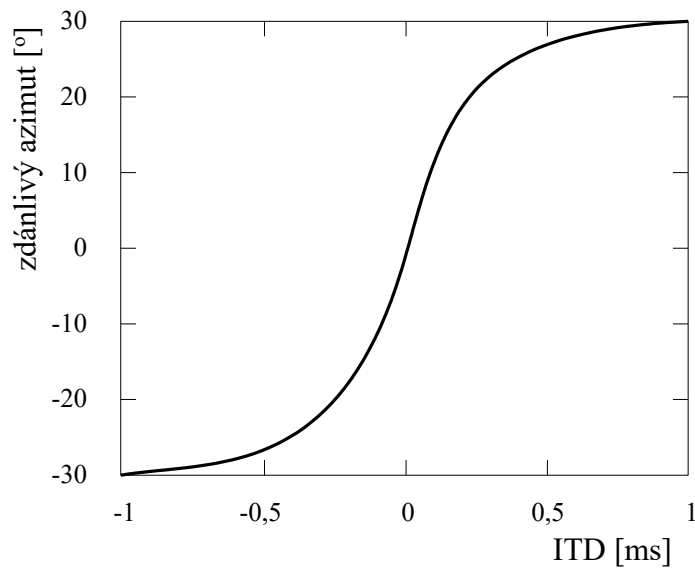


Interaurální časové diference

- Kratší dráha zvukového vlnění = zvuková vlna dopadne na jedno ucho dříve než na druhé.
- Pro harmonické signály znamená ITD fázový rozdíl (*Interaural Phase Difference, IPD*)
- Posune-li se vzájemně fáze zvuku dopadajících na obě uši, je zvuk vnímán na straně toho ucha, v němž fáze zvuku předbíhá.
- Posune-li se fáze více než o polovinu trvání periody, pak zvuk přeskočí do druhého ucha.
- ITD se projevuje u harmonických signálů do kmitočtu asi 800 Hz.

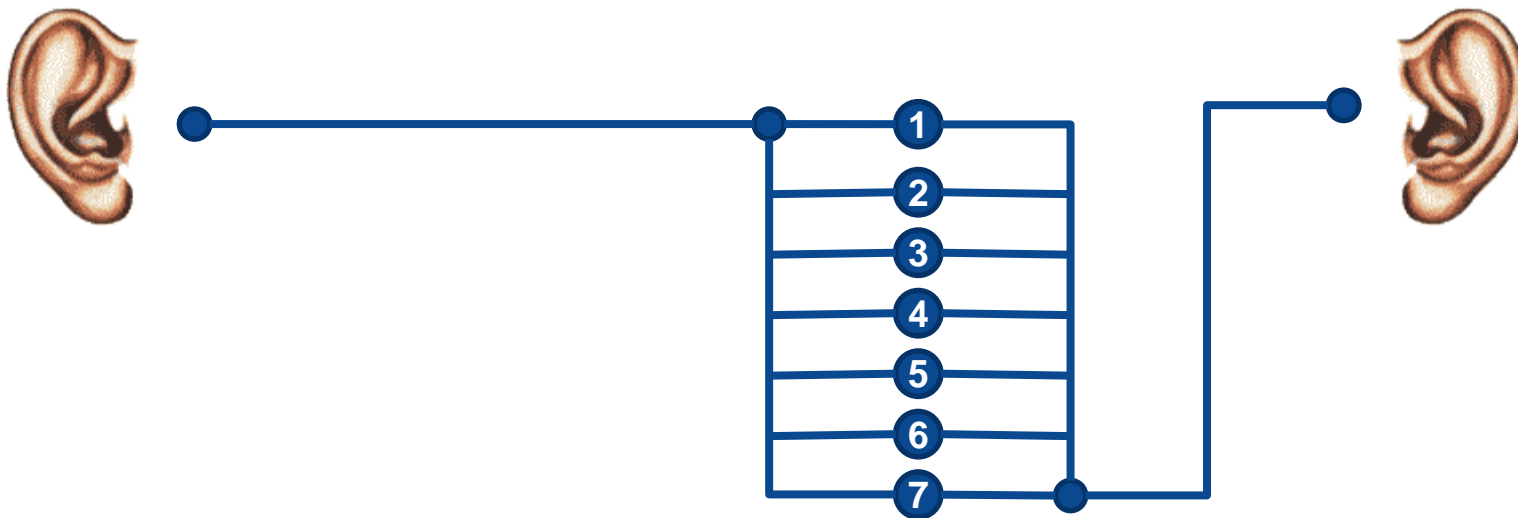


Interaurální časové diference



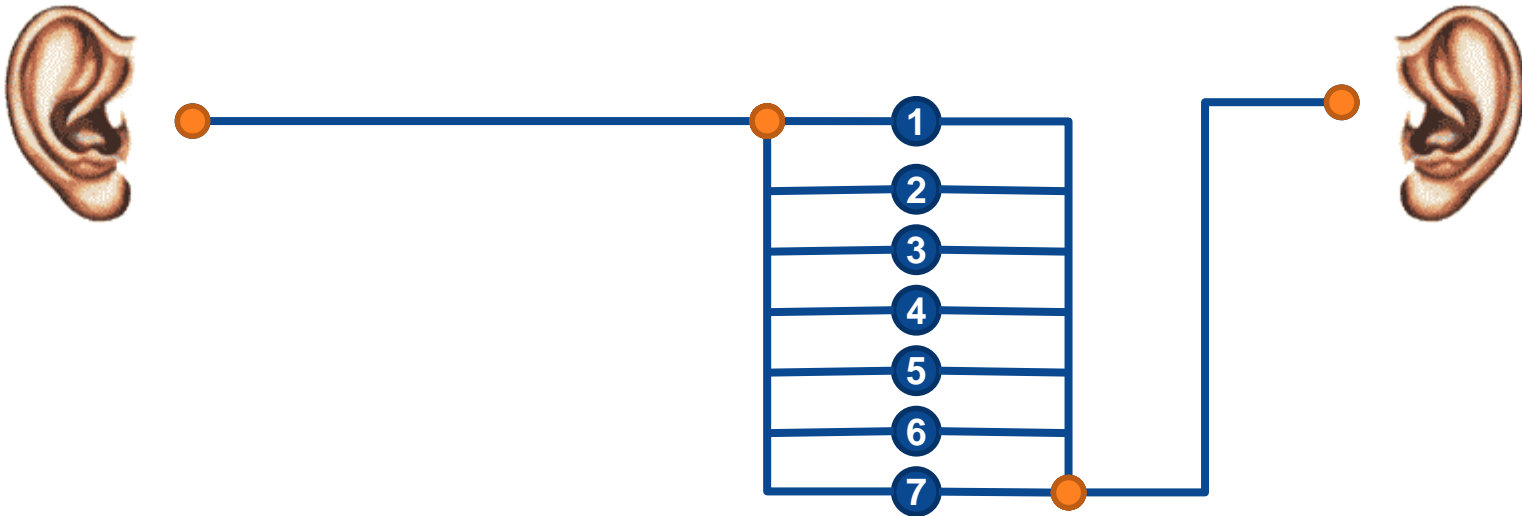
Zpracování interaurálních časových diferencí mozkiem

- **Jeffressův model:** zpožďovací linka a detektor shody.



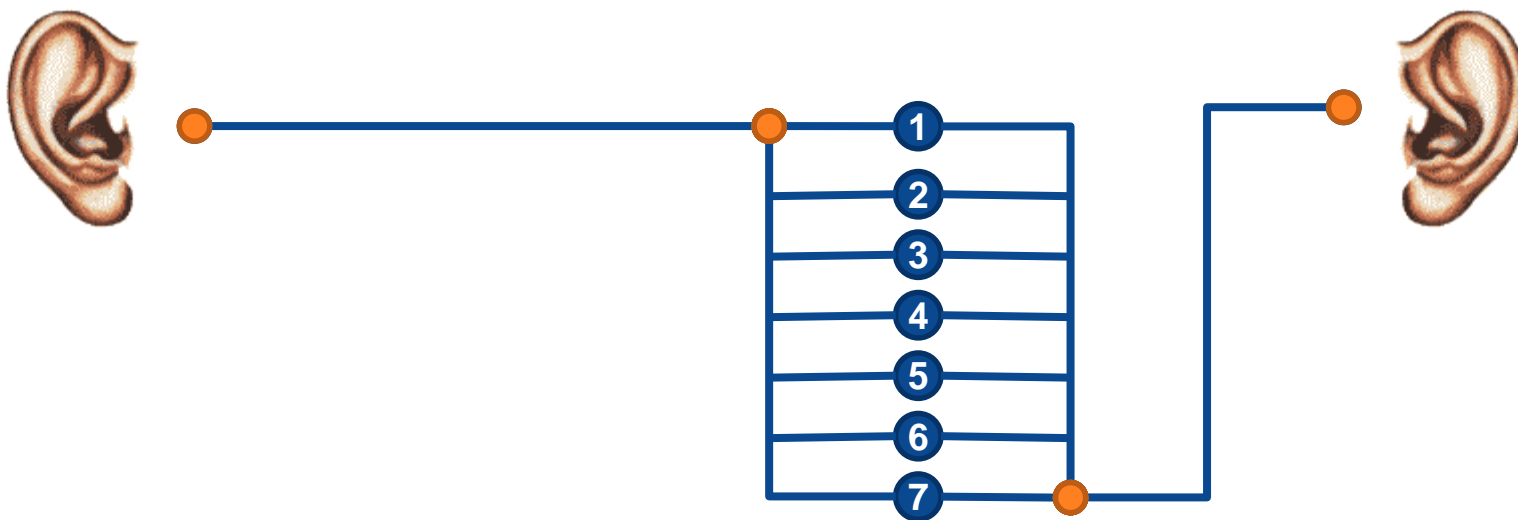
Jeffressův model

- Zvukové vlnění dopadající zepředu



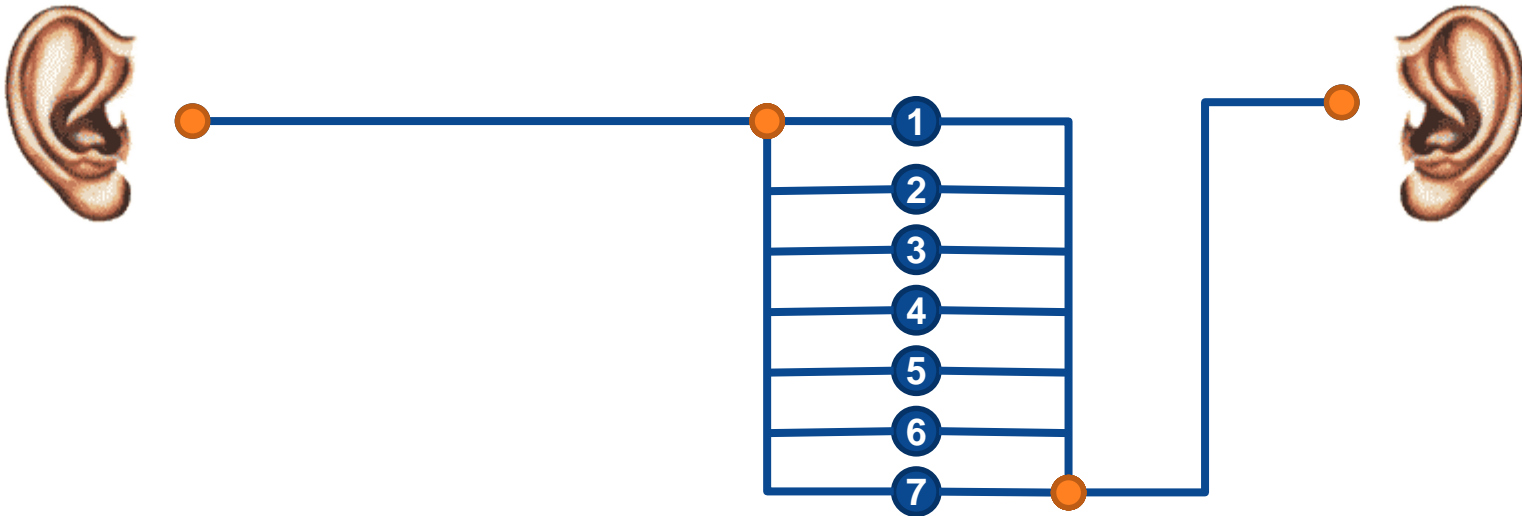
Jeffressův model

- Zvukové vlnění dopadající zleva.



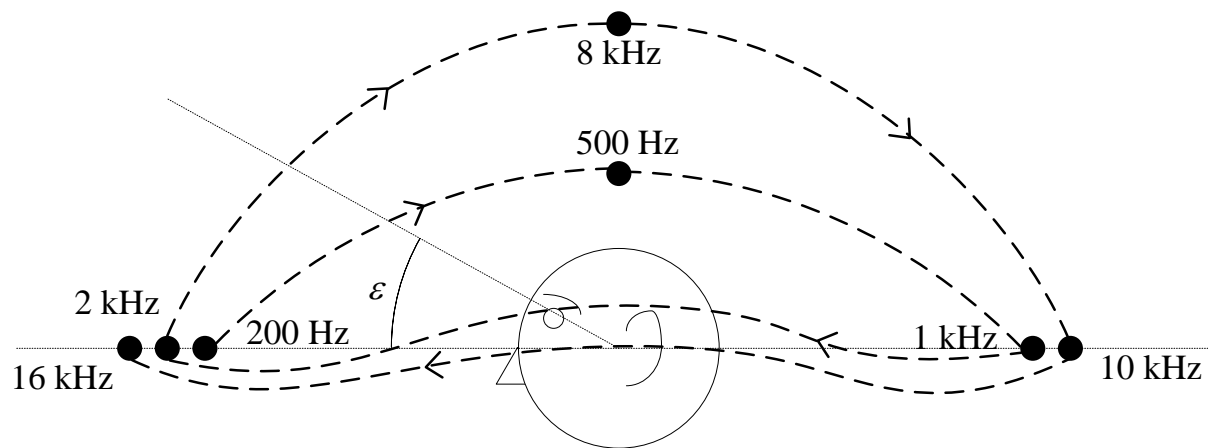
Jeffressův model

- Zvukové vlnění dopadající zprava.



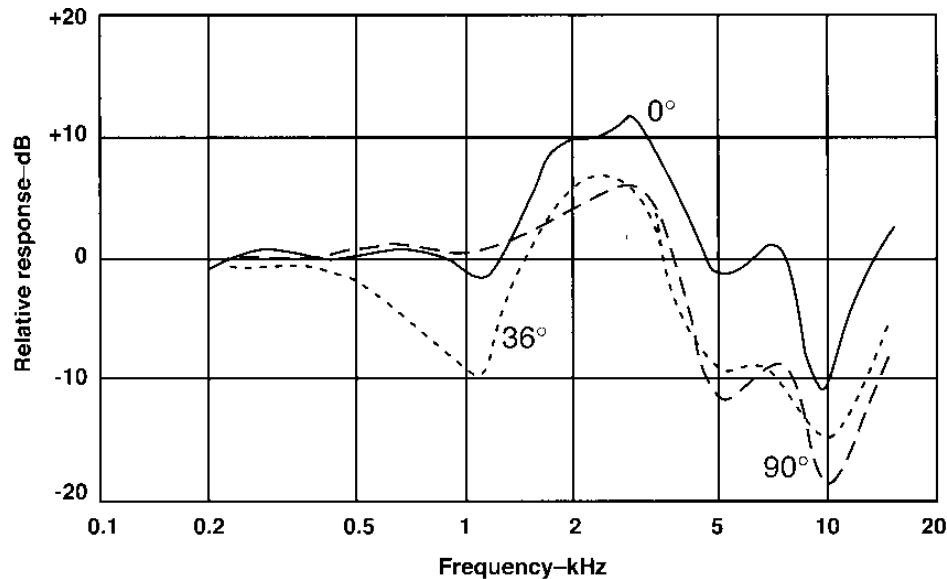
Lokalizace zvuku v mediální rovině

- **Lateralizace:** vnímání zvuku na spojnici mezi oběma ušima uvnitř hlavy.
- **Externalizace:** lokalizace zdroje zvuku vně hlavy.



Lokalizace zvuku v mediální rovině

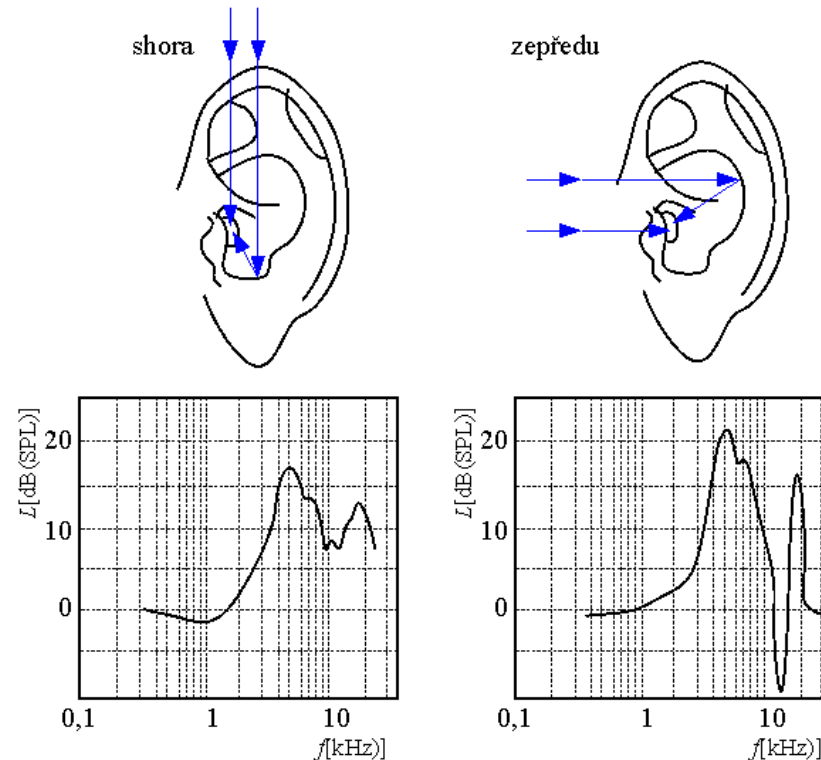
- Změny spektra na vyšších kmitočtech
 - akustický stín boltce
 - odrazy od ramen
 - odrazy ve vnějším uchu
- Pohyb zdroje zvuku
- Pohyby hlavou
- Odrazy zvuku v prostoru



Mehrgardt, S., Mellart, V. „Transformation characteristics of the external human ear“, *Journal of the Acoustical Society of America*, 61, 6/1977, s. 1567-1576.

Odrazy od boltce a ramen

- Odrazy od boltce:
 - akustický směrový filtr – pro každý směr se mění dráhový rozdíl původního signálu a signálu odraženého od vnitřní struktury boltce,
 - na bubínku se setkávají s různými fázovými posuny v závislosti na vlnové délce,
 - každému směru odpovídá jiný filtr,
 - pro různé směry vznikají lokální extrémy v části přenosové funkce.
- Odrazy od ramene: část odraženého signálu směřuje k boltci a sečte se se signálem přímým.



Algazi, R., Aveando, C., Thompson, D., Avendano, C., "CIPIC HRTF Database," in Proc. IEEE WASPAA'01, New Platz, NY, 2001, <http://interface.cipic.ucdavis.edu/>.

Lokalizace zvuku – shrnutí

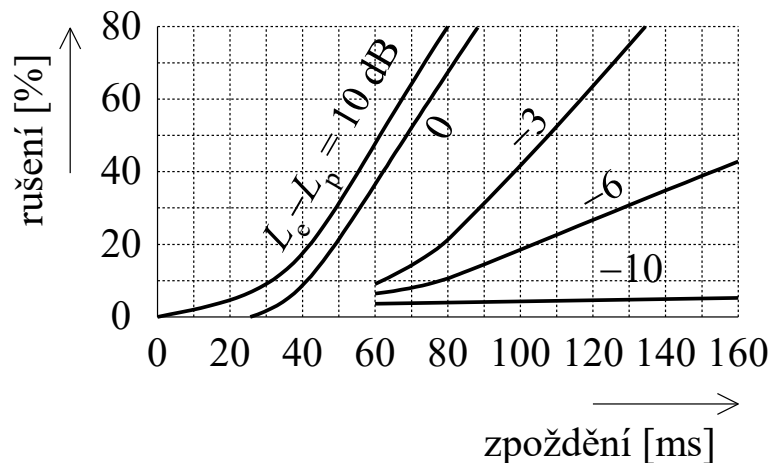
1. **Nízké kmitočty:** do kmitočtu 400, resp. až 700 Hz nepředstavuje hlava žádnou překážku – IID resp. ILD jsou zanedbatelné a o směru přicházejícího zvuku rozhodují ITD resp. IPD.
2. **Střední kmitočty:** pro signály od kmitočtu 400, resp. 700 Hz je vlnová délka signálu tak malá, že ITD resp. IPD nejsou nejdůležitějším faktorem, záleží spíše na IID resp. ILD způsobené akustickým stínem hlavy.
3. **Vysoké kmitočty:** u kmitočtů nad cca 5 kHz se projevují spektrální změny zvuku vlivem odrazů od ušních boltců.

Odhad vzdálenosti zdroje zvuku

- V bezodrazovém prostoru:
 - na základě znalosti intenzity zdroje zvuku – se vzrůstajícím kmitočtem vzrůstá útlum na jednotku délky
- V prostoru s odrazy:
 - na základě znalosti prostoru a analýzy impulsní odezvy prostoru

Jev priority

- Haasův efekt, efekt předstihu, precedence effect, law of the first wavefront
- Zvuková vlna, která dorazí k uchu první, převažuje při určování směru.
- Haasův experiment: přichází-li odraz k posluchači se zpožděním do 30 ms, posluchač směr odrazu nevnímá, odražený signál nepostřehne a zdroj zvuku určuje podle příchodu přímé zvukové vlny i tehdy, když hladina intenzity odražené vlny je o 7 až 10 dB vyšší než hladina intenzity přímé vlny.



Fyziologická a psychologická akustika