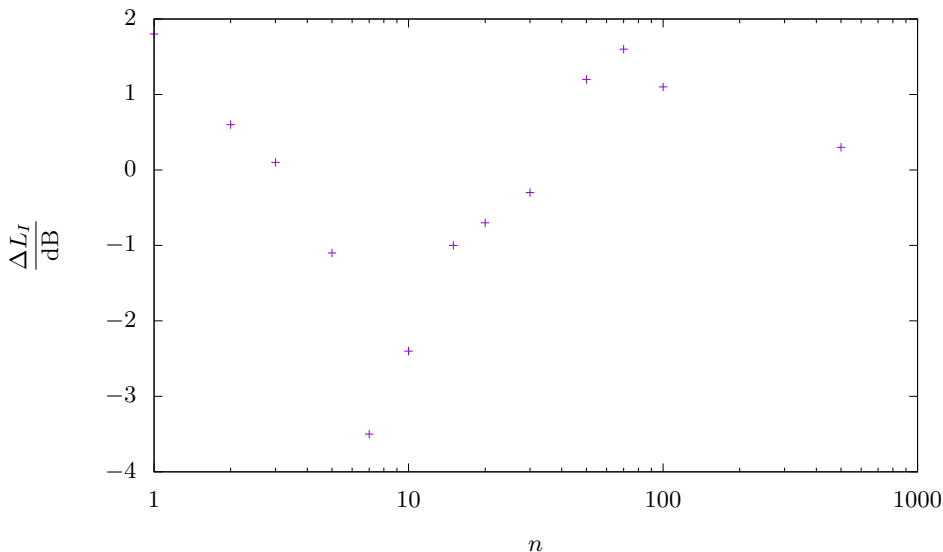


Úloha IV.E ... papírová izolační

12 bodů; průměr 9,32; řešilo 28 studentů

Změrte, jak moc dokáže papír stínit zvuk. K měření stačí použít např. mobilní telefon jako generátor zvuku a mikrofon v počítači jako detektor (Audacity). Použijte papíry různých druhů a tvarů. Michal přemýšlel, jak se zbavit nepříjemných zvuků, které vydával spolubydlící.



Obr. 1: Závislost rozdílu hlasitosti zvuku vůči referenční hladině na počtu listů papíru pro frekvenci 660 Hz. Osa x je logaritmická.

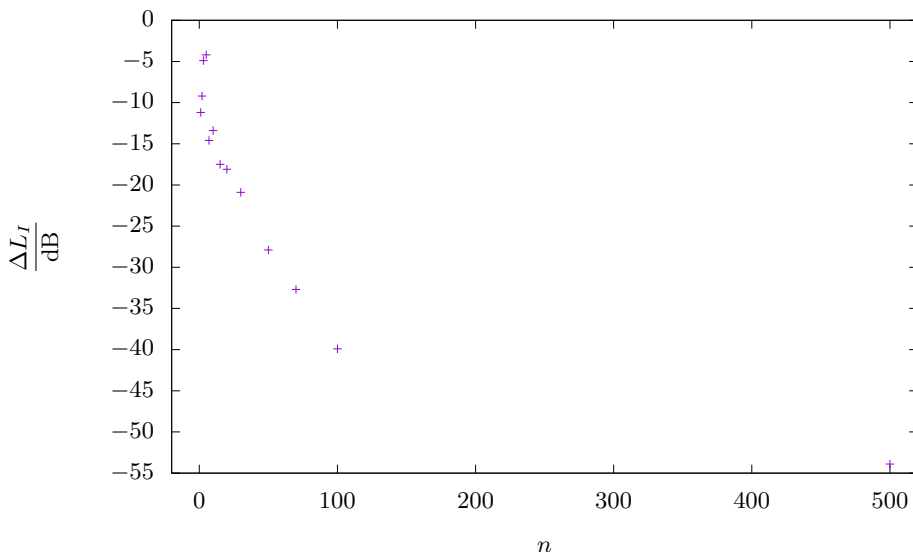
Teória

Dopadá-li zvuková vlna na rozhraní dvou materiálů (v našem případě vzduchu a papíru), část intenzity se odrazí zpět, zatímco zbytek projde. Následuje opačné rozhraní, přes které opět projde jen část intenzity. Vlnění, které se odrazí od druhého rozhraní, se ale ještě může částečně odrazit od prvního rozhraní a následně se může znovu pokusit projít druhým rozhraním.

Poměry jednotlivých intenzit závisí na materiálu a na frekvenci vlnění. Například kovy či sklo velkou část energie zvuku odrazí, zatímco přes rozhraní pórovitých materiálů většina energie projde. Závislost na frekvenci už tak jednoduchá není a u různých materiálů může být jiná.

Část energie zvuku je při průchodu prostředím pohlcena a přeměněna na teplo. Také tento jev závisí na frekvenci vlnění a na materiálu.

V tomto experimentu jsme použili dva druhy papírů – homogenní papír a lepenku, která se skládá z papíru a vzduchu. Klasický papír je i ve více vrstvách velmi tenký, proto lze útlum



Obr. 2: Závislost rozdílu hlasitosti zvuku vůči referenční hladině na počtu listů papíru pro frekvenci 8 500 Hz.

způsobený prostředím zanedbat. Jednotlivé listy však na sebe nedoléhají zcela přesně, takže výsledný blok papírů bude obsahovat vnitřní rozhraní, na kterých bude docházet k odrazům.

Každý další papír přidá dvě nová rozhraní a každé z nich má nějaký koeficient propustnosti. Výsledná propustnost bloku se tak s každým dalším papírem znovu vynásobí nějakým koeficientem. Z toho se dá usuzovat, že celková prošlá intenzita bude exponenciálně klesat s počtem listů papíru.

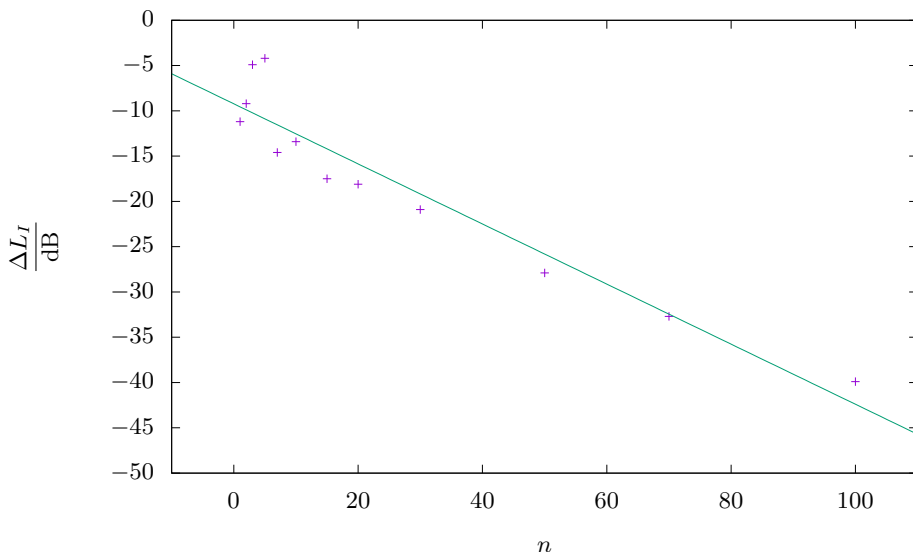
Lepenka se bude chovat podobně s tím rozdílem, že její tloušťka už nebude zanedbatelná a zřejmě tak bude docházet k pohlcování energie přímo v jednotlivých vrstvách lepenky. Lze ukázat, že i tento útlum probíhá exponenciálně¹

Papír zřejmě pohltí pouze tu část zvuku, která by procházela přímo přes něj. Zvuk je však způsoben vlněním a proto se může ohýbat okolo překážek. Ohyb je výrazný tehdy, pokud je vlnová délka srovnatelná s rozměry překážky nebo menší, což je v případě tohoto experimentu splněno. Vždy tak bude existovat nějaká minimální hladina zvuku, kterou bychom naměřili, i kdyby papír všechn zvuk odstínil.

Dále si musíme uvědomit, že veličina, kterou běžně vnímáme jako „hlasitost“, se ve skutečnosti jmenuje hladina intenzity a je definovaná vztahem

$$L_I = 10 \log_{10} \left(\frac{I}{I_0} \right),$$

¹https://en.wikipedia.org/wiki/Acoustic_attenuation



Obr. 3: Závislost rozdílu hlasitosti zvuku vůči referenční hladině na počtu listů papíru pro frekvenci 8 500 Hz bez hodnoty pro 500 listů, proložená lineární funkcí $f(x) = ax + b$.

Koeficienty fitu jsou $a = (-0,33 \pm 0,03)$ dB a $b = (-9,2 \pm 1,3)$ dB.

kde $I_0 = 1 \cdot 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ je nějaká minimální slyšitelná intenzita. Zvýšení hlasitosti o 10 dB tak odpovídá desetinásobnému zvýšení intenzity zvuku. Výše jsme odhadli, že závislost prošlé intenzity na počtu papírů bude exponenciální, neboli

$$I = Ae^{-an},$$

kde $A > 0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ a $a > 0$ jsou nějaké konstanty a n je počet listů papíru. Potom pro měřenou hlasitost dostáváme

$$L_I = 10 \log_{10} \left(\frac{A}{I_0} e^{-an} \right) = 10 \log_{10}(e) \left(\ln \left(\frac{A}{I_0} \right) - an \right) = B(1 - bn),$$

což je lineární funkce.

Postup pri experimente

Ako generátor zvuku sme použili mobilný telefón. Ako detektor zvuku bolo potrebné zvoliť citlivé zariadenie, preto sme použili hlukomer. Hlukomer meria intenzitu zvuku v decibeloch.

Generátor zvuku a hlukomer boli položené tak, aby vzdialenosť medzi nimi bola konštantná a zároveň nie príliš veľká, aby boli výsledky badateľne rozdielne.

Použili sme niekoľko druhov papiera, pričom sa menila veľkosť papiera, materiál, tvar a hrúbka. Každý papier bol vložený medzi generátor zvuku – ktorý generoval vždy rovnakú frekvenciu – a hlukomer. Pre každý papier sme previedli 3 merania, ktoré sú uvedené v tabuľke 1.

V druhé části experimentu jsme zvuk opět generovali pomocí mobilního telefonu, ale měřili jsme ho pomocí mikrofону a počítače. Použili jsme klasický kancelářský papír formátu A4 s plošnou hustotou $80 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$. Z důvodu velkého množství listů papíru byl experiment uspořádán vertikálně (nejníže zdroj, nad ním papíry a nahoře mikrofon). Vzdálenost mikrofónu a zdroje byla konstantní.

Výsledky merania

Generátor zvuku vysielal zvuk s frekvenciou 660 Hz. Vzdialenosť medzi generátorom zvuku a hlukomerom bola 16 mm. Bez tienenia zvuku papierom, hlukomer nameral priemernú intenzitu 90,6 dB so štandardnou odchýlkou $\pm 0,2$ dB. Štandardná odchýlka sa vypočíta podľa vzťahu

$$u = \sqrt{\frac{1}{N(N-1)} \sum_{i=1}^N (L_{Ii} - \bar{L}_I)^2},$$

kde pre jeden druh papiera N je počet meraní, L_{Ii} je tlmená hladina intenzity a \bar{L}_I je priemerná hodnota tlmenej hladiny intenzity. Namerané hodnoty su v tabuľke 1 spolu so štandardnou odchýlkou.

Tab. 1: Tlmenie zvuku rôznymi typmi papiera.

papier	$\frac{d}{\text{mm}}$	$\frac{S}{\text{cm}^2}$	L_I dB	\bar{L}_I dB	u dB	$\frac{\Delta \bar{L}_I}{\text{dB}}$	$\frac{u}{\text{dB}}$		
kriedový papier	0,12	623,7	86,9	85,5	86,9	86,4	0,5	4,2	0,6
dva kriedové papiere	0,215	623,7	85,4	84,8	84,9	85,0	0,2	5,6	0,3
hladká lepenka 1	0,597	603,8	84,9	84,3	84,6	84,6	0,2	6,0	0,3
hladká lepenka 2	0,327	621,6	85,6	85,1	84,7	85,1	0,3	5,5	0,4
dvě hladké lepenky 2	0,589	621,6	82,5	81,2	81,2	81,6	0,4	9,0	0,5
toaletný papier	0,123	107,0	89,8	89,5	89,6	89,6	0,1	1,0	0,3
dva toaletné papiere	0,197	107,0	88,4	89,3	89,4	89,0	0,3	1,6	0,4
tři toaletné papiere	0,28	107,0	88,2	88,4	89,0	88,5	0,2	2,1	0,3
lepenka 1	0,28	832,5	85,7	86,3	86,1	86,0	0,2	4,6	0,3
lepenka 2	0,538	832,5	81,8	82,3	83,7	82,6	0,6	8,0	0,6
hladká lepenka 3	2,116	700,8	71,0	72,2	68,0	70,4	1,2	20,2	1,2
hladká lepenka 4	0,703	275,1	85,9	84,5	85,3	85,2	0,4	5,4	0,5
vlnitá lepenka jednovrstvová	2,408	307,2	85,3	84,7	84,3	84,8	0,3	5,8	0,4
vlnitá lepenka dvojrvtvová	5,54	310,5	83,9	84,3	83,1	83,8	0,4	6,8	0,5

V druhém měření byla vzdálenost zdroje a mikrofónu přibližně 40 cm. Vzhledem k tomu, že nás zajímala závislost hlasitosti na počtu listů papíru, měřili jsme pouze rozdíl hlasitosti vůči referenční hladině intenzity, kterou jsme zvolili nulovou pro nula listů papíru. V tabulce 2 jsou výsledky měření pro frekvence 660 Hz a 8 500 Hz. Tyto hodnoty jsme dále vynesli do logaritmického grafu 1 a dále do grafů 2 a 3. V posledním jmenovaném grafu jsme zobrazili všechny hodnoty kromě poslední, abychom je mohli rozumně proložit lineární funkcí.

Tab. 2: Naměřené hodnoty rozdílu hlasitosti zvuku vůči referenční hladině pro různé počty listů papíru.

n	660 Hz	8 500 Hz
	$\frac{\Delta L}{\text{dB}}$	$\frac{\Delta L}{\text{dB}}$
1	1,8	-11,2
2	0,6	-9,2
3	0,1	-4,9
5	-1,1	-4,2
7	-3,5	-14,6
10	-2,4	-13,4
15	-1,0	-17,5
20	-0,7	-18,1
30	-0,3	-20,9
50	1,2	-27,9
70	1,6	-32,7
100	1,1	-39,9
500	0,3	-53,9

Diskusia

Z merania môžeme pozorovať, že rôzne papiere (typ, hrúbka, atď.) zvuk tlmili rôzne. Keď porovnáme tlmenú intenzitu jednou vrstvou daného materiálu s rovnakým materiálom ale dvojvrstvovým, tak dvojvrstvový materiál tlmil zvuk viac. Z meraní, kde sme menili počet vrstiev, môžeme povedať, že čím hrubší materiál, tým viac tlmí zvuk. Typ papiera hrá tiež veľkú rolu, ako sme sa presvedčili, lepenka tieni zvuk inak (lepšie) ako obyčajný papier. Je to preto, že zvuk je najlepšie pohlcovaný pórovitými materiálmi, obsahujúcimi vzduchové vačky (zvuk je v kontakte s časticami plynu, ktoré môže rozkmitať ľahko a odovzdať im viac energie ako časticiam pevnej látky). Z nášho experimentu pozorujeme, že rôzny obsah papiera má badaateľný vplyv na tlmenie zvuku až pri veľkých zmenách obsahu papiera. Odchýlky merania boli pri niektorých papieroch výraznejšie, avšak celkové pozorovanie neovplyvnili. Chyby merania vznikli kvôli nepresnosti hlukomeru, nepresnému umiestneniu papiera, použitiu všesmerového mikrofónu (čiže zachytával zvuk zo všetkých strán), všesmerovému zdroju zvuku a šumu okolia. Tieto chyby môžu byť (pri lepších podmienkach experimentu) odstránené použitím smerového mikrofónu a zdroju zvuku a izoláciou od okolitých zvukov.

Jak môžeme vidieť v tabuľke 2, pro frekvenci 660 Hz se hlasitost snížila maximálně o jednotky decibelů. Můžeme z toho usuzovat, že zvuk se velmi účinně ohnul kolem papírové překážky a snadno dorazil do mikrofónu, který byl navíc výrazně dál od papírů než v první části měření. Podle grafu 1 se navíc zdá, že jsme nenaměřili jen náhodné fluktuace kolem nuly, ale že je v datech nějaká pravidelnost. Pravděpodobně je to způsobeno nějakou netriviální interferencí zvukových vln, které se ohnuly kolem bloku papírů. Bohužel, výpočet difrakce vlnění na překážce není úplně snadnou záležitostí, takže naměřenou závislost nemůžeme podpořit teoretickým modelem.

Pro frekvenci 8 500 Hz už je situace o něco zajímavější. Vlnová délka zvuku vychází přibližně 4 cm, což je výrazně menší hodnota, než jsou rozměry papíru. Difrakce proto nehraje takovou roli a můžeme tak pozorovat skutečný útlum hlasitosti zvuku. Naměřené hodnoty sice nesedí zcela přesně na přímce, ale všechny hodnoty kromě poslední mají zřejmý lineárně klesající trend, což je v souladu s předpovědí našeho modelu. To je dobře vidět v grafu 3.

Rozdíl hlasitosti pro 500 listů papíru se nápadně vymyká předchozí závislosti, takže se zřejmě projevil nějaký jev, který jsme neuvažovali. Opět se nabízí vysvětlení pomocí difrakce vlnění. Ta sice měla výrazně menší vliv, než v případě pro 660 Hz, ale jelikož se propustnost bloku papírů neustále snižuje, musí proslá intenzita dříve či později klesnout pod hodnotu intenzity způsobené difrakcí. Potom už nebude počet papírů hrát žádnou výraznou roli, protože pokaždé naměříme podobnou minimální hodnotu difrakčního pozadí.

Vzhledem k tomu, že vlnová délka byla menší než výška pěti set listů papíru, se také mohly projevit ještě zajímavější jevy typu interference vlnění na jednotlivých rozhraních papírů.

Záver

Experimentálne sme overili teoretické predpoklady tienenia zvuku papierom, ktoré závisí na niekoľkých parametroch. Hrúbka papiera – hrubší papier tlmí zvuk lepšie, vrstvenie papiera – viac vrstiev pohlcuje zvuk lepšie, materiál papiera – rôzne druhy papiera tlmia zvuk rôzne. Obsah papiera ovplyvňuje tienenie zvuku, avšak až pri väčšom zmenšení obsahu je rozdiel badateľný.

Dále jsme zjistili, že při zanedbání difrakce a interference je útlum hlasitosti zvuku přibližně přímo úměrný počtu listů papíru, které k tomu použijeme. Pokud difrakci a interferenci nelze zanedbat, výsledky mohou být ještě daleko zajímavější.

Katarína Častulíková
katka.castulikova@fykos.cz

Jáchym Bártík
tuaki@fykos.cz

Fyzikální korespondenční seminář je organizován studenty MFF UK. Je zastřešen Oddělením propagace a mediální komunikace MFF UK a podporován Ústavem teoretické fyziky MFF UK, jeho zaměstnanci a Jednotou českých matematiků a fyziků.

Toto dílo je šířeno pod licencí Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported.
Pro zobrazení kopie této licence navštivte <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>.