

Josef Zahradníček

Katodový oscilograf v akustice

Časopis pro pěstování matematiky a fysiky, Vol. 67 (1938), No. Suppl., D205--D214

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/120787>

## Terms of use:

© Union of Czech Mathematicians and Physicists, 1938

Institute of Mathematics of the Academy of Sciences of the Czech Republic provides access to digitized documents strictly for personal use. Each copy of any part of this document must contain these *Terms of use*.



This paper has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ: The Czech Digital Mathematics Library* <http://project.dml.cz>

žáky z experimentálního stolu na vzdálenost 2 m při zastřené nejblíže okně. K el. skopu patří jeden menší a jeden větší dutý kulový vodič s otvorem, dále rovná kruhová deska, nad níž se pohybuje druhá deska, která je na děleném stojaně a tvoří tak s první deskou rozkladný kondensátor. Druhý pár desek je plošně čtyřikrát větší.

Netroufám si tvrdit, má-li celý naznačený postup výkladu nějakou výhodu proti obvyklému a jednoduchému způsobu dosavadnímu, ani sám pro sebe ho nepokládám za definitivní, lituji pouze, že jsem už na odchodu a nebudu moci tento nový postup vyzkoušet v další praxi.

Je s podivem, že se neobjevila kritika ani jedné ze tří nových učebnic fyziky (vyjma Wangler I.), jako by odborníci podceňovali tuto velkou, nesnadnou a zodpovědnou činnost spisovatelskou. Aspoň recensenti by měli vystoupit ze své rezervy, když nyní jsou učebnice delší dobu zavedeny a odpadají konkurenční obavy autorů.

---

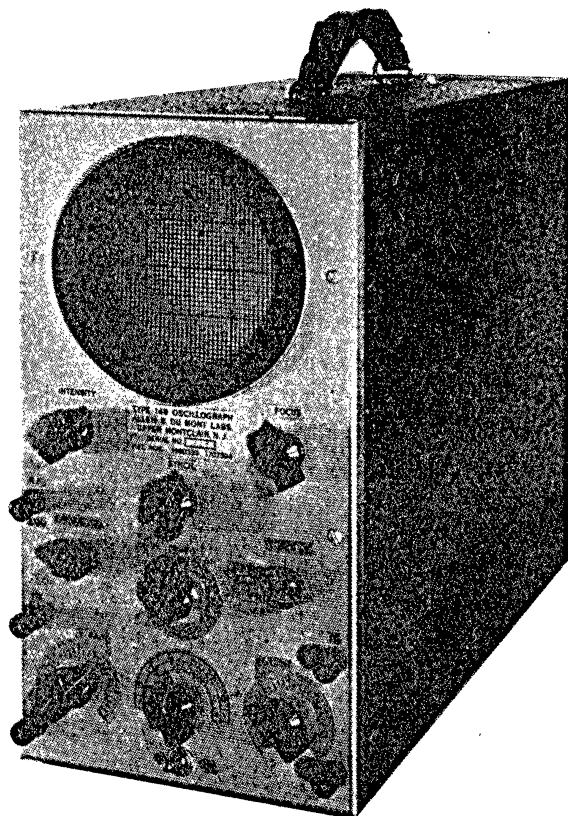
## Katodový oscilograf v akustice.

Josef Zahradníček, Brno.

V předešlém ročníku Časopisu (66, D 285) pojednal J. Šafránek o některých elektrických pokusech s katodovým oscilografem. V následujících řádcích chci promluvit o použití katodového oscilografu v akustice. Hned na počátku podotýkám, že všechny pokusy, obvykle v akustice konávané, je možno provést oscilografem katodovým a že je možno provést i mnohé pokusy jiné, které dosavadními prostředky nebylo možno konati, anebo bylo nutno použití experimentálních pomůcek příliš složitých a nákladných. V katodovém oscilografu má fyzika jeden z nejvděčnějších přístrojů, kterých je možno všestranně použít všude tam, kde jde o studium kmitů elektromagnetických nebo mechanických. Mám při tom na mysli úplný přístroj, t. j. katodový oscilograf obsahující Braunovu trubici se žhoucí katodou s příslušnými zesilovači a s generátorem kmitů pilovitých, ať už je to americký přístroj Du Montův (obr. 1), nebo přístroj Philipsův, Leyboldův, fy AEG anebo jiných značek.

Přístroj je zapjat na zdroj městského proudu střídavého 110 V, čímž jest obstaráno žhavení katody a anodové napětí pro Braunovu trubici, příslušná napětí pro zesilovače a pro rázový generátor. Na vstupní svorky přístroje připojíme zdroj střídavého napětí z okruhu mikrofónu, zachycujícího akustické kmity. Střídavé

napětí mikrofonového proudu na páru desek, mezi nimiž prochází svazek elektronových paprsků trubice Braunovy, budí kmit paprsků s amplitudou vertikální a tento kmit rozvineme časově ve směru vodorovném rázovým generátorem, jehož frekvenci na-

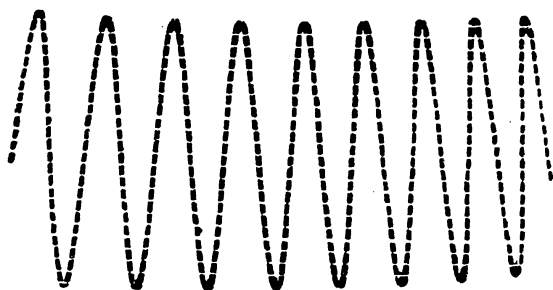


Obr. 1. Katodový oscilograf Du Montův.

stavíme proměnnou kapacitou tak, aby se shodovala s frekvencí kmitů mikrofonových. Tím dosáhneme synchronisace obojích kmitů a na stínítku Braunovy trubice průměru 7,5 cm resp. 12,5 cm objeví se příslušné křivky ustálené v sytě zeleném tahu, viditelném i za dne v místnosti nezatemněné.\*)

\*) Příslušná cena přístroje jest asi 2000 resp. 4000 Kč podle druhu přístroje.

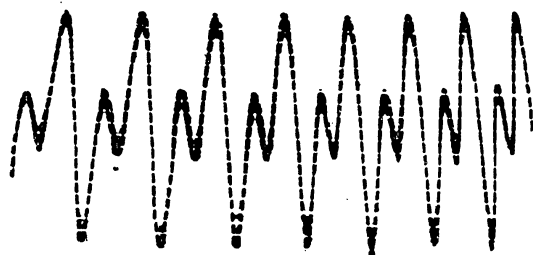
Přijímačem čili detektorem akustických kmitů je v následujících případech mikrofon v různé úpravě, obvykle Reissův s uhlovým práškem a s uhlovou membránou, který je postaven buď volně v prostoru, anebo jest umístěn v trubici, a to buď pevně na př. na jednom konci interferenční trubice Quincke-Stefanovy, anebo je v posunovatelném pístu na př. v rezonátoru. Je vhodné mít po ruce několik mikrofonových sond v různé úpravě — cena jedné vložky mikrofonové jest asi 25 Kč (Ericson). Mikrofon je zařazen se zdrojem 4 V (suchá baterie) do primární cívky mikrofonového transformátoru a cívka sekundární je zapjata na vstupní svorky katodového oscilografu, t. j. na jeden pár desek kondensátoru Braunovy trubice. Svazek elektronových paprsků koná pak kmity, odpovídající frekvenci a amplitudě mikrofonového proudu a tedy zachycovaného zvuku. Katodovým oscilografem možno studovat cestou jednoduchou a rychlou frekvenci, intenzitu a formu zachycovaných kmitů za předpokladu, že mikrofon zachycuje akustické kmity věrně, nezávisle na frekvenci a intenzitě kmitů.



Obr. 2. Jednoduchý kmit ladičky.

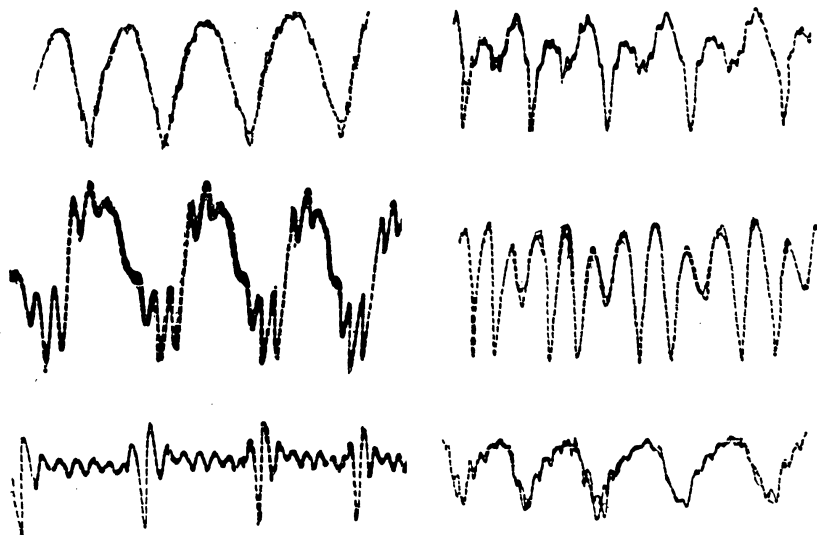
Katodovým oscilografem můžeme studovat kmity akustických zdrojů, ať jsou to struny, tyče, blány, desky, píšťaly nebo zdroje elektroakustické — tlampač a pod. Podle formy křivky ustálené na fluoreskujícím stínítku — po dosažení synchronisaci — seznáme, jde-li o zdroj monotónový, jakým je na př. ocelová ladička, jemně uhozená plstěným kladívkem na okraji ramene (obr. 2), nebo jde-li o zdroj polytónový na př. strunu, píšťalu a pod. V kmitu struny poznáme vedle základního tónu ještě aspoň oktávu (obr. 3), v kmitu retné píšťaly poznáme na oscilogramu první i druhý vrchní tón, v kmitu píšťaly jazýčkové je patrné několik tónů z bohatého mnohočarého spektra jazýčku. Zvláště složité jsou kmity samohlásek, které se dají pěkně předvésti i pro větší posluchárnu najednou, anebo zachytit fotograficky (obr. 4). Kteroukoli složku z akustického spektra zdroje můžeme vybrat válcovým rezonátorem, jehož sloupec ladíme posuvnou sondou

mikrofonovou, spojenou se vstupními svorkami oscilografu. Frekvence jednotlivých kmitů určíme z frekvence normální, na př. z normálů ladičkových nebo píšťalových, ze známých rozměrů jejich vln na stínítku. Možno ovšem měření frekvence provést i cestou jinou.



Obr. 3. Kmit struny, dávající primu a oktávu.

Zdroje zvukové budící hluk dávají akustické spektrum spojitě v určitém oboru, jak se můžeme přesvědčiti pomocí resonátoru při analýze zvuků, buzených na př. motorem vysavače, nebo souhláskami rrrr . . . , sssss . . . a pod.



Obr. 4. Kmity samohlásek: i, u, e, o, a, y.

Podle amplitudy kmitů, zachycených na stínítku oscilografu, můžeme posuzovati intenzitu tónu, pokud jde o kmity netlumené; jsou-li pak kmity tlumené na př: vlastní kmity ladičky, možno

z časového průběhu amplitudy souditi na útlum kmitů. I fázový rozdíl dvou kmitů můžeme určit z formy křivek; mikrofon posunujeme na různá místa v okolí zdroje a sledujeme proměnnost křivek od případu, kdy fázový rozdíl je nulový, kdy nabude maxima a kdy opět klesne na nulu.

Katodový oscilograf, podávající kmitu časově rozvinuté a ustálené, hodí se zvláště dobře pro studium akustických spekter zdrojů po všech jmenovaných stránkách, a to i v těch případech, kdy experimentátor nemá hudebního sluchu a odborných vědomostí hudebních. Tlaková sonda akustická s muším křídélkem, blána se zrcátkem a citlivý plamen jsou vlastně integrální detektory zvukové, které připouštějí sice také časový rozklad kmitů na př. Wheatstoneovým zrcadlem anebo na běžící film, ale tato metoda je buďto málo přesná, anebo zdlouhavá a nákladná oproti katodovému oscilografu.

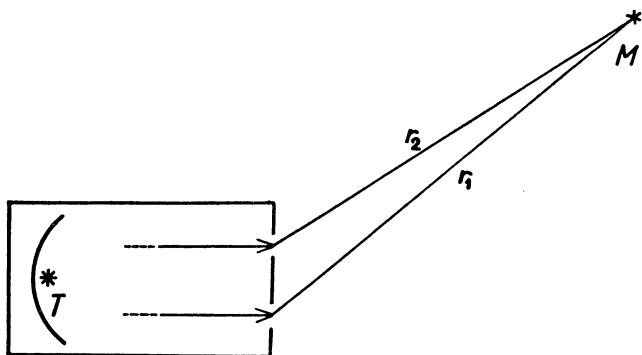
Katodovým oscilografem možno zkoušeti úkazy v akustickém poli, a to přímočaré šíření, případně ohyb, odraz, lom, dispersi, absorpci, interferenci. Jako zdroj zvuku volíme retnou píšťalu s kmitočtem řádu  $10^2$  resp.  $10^3$  hertzů — píšťalu s proměnnou ozvučnou anebo akustický oscilátor, jehož podstatou jsou periodické výboje kapacity neonovou lampou. Kapacita řádu  $10^3$  cm nabíjí se ze zdroje stejnosměrného proudu o napětí 120 V přes velký odpor řádu megohmu a vybíjí se lampou neonovou, když napětí na kapacitě vzroste na zápalné napětí lampy. Počet těchto proudových nárazů v sekundě mění se s odporem a kapacitou. Vysilač a přijímač akustických kmitů umístíme na experimentálním stole ve vzájemné vzdálenosti asi metru. Je-li mezi zdrojem a přijímačem volný prostor, ukážeme přímočaré šíření nebo odraz zvuku na zrcadle na př. desce dřevěné nebo skleněné rozměrů 30 cm × 30 cm a pod. Přijímač můžeme umístit v ohnisku parabolického zrcadla, užívaného obvykle při pokusech s tepelným zářením, a podobně i vysilač, který může být nahrazen tlampačem s kuželovitou ozvučnou. Podle amplitudy křivek na stínítku oscilografu poznáme, kdy přijímač dostává ze zdroje maximum energie. Těmito pokusy snadno zjistíme, kterým směrem šíří se z daného zdroje na př. z píšťaly, tlampače a pod. maximum zvukové energie.

Čím je frekvence vyšší a tedy délka vlny kratší, tím více se projevuje přímočaré šíření zvukové energie; čím delší jsou vlny, tím více energie dostává se k přijímači ohybem.

Při demonstraci odrazu zvuku musí být vzdálenost mezi zrcadlem a zdrojem vln tak volena, aby se na zrcadle vytvořil uzel stojatých vln. Snadno se přesvědčíme, že i množství energie mikrofonem přijaté závisí na vzdálenosti mikrofonu od zrcadla — mikrofon je detektor tlakový a maximum energie přijímá v uzlech vln.

Jednoduchým způsobem dá se ukázati odraz zvukových vln na rozhraní dvou plynných prostředí na př. na horkém vzduchu, vystupujícím nad rozžhaveným drátem nebo plechem, nebo nad rovinnou řadou plamének plynových, zapálených nad vodorovně položenou trubicí asi 50 cm dlouhou, a pod. Zdrojem zvuku je tlampač a přijímačem je mikrofón v ohnisku parabolického zrcadla.

Nebudu zde popisovat pokus o lom zvuku na př. ze vzduchu do vody nebo obráceně, nebo lom čočkou, vytvořenou na př. v drátěné formě z peří; i tyto pokusy dají se pěkně provésti mikrofónem ve spojení s oscilografem, a to daleko jednodušeji, než



Obr. 5. Ohyb zvuku dvěma štěrbinami.

s použitím jiného detektoru ať citlivého plamene nebo zvukového radiometru. Uspořádáním v předešlém odstavci popsaným dá se ukázati lom ze vzduchu do prostředí řidšího (teplý vzduch) a úplný odraz.

Zvláště jednoduchý a přesvědčivý je pokus, kterým ukážeme ohyb zvukových vln na mřížce. Pokusy v následujícím popsané mají rozhodně přednost před těmi pěknými pokusy, které uvádí Pohl\*) ve své „Akustice“, kde detektorem zvuku jsou jemné torsní vážky.

Vhodnou ohybovou mřížku akustickou se dvěma štěrbinami vytvoříme ze skřínky dřevěné rozměrů 50 cm × 40 cm × 35 cm, v jejíž nejmenší stěně jsou dva otvory 7 cm × 13 cm ve vzájemné vzdálenosti 15 cm. Ve skřínce jest umístěn tlampač *T*, dávající vysoký tón o frekvenci asi  $3 \cdot 10^3$  per/sec. Mikrofón *M* spojený s oscilografem je ve vzdálenosti asi 1 m od mřížky a přijímá v poloze nulové maximum energie z obou otvorů (obr. 5). Mikrofón posunujeme po experimentálním stole tak, aby byl stále stejně vzdálen

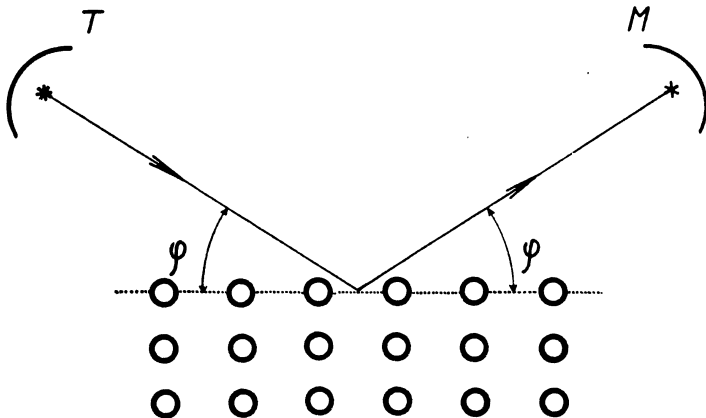
\*) R. W. Pohl, *Mechanik und Akustik*, 224, Berlin 1930. Viz též H. Bouasse, *Acoustique générale*, 406, Paris 1926.

od středního bodu mřížky, a zjistíme polohy, v nichž přijímá maximum resp. minimum energie. Počtem se přesvědčíme, že pro polohy maxim a minim platí známý vztah

$$r_1 - r_2 = d \sin \alpha = 2k\lambda/2 \text{ resp. } (2k + 1) \lambda/2, \quad k = 0, 1, 2, 3, \dots,$$

z čehož možno určití délku vlny zaznívajícího tónu. Přikryjeme-li v maximum nebo v minimum jeden z otvorů, poznáme vliv toho na křivce oscilografu. Konstanta mřížky je v našem případě  $d=22$  cm.

Ohyb na prostorové mřížce (obr. 6), vytvořené na př. z dřevěných koulí průměru 4 cm (nebo z kotoučků s průměrem 4 cm



Obr. 6. Ohyb zvuku na prostorové mřížce.

a tloušťky 2 cm), rozložených pravidelně ve vzájemné vzdálenosti 15 cm, možno též ukázati katodovým oscilografem, a to tak, že vysílačem je tlampač s konickou ozvučnou, vysílající rovinné vlny, a přijímačem je mikrofon, upevněný v ohnisku parabolického zrcadla. Mřížka je krychlová o celkové straně 60 cm. Mřížku nastavíme do úhlu  $\varphi$  vůči přijímači a vysílači a měníme kmitočet oscilátoru tak, až detektor ukazuje maximum. Měřením jednotlivých veličin se přesvědčíme, že je splněna rovnice Braggova

$$2d \sin \varphi = 2k\lambda/2, \quad k = 1, 2, \dots,$$

kde  $d = 15$  cm je konstanta mřížky, t. j. vzdálenost rovin, osazených hmotami,  $\lambda$  délka vlny zaznívajícího tónu (řádu  $10^3$  per/sec) a  $\varphi$  úhel odlesku, t. j. doplněk úhlu dopadu na roviny mřížkové. Tyto pokusy s akustickou mřížkou prostorovou, t. j. selektivního odrazu na hmotách pravidelně rozložených usnadní žákům pochopení ohybových zjevů Röntgenových paprsků na krystalových mřížkách. V obojím případě jde o odraz na hmotách pravidelně rozložených v rovinách rovnoběžných. Paprsky odražené na jednotlivých rovinách zesilují se jen tehdy, je-li splněn horní vztah.



Jako doplněk ke mřížce prostorové je vhodné uvést mřížku rovinnou, t. j. s jedinou vrstvou koulí nebo kotoučků, na níž se odrazí poměrně malé množství dopadající energie vyjma ten případ, kdy úhel odlesku je malý. V tom případě jde o dopad na hmotu jakoby souvislou, odraz je nezávislý na úhlu dopadu.

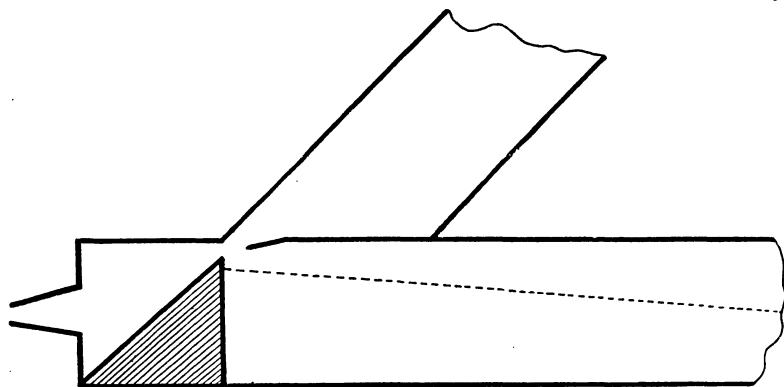
Je-li rozhraní osazeno hmotou nepravidelně rozloženou, vzniká rozptyl energie dopadající, t. j. odraz se děje do různých směrů a v různých intenzitách.

Je-li mezi vysilačem a přijímačem zvuku překážka, takže zvuk se dostává ze zdroje k přijímači jen po průchodu onou překážkou, můžeme z amplitudy křivek na stínítku oscilografu určit absorpci oné látky, a to v závislosti na jakosti a tloušťce látky a na frekvenci. Při těchto měřeních je mikrofon umístěn v trubici nebo ve skřínce svrchu popsané; jedna stěna skřínky je tvořena absorbující látkou: dřevo, plst atd. Koeficient průzvučnosti látky, t. j. poměr mezi hodnotou energie dopadající na přijímač přímo ( $E_0$ ) a po průchodu látkou ( $E_p$ ), tedy  $p = E_p/E_0$  je důležitou akustickou konstantou látky vedle koeficientů odrazu  $r$  a absorpce  $a$  obdobně definovaných. Součet těchto tří koeficientů je roven 1 podle zákona o zachování energie. Tyto konstanty hmot jsou důležité pro stavební akustiku, ať jde o zvukovou izolaci jednotlivých místností mezi sebou a hlavně od ulice a o t. zv. dobu dozívání řeči, zpěvu nebo hudby v síních společenských ať koncertních nebo divadelních nebo chrámových.

Mikrofonem s katodovým oscilografem dá se studovat rozdělení energie v akustickém poli kteréhokoli zdroje. Tak na př. na různých místech posluchárny, ve které zaznívá retná píšťala, poháněná elektrickým foukadlem, nalézajícím se ve vedlejší místnosti (otvorem ve zdi je veden proud vzduchu z foukadla kaučukovou hadicí) dá se určit z formy kmitu fázový rozdíl mezi primou a oktávou zaznívajícího tónu a odtud délka vlny resp. kmitočet resp. rychlost zvuku ve vzduchu. Mikrofonovou sondou dá se též určit hustota toku zvukové energie z daného zdroje na př. píšťaly nebo tlampače v různých směrech.

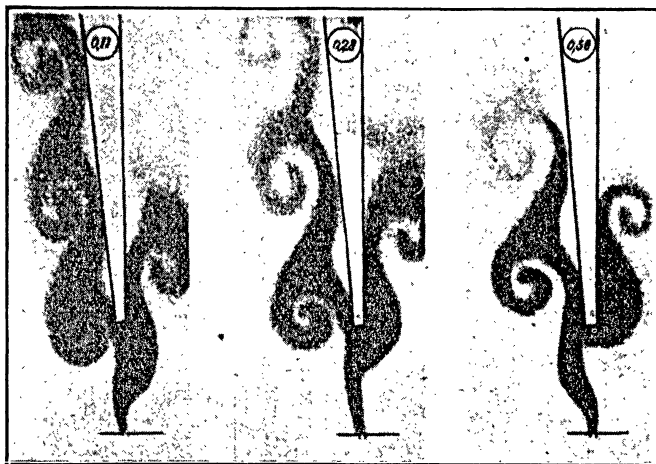
U retné píšťaly možno na př. touto cestou snadno ukázat, že kmity, vznikající po obou stranách hrany rtu, jsou proti sobě fázově posunuty o půlvlnu. Stačí jen kmity, šířící se od rtu do vnějšího prostoru, zachytit obdobnou trubicí, jako jest ozvučna (obr. 7) a mikrofon posunovat od konce hlavní ozvučny ke konci ozvučny vedlejší. Kdežto v blízkosti jednoho nebo druhého konce je na oscilografu velká amplituda zachycovaných kmitů, klesá ve střední poloze mikrofonu kmitová amplituda na minimum. Stačí pak v této poloze mikrofonu vložit stínítko mezi konec jedné z ozvučen a mikrofon a amplituda kmitů narůstá. Tento pokus doplňuje fotografie Carrièreovy (1925), pořízené na píšťale 15 m dlouhé v oboru subakustickém (obr. 8).

Interferenci dvou řad postupných vln zvukových ukážeme trubicí Quincke-Stefanovou, a to v té úpravě, že na jednom volném konci interferenční trubice zasuneme mikrofonovou sondu, druhým



Obr. 7. Píšťala retná s prostorem vnitřním a vnějším.

volným koncem, který jest opatřen kuželovitým nástavkem, vnikají zvukové vlny k mikrofonu. Měníce délku jedné větve trubice, ukážeme maxima případně minima interferencí vznikající.



Obr. 8. Víry v píšťale retné podle Carrièrea.

Zdroj zvuku a interferenční trubice s mikrofonem jsou při tom na experimentálním stole vzájemně vzdálené asi metr.

Je-li mikrofon na jednom konci válcovitého rezonátoru s proměnnou délkou, můžeme laděním rezonátorového sloupce vybrati

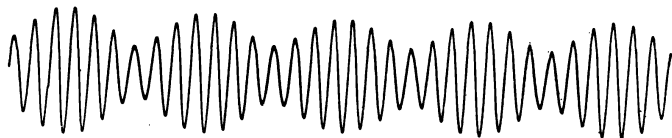
ze zachycovaného zvuku tón, jehož délka vlny  $\lambda$  je s délkou resonujícího sloupce  $d$  ve vztahu

$$d = \delta + (2k - 1) \lambda/4, \quad k = 1, 2, 3, \dots$$

Při tom je  $\delta$  otvorová korekce resonátoru, kterou určíme ze dvou měření pro  $k$  a  $k + 1$ .

Řadou proměnných resonátorů spolu spojených můžeme „filtrovat“ zachycený zvuk tak, že z něho vybereme jen určitý obor, případně jen určitý tón. Jednoduchý filtr akustický sestavíme z trubice asi 1 metr délky a 3 cm průměru, k ní jsou kolmo ve stejných vzdálenostech připojeny trubice vedlejší asi 25 cm délky a 2,5 cm průměru, které jsou opatřeny pohyblivými pístkami na př. dřevěnými. Na jednom konci hlavní trubice je nasunut mikrofon, na druhém konci je kuželovitý nástavek na zachycení zvuku. Ze složitého kmitu jazýčkové píšťaly vyloučíme laděním akustického filtru libovolné kmity, mikrofon zachytí jen určitý tón, jak se přesvědčíme na stinitku oscilografu.

Skládání kmitavých pohybů stejnosměrných možno provést tak, že jedním mikrofonem zachycujeme kmity, vysílané současně ze dvou zdrojů na př. píšťal. Touto cestou možno též ukázati rázy případně diferenční tón, vydávaný dvěma krátkými píšťalkami



Obr. 9. Diferenční tón dvou Galtonových píšťalek.

blízkého kmitočtu (obr. 9). Skládání dvou kmitů vzájemně kolmých ukážeme tak, že sekundární cívkou dvou mikrofonových okruhů připojíme na oba páry zkřížených elektrod katodového oscilografu. Zachycují-li oba mikrofony též tón, je možno z formy Lissajousovy křivky určití buď rychlost zvuku ve vzduchu, nebo délku vlny zaznívajícího tónu. Pro výchylky elektronového svazku platí

$$x = a \sin 2\pi nt, \quad y = b \sin 2\pi n (t - d/c).$$

Pro  $d/c = kT/4$  přechází Lissajousova křivka v přímku. Je-li  $c$  známo, určíme ze vzdálenosti obou mikrofonů kmitočet  $n = 1/T$ .

Uvedenými pokusy nejsou vyčerpány možnosti pro použití katodového oscilografu v akustice. Uvážíme-li, že i v elektřině je možno tohoto přístroje všestranně použítí, je vskutku nejvyšší žádoucí, aby naše střední školy měly tento přístroj ve svých sbírkách. Cena 2000 Kč je jistě mnohonásobně vyvážena hodnotou tohoto vzácného přístroje.

*Fysikální ústav Masarykovy university.*