

Josef Zahradníček

Akustická měření Rayleighovou deskou

Časopis pro pěstování matematiky a fysiky, Vol. 60 (1931), No. 3, 183--191

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/123940>

Terms of use:

© Union of Czech Mathematicians and Physicists, 1931

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>

Akustická měření Rayleighovou deskou.

Josef Zahradníček.

(Došlo 31. srpna 1930.)

Důležitou metodou pro měření intenzity zvukového pole je metoda Rayleighovy desky, spočívající na faktu, že deštička svisle zavěšená v poli zvukových vln se stáčí do směru k paprskům kolmému.¹⁾ Podle Rayleigha jest intenzita zvuku definována množstvím energie, procházejícím v jedné sekundě plochou 1 cm^2 ve směru k paprskům kolmém t. j.

$$J = \frac{1}{2} \rho c u_0^2,$$

kde ρ je specifická hmota prostředí, c rychlost zvukových vln v prostředí a u_0 amplituda rychlosti.²⁾

E. Grimsehl³⁾ sestrojil na této myšlence fonometr, jehož podstatou byla Rayleighova deštička zavěšená na tenkém vlákně v kmitně rezonátoru, jehož délka byla na pevném konci měněna. Tímto zařízením studoval Grimsehl závislost úchytky jednak na vzdálenosti zdroje od rezonátoru, jednak na tlaku vzduchu, jímž byla píšťala rozezvučena. Rayleighovu deštičku umístil Grimsehl v rezonátoru proto, aby na deštičku nepůsobily proudy vzduchové, a z toho důvodu přepažil ještě volný konec rezonátoru kaučukovou blanou. Měření Grimsehlova jsou jen relativní, teorie desky Rayleighovy v té době známa nebyla.

¹⁾ Lord Rayleigh, Phil. Mag. 14, 186, 1882, Theory of sound 2, II., 43, London 1896.

²⁾ Časová střední hodnota kinetické energie jest

$$E = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{1}{2} m u^2 dt, \quad m = \rho c, \quad u = u_0 \sin \omega t$$

t. j.

$$E = \frac{1}{2} \rho c u_0^2,$$

což je polovina úhrnné energie J .

³⁾ Wied. Ann. 34, 1028, 1888.

Hodnotu otáčivého momentu, kterým je deska Rayleighova stáčena do polohy ke směru paprsků kolmé, vyšetřil W. König.⁴⁾ Vyšel od rotačního elipsoidu, zavěšeného v proudu ideální kapaliny a svírajícího svou osou se směrem proudu úhel ϑ . Proudící kapalina působí na elipsoid otáčivým momentem, jehož hodnota jest

$$M = Cu^2 \sin 2\vartheta,$$

kde konstanta C závisí jednak na kapalině, jednak na rozměrech elipsoidu. Poněvadž hodnota otáčivého momentu M závisí na čtverci rychlosti kapaliny, platí svrchní vztah i pro proud střídavý

$$u = u_0 \sin \omega t;$$

nutno jen zavést

$$u^2 = \frac{u_0^2}{2}.$$

Je-li tloušťka desky zanedbatelně malá proti poloměru, jest hodnota konstanty C podle Königa

$$C = \frac{4}{3} \rho r^3,$$

kde ρ je specifická hmota kapaliny, r poloměr desky.⁵⁾ Maximum otáčivého momentu je pro $\vartheta = 45^\circ$.

Otáčivý moment desky

$$M = D\alpha$$

dá se určit z „direkční síly“ závěsu D a úhlu stočení α , případně z momentu setrvačnosti Θ a doby kyvu T

$$D = \frac{4\pi^2}{T^2} \Theta.$$

Je patrné, že z těchto veličin jest možno určit intenzitu akustického pole a to absolutně; při tom jest výhodno, že údaje desky Rayleighovy jsou nezávislé na frekvenci akustických vln. Použití desky je jen omezeno podmínkou

$$r < \lambda/2\pi,$$

kde λ je délka nejkratší vlny přicházející při měření v úvahu; s rostoucím poloměrem desky pozměňuje se akustické pole, jehož intenzita má býti měřena.

Při měření účinku akustických kmitů na vhodné resonátory užil též Lebeděv⁶⁾ desky Rayleighovy a to stejně jako Grim-

⁴⁾ Wied. Ann. 43, 43, 1891.

⁵⁾ Korekce na tloušťku desky e jest

$$- 0,2977 \frac{e}{2r}$$

⁶⁾ Ann. d. Phys. 62, 158, 1897.

sehl s resonátorem. Podobně učinil i W. Zernov,⁷⁾ který v laboratoři Lebeděvově obral si za úkol zkoušetí Königovu teorii desky; našel dobrý souhlas mezi teorií a experimentem.

Jak již bylo uvedeno, mělo spojení Rayleighovy desky s resonátorem ten účel, aby byly odstraněny rušivé vlivy na desku působící, jednak též aby byla resonátorem zvýšena citlivost desky. Maximum účinku na desku je v kmitně resonátoru. Takové úpravy experimentální užíli při akustických měřeních: W. Rihl,⁸⁾ H. Lichte,⁹⁾ G. W. Stewart.¹⁰⁾

Königova teorie desky Rayleighovy platí v tom případě, je-li deska (s vhodným průměrem $2r < \lambda/\pi$) v akustickém poli volně zavěšena opodál takových těles, která by akustickou intenzitu na daném místě pole buď zeslabovala, nebo zesilovala, zkrátka měnila, tak že pole je pak v daném místě jiné, než by tam bylo bez přítomnosti oněch těles. Je-li v prostoru pevnými stěnami úplně uzavřeném a zvukonosným prostředím vyplněném akustický zdroj na př. ladička a vhodný detektor zvukových vln na př. Rayleighova deska, jest rozdělení energie v akustickém poli přibližně takové, jaké by tam bylo bez detektoru, jsouc jen nepatrně pozmeněno. Každý přijímač vln mění silové pole, jehož intenzitu má zjistiti nebo změřiti.

Je-li Rayleighova deska v resonátoru na př. válcovém, jsou údaje její jiné, než by byly bez resonátoru, jímž rozdělení energie je pozmeněno, a jsou dále závislé na té okolnosti, jak dobře je resonátor na příslušné vlny naladěn. Tyto otázky chceme řešiti v následujících řádcích.

První otázka souvisí s rozdělením rychlosti v resonátoru. Rychlost je maximální v kmitně, minimální v uzlu stojaté vlny. Jde-li o resonátor na jednom konci otevřený, na druhém s pevnou stěnou, naladěný na čtvrtvlnu dané frekvence, jest rozdělení rychlosti podél jeho délky od maxima k minimu vystiženo funkcí

$$u = u_0 \cos \frac{2\pi x}{\lambda}.$$

Na volném konci resonátoru $x = 0$ je maximum rychlosti $u = u_0$, na konci pevné $x = l = \lambda/4$ je minimum rychlosti $u = 0$. Podle toho, na kterém místě v resonátoru $0 \leq x \leq \lambda/4$ se deska nalézá, jest její údaj t. j. výchylka z rovnovážné polohy dána vztahem

$$a = K \cos^2 \frac{2\pi x}{\lambda},$$

⁷⁾ Ann. d. Phys. 26, 79, 1908.

⁸⁾ Ann. d. Phys. 36, 647, 1911.

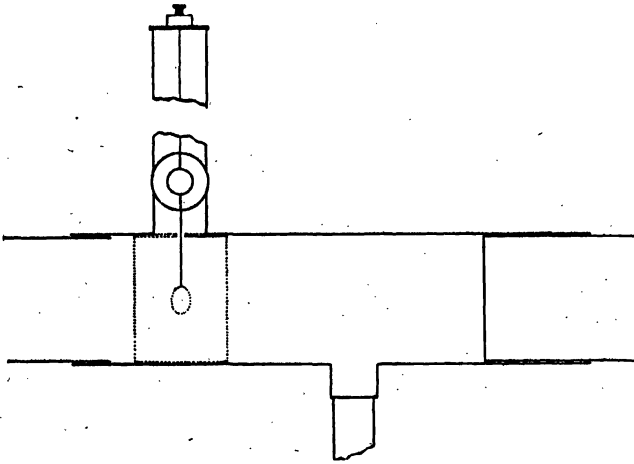
⁹⁾ Ann. d. Phys. 42, 843, 1913.

¹⁰⁾ Phys. Rev. 1, 309, 1913.

kde konstanta K souvisí s dříve uvedenou C vztahem

$$K = \frac{C}{D} u_0^2, \quad C = \frac{4}{3} \rho r^3, \quad D = \frac{4\pi^2}{T^2} \Theta.$$

Příslušné měření bylo provedeno tím způsobem, že deska Rayleighova se nalézala v rezonančním válci vodorovně postaveném, jehož délka zůstávala stálou — čtvrtvlna zaznívajícího tónu — na obou koncích rezonátoru byly pak zasunovány resp. vysunovány nástavky tak, aby se deska dostávala na různá místa rezonátoru

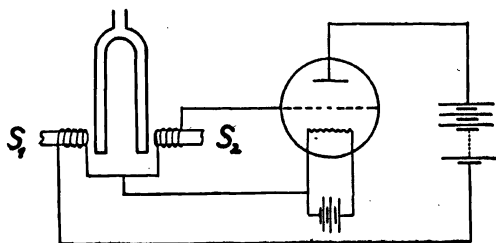


Obr. 1.

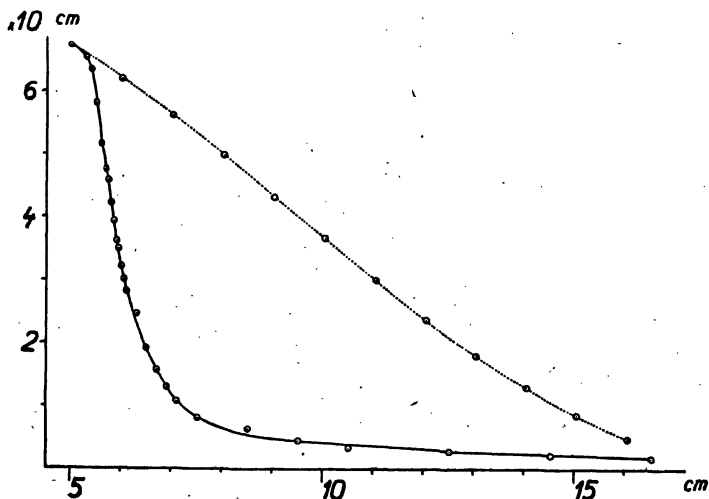
o stálé délce. Celý přístroj byl sestaven zcela jednoduše (obr. 1). Resonátorová trubice má délku 19,0 cm, průměr 5,0 cm. Vodorovná trubice tato je nesena svislou nožkou, spojenou se stativem, jenž jest opatřen třemi stavěcími šrouby. K trubici resonátoru je připojena svisle trubice 23 cm délky a 2,2 cm průměru, v níž na závěsu platino-iridiovém délky 18 cm a 0,0158 mm průměru jest zavěšeno deska Rayleighova t. j. krycí sklíčko mikroskopické 8 mm v průměru. Zasunovatelné trubice, jichž je několik dvojic, jsou opatřeny milimetrovým dělením.

Přístroj je postaven na konsoli na zdi; v jeho blízkosti jest umístěn zdroj zvuku určité frekvence — v našem případě ladička a^1 , udržovaná v pohybu elektromagneticky nebo elektronovou lampou

ve spojení podle Ecclesa,¹¹⁾ případně s jednostupňovým zesilovačem a tlapačem (obr. 2). Pozorování desky děje se dalekohledem se škálou, při němž dalekohled jest umístěn v otvoru ve zdi, tak že pozorovatel odčítající úchytku nalézá se ve vedlejší místnosti, aby neměnil akustického pole svou přítomností, nahodilým po-



Obr. 2.



Obr. 3.

hybem hlavy nebo rukou. Místnost s deskou Rayleighovou jest uzavřena, aby rozdělení akustické energie při stálém zdroji bylo stálé; pak jsou úchytky desky stálé na půl milimetru a při opakování

¹¹⁾ Wien-Harms, Handbuch der Experimentalphysik I, 52, Leipzig 1926. — V mřížkovém a anodovém kruhu elektronové lampy (na př. Mars Ultramicro) jsou zařazeny samoindukce S_1 , S_2 (elektromagnety ze sluchátek po 2000 ohmch).

pokusů shodné, pokud ovšem síla zdroje je stálou t. j. intenzita topného proudu a anodové napětí.

Následující tabulka podává ukázkou měření, která vykonal v našem ústavu p. F. Nimrichter; vzdálenost škály od zrcátka byla 225 cm. Deska Rayleighova dostávala se postupně v resonátoru stálé délky 19,0 cm na místa, vzdálená od volného konce resonátoru v mezích od 5,0 cm do 16,5 cm. Teplota byla 17° C.

Vzdálenost desky cm	výchylka desky cm	vzdálenost desky cm	výchylka desky cm
5,0 ₀	66,7 ₀	6,1 ₀	27,9 ₅
3 ₀	64,7 ₀	3 ₀	22,6 ₅
4 ₀	63,1 ₀	5 ₀	18,8 ₅
5 ₀	57,4 ₀	7 ₀	15,7 ₀
6 ₀	51,3 ₀	9 ₀	12,9 ₅
7 ₀	47,4 ₅	7,1 ₀	10,8 ₅
7 ₅	45,5 ₅	5 ₀	7,9 ₅
8 ₀	41,8 ₀	8,5 ₀	6,3 ₅
8 ₅	39,1 ₀	9,5 ₀	4,2 ₅
9 ₀	36,1 ₀	10,5 ₀	3,2 ₀
9 ₅	34,7 ₅	12,5 ₀	2,6 ₀
6,0 ₀	32,0 ₅	14,5 ₀	2,0 ₀
0 ₅	29,8 ₅	16,5 ₀	1,6 ₅

Graficky podána jest (obr. 3) jednak závislost výchylky desky na poloze v resonátoru, jednak průběh funkce¹²⁾ (křivka tečkovaná)

$$y = A \cos^2 \frac{2\pi x}{\lambda};$$

při tom bereme délku vlny

$$\lambda = 4d = 78,0 \text{ cm.}$$

Značný rozdíl mezi průběhem obou křivek dá se vysvětliti tím, že deska Rayleighova přece jen mění silové pole v resonátoru a to tím více, čím větší je poměr průměru desky a resonátoru; dále jest válcový resonátor, v němž se deska nalézá, opatřen otvorem 2 mm v průměru pro závěs desky¹³⁾ a tím jsou poměry v resonátoru též změněny a konečně při otevřeném resonátoru, není kmitna přesně na volném konci, jak jsme při výpočtu předpokládali.

¹²⁾ Konstanta A volena tak, aby pro $x = 5,00$ bylo $y = 66,70$ cm.

¹³⁾ Do resonátorové trubice zasunuty jsou dvě válcové vložky opatřené na kraji půlkruhovým otvorem 2 mm v průměru, jež tvoří kol závěsu desky mezi zrcátkem a deskou otvor; bez těchto vložek byl by resonátor postranním válcem, určeným pro závěs desky, podstatně změněn.

Z toho důvodu, že rozdělení akustické energie jest v resonátoru deskou Rayleighovou změněno, hodí se Rayleighova deska ve spojení s resonátorem hlavně pro měření relativní, ať už jde o srovnávání zdrojů téže frekvence, anebo o srovnávání intenzity na různých místech akustického pole.

Připomínám ještě, že při všech změnách na resonátoru byl zdroj vždy postaven vůči resonátoru do relativně stejné polohy, aby ve všech případech bylo vlnění před otvorem resonátoru stejné a to v intenzitě i fázi.

Druhá otázka, jak závisí výchylka desky na délce resonátoru t. j. na té okolnosti, jak dobře je resonátor na danou frekvenci naladěn, byla studována tímž zařízením. Deska měla nyní vůči volnému konci resonátoru pevnou polohu, délka resonátoru byla pak na pevném konci měněna a to při tónu komorního a^1 v mezích 20,8 cm až 17,3 cm. Příslušné měření, jež vykonal rovněž p. F. Nimrichter, jest uvedeno v následující tabulce. Teplota byla 17,5° C.

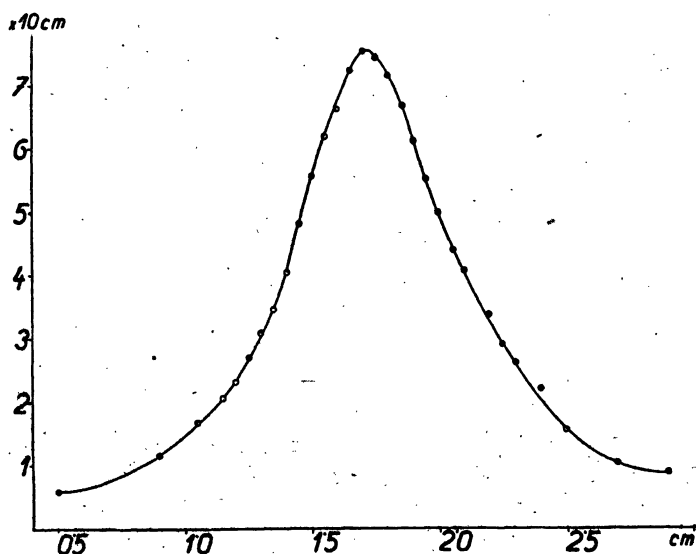
Prodloužení resonátoru cm	délka cm	výchylka desky cm	prodloužení resonátoru cm	délka cm	výchylka desky cm
0,00	17,30	3,25	1,80	19,10	70,95
50	80	5,70	85	15	66,20
90	18,20	11,45	90	20	60,65
1,05	35	16,70	95	25	54,70
15	45	20,15	2,00	30	49,50
20	50	22,85	05	35	43,55
25	55	26,80	10	40	40,40
30	60	30,70	15	45	37,05
35	65	34,20	20	50	33,50
40	70	40,25	25	55	28,65
45	75	47,65	30	60	25,95
50	80	55,20	40	70	21,80
55	85	61,50	50	80	15,55
60	90	65,60	70	20,00	10,25
65	95	71,65	90	20	8,80
70	19,00	74,75	3,50	80	4,45
75	05	73,70			

Průběh rezonanční křivky podává následující graf — závislost výchylky desky na délce resonátoru (obr. 4).

Připomínám ještě, že v ústavu našem byla provedena měření dalších křivek rezonančních resonátoru pro komorní a^1 a to v té formě, že volný konec resonátoru opatřen byl kruhovými clonkami různých průřezů. Z těchto měření jen uvádím, že v tom případě (změněn útlum) čím menší je průměr otvoru na volném konci reso-

nátoru, tím je maximum rezonanční křivky nižší a současně více posunuto k menším délkám, jak ukazuje následující tabulka:

průměr clony cm	maxim. výchylka desky cm	délka rezonátoru cm
4,8	74,7 ₅	19,0 ₀
4,3	70,2 ₅	18,6 ₀
3,7	64,5 ₀	18,3 ₀
3,0	51,6 ₀	17,6 ₅
2,2	30,7 ₅	16,3 ₀



Obr. 4.

Průměry otvorů voleny v udané velikosti, aby poměr jejich ploch byl 5 : 4 : 3 : 2 : 1.

Bylo by ještě zajímavé zkoušet závislost výchylky desky Rayleighovy na frekvenci při stálé délce rezonátoru a závislost na intenzitě zvuku, tedy na vzdálenosti zdroje od rezonátoru.

Pokusy s volnou deskou Rayleighovou t. j. bez spojení s rezonátorem vyžadují nepoměrně větší citlivosti desky, než jaká byla ve svrchních měřeních.

V Brně v srpnu 1930.

Fyzikální ústav Masarykovy university.

Les mesures acoustiques faites à l'aide du disque de Rayleigh.

(Extrait de l'article précédent.)

On a employé pour les mesures le disque de Rayleigh en connexion avec un résonateur et on a mesuré d'une part la dépendance de la déviation de la position du disque, la longueur du résonateur étant constante, d'autre part la dépendance de la déviation de la longueur du résonateur, pendant la position fixe du disque, la courbe de résonance. Pour la source du son on a employé un diapason normal entretenu par une lampe à trois électrodes. Le disque de Rayleigh fut observé de la chambre voisine au moyen d'une lunette placée dans une ouverture pratiquée dans le mur.
