

Zeitschrift: Technische Mitteilungen / Schweizerische Post-, Telefon- und Telegrafienbetriebe = Bulletin technique / Entreprise des postes, téléphones et télégraphes suisses = Bollettino tecnico / Azienda delle poste, dei telefoni e dei telegrafi svizzeri

Band: 30 (1952)

Heft: 7

Artikel: Akustische Resonatoren als Schallabsorber = Résonateurs acoustiques absorbant du son

Autor: Lauber, A.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-876113>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 17.11.2024

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

TECHNISCHE MITTEILUNGEN

BULLETIN TECHNIQUE

PTT

BOLLETTINO TECNICO

Herausgegeben von der Schweizerischen Post-, Telegraphen- und Telephonverwaltung. Publié par l'administration des postes, télégraphes et téléphones suisses. Pubblicato dall'amministrazione delle poste, dei telegrafi e dei telefoni svizzeri

Akustische Resonatoren als Schallabsorber

Von A. Lauber, Bern

Résonateurs acoustiques absorbant du son

Par A. Lauber, Berne

534.414

Zusammenfassung. Akustische Resonatoren können in der Raumakustik mit Erfolg als Tieftonabsorber verwendet werden. Es wird von zwei verschiedenen Ausführungen solcher Resonatoren berichtet, die sowohl im Laboratorium als auch in der Praxis ausprobiert worden sind.

Résumé. Pour l'acoustique des locaux, les résonateurs peuvent être utilisés avec succès pour l'absorption des sons graves. Deux types de résonateurs acoustiques sont mentionnés, ils ont été étudiés au laboratoire ainsi que dans des réalisations pratiques.

Bisher wurden in der Schweiz für die Schallabsorption der tiefen Töne fast ausschliesslich Anordnungen aus schwingungsfähigen Platten irgendwelcher Art verwendet. Die Resonanzfrequenzen solcher zweidimensionaler Schwingungsgebilde lassen sich schwer exakt zum voraus berechnen, da sie noch von einer ganzen Reihe anderer Faktoren abhängig sind; so zum Beispiel von der spezifischen Masse und den elastischen Eigenschaften des verwendeten Materials und vor allem durch die bei den verschiedenen Montagen entstehenden Einspannungen und Dämpfungen. Die Erfahrung zeigt ferner, dass in vielen Fällen, besonders bei kleinen Ansage- und Sprechstudios, mit solchen Anordnungen die Frequenzen unterhalb 150 bis 200 Hz nicht genügend gedämpft werden können; daher war es notwendig, nach wirksameren Lösungen zu suchen. Dabei wurden zwei Anordnungen im Laboratorium gemessen und in verschiedenen Räumen praktisch ausgeführt:

Jusqu'à présent on a utilisé en Suisse pour l'absorption des sons graves, diverses combinaisons de panneaux vibrants. Les fréquences de résonance de tels systèmes à deux dimensions sont très difficiles à déterminer d'avance avec exactitude parce qu'elles dépendent d'un grand nombre de facteurs; ainsi par exemple la masse spécifique, les propriétés élastiques du matériel utilisé et particulièrement l'influence du montage sur les tensions des panneaux et l'amortissement. L'expérience montre que dans bien des cas, particulièrement pour les petits studios d'annonce et de parole, l'absorption des sons en dessous de 150 à 200 Hz est insuffisante avec de tels dispositifs et qu'il est par conséquent nécessaire de chercher des solutions plus efficaces. Les deux solutions suivantes ont été réalisées pratiquement dans divers locaux.

1. Einseitig offene Röhren mit Anpassung des Wellenwiderstandes am offenen Ende;
2. Hohlsteine, deren Volumen durch eine Öffnung mit dem Raum kommuniziert.

1. Tuyaux ouverts à une extrémité avec adaptation de l'impédance caractéristique à l'extrémité ouverte.
2. Briques creuses dont le vide est en communication avec la salle par un trou.

1. Einseitig offene Röhren

1. Tuyaux ouverts à une extrémité

Die einseitig offene Röhre ist das akustische Analogon der elektrischen Paralleldraht- oder «Lecher»-Leitung; sie hat verschiedene Resonanzfrequenzen, die immer dann auftreten, wenn die Rohrlänge gleich einer ungeraden Zahl von einer Viertelwellenlänge ist.

Le tuyau ouvert à une extrémité est acoustiquement analogue aux conducteurs électriques parallèles (système «Lecher»), ses fréquences de résonance apparaissent toujours lorsque la longueur du tuyau est égale aux quarts de longueur d'onde impairs.

$$f_{\text{res}} = \frac{c}{4l} \cdot (2n + 1)$$

f_{res} = Resonanzfrequenz
 n = 0, 1, 2, 3 ...
 c = Schallgeschwindigkeit
 l = Rohrlänge

$$f_{\text{res}} = \frac{c}{4l} \cdot (2n + 1)$$

f_{res} = fréquence de résonance
 n = 0, 1, 2, 3 ...
 c = vitesse du son
 l = longueur du tuyau

Um raumakustisch möglichst wirksam zu sein, muss ein solcher Resonator an den Wellenwiderstand einer ebenen Welle angepasst sein, wofür die Kenntnis seiner Wirkverluste notwendig ist. Diese können zum Beispiel experimentell durch die Messung ihrer Resonanzkurven bestimmt werden. Man kann sie aber auch aus der totalen Verlustleistung berechnen, das heisst aus Viskositätsverlust und Strahlungsverlust. Wenn man sich das Innere des Rohrvolumens mit konzentrischen Luftröhren ausgefüllt denkt, die sich gegenseitig aneinander reiben, und überdies die Geschwindigkeitsverteilung aller Luftteilchen im ganzen Rohr bekannt ist, so berechnet sich die Verlustleistung durch Viskosität für das ganze Rohr und im Zeitmittel einer Schwingungsperiode zu

$$P_1 = 2\pi \cdot \mu \cdot \frac{1}{\tau} \int_{R=0}^{R=R_0} \int_{x=0}^{x=1} \int_{t=0}^{t=\tau} \left(\frac{dv}{dR}\right)^2 \cdot R \cdot dR \cdot dx \cdot dt \quad 1^2)$$

$$P_1 = \frac{O}{2} \cdot \varrho \cdot \sqrt{\frac{\omega \cdot \nu}{2}} \cdot \frac{v_0^2}{2} \quad \begin{array}{l} O = \text{Innere Oberfläche des Rohrmantels} \\ \varrho = \text{Dichte der Luft} \\ \nu = \frac{\mu}{\varrho} = \text{Kinematische Zähigkeit der Luft} \end{array}$$

daraus folgt

$$r_1 = \frac{O}{2} \cdot \varrho \cdot \sqrt{\frac{\omega_0 \cdot \nu}{2}} \quad \begin{array}{l} \omega = \text{Kreisfrequenz der Schwingung} \\ v_0 = \text{Max. Schallschnelle in der Mitte am Eingang des Rohres} \\ r_1 = \text{Verlustwiderstand infolge Luftreibung} \end{array}$$

Die Verlustleistung infolge Strahlung berechnet sich zu:

$$P_2 = \frac{v_0^2}{2} \cdot r_{str.} \quad 3)$$

$$r_{str.} = c \cdot \varrho \cdot S \cdot \left[1 - \frac{I_1(2kR_0)}{kR_0} \right]$$

$$P_2 = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{\varrho}{c} \cdot \frac{v_0^2}{2} \cdot \omega^2 \cdot R_0^4 \quad \begin{array}{l} k = \frac{\omega}{c} \\ I_1 = \text{Bessel Fkt. erster Ordnung} \end{array}$$

daraus folgt

$$r_2 = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{\varrho}{c} \cdot \omega_0^2 \cdot R_0^4 \quad r_2 = \text{Verlustwiderstand infolge Strahlung}$$

Die für die so berechnete Leistungsanpassung notwendige zusätzliche Dämpfung lässt sich einfach dadurch erreichen, dass über das offene Rohrende ein Stück Polsterwatte gespannt wird.

Fig. 1 zeigt ein derartiges Rohr, bei dem im herausgezogenen Abschluss das Sondenmikrophon sichtbar ist, mit dem die Resonanzkurven gemessen wer-

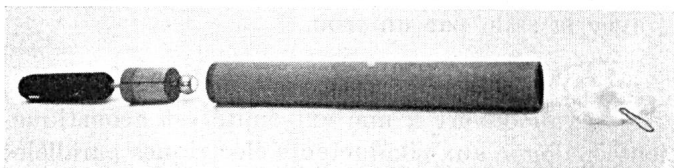


Fig. 1a. Einseitig offene Röhre als akustischer Resonator
 Links = Abschluss mit Sondenmikrophon
 Rechts = Polsterwatte für Leistungsanpassung
 Tuyau ouvert à une extrémité utilisé comme résonateur
 à gauche = bouchon avec microphone sonde
 à droite = bouchon de ouate servant à l'adaptation de puissance

Pour obtenir le plus d'efficacité possible sur l'acoustique de la salle, ces résonateurs doivent être adaptés à l'impédance caractéristique d'une onde plane; il faut par conséquent en connaître les pertes réelles. Celles-ci peuvent être déterminées expérimentalement en mesurant la courbe de résonance. On peut aussi calculer ces pertes en partant de l'énergie totale des pertes par viscosité et par rayonnement. En décomposant le volume intérieur du tuyau en une série de tubes d'air concentriques se frottant les uns contre les autres avec une répartition des vitesses des particules d'air connue, on peut calculer comme suit les pertes par viscosité pour la durée d'une oscillation.

$$P_1 = 2\pi \cdot \mu \cdot \frac{1}{\tau} \int_{R=0}^{R=R_0} \int_{x=0}^{x=1} \int_{t=0}^{t=\tau} \left(\frac{dv}{dR}\right)^2 \cdot R \cdot dR \cdot dx \cdot dt \quad 1^2)$$

$$P_1 = \frac{O}{2} \cdot \varrho \cdot \sqrt{\frac{\omega \cdot \nu}{2}} \cdot \frac{v_0^2}{2} \quad \begin{array}{l} O = \text{surface intérieure du tuyau} \\ \varrho = \text{masse spécifique de l'air} \\ \nu = \frac{\mu}{\varrho} = \text{viscosité cinétique de l'air} \end{array}$$

d'où

$$r_1 = \frac{O}{2} \cdot \varrho \cdot \sqrt{\frac{\omega_0 \cdot \nu}{2}} \quad \begin{array}{l} \omega = \text{pulsation de l'oscillation} \\ v_0 = \text{vitesse maximum du son à l'entrée au milieu du tuyau} \\ r_1 = \text{résistance de perte due au frottement de l'air} \end{array}$$

L'énergie des pertes due au rayonnement se calcule comme suit:

$$P_2 = \frac{v_0^2}{2} \cdot r_{str.} \quad 3)$$

$$r_{str.} = c \cdot \varrho \cdot S \cdot \left[1 - \frac{I_1(2kR_0)}{kR_0} \right]$$

$$P_2 = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{\varrho}{c} \cdot \frac{v_0^2}{2} \cdot \omega^2 \cdot R_0^4 \quad \begin{array}{l} k = \frac{\omega}{c} \\ I_1 = \text{fonction de Bessel premier ordre} \end{array}$$

d'où

$$r_2 = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{\varrho}{c} \cdot \omega_0^2 \cdot R_0^4 \quad r_2 = \text{résistance équivalente aux pertes par rayonnement}$$

On réalise l'amortissement auxiliaire nécessaire à l'adaptation de puissance calculé, en plaçant un morceau de ouate à l'entrée ouverte du tube.

La fig. 1 montre un tuyau dont on a enlevé le bouchon pour montrer le microphone sonde qui a servi aux mesures de la courbe de résonance; à l'autre extrémité on voit l'amortissement auxiliaire nécessaire à l'adaptation.

En pratique on a utilisé des jeux de 4 tuyaux dont les longueurs sont de 90, 75, 50 et 40 cm, à ces longueurs correspondent les premières fréquences de résonance de 96, 115, 172 et 215 Hz. Les 4 courbes de résonance se recouvrent de sorte qu'elles sont efficaces pour toute la gamme de fréquence de 85 à 220 Hz (voir fig. 2). De tels dispositifs ont donné de bons résultats dans des cabines de speaker et des petits studios de théâtre, mais cette solution est relativement cher.

2. Briques creuses

Des briques creuses dont le vide communique avec le local par un trou représentent des résonateurs de Helmholtz, dont la fréquence de résonance est:

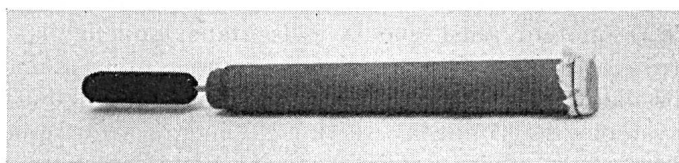


Fig. 1b. Fertig zusammengestellter Resonator
Le résonateur complet

den; ferner ist auch die für die Leistungsanpassung notwendige Zusatzdämpfung sichtbar.

Für die praktische Anwendung dienten Sätze von je vier solchen Röhren, deren Längen 90, 75, 50 und 40 cm betragen, was erste Resonanzfrequenzen von 96, 115, 172 und 215 Hz ergab. Die vier Resonanzkurven überlappen sich, so dass sie praktisch im ganzen Frequenzbereich von 85...220 Hz wirksam sind (vgl. Fig. 2). Solche Anordnungen haben sich bei Sprechkabinen und kleinen Hörspielstudios gut bewährt, doch ist diese Lösung verhältnismässig teuer.

2. Hohlsteine

Hohlsteine, deren Volumen durch eine Öffnung mit dem Raum kommuniziert, stellen reine Helmholtzresonatoren dar mit einer Resonanzfrequenz von:

$$f_{\text{res}} = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{l}{V} \cdot \frac{\pi R^2}{\pi R \frac{2}{2} + l}}$$

c = vitesse du son

V = volume du vide du résonateur

R = Rayon du trou circulaire

l = profondeur du trou, resp. longueur du cou du résonateur

La réalisation pratique est faite au moyen de briques creuses «Durisol» (fig. 3). Ces briques sont fermées par deux plaques frontales de même matière et un des deux côtés est perforé à deux endroits communiquant avec les vides. Ce matériel passablement rugueux et poreux a l'avantage de présenter dans le cou du résonateur un frottement qui correspond précisément à l'adaptation de l'impédance caractéristique. L'inconvénient de ces briques est leur manque d'étanchéité et par conséquent il est nécessaire de les crépir sur toute la surface extérieure.

La fig. 4 donne les coefficients d'absorption de parois montées de cette manière pour différents diamètres des trous, mesurés dans une salle réverbérante.

La fig. 5 montre la réalisation pratique dans un studio.

Enfin, il faut citer une particularité des propriétés des absorbants réalisés au moyen de résonateurs qui différencie ce mode de celui qui consiste à utiliser

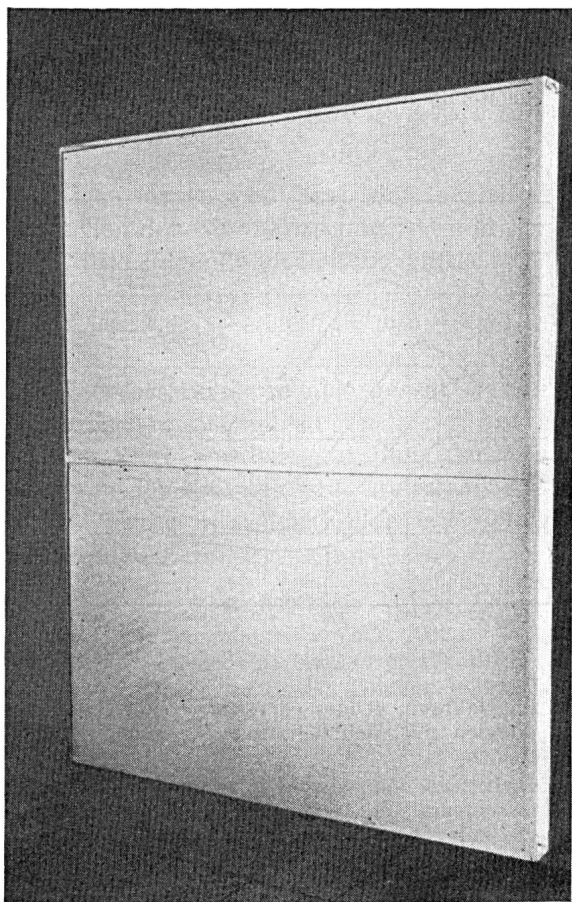


Fig. 2a. Wandelement mit Sätzen aus je vier Resonatorröhren.
Ansicht von vorne
Elément monté dans un mur comprenant des jeux de quatre résonateurs tubulaires. Vue de devant

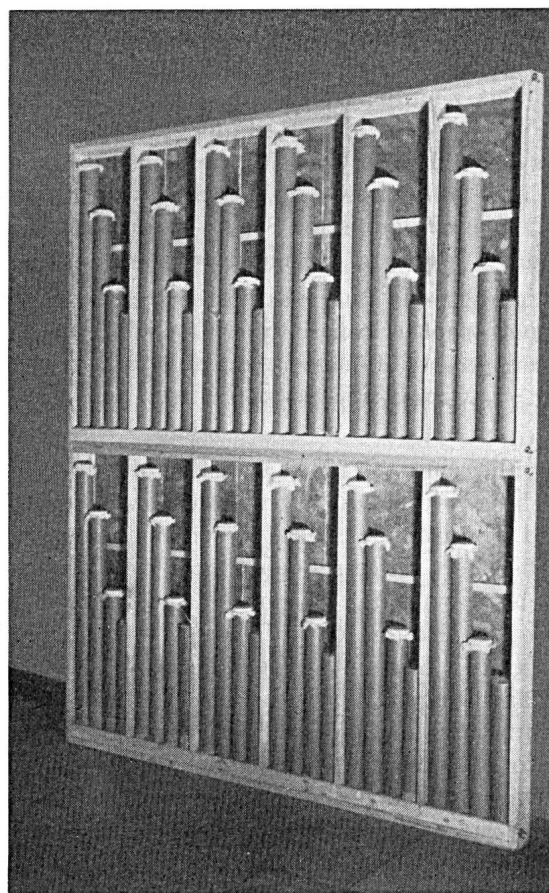


Fig. 2b. Wandelement mit Sätzen, bestehend aus je vier Resonatorröhren.
Ansicht von hinten
Elément monté dans un mur comprenant des jeux de quatre résonateurs tubulaires. Vue de derrière

$$f_{\text{res}} = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{V} \cdot \frac{\pi R^2}{\frac{\pi R}{2} + l}}$$

c = Schallgeschwindigkeit
 V = Volumen des Resonator-Hohlraumes
 R = Radius des kreisförmigen Loches
 l = Tiefe des Loches bzw. Länge des Resonatorhalses

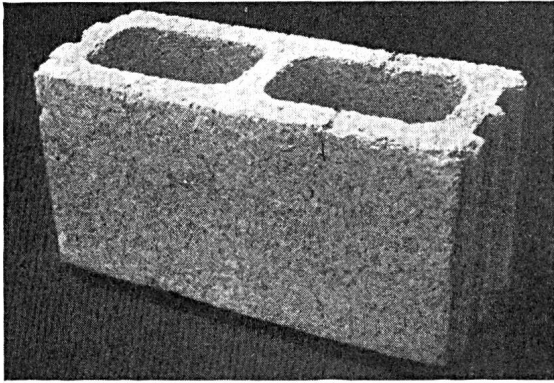


Fig. 3a. «Durisol»-Hohlkammersteine als Helmholtzresonatoren. Hohlkammerstein allein
 Briques creuses «Durisol» utilisées comme résonateurs de Helmholtz. Brique originale

Die praktische Ausführung geschah mit «Durisol»-Hohlkammersteinen. Wie Fig. 3 zeigt, werden diese Steine an beiden Stirnseiten mit Platten aus gleichem Material abgedeckt und die beiden Hohlräume an einer Frontseite mit einem kreisrunden Loch angebohrt. Das ziemlich raue und poröse Material hat den Vorteil, dass die Reibung im Resonatorhals bereits den richtigen Wert für die Leistungsanpassung hat. Ein Nachteil besteht allerdings darin, dass die ganze äussere Fläche der Steine beim Bau sorgfältig mit feinem Verputz gedichtet werden muss.

Fig. 4 zeigt die im Hallraum gemessenen Absorptionskoeffizienten von so gebauten Wänden mit verschieden grossen Löchern.

Fig. 5 zeigt die praktische Ausführung in einem Studio.

Abschliessend sei noch auf eine besondere Eigenschaft hingewiesen, die allen Resonanzabsorbern eigen ist und wodurch sich diese wesentlich von den porösen Absorbern unterscheiden: Bei der Resonanzfrequenz ist sowohl der Resonator als auch der Raum, in dem der Resonator aufgestellt wird, als schwingungsfähiges System zu betrachten. Das Verhältnis der Dämpfungen dieser beiden Systeme bestimmt Richtung und Gefälle des Schallenergieflusses. Das bedeutet, dass ein und derselbe Resonator, je nach dem Dämpfungszustand des Raumes, in dem er aufgestellt wird, verschieden stark schallabsorbierend wirkt. In extrem stark gedämpften Räumen wird ein ungedämpfter Resonator sogar als Schallgenerator wirken und den Nachhall des Raumes bei der Resonanzfrequenz vergrössern.

Der in der Raumakustik übliche Begriff der Nachhallzeit kann auch auf den akustischen Resonator

des matériaux poreux: à la fréquence de résonance le résonateur ainsi que la salle dans laquelle il se trouve doivent être considérés comme un système oscillant. Le rapport des amortissements de ces deux systèmes détermine la direction et l'énergie acoustique transmises. Cela signifie que le même résonateur monté dans des salles ayant différents amortissements acoustiques a, dans chacune de ces salles, un coefficient d'absorption différent. Dans des locaux très fortement amortis, un résonateur peut même jouer le

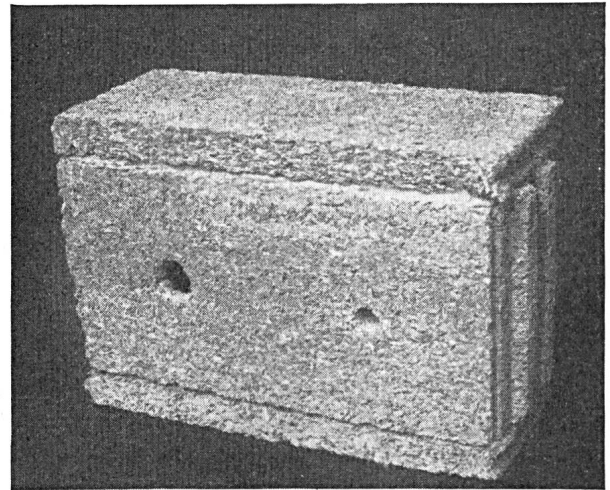


Fig. 3b. «Durisol»-Hohlkammersteine als Helmholtzresonatoren. Der fertige Helmholtzresonator
 Briques creuses «Durisol» utilisées comme résonateurs de Helmholtz. Résonateur terminé

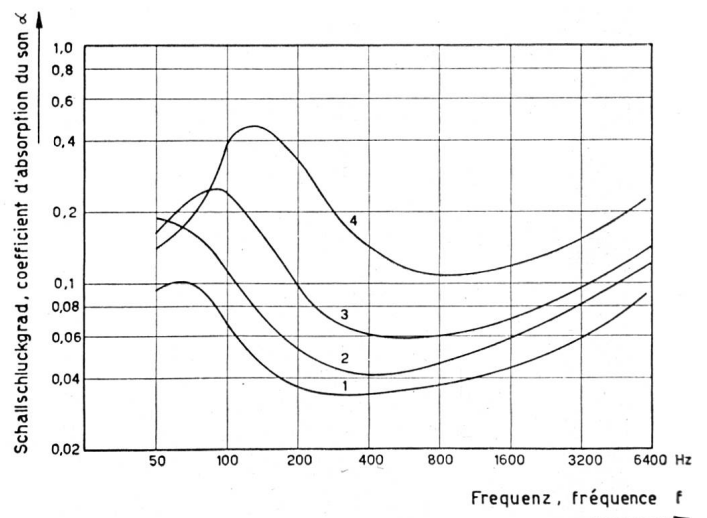


Fig. 4. Im Hallraum gemessene Absorptions-Koeffizienten von Wänden mit Helmholtzresonatoren aus Hohlkammersteinen

Coefficients d'absorption du son de parois constituées de résonateurs Helmholtz en briques creuses, mesurés dans une salle réverbérante

Kurve 1 = Lochdurchmesser 1,7 cm
 Courbe 1 = Diamètre du trou 1,7 cm
 Kurve 2 = Lochdurchmesser 2,7 cm
 Courbe 2 = Diamètre du trou 2,7 cm
 Kurve 3 = Lochdurchmesser 2,7 cm und 6 cm gemischt
 Courbe 3 = Trous entremêlés de 2,7 et 6 cm de diam.
 Kurve 4 = Lochdurchmesser 6 cm und 13 cm gemischt
 Courbe 4 = Trous entremêlés de 6 et 13 cm de diam.



Fig. 5. Radiostudio in Zürich mit Helmholtzresonatoren aus Hohlkammersteinen
Studio de radio à Zurich pourvu de résonateurs de Helmholtz en briques creuses

angewendet werden; es lässt sich leicht ableiten, dass zwischen der Resonanzschärfe Q und der Nachhallzeit T die folgende Beziehung gültig ist:

$$T = 13,8 \cdot \frac{Q}{\omega_0} \quad \omega_0 = 2 \pi f_0$$

Zusammenfassend kann also gesagt werden, dass die theoretischen Betrachtungen in der Praxis weitgehend bestätigt wurden und dass der akustische Resonator in der Raumakustik interessante Möglichkeiten bietet und in vielen Fällen mit Erfolg angewendet werden kann.

Bibliographie

- 1) *H. Lamb*. Hydrodynamics. New York, 1932.
- 2) *H. Samulon*. J. Acoust. Soc. Am. **19** (1947), 191.
- 3) *Lord Rayleigh*. Theory of Sound. London, 1894.

rôle de générateur acoustique et augmenter par conséquent la réverbération à la fréquence de résonance.

La définition du temps de réverbération souvent utilisée pour l'acoustique des locaux peut l'être également pour les résonateurs; il est aisé de démontrer qu'entre le temps de réverbération T et le facteur de qualité Q d'un système résonnant il existe la relation suivante:

$$T = 13,8 \cdot \frac{Q}{\omega_0} \quad \omega_0 = 2 \pi f_0$$

En conclusion on peut dire que les considérations théoriques sont confirmées par la pratique, que le résonateur présente un intérêt dans l'acoustique des locaux et que dans de nombreux cas il peut être utilisé avec succès.