

Helmut V. Fuchs, Bradley Alexander, Stefan Weinzierl

Breitband-Schallabsorber für Räume mit besonderen Akustik-Anforderungen

Open Access via institutional repository of Technische Universität Berlin

Document type

Journal article | Accepted version

(i. e. final author-created version that incorporates referee comments and is the version accepted for publication; also known as: Author's Accepted Manuscript (AAM), Final Draft, Postprint)

This version is available at

<https://doi.org/10.14279/depositonce-15245>

Citation details

This is the peer reviewed version of the following article:

Fuchs, H.V., Alexander, B. and Weinzierl, S. (2020), Breitband-Schallabsorber für Räume mit besonderen Akustik-Anforderungen. *Bauphysik*, 42: 173–183. <https://doi.org/10.1002/bapi.202000014>.

which has been published in final form at <https://doi.org/10.1002/bapi.202000014>. This article may be used for non-commercial purposes in accordance with Wiley Terms and Conditions for Use of Self-Archived Versions. This article may not be enhanced, enriched or otherwise transformed into a derivative work, without express permission from Wiley or by statutory rights under applicable legislation. Copyright notices must not be removed, obscured or modified. The article must be linked to Wiley's version of record on Wiley Online Library and any embedding, framing or otherwise making available the article or pages thereof by third parties from platforms, services and websites other than Wiley Online Library must be prohibited.

Terms of use

This work is protected by copyright and/or related rights. You are free to use this work in any way permitted by the copyright and related rights legislation that applies to your usage. For other uses, you must obtain permission from the rights-holder(s).

Breitband-Schallabsorber für Räume mit besonderen Akustik-Anforderungen

Mit ehrendem Gedenken an Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Fasold geschrieben

Für Räume, die eine mühelose und ungestörte Sprachkommunikation ermöglichen sollen, gelten erhöhte akustische Anforderungen. Als besondere Herausforderung hat sich hierbei eine Dämpfung der tieffrequenten Schallanteile erwiesen. Hierfür geeignete, genügend breitbandig wirksame Absorber wie Verbundplatten-Resonatoren belegen jedoch eine große Wand- oder Deckenfläche und sind für viele Anwendungen zu sperrig und teuer. Das hier vorgestellte, neuartige Modul, das allseitig stabil von einem nur teilweise perforierten Metallgehäuse umschlossen ist, weist demgegenüber nicht nur eine höhere Wirksamkeit auf, sondern eignet sich aufgrund seiner modularen Bauweise und geringer Herstellungskosten für eine Vielzahl von Raumtypen, auch für eine Nachrüstung bei laufendem Betrieb. Messwerte aus dem Hallraum und von ersten raumakustischen Sanierungen bestätigen die theoretischen Erwartungen und stellen eine praktikable Lösung für ein allgegenwärtiges Problem der Bauphysik in Aussicht.

Stichworte Raumakustik; Absorber; Sprachverständlichkeit

„Zur Korrektur des Frequenzganges der Nachhallzeit ist meist der Einbau spezieller Schallabsorber notwendig ... unterhalb 250 Hz beginnend, ist ein Abfall anzustreben“ [1, S. 289]

1 Einleitung

Wenn in Zeiten der Corona-Krise Schulen, Büros, Geschäfte und Restaurants geschlossen bleiben, kommt zwar lautstarke Betriebsamkeit allerorten zur Ruhe, nicht aber das Bedürfnis nach einer mühelosen und ungestörten Sprachkommunikation. Sie stellt erhöhte akustische Anforderungen an die Akustik von Räumen, zumal wenn Abstandsregeln gelten, die es nicht ermöglichen, die Behinderung durch erhöhte Lärmpegel oder eine schlechte Raumakustik durch eine größere Nähe zwischen den beteiligten Personen auszugleichen (Bild 1). Diese erhöhten Anforderungen gelten nicht nur für Vortrags- und Unterrichtsräume, sondern auch für Büros, Speise-, Warte-, und Besprechungsräume, Warenhäuser sowie für Patienten- und Behandlungsräume in Arztpraxen und Krankenhäusern, um nur einige Beispiele zu nennen.

Sobald eine kritische Grenze erreicht ist, kann sich dann durch den Lombard-Effekt eine Lautheitsspirale in Gang setzen, bei der Sprecher die mangelnde Verständlichkeit durch ein erhöhtes Stimmvolumen auszugleichen versu-

Broadband sound absorber for rooms with special acoustic requirements

For rooms that should allow effortless and undisturbed speech communication, increased acoustic requirements apply. The damping of low-frequency sound components has proven to be a particular challenge. However, suitable absorbers with sufficient broadband effectiveness such as composite panel resonators occupy a large wall or ceiling area and are too bulky and expensive for many applications. In contrast, the new module presented here, which is enclosed on all sides by a partially perforated metal housing, is not only more effective but, due to its modular design and low manufacturing costs, is also suitable for a large number of room types, including acoustic renovation during ongoing operation. Measured values from the reverberation room and from the first room acoustic refurbishments confirm the theoretical expectations and hold out the prospect of a practicable solution to an omnipresent problem of building physics.

Keywords room acoustics; absorbers; speech intelligibility

chen, was insbesondere in Räumen mit vielen, verteilten Schallquellen wie Restaurants oder Großraumbüros ein akustisches Tohuwabohu nach sich ziehen kann [3, Bild 10]. Diese Rückkopplung setzt schon bei relativ geringen Schallpegeln zwischen 40 und 45 dB ein [4].

Als besondere Herausforderung hat sich hierbei eine Dämpfung des tieffrequenten Schalls erwiesen, der die

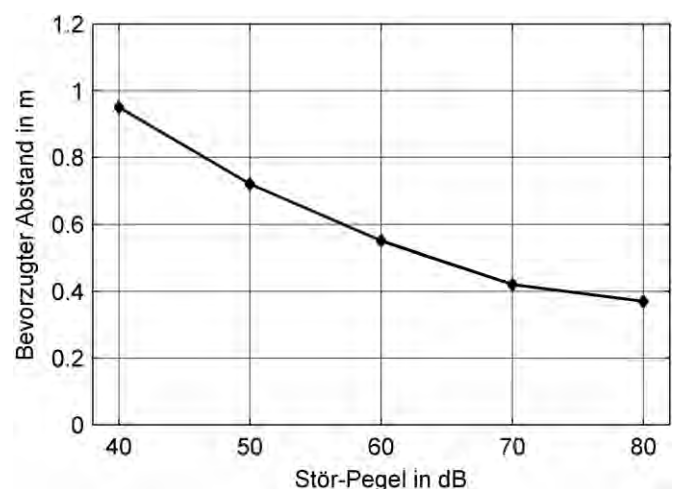


Bild 1 Von Kommunizierenden für Unterhaltungen bevorzugter Abstand zueinander, abhängig vom Störpegel im Raum nach [2, S. 16.12]
Preferred distance for casual conversation, depending on the noise level in a room according to [2, p. 16.12]

Kommunikation aus mehreren Gründen besonders stört. Zum einen liegen die für die Deutlichkeit von Sprache wesentlichen Anteile in einem Frequenzband zwischen 500 und 4000 Hz [5]. Ein schlecht gedämpftes Schallfeld, wie es sich in einem längeren Nachhall unterhalb 500 Hz bemerkbar macht, führt somit zu einer Verstärkung von Schallanteilen, die für die Sprache irrelevant sind, darunter unvermeidliche Nutzer- und schlecht zu dämmende Außengeräusche. Zum anderen führt die bei den Tiefen geringe Dichte der Raummoden bei fehlender Dämpfung zum Dröhnen und zur Verfärbung des Raumklangs, da ganz bestimmte Frequenzen im Raum verstärkt werden, während benachbarte diesen kaum anregen können.

Als raumakustisch besonders kritisch wird meist der Bereich unterhalb einer Schröder-Frequenz

$$f_s = 2000 \sqrt{\frac{T}{V}} \quad (1)$$

betrachtet, mit dem Volumen V des Raumes in m^3 und seiner Nachhallzeit T in s [6]. In kleinen Räumen hat sich allerdings gezeigt, dass z.B. bei einem Volumen von 500 m^3 Verfärbungen nicht nur bis zu $f_s \approx 80 \text{ Hz}$, sondern noch bis 250 Hz wahrgenommen werden können [7]. Diese Resonanzen führen aber nicht nur zu einer Verfärbung des Raumklangs; sie können, insbesondere wenn sie durch männliche Stimmen angeregt werden [3, Bild 3] auch noch zu einer Verdeckung des für das Sprachverstehen entscheidenden Frequenzbereichs führen [3, Bild 6].

Eine besondere Herausforderung ergibt sich aber nicht nur durch die für eine sprachliche Interaktion abträglichen psychoakustischen Effekte, sondern auch durch die technisch-physikalische Herausforderung, einen tieffrequenten Schallabsorber mit vertretbarem Materialeinsatz und Platzbedarf zu bauen.

2 Breitband-Absorber in der Fläche

Konventionelle, nur passiv wirkende Maßnahmen mit einem 20 bis 50 mm dicken faserigen oder offenporigen

Absorptionsmaterial können zwar im kHz-Bereich (oft mehr als nötig) dämpfen, verlieren aber unterhalb 250 Hz ihre Wirksamkeit, gleich ob sie an Decken und Wänden oder frei im Raum angebracht werden (Bild 2). Besonders tieffrequent wirksam sind Membran-Absorber (MA) [8, Abschn. 5.3], wie sie sich aufgrund ihrer Metallbauweise, die ohne jedes Dämpfungsmaterial auskommt, seit den frühen 1980er Jahren als Kulissen-Schalldämpfer in stark verschmutzenden Abgas- und hygienisch anspruchsvollen Lüftungsanlagen bewährt haben. In Räumen für Musik und Sprache trifft man sie heute nur noch selten an Decke und Wänden an [9, Abschn. 14.4.1 und 14.5.2].

Eine starke Verbreitung haben ab 1995 Verbundplatten-Resonatoren (VPR) [8, Abschn. 4.3] in Hörstudios (Bild 3) und Büroräumen gefunden. Auch in größeren Versammlungs- und Konferenzräumen sowie in Sälen für Sprachdarbietungen sorgen VPR vielerorts für ein nach [9, Kap. 12 und 14] wünschenswertes Bassverhältnis

$$BR = \frac{T_{125} + T_{250}}{T_{500} + T_{1000}} \leq 1 \quad (2)$$

in das die Nachhallzeiten bei 125 und 250 Hz bzw. 500 und 1000 Hz eingehen [11]. Das gelingt schon bei einer Bautiefe von 100 mm, indem z.B. eine 0,8 bis 2,5 mm dicke Stahlplatte nur punktwise mit einer vorzugsweise porösen Dämpfungsschicht eng verbunden ist.

Die höchsten Anforderungen an die Reflexionsfreiheit gelten für bestimmte schalltechnische Mess- und Prüfräume nach [12, Kap. 8]. Der für die Freifeld- und Halbfreifeld-Räume aus dem VPR weiterentwickelte Breitband-Kompaktabsorber (BKA) schafft schon bei einer Standardanwendung wie in Bild 4 bis 63 Hz herunter einen Absorptionsgrad von weit über dem nach Sabine eigentlich auf

$$\alpha_s \leq 1 \quad (3)$$

begrenzten Wert. Diese nach der Definition des Absorptionsgrads eigentlich nicht möglichen Werte können auftreten, wenn bei stark absorbierenden Materialien mit einer größeren Schichtdicke Beugungseffekte an den Flä-

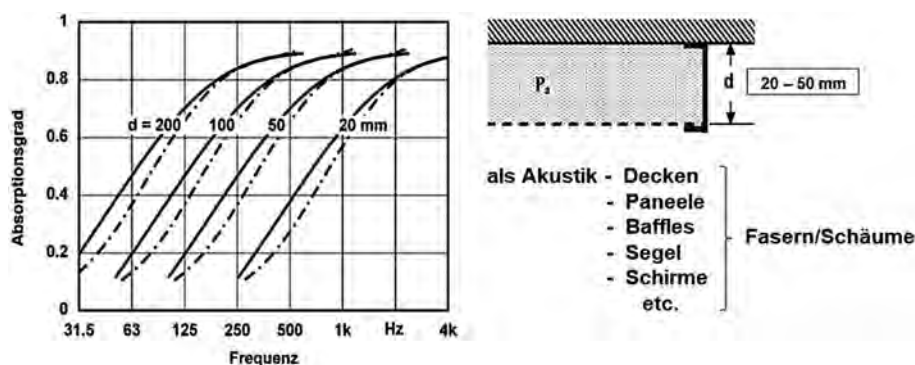


Bild 2 Absorptionsgrad α faseriger/poröser Absorber unterschiedlicher Dicke d mit optimal angepasstem Strömungswiderstand für diffusen (—) bzw. senkrechten (---) Schalleinfall [10, Abb. 9.3]
Absorption coefficient α of fibrous/porous absorber materials of varying thickness d with optimized flow resistance for diffuse (—) or normal (---) sound incidence [10, Fig. 9.3]

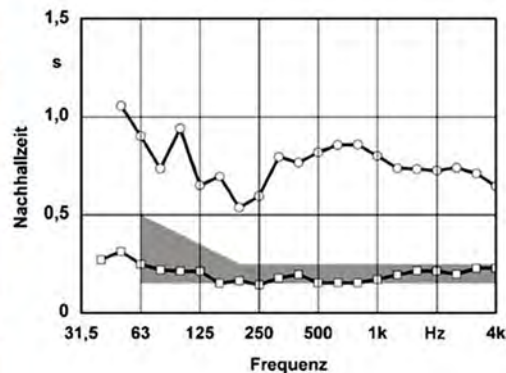
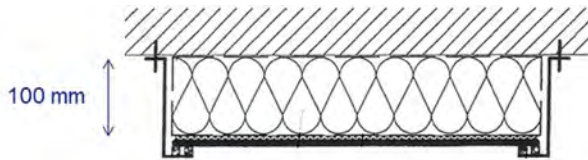


Bild 3 VPR-Module (vorzugsweise $1 \times 1,5 \times 0,1$ m groß) mit rundum offenen Rahmen an Decke und Wänden in einem professionellen Abhörraum der Bauer Studios in Ludwigsburg; Nachhallzeit vorher (○) bzw. nachher (□) sowie Empfehlung der ITU-R BS 1116-1994 (grau) [9, Abschn. 14.5.4].
VPR modules (preferably $1 \times 1,5 \times 0,1$ m in size) with open frames on the ceiling and walls in a professional mastering room at Bauer Studios in Ludwigsburg; reverberation time before (○) and after (□) and recommendation of ITU-R BS 1116-1994 (grey) [9, section 14.5.4].

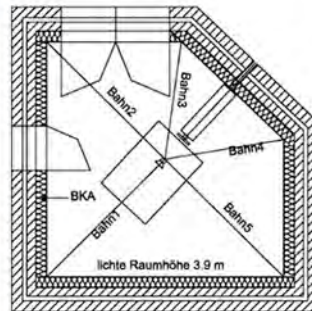
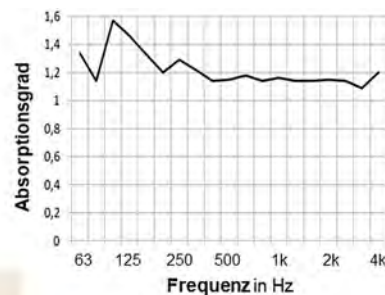
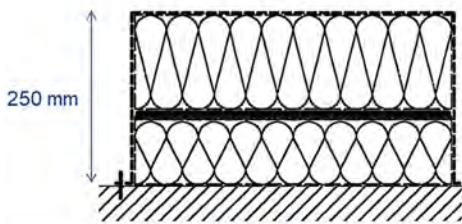


Bild 4 BKA-Module in für die jeweiligen Prüfstände ganz individuell angepassten Materialien und Formaten ermöglichen Reflexionsfreiheit nach Norm auch noch unter 63 Hz [9, Abschn. 16.7]
BKA modules in materials and formats individually adapted to the respective testing facility enable anechoic conditions according to standards, even below 63 Hz [9, section 16.7]

chen oder Kanten von Absorbern auftreten. Aber nur dank der auch im BKA reagierenden Resonanzen konnten hunderte „schalltote“ Messräume (im Bild 4 z.B. ein erster Motor-Prüfstand 1997 bei BMW in München), vor allem auch Akustik-Windkanäle für die Autoindustrie, im großen Maßstab realisiert werden.

3 Breitband-Absorber in den Raumkanten

Für Unterrichtsräume jeder Art kommen die VPR oder BKA aus architektonischer, kommerzieller und prakti-

scher Sicht in der benötigten Masse meist nicht in Betracht. Hier haben sich seit 2011 stattdessen neuartige Kanten-Absorber (KA) in Trockenbauweise bewährt [13]. Bild 5 zeigt zunächst einen theoretisch sinnvoll erscheinenden Absorptionsgrad nur wenig um den Wert 1 schwankend einer 400 mm dicken Mineralwollschicht ohne integrierten Resonator, wenn diese, schallhart umrandet, auf einer Fläche $S_A = 12 \text{ m}^2$ auf dem Boden eines Hallraums ausgebreitet liegt (a). Wird dasselbe Absorptionsmaterial dagegen 500 mm breit längs einer unteren Kante desselben Raums angeordnet (b), so steigt sein Absorptionsgrad unterhalb 250 Hz erstaunlich weit über 1

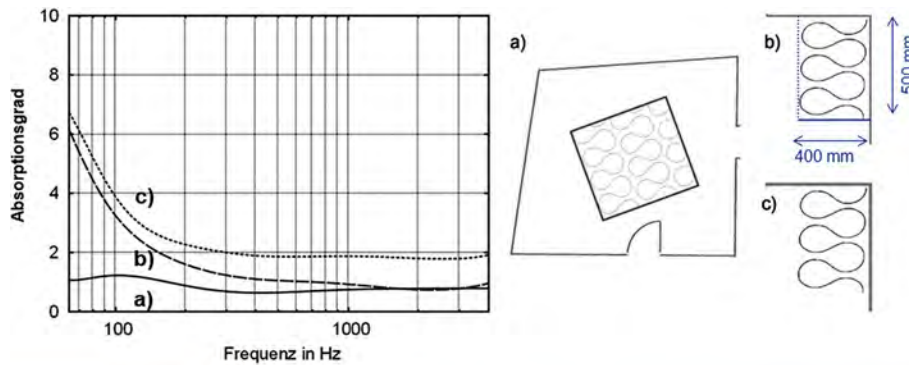


Bild 5 Absorptionsgrad eines 400 mm dicken homogenen faserigen Absorbers, gemessen im Hallraum; a) $S_A = 3 \text{ m} \times 4 \text{ m} = 12 \text{ m}^2$ auf dem Boden im GK-Rahmen, b) $0,5 \text{ m} \times 6,5 \text{ m} = 3,2 \text{ m}^2$ in einer unteren Kante mit GK-Platten an seiner schmalen und GK-Lochplatten an seiner breiten Seite, c) dieselben $3,2 \text{ m}^2$ ganz ohne Abdeckungen.

Absorption coefficient of a 400 mm thick homogeneous fibrous absorber, measured in a reverberation chamber; (a) $S_A = 3 \text{ m} \times 4 \text{ m} = 12 \text{ m}^2$ on the floor in a drywall frame, (b) $0,5 \text{ m} \times 6,5 \text{ m} = 3,2 \text{ m}^2$ in a lower edge with drywall panels on its narrow side and drywall perforated panels on its wide side, (c) the same $3,2 \text{ m}^2$ entirely without coverings.

an (b). Und wenn man auch seine schmalere Seitenfläche den Schallwellen aus dem Raum zugänglich macht, erhöht sich die Wirksamkeit desselben Materials im gesamten Hörbereich nochmals erheblich (c).

In mehreren Berliner Bezirken wurden Musterräume mit KA ausgestattet, etwa wie in Bild 5 für einen Musik-Unterrichtsraum der Carlo-Schmid-Oberschule in Spandau [13, Abschn. 3.1]. So setzen die in lang gestreckten Gipskarton (GK)-Koffern waagrecht unter der Decke und senkrecht in Raumkanten komplett vor Ort zu installierenden KA sich mittlerweile auch außerhalb Berlins in Kitas, Klassenzimmern, Büro- und Seminarräumen langsam durch. Man hat auch schon vielfach Räume mit unzureichenden Akustikdecken dadurch aufgewertet, dass man in deren Hohlraum entlang der Raumkanten hinter Lochplatten zusätzlich eine dickere Absorberschicht eingebaut hat [13, Abschn. 3.3 und 3.5]. Inzwischen sind Standard-Deckensysteme auf dem Markt, die auf dieses Konzept „versteckter“ KA aufbauen [14].

4 Breitband-Absorber in Modulbauweise

Die VPR- und BKA-Module können dank ihrer vielfach integrierten Plattenresonanzen die vielfältigen Raum-Moden interaktiv breitbandig dämpfen. Sie werden, komplett im Werk vorgefertigt, immer schon besonders vorteilhaft nahe den Raumkanten installiert. Sie belegen dort aber mit $1\text{--}2 \text{ m}^2$ pro Modul kostbare Wand- oder

Deckenflächen und sind für viele Anwendungen zu sperrig und teuer. Dem gleichen Ziel dienende KA-Koffer sind zwar preiswerter und belegen viel kleinere Flächen. Sie müssen aber mit ihrer massiven Mineralwollfüllung handwerklich an die Decke und Wände vor Ort angepasst werden. In den diversen Unterrichtsräumen bieten sich die Ferien zur Durchführung der recht aufwendigen Vorbereitung und Ausführung der Bauarbeiten an. In Bürolandschaften, Dienstleistungszentren, Werkstätten, Küchen und Restaurants muss eine vielerorts ebenso dringend gebotene raumakustische Nachrüstung dagegen am besten bei laufender Geschäftstätigkeit erfolgen. Hier gibt es Bedarf, Herausforderungen und Chancen für eine neuerliche Innovation nicht nur für Kommunikationsräume. Die Breitband-Absorber-Traps (BAT) verknüpfen alle reaktiven und passiven akustischen Mechanismen der vorgenannten Entwicklungen in einer vorteilhaften Kombination:

- Vom Raum direkt auftreffende Luftschallwellen regen zahlreiche gekoppelte Schwingungen in den Glattblechen an.
- Von Decke und Wänden reflektierte und um die Glattbleche gebeugte Schallwellen regen stehende Wellen innerhalb des Hohlkörpers dreidimensional an.
- Allseitig eng und abriebfest umschlossenes faseriges oder poröses Material sorgt für eine besonders breitbandige Absorption aller Resonanzen im gesamten relevanten Frequenzbereich (63 bis 4000 Hz).

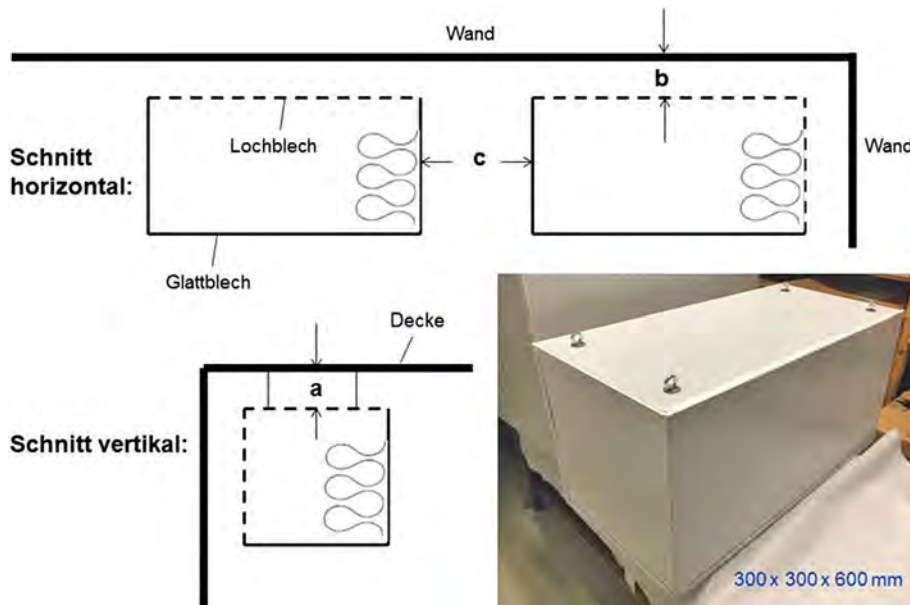


Bild 6 Mit geschlossenen bzw. perforierten Blechen umhüllte BAT mit Abständen a unter der Decke, b vor Wänden und c nebeneinander
Enclosed BAT with smooth or perforated sheets with spaces a under the ceiling, b in front of walls, and c next to each other

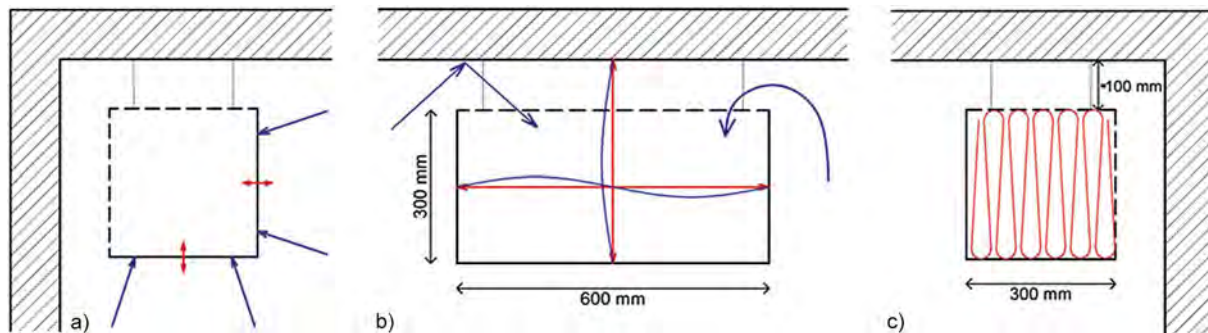


Bild 7 Die drei akustischen Mechanismen, die gemeinsam im BAT mit dem Schallfeld des Raumes interagieren: a) Plattenresonanzen in den Glattblechen des Moduls, b) stehende Wellen im Hohlkörper, c) Absorption in der faserigen Füllung der Module
The three acoustic mechanisms in the BAT that jointly interact with the sound field of the room: a) Plate resonances in steel encasement of module, b) standing waves in cavity, c) absorption of fibrous filling in module

Die Bilder 6 und 7 veranschaulichen, wie das kompakte Modul dem Raum jeweils nur geschlossene Flächen zuwendet und Luftschall direkt nur durch Lochbleche eindringen kann, die der Decke oder Wand zugewandt sind. Messungen im Hallraum haben die Wirksamkeit des neuen Konzepts bestätigt, ebenso wie erste raumakustische Sanierungen mit den komplett vorzufertigenden BAT [15].

4.1 BAT-Module auf schallhartem Boden

Eine theoretische Behandlung insbesondere der nach Bild 7a) eigenartig zusammenhängend angeregten Plattenresonanzen gestaltet sich schwierig. Deswegen wurde zunächst ein Satz von 12 unterschiedlich perforierten Prüflingen in ganz verschiedener Anordnung auf dem Boden des normgerecht nach [12, Kap. 7] bedämpften 200 m³ großen Hallraums der TU Berlin gemäß ISO 354 untersucht. Dazu wurden die Module unmittelbar nebeneinander flächig ausgebreitet und zwar zum einen so, dass ihre großen perforierten Flächen auf dem Boden,

also für den Schall unzugänglich lagen und zum anderen so, dass diese dem Raum zugekehrt waren, wobei die geschlossenen Seiten eine Art Rahmen für die mit $S_A \approx 2,2 \text{ m}^2$ belegte Fläche bildeten (Bild 8). In beiden Fällen wird unter 250 Hz eine breitbandige resonanzartige Überhöhung der äquivalenten Absorptionsfläche

$$A_{\text{eq}} = 0,16V \left(\frac{1}{T_m} - \frac{1}{T_0} \right) \quad (4)$$

aus den gemessenen Nachhallspektren mit (T_m) bzw. ohne (T_0) die Prüflinge deutlich.

Im zweiten Fall wird, wie nicht anders zu erwarten, die Absorption insbesondere im oberen Frequenzbereich erheblich verstärkt auf $A_{\text{eq}} \approx 3 \text{ m}^2$. Wenn man dieselben Module mit einem beidseitigen Abstand zwischen 100 und 400 mm verlegt (Bild 9), kann A_{eq} oberhalb 250 Hz bis zum doppelten Wert ansteigen und so eine fast konstante Absorptionscharakteristik ab 63 Hz von breitbandig gut 0,5 m² pro Modul erreichen. An diesem Ergebnis ändert sich nicht viel, wenn man alle Module 200 mm

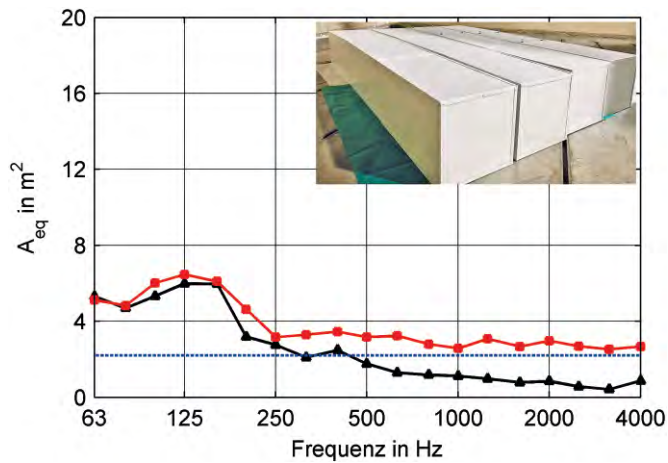


Bild 8 Äquivalente Absorptionsfläche (A_{eq}) von 12 eng nebeneinander auf dem Hallraumboden ausgelegten Prüflingen; perforierte Flächen auf dem Boden ($\blacktriangle$), perforierte Flächen zum Raum, s. Foto ($\blacksquare$), belegte Bodenfläche 2,2 m² (strichliert)
Equivalent absorption area (A_{eq}) of 12 test specimens laid out close together on the floor of the reverberation chamber; perforated surfaces on the floor ($\blacktriangle$), perforated surfaces facing the room, see photo ($\blacksquare$), covered surface 2.2 m² (dashed line)

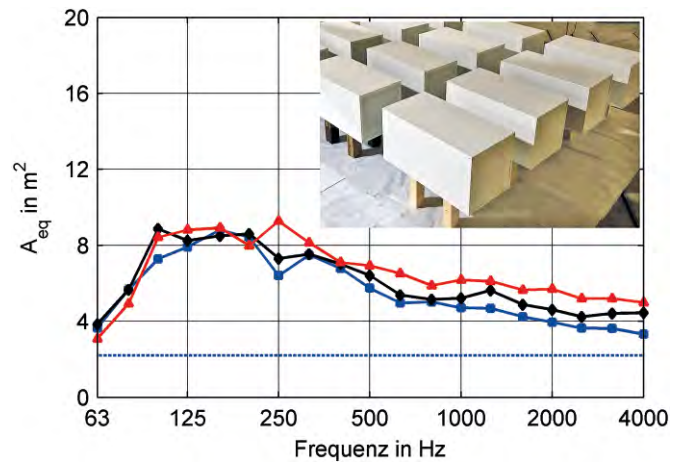


Bild 10 Anordnung wie in Bild 8, perforierte Flächen zum Raum, Abstände $a = 200$ mm vom Boden; Abstände zwischen den Prüflingen: $c = 100$ ($\blacksquare$), 200, s. Foto ($\blacklozenge$), 400 mm ($\blacktriangle$), projiziert auf die Bodenfläche von 2,2 m² (strichliert).
Arrangement as in Figure 8, perforated surfaces to the room, distances $a = 200$ mm from the floor; distances between the test specimens: $c = 100$ ($\blacksquare$), 200, see photo ($\blacklozenge$), 400 mm ($\blacktriangle$), projected surface 2.2 m² (dashed line)

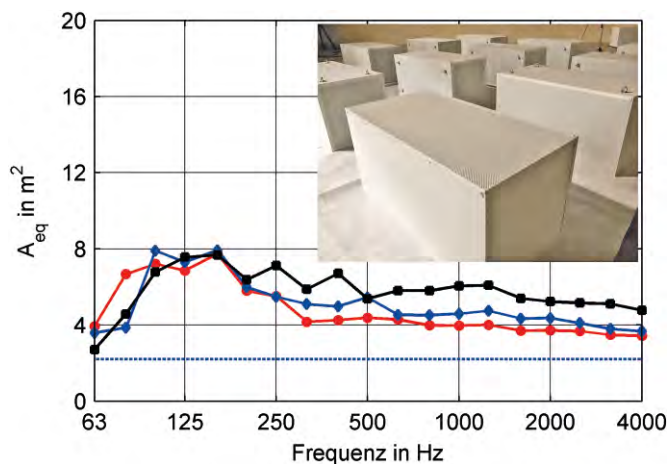


Bild 9 Anordnung wie in Bild 8, perforierte Flächen zum Raum; Abstände zwischen den Prüflingen $c = 100$ ($\bullet$), 200 ($\blacklozenge$), 400 mm, s. Foto ($\blacksquare$), belegte Bodenfläche 2,2 m² (strichliert)
Arrangement as in Figure 8, perforated surfaces to the room; distances between the test specimens $c = 100$ ($\bullet$), 200 ($\blacklozenge$), 400 mm, see photo ($\blacksquare$), covered surface 2.2 m² (dashed line)

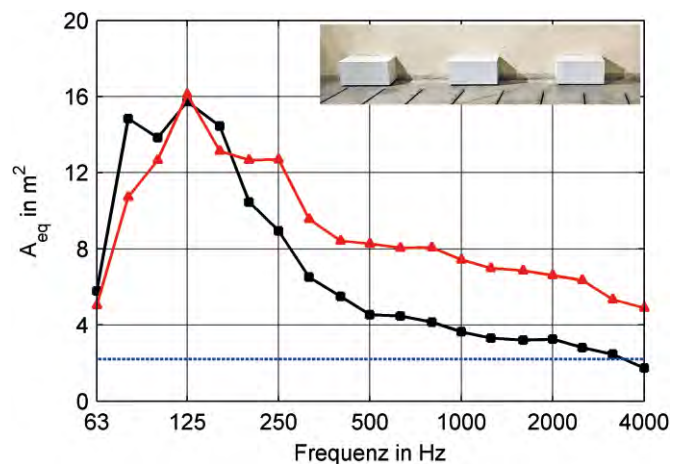


Bild 11 A_{eq} von 12 BAT-Prüflingen entlang der 4 unteren Kanten des Hallraums; perforierte Flächen auf dem Boden und zur Wand, s. Foto ($\blacksquare$), perforierte Flächen zum Raum ($\blacktriangle$), belegte Bodenfläche 2,2 m² (strichliert)
 A_{eq} of 12 BAT test samples along the 4 lower edges of the reverberation chamber; perforated surfaces on the floor and to the walls, see photo ($\blacksquare$), perforated surfaces to the room ($\blacktriangle$), projected surface 2.2 m² (dashed line)

hoch aufständert (Bild 10), was etwa ihrer (hier ausdrücklich nicht empfohlenen) Abhängung wie Baffles von einer Decke entspräche.

4.2 BAT-Module vor schallharten Kanten

Bei einer Anordnung der BAT-Module unmittelbar vor schallharten Kanten (Bild 11) steigt die Absorption im gesamten relevanten Spektrum auf bis zu 1,2 m² pro Modul. Wenn die überwiegend geschlossenen Flächen der in den Kanten platzierten Module zum Raum weisen, treten die zur Bedämpfung der Raum-Moden besonders wichtigen Resonanz-Effekte deutlicher in Erscheinung. Aber auch wenn stattdessen die perforierten Flächen dem

Raum zugekehrt werden, bleiben diese erhalten, wobei sich oberhalb von 250 Hz die Absorption verdoppelt, ähnlich wie es in Bild 8 zu sehen ist.

Durch eine Aufstellung der Module in einem Abstand 200 mm vom Boden wird eine bevorzugte BAT-Installation in nicht zu großen Abständen a von der Decke simuliert (Bild 12). Erst für größere Abstände b von der Wand erhöht sich die Absorption bei den höheren, aber etwas auf Kosten der tiefen Frequenzen. In dieser Messreihe wurde zwar der Einfluss des Abstands c der Prüflinge voneinander nicht bestimmt. Aber aus den Bildern 9 und 10 kann man schließen, dass deren Absorption bei höheren Frequenzen etwas geringer zu erwarten ist, wenn die einzelnen Elemente parallel zu einer Raumkante enger

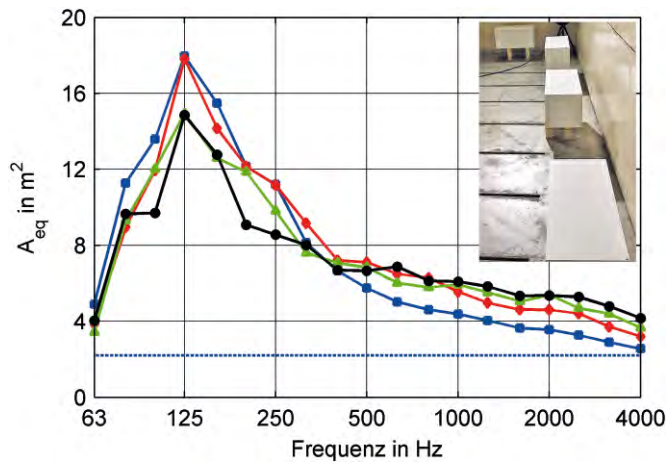


Bild 12 A_{eq} von 12 BAT-Prüflingen entlang der unteren Kanten des Hallraums (Perforationen zu Wand und Boden), Abstände voneinander ähnlich wie in Bild 11, Abstand $a = 200$ mm vom Boden; Abstände von der Wand: $b = 0$ (■), 100 (◆), 200, s. Foto (▲), 400 mm (●), projiziert auf Bodenfläche $2,2 \text{ m}^2$ (strichliert)
 A_{eq} of 12 BAT test samples along the lower edges of the reverberation chamber (perforations to the wall and floor), distances from each other similar to figure 11, distance $a = 200$ mm from the floor; distances from the wall: $b = 0$ (■), 100 (◆), 200, see photo (▲), 400 mm (●), projected surface $2,2 \text{ m}^2$ (dashed line)

zusammen installiert werden, wie es in den Beispielen von Abschn. 5 geschehen ist.

4.3 Die akustische Wirksamkeit der BAT-Module im Vergleich

Dass stark absorbierende Prüflinge, auch wenn sie normgerecht gemäß ISO 354 mit einem schallundurchlässigen Rahmen versehen auf 12 m^2 eng nebeneinander auf dem Boden eines Hallraums ausgelegt werden, einen Absorptionsgrad von über 1 ergeben können, wurde bereits in Bild 4 am Beispiel des BKA dargestellt. Auch ist bekannt, dass deren Absorption tendenziell steigt, wenn man Elemente eines beliebigen Schallabsorbers in einer Fläche oder Kante mit Abstand zueinander verlegt und die resultierende Absorptionsfläche A_{eq} nach Gl. (4) auf deren Oberfläche S_A bezieht:

$$\alpha = \frac{A_{eq}}{S_A} \quad (5)$$

Aber schon der starke Anstieg der Wirksamkeit der passiven Schallabsorber zu den tiefen Frequenzen gemäß Bild 5 macht deutlich, dass ihre Anordnung in Raumkanten zu einer viel intensiver dämpfenden Wechselwirkung insbesondere mit den axialen Raum-Moden führen kann, weil deren Schallenergie sich stets gerade dort konzentriert. Dieser Kanten-Effekt setzt aber immer voraus, dass im Absorber selbst überhaupt das Potenzial zur Dämpfung der tiefen Frequenzen vorhanden ist. So wird natürlich auch bei den BAT-Modulen dieser Effekt in Bild 13 sehr deutlich. Wollte man, etwa wie für die Ergebnisse in Bild 5, deren Absorptionsgrad nur auf deren projizierte Oberfläche von $0,6 \text{ m} \times 0,3 \text{ m} = 0,18 \text{ m}^2$ beziehen, so käme man bei 1000 Hz schon auf einen Wert von 2,8 und bei 125 Hz

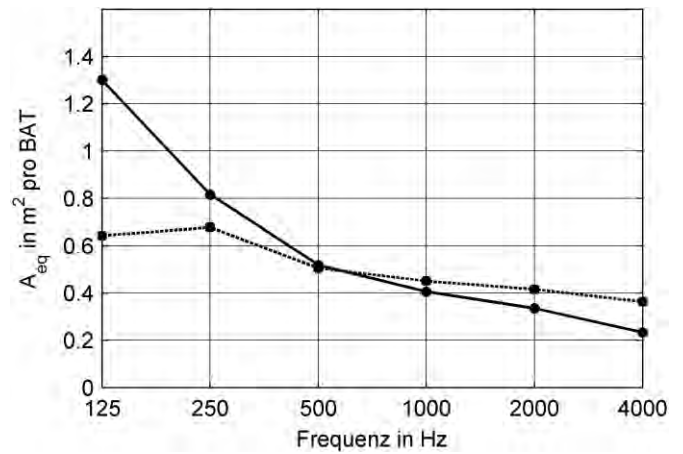


Bild 13 A_{eq} pro Prüfling bei Anordnung in der Fläche (▲) gemäß Bild 10 (▲) bzw. in den Kanten (●) gemäß Bild 13 (◆)
 A_{eq} per test specimen when arranged as surface (■) according to Figure 10 (▲) or in edges (●) according to Figure 13 (◆)

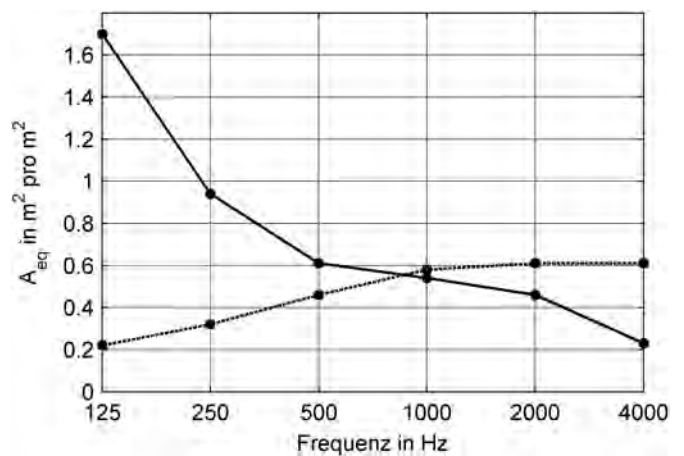


Bild 14 A_{eq} bezogen auf die gesamte Oberfläche von BAT-Modulen im Vergleich zu konventionellen, 50 mm dicken Absorber-Baffles
 A_{eq} related to the total surface area of BAT modules compared to conventional 50 mm thick absorber baffles

auf 3,9 auf dem Boden und 7,2 in den Kanten. Auch wenn sich die Ergebnisse aus dem Hallraum nicht einfach auf einen anderen Raum übertragen lassen und Nachhallergebnisse gerade bei tiefen Frequenzen immer stark von Messort zu Messort variieren (s. Bild 19), hat man keinen besseren Parameter als die hier im Vordergrund diskutierte Absorptionsfläche nach Gl. (4), um die Nachhallzeit in einem Raum wenigstens näherungsweise abzuschätzen.

In Bild 14 ist die im Hallraum erreichbare A_{eq} der BAT gemäß Bild 12 (◆) mit derjenigen von handelsüblichen Absorber-Baffles mit einer Dicke von 50 mm im Abstand von 0,5 bis 1 m parallel zueinander, etwa wie es in DIN 18041-2016, Bild 4 c) empfohlen wird, verglichen, wenn man A_{eq} jeweils auf die gesamten beschallten Oberflächen aller Elemente bezieht.

5 BAT-Module in Muster-Installationen

Um die Ergebnisse aus dem Hallraum in realen Räumen zu bestätigen, wurden als Muster-Installationen ein klei-

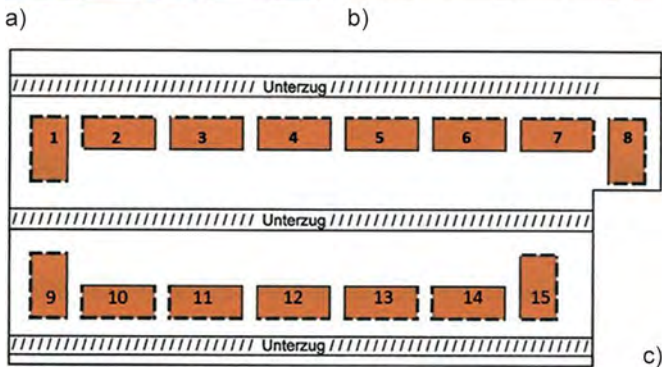


Bild 15 Installation von 15 BAT nahe den Beton-Unterzügen in einem Besprechungsraum; a) vorher, b) nachher, c) Deckenspiegel
Installation of 15 BAT near concrete beams in a meeting room; a) before, b) after, c) ceiling plan

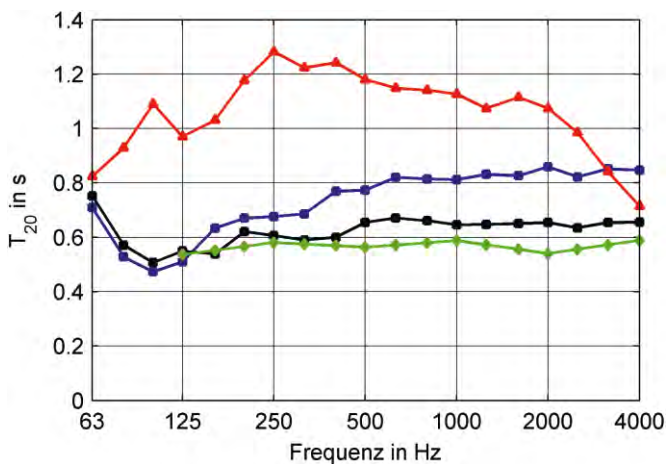


Bild 16 Nachhallzeiten im Testraum gemäß Bild 15; gemessen unmöbliert vorher (▲), nachher (■), gemessen möbliert (●), geschätzt mit zusätzlich 5 Personen (◆)
Reverberation times in the test room according to Figure 15; measured unfurnished before (▲), after (■), measured furnished (●), estimated with an additional 5 persons (◆)

ner Besprechungsraum und ein mittelgroßer Unterrichtsraum mit BAT-Modulen akustisch behandelt.

Für die erste Bemusterung mit den neuartigen BAT wurden deren geschlossene glatte Sichtflächen speziell auf diesen kleinen Besprechungsraum ausgelegt, s. Bild 15, das sogleich deutlich macht, dass hier die als optimal ermittelte Anordnung möglichst nahe den oberen Raumkanten wegen der drei ca. 50 cm tiefen Betonunterzüge



Bild 17 Installation von 21 BAT in einem Klassenzimmer der Grundschule „Max Dortu“ in Potsdam
Installation of 21 BAT in a classroom of the “Max Dortu” Primary School in Potsdam

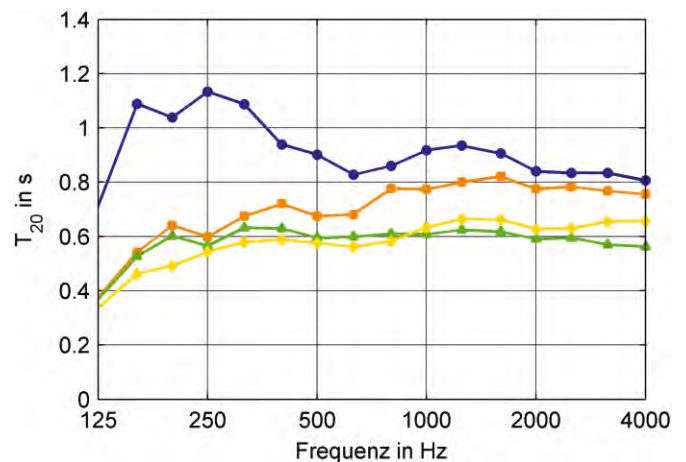


Bild 18 Nachhallzeit im Raum von Bild 17; möbliert vorher (●) und nachher (■) sowie mit 20 (▲) Kindern und Prognose aus Hallraum-Tests (◆) (ohne Kinder)
Reverberation time in the room of picture 17; furnished before (●) and after (■) and with 20 children (▲) and prognosis from reverberation room tests (◆) (without children)

nicht möglich war. Auch an die anderen haustechnischen Abhängungen von der Decke mussten und konnten die neuartigen Schallabsorber ohne weiteres angepasst werden. Deswegen kann es nicht verwundern, dass die Absenkung der Nachhallzeit gemäß Bild 16 zwar breitbandig überzeugend ausfällt, aber doch nicht ganz den Erwartungen aus Bild 12 (▲) entspricht. Für die Messungen vorher/nachher war der Raum fast leer. Mit einigen Möbeln fällt erwartungsgemäß die Nachhallzeit oberhalb 250 Hz weiter ab. Wenn man weiterhin die Absorption von etwa 5 Personen in Sitzposition nach DIN 18041, Tab. G.2 dazu abschätzt, wird ein fast konstanter Wert unter 0,6 s erreicht, was für den 72 m³ großen Raum

unter den Vorgaben als akzeptabler Wert erscheint. Interessanterweise hatte sich in Vorversuchen mit nur 6 der Prototypen, die aber alle versuchsweise tatsächlich nahe den unteren Raumkanten aufgeständert wurden, ein ähnliches Nachhallspektrum angedeutet.

Eines der größten Anwendungsfelder für BAT-Module liegt sicherlich in Schulbauten aller Bestimmungen. Hier haben sich schon die Kanten-Absorber nach Abschn. 3 in verschiedenen Varianten vielfach bewährt [13]. So wurde nun zunächst ein $6,9 \times 5,1 \times 3,5$ m großes Klassen-zimmer in der denkmalgeschützten Grundschule „Max Dortu“ in Potsdam gemäß Bild 17 mit 21 vierseitig geschlossenen BAT im Abstand $a \approx b \approx 100$ mm ausgestattet; bei einer projizierten Gesamtfläche von $3,8 \text{ m}^2$ also auf nur ca. 3 % der Deckenfläche. Die Nachhallzeit (Bild 18) konnte dadurch im besonders wichtigen Bereich zwischen 125 und 250 Hz im möblierten unbesetzten Raum etwa halbiert werden. Die Prognose auf Basis der Hallraum-Ergebnisse von Abschnitt 4 wird zwar erwartungsgemäß, insbesondere bei mittleren und hohen Frequenzen, nicht ganz erreicht. Aber mit 20 Kindern wird der Sollwert nach Norm ($T_{\text{soll}} = 0,5 \text{ s}$) gemäß Tabelle A.1, Zeile 6 in DIN 18041-2016 nur um die tolerablen 20 % überschritten. Der Abfall zu den Tiefen ist nach [1] hinsichtlich der Sprachverständlichkeit natürlich generell positiv zu beurteilen.

6 Rückbesinnung und Ausblick

Für Sprache und Musik kultivieren Stimmen und Instrumente vielfältige Resonanzsysteme in Körpern, Saiten und Hohlräumen. Diese treten in auch nur teilweise geschlossenen kleineren Räumen bei tiefen Frequenzen in eine problematische Wechselwirkung mit deren Eigenresonanzen, die so gar nicht mit unserem Tonsystem harmonieren. Schon Vitruvius spricht in Buch V seiner *Architectura* über Schallschalen und -gefäße nach der Art von Platten- und Helmholtz-Resonatoren, die unter den vorderen Stufen eines Amphitheaters angebracht wurden [9, Abb. 6.14]. Nach [16, S. 28] meinte er, dass damit die Stimmen der Darsteller durch „Konsonanz“ unterstützt worden seien. W. Reichardt [17, S. 10] wusste es schon 1979 besser: „Sie verstärken nicht etwa die Töne, auf die sie abgestimmt sind, sondern schwächen sie sogar! Sie entziehen dem Schallfeld Energie, die dann in der Eigenschwingung des Resonators vernichtet wird“, denn auf S. 121 desselben Buchs schreibt der Experte: „Für alle Räume, in denen es auf Sprachverständlichkeit ankommt, steht die Tiefenschluckung an erster Stelle. Denn tiefe Töne verdecken die höheren weitaus mehr als umgekehrt.“

Alle hier angesprochenen Breitband-Schallabsorber können jede Sprache und Kommunikation in kleineren Räumen hörbarer machen und Lärm in lauten Arbeitsbereichen reduzieren. Aus den Erfahrungen mit vielfältigen Varianten der VPR, BKA und KA [8] kann man die Absorptionscharakteristik auch der neuartigen BAT leicht

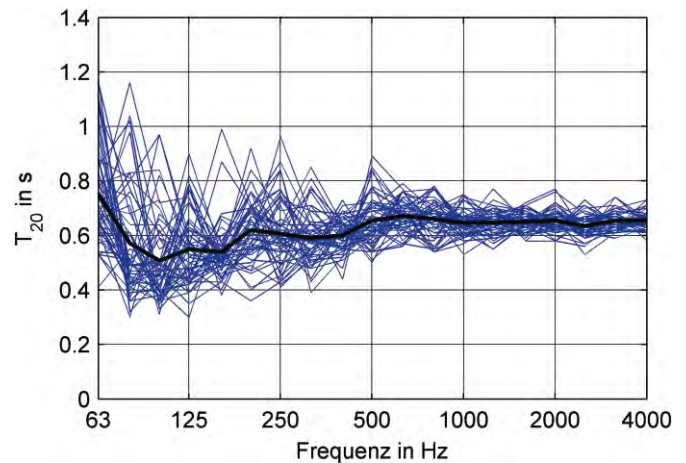


Bild 19 Charakteristische Streuungen bei der Mittelung der Messergebnisse von Bild 16 (■)
Characteristic variance when averaging the measurement results of Figure 16 (■)

durch Wahl der Materialien, Abmessungen und Blechstärken dem jeweiligen Bedarf anpassen.

Dabei bleibt stets das Problem, dass weder ein Hall- noch ein beliebiger anderer Raum bei tiefen Frequenzen $f < f_S$ ein diffuses Schallfeld ausbilden, das für eine Prognose nach Sabine eigentlich vorausgesetzt wird. So wird eine Messung der Nachhallzeit an verschiedenen Messpunkten bei tiefen Frequenzen aufgrund der modalen Inhomogenität stets eine große Streuung der Messwerte aufweisen, wie dies etwa an 55 Messpositionen im ersten Testeinatz (Bild 15) auftrat. Der Mittelwert dieser Kurven (Bild 19, fettgedruckte Linie) entspricht dennoch weitgehend der Prognose, die sich anhand der normgerecht gemessenen Absorption im Hallraum stellen lässt.

Der rundum metallische Korpus der BAT qualifiziert diese auch für erhöhte hygienische Anforderungen z. B. des Nahrungsmittel- und Gastgewerbes, was deren regel-

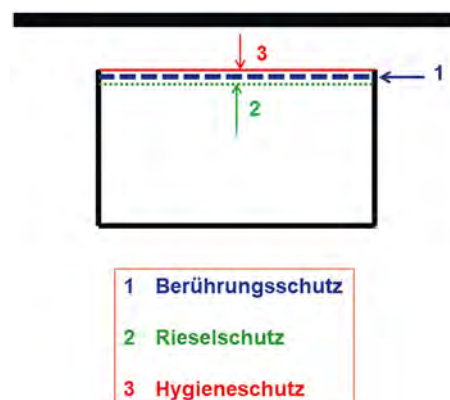


Bild 20 Neben dem Sichtschutz durch vier Glatbleche dienen zwei Lochbleche (1) mit ca. 20 % Lochanteil dem Berührungsschutz, Faservlies (2) dem Rieselschutz und (bei Bedarf) z. B. Edelstahlfolie (3) als zusätzlicher Hygieneschutz im BAT

In addition to the visual cover provided by 4 smooth plates, 2 perforated plates (1) with approx. 20 % perforation serve as contact protection, fibre fleece (2) as trickle protection and (if required) e.g. stainless steel foil (3) as additional hygiene protection in the BAT

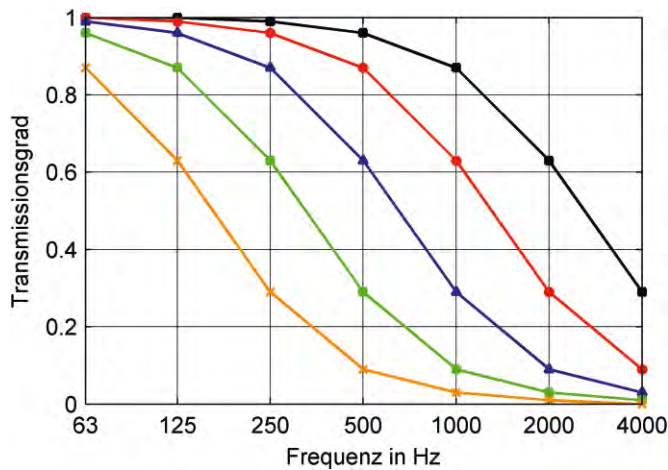


Bild 21 Transmissionsgrad τ nach Gl. (6) für Abdeckungen der Lochbleche im BAT; $m'' = 0,05$ (■), $0,10$ (●), $0,20$ (▲), $0,40$ (■), $0,80$ (x) kg/m^2
Transmission coefficient τ according to equation (6) for covers of the perforated plates in the BAT; $m'' = 0.05$ (■), 0.10 (●), 0.20 (▲), 0.40 (■), 0.80 (x) kg/m^2

mäßige und gründliche Reinigung angeht. Neben dem Sichtschutz durch die dem Raum zugewandten Glatblechseiten sorgt das auf die dem Berührungsschutz dienenden Lochbleche rückseitig aufkaschierte Faservlies für einen sicheren Rieselschutz hinsichtlich des in Bild 20 nicht eingezeichneten Absorptionsmaterials. Für den ge-

rade besonders aktuellen intensivmedizinischen und Operationsbereich lassen sich auch alle perforierten Flächen als Kontaminationsschutz, wenn nötig, noch zusätzlich z.B. durch eine 0,05 mm dicke Edelstahlfolie luftdicht im Sinne des klinischen Risiko-Managements nach [18] versiegeln, ohne dadurch die akustische Wirksamkeit der BAT zu zerstören zu machen. Deren Schall-Transmissionsgrad τ lässt sich nach Cremer [19, S. 24] unter normalen Bedingungen mit

$$\tau \approx \frac{1}{1 + 60(fm'')^2} \quad (6)$$

für f in kHz und m'' in kg/m^2 abschätzen und aus Bild 21 für eine flächenbezogene Masse m'' von ca. $0,4 \text{ kg/m}^2$ im Vergleich zu einer 0,1 mm dicken PE-Folie mit ca. $0,1 \text{ kg/m}^2$ ablesen.

Auf diese Weise vergrößert sich noch einmal der Anwendungsbereich für ein Absorber-Konzept, das insbesondere bei tiefen Frequenzen, bezogen auf seine Baugröße, bemerkenswert effizient ist und mit dem auch Räume mit besonderen Anforderungen an die Sprachkommunikation aufgrund seiner modularen Bauweise und niedriger Herstellungskosten unkompliziert und schnell nachgerüstet werden können.

Literatur

- [1] Fasold, W.; Sonntag, W.; Winkler, H. (1987) *Bau und Raumakustik*. Berlin: Verlag Bauwesen.
- [2] Levitt, H.; Webster, J. C. (1991) *Effects of noise and reverberation on speech* in: Harris, C. M. [Hrsg.] *Handbook of acoustical measurements and noise control*. New York: McGraw-Hill.
- [3] Fuchs, H. V. (2020) *Die Neufassung der DIN 18041 und ihre Auswirkung auf Sprachverstehen und Schallbelastung in Kommunikationsräumen* in: Fouad, N. A. [Hrsg.] *Bauphysik-Kalender 2020*, S. 725–753.
- [4] Bottalico, P.; Passione, I. I.; Graetzer, S.; Hunter, E. J. (2017) *Evaluation of the starting point of the Lombard effect* in: *Acta Acust united Ac* 103, pp. 169–172.
- [5] Davis, D.; Davis, C. (1991) *Designing for speech intelligibility* in: Ballou G. M. [Hrsg.] *Handbook for Sound Engineers*. Carmel: SAMS.
- [6] Schröder, M. R. (1996) *The 'Schröder frequency' revisited* in: *J. Acoust. Soc. Am.* 99, pp. 3240–41.
- [7] Fazenda, B.; Wankling, M. (2008) *Optimal modal spacing and density for critical listening* in: 125th AES Convention, San Francisco, Paper 7584.
- [8] Fuchs, H. V. (2020) *Schall absorbierende Bauteile – Eine aktuelle Übersicht* in: Fouad, N. A. [Hrsg.] *Bauphysik-Kalender 2020*, S. 539–591.
- [9] Fuchs, H. V. (2017) *Raum-Akustik und Lärm-Minderung*. Berlin: Springer.
- [10] Fuchs, H. V.; Möser, M. (2004) *Schallabsorber* in: Müller, G.; Möser, M. [Hrsg.] *Taschenbuch der Technischen Akustik*. Berlin: Springer, S. 247–304.
- [11] Beranek, L. L. (1962) *Music, acoustics, and architecture*. New York: Wiley & Sons.
- [12] Fuchs, H. V.; Zha, X. (2020) *Akustische Messräume für einen erweiterten Frequenzbereich* in: Fouad, N. A. [Hrsg.] *Bauphysik-Kalender 2020*, S. 461–497.
- [13] Fuchs, H. V.; Zha, X. (2020) *Schall lenkende und dämpfende Maßnahmen in kleineren Räumlichkeiten* in: Fouad, N. A. [Hrsg.] *Bauphysik-Kalender 2020*, S. 471–499.
- [14] Fuchs, H. V.; Becker, B. (2017) *Im Hohlraum die Tiefen schlucken* in: *Trockenbau Akustik* 34, H. 8, S. 34–39.
- [15] Fuchs, H. V.; Alexander, B.; Weinzierl, S. (2020): *Flexibel installierbare Breitband-Schallabsorber für Kommunikationsräume* in: *Fortschritte der Akustik – 46. Jahrestagung für Akustik*, Hannover, S. 886–889.
- [16] Pappalardo, U. (2007) *Antike Theater*. Petersberg: Michael Imhof.
- [17] Reichardt, W. (1979) *Gute Akustik – aber wie?* Berlin: Verlag Technik.
- [18] Siegmann, S.; Notbohm, G. (2015) *Neuer Blick auf Lärm als Risikofaktor im Krankenhaus* in: *Fortschritte der Akustik – 41. Jahrestagung für Akustik*, Nürnberg, S. 738–741.
- [19] Cremer, L.; Müller, H. A. (1976) *Die wissenschaftlichen Grundlagen der Raumakustik*, Bd. 2. Stuttgart: Hirzel Verlag.

Autoren

Prof. Dr.-Ing. Helmut V. Fuchs (Korrespondenzautor)
hvfuchs@hotmail.com
Gemeinnützige Stiftung Casa Acustica
Kirchblick 5
14129 Berlin-Schlachtensee

Bradley Alexander
balexander4@gmail.com
Technische Universität Berlin
Fachgebiet Audiokommunikation
Schr. EN-8
Einsteinufer 17c
10587 Berlin

Prof. Dr. Stefan Weinzierl
stefan.weinzierl@tu-berlin.de
Technische Universität Berlin
Fachgebiet Audiokommunikation
Schr. EN-8
Einsteinufer 17c
10587 Berlin